

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**Зигар Андрій Володимирович**

УДК 911.9:502:550.3

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ВПЛИВ ПРИРОДНО - ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ  
ГАЕС НА ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У СЕРЕДОВИЩІ ЇЇ  
ФУНКЦІОНУВАННЯ**

106 – Географія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 –  
Природничі науки

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне  
джерело \_\_\_\_\_ А.В.Зигар

Науковий керівник – **Ющенко Юрій Сергійович**,  
доктор географічних наук, професор

**Чернівці - 2024**

## АНОТАЦІЯ

Андрій ЗИГАР. **Вплив природно - технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 106 – Географія. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Міністерство освіти і науки України, Чернівці, 2024.

Дослідження за темою дисертації виконувалось протягом 2020–2024 рр. згідно з планами науково-дослідних робіт кафедри географії України географічного факультету Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

У дисертації здійснено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення науково-практичного завдання, спрямованого на всебічне дослідження локальної природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС, яка є складним творінням, що інтегрує природні компоненти річкових басейнів та антропогенні ландшафти, в рамках галузі конструктивної географії.

Особливу увагу приділено процесам трансформації, які виникають внаслідок взаємодії природних й техногенних чинників. Дослідження охоплює детальний аналіз змін у басейні річки Дністер, оцінює геоекологічний вплив від антропогенної діяльності на ландшафти та екосистеми, а також зміни геологічного середовища, гідрогеологічного режиму у масиві гірських порід.

Дослідження ґрунтується на даних, отриманих з експериментальних результатів польових та камеральних досліджень, які відображають реальні умови та обставини, в яких проводилися експерименти.

Польові дослідження включали комплексні геодезичні виміри зі застосуванням глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), а також застосування класичних методів геометричного та тригонометричного нівелювання геодезичної мережі встановленої в зоні експлуатації гідротехнічної споруди.

Додатково проводились заміри рівнів води в межах зрегульованого русла басейнової річкової системи Дністра та в межах штучної ландшафтної-технічної системи верхньої водойми Дністровської ГАЕС. Одночасно здійснювались заміри динамічних рівнів води у гідрологічних свердловинах. Проводились регулярні спостереження за річковим стоком в межах водосховища.

Ці дані є ключовими для розуміння таких аспектів, як стійкість та фізична надійність природно-технічних географічних систем (ПТГС). Під поняттям фізичної надійності розуміються закономірності збереження властивостей ПТГС та їх здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах експлуатації й умовах антропогенного навантаження.

Вихідними матеріалами камеральних досліджень слугували креслення та пояснювальні записки, чинні проєкти та конструкторські рішення, об'єкту будівництва Дністровської ГАЕС та Дністровської ГЕС, геопросторові та картографічні дані веб сервісів OpenStreetMap (OSM) та Google Maps, програмні комплекси параметричного проєктування Autocad Inventor, SolidWorks, вільна кросплатформна геоінформаційна система, що складається з настільної та серверної частини: QGIS, в поєднанні з навчальною версією ArcGIS, мова програмування та пакет прикладних програм для розв'язання задач технічних обчислень таких як MATLAB, матеріали, сейсмологічних, гідрологічних та численні картографічні матеріали, зокрема геологічні звіти виконаних сторонніми організаціями.

Однією з основних проблем стало оброблення значного обсягу даних на гідротехнічному об'єкті, оскільки загальна кількість контрольної-вимірної апаратури (КВА) на гідротехнічному об'єкті, перевищує 3000 одиниць, не враховуючи фільтраційної КВА та геодезичної КВА.

Значний обсяг інформації, що оцінюється протягом кількох років у сотнях тисяч значень, вимагали оцифрування більшості даних з паперових носіїв. Крім того, недосконалість дистанційних давачів суттєво вплинула на процес обробки, що змусило застосовувати математичну фільтрацію інформації за допомогою

високорівневої мови програмування загального призначення з динамічною суворою типізацією та автоматичним керуванням пам'яттю, орієнтована на підвищення продуктивності Python.

Для обробки великих масивів числових даних і параметричного моделювання використовувались потужні багатоядерні процесори обчислювальних станцій. Особливий акцент був зроблений на застосуванні методу кінцевих елементів, який передбачав чисельний метод розв'язання диференціальних рівнянь із частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають під час розв'язання завдань для моделювання і візуалізації 3D – моделі результатів дослідження.

Визначено зміни у гідрогеологічному режимі до та після введення об'єкта в експлуатацію, враховуючи вплив антропогенної діяльності на річкові басейнові системи. Покращено розуміння та визначено чинники, що впливають на зміну напружено-деформаційного стану ґрунтів, а також встановлено кількісні параметри горизонтальних зміщень. Розширено знання про взаємозв'язок між коливаннями рівня води у ландшафтної - технічній системі водосховища та деформацією ґрунту в контексті циклічних навантажень на ґрунтову основу резервуара Дністровської ГАЕС, розглядаючи резервуар як джерело поперечних коливань.

Сформульовано прикладну значущість отриманих результатів для проектування та експлуатації природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС. Застосовано метод крос-спектрального аналізу для виявлення низькочастотних коливань ґрунту, спричинених змінами рівня води в резервуарі Дністровської ГАЕС. Результати дослідження забезпечують високу точність у визначенні частотного спектра коливань та ідентифікації потенційних резонансних явищ в ґрунтах, що є ключовим для розуміння взаємозв'язків між гідротехнічною діяльністю та геофізичними процесами в геосистемі. Такий підхід має значне теоретичне значення для розвитку наукових засад геофізики практичну значущість для забезпечення безпеки та стійкості гідроенергетичних об'єктів, надаючи

підґрунтя для розроблення ефективних стратегій моніторингу та управління ризиками, пов'язаними з експлуатацією природно-технічних геосистем.

У першому розділі дисертації «Методологічні основи дослідження природно-технічних геосистем» обґрунтовано актуальність та важливість дослідження природно-техногенних геосистем, де для глибокого розуміння механізмів їх функціонування важливо використовувати комплексний підхід, що базується на сукупності знань, не обмежуючись однією теоретичною концепцією. Типологія систем, що використовується в галузі конструктивної географії, має кілька напрямків, зокрема виділяють функціональні та структурні типи систем. До функціональних типів належать ізольовані, закриті та відкриті системи, які відрізняються ступенем взаємодії з навколишнім середовищем та здатністю до обміну речовиною та енергією. Структурні типи систем, які описуються як морфологічні, каскадні, процес - реакція (процесорні), керовані, саморегульовані, також відображають різні аспекти структурної організації та взаємодії компонентів. Така різноманітність класифікацій демонструє різноманітність підходів до вивчення геосистем та ландшафтів й необхідність інтеграції різних наукових поглядів для всебічного аналізу та розуміння природних і штучних геосистем. Дана інтеграція дає можливість виявити й зрозуміти складні взаємозалежності та процеси, що відбуваються в ПТГС, забезпечуючи більш глибоке та об'єктивне розуміння їх функціонування та еволюції. У цьому контексті, управління геосистемами вимагає комплексного підходу, що містить у собі як технологічні, так і екологічні аспекти, щоб забезпечити стійке і гармонійне співіснування природних і техногенних компонентів. Впровадження кібернетичних принципів в управління геосистемами.

Другий розділ дисертації «Опис методологічних підходів щодо моніторингу динамічних процесів у середовищі функціонування Дністровської ГАЕС.» пропонує ознайомитись з основними інструментальними методами дослідження, а також методологічними підходами в процесі моніторингу природно-технічних геосистем Дністровської ГАЕС, що реалізується через систематичні геодезичні та

геотехнічні спостереження. У розділі аналізуються значні переваги використання дистанційних методів моніторингу, а також описані проблемні аспекти їх застосування.

У третьому розділі дисертації «Вивченість вхідних характеристик функціонування природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС.» описано геологічну будову яка підрозділяється на три структурні поверхи (комплексу): - архейський (кристалічний (гранітний) фундамент; -верхнедокембрійський (верхне протерозойський) складений метаморфічними породами (перешарування пачок алевролітів, аргілітів і піщаників (різної потужності); - мезокайнозойський, складений осадовими утвореннями крейди, неогену й четвертинними відкладах різного генезису й потужності.

Тектонічні умови розташування гідротехнічного об'єкту згідно з інформацією Державної служби геології України, зону експлуатації каскаду ГЕС та ГАЕС, перетинають головні розломи це Томашівсько – Лядівський, Галайковецький та другорядні Сокілецький, Бахтинський. Окремим підрозділом описані гідрогеологічні умови середовища в якому спостерігається розвантаження декількох водоносних горизонтів з різним режимом живлення. Пластово - тріщинні й тріщинні води в корінних породах мають напірний, іноді високонапірний, а частіше безнапірний характер залягання. Вони пов'язані до горизонтів тріщинуватих вапняків в сарматі, пісків у тортоні та верхній крейді, пісковиків у товщі верхнього протерозою. Більша їхня частина дренується схилами долини річки Дністер і великими ярами.

Охарактеризовано геодинамічні умови у зоні експлуатації каскаду ГЕС і ГАЕС де було облаштовано систему пунктів сейсмічного моніторингу, яку доповнено інформацією від станцій Карпатської регіональної сейсмічної мережі, крім цифрових записів сейсмічної станції “Ломачинці”(NDNU), додатково використовувалися дані з ближніх сейсмічних станцій регіональної сейсмічної мережі (КРСМ): “Городок” (HORU), “Кам’янець-Подільський” (КМРУ), “Чернівці” (CHRU), “Косів” (KSV)

Четвертий розділ - «Результати експериментальних досліджень впливів природно — технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування». За допомогою геодезичних методів вдалося представити дослідження кінематики сучасних вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС впродовж 2000-2019 років отриманих на основі високоточного геометричного нівелювання.

Встановлено кількісні параметри розподілу горизонтальних зміщень в інклінометричних та ексцензометричних свердловинах. Завдяки поєднанню графіків амплітуди коливань рівнів води у водосховищі з епізодами сейсмічних явищ, синхронізованими за часом, завдяки чого стало можливим відстежити виникнення "індукованих землетрусів". Виконано моделювання поведінки ґрунтів під впливом природних і техногенних навантажень.

**Ключові слова:** русло, геодезичне забезпечення, ландшафтна система, річка, 3D поверхня, водосховище, ГЕС, потік, антропогене навантаження, ГІС, водойма, дамба, ГНСС, гідрологія, басейнова система.

#### **ABSTRACT**

**Andrii ZYHAR. Influence of the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP on dynamic processes in the environment of its operation.**

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 106 - Geography - Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2024.

The research on the topic of the dissertation was carried out during 2020-2024 in accordance with the research plans of the Department of Geography of Ukraine, Faculty of Geography, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.

The thesis makes a theoretical generalisation and proposes a new solution to the scientific and practical task aimed at a comprehensive study of the local natural and technical geosystem of the Dniester PSPP, which is a complex creation that integrates the natural components of river basins and anthropogenic landscapes, within the framework of the field of constructive geography.

Particular attention is paid to the transformation processes that result from the interaction of natural and anthropogenic factors. The research covers a detailed analysis of changes in the Dniester River basin, assesses the geo-environmental impact of anthropogenic activities on landscapes and ecosystems, as well as changes in the geological environment and hydrogeological regime in the rock mass.

The study is based on the data obtained from the experimental results of field and desk studies, which reflect the actual conditions and circumstances in which the experiments were conducted.

The field surveys included comprehensive geodetic measurements using the Global Navigation Satellite System (GNSS), as well as the use of classical methods of geometric and trigonometric levelling of the geodetic network installed in the area of operation of the hydraulic structure.

Additionally, water levels were measured within the regulated channel of the Dniester basin river system and within the artificial landscape and technical system of the upper reservoir of the Dniester PSPP. At the same time, dynamic water levels were measured in hydrological wells. Regular observations were made of river flow within the reservoir.

These data are key to understanding such aspects as the sustainability and physical reliability of natural and technical geographical systems (NGGS). The concept of physical reliability refers to the regularities of preserving the properties of the NGGS and their ability to perform the necessary functions in the specified operating modes and conditions of anthropogenic load.

The source materials of the desk research were drawings and explanatory notes, existing designs and design solutions, construction sites of the Dniester PSPP and Dniester HPP, geospatial and cartographic data from OpenStreetMap (OSM) and Google Maps, parametric design software systems Autocad Inventor, SolidWorks, a free cross-platform geographic information system consisting of a desktop and server part: QGIS, in combination with the ArcGIS training version, a programming language and application package for solving technical computing problems such as MATLAB,



materials, seismological, hydrological and numerous cartographic materials, including geological reports performed by third-party organisations.

One of the main challenges was the processing of a significant amount of data at the hydraulic facility, as the total number of control and measurement equipment (C&ME) at the hydraulic facility exceeds 3000 units, not including filtration C&ME and geodetic C&ME.

A significant amount of information, estimated at hundreds of thousands of values over several years, required digitisation of most of the data from paper carriers. In addition, the imperfection of remote sensors significantly affected the processing process, which forced the use of mathematical filtering of information using a high-level general-purpose programming language with dynamic strict typing and automatic memory management, Python, focused on improving performance.

Powerful multi-core processors of computer stations were used to process large arrays of numerical data and parametric modelling. Particular emphasis was placed on the use of the finite element method, which provided a numerical method for solving partial differential equations and integral equations arising from the solution of problems for modelling and visualisation of the 3D model of the study results.

Changes in the hydrogeological regime before and after the facility commissioning were determined, taking into account the impact of anthropogenic activities on river basin systems. The understanding of the factors affecting the change in the stress-strain state of soils was improved and the quantitative parameters of horizontal displacements were determined. The knowledge of the relationship between water level fluctuations in the landscape-technical system of the reservoir and soil deformation in the context of cyclic loads on the soil base of the Dniester PSPP reservoir was expanded, considering the reservoir as a source of transverse vibrations.

The applied significance of the obtained results for the design and operation of the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP is formulated. The method of cross-spectral analysis was used to detect low-frequency ground vibrations caused by changes in the water level in the reservoir of the Dniester PSPP. The results of the study provide

high accuracy in determining the frequency spectrum of oscillations and identifying potential resonance phenomena in soils, which is key to understanding the relationship between hydraulic engineering activities and geophysical processes in the geosystem. This approach has significant theoretical significance for the development of the scientific foundations of geophysics and practical significance for ensuring the safety and sustainability of hydropower facilities, providing a basis for developing effective strategies for monitoring and managing risks associated with the operation of natural and technical geosystems.

The first chapter of the thesis, "Methodological Foundations for the Study of Natural and Technical Geosystems," substantiates the relevance and importance of studying natural and technogenic geosystems, where it is important to use an integrated approach based on a body of knowledge, not limited to one theoretical concept, to gain a deep understanding of their functioning mechanisms. The typology of systems used in the field of constructive geography has several directions, in particular, functional and structural types of systems are distinguished. Functional types include isolated, closed and open systems, which differ in the degree of interaction with the environment and the ability to exchange matter and energy. Structural types of systems, which are described as morphological, cascade, process-response, controlled, self-regulating, also reflect different aspects of structural organisation and interaction of components. This variety of classifications demonstrates the diversity of approaches to the study of geosystems and landscapes and the need to integrate different scientific perspectives for a comprehensive analysis and understanding of natural and artificial geosystems. This integration makes it possible to identify and understand the complex interdependencies and processes occurring in PAs, providing a deeper and more objective understanding of their functioning and evolution. In this context, geosystems management requires an integrated approach that includes both technological and environmental aspects to ensure sustainable and harmonious coexistence of natural and anthropogenic components. Implementation of cybernetic principles in geosystem management.

The second chapter of the thesis, "Description of Methodological Approaches to Monitoring Dynamic Processes in the Dniester PSPP Operating Environment", offers an overview of the main instrumental research methods and methodological approaches in the process of monitoring the natural and technical geosystems of the Dniester PSPP, which is implemented through systematic geodetic and geotechnical observations. The chapter analyses the significant advantages of using remote monitoring methods and describes the problematic aspects of their application.

The third chapter of the thesis, "Study of the input characteristics of the functioning of the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP", describes the geological structure, which is divided into three structural floors (complexes) - Archean (crystalline (granite) basement); - Upper Precambrian (Upper Proterozoic) composed of metamorphic rocks (interbedded siltstone, mudstone and sandstone beds of different thickness); - Mesocene (Mesocene) composed of Cretaceous, Neogene and Quaternary sediments of different genesis and thickness.

According to the State Service of Geology of Ukraine, the tectonic conditions of the hydraulic facility's location, the operation area of the HPP and PSPP cascade, are crossed by the main faults: Tomashivsko-Liadiivskyi, Halaykovetskyi and minor Sokiletskyi and Bakhtinskyi faults. A separate subsection describes hydrogeological conditions of the environment in which several aquifers with different feeding regimes are discharged. Formation-fracture and fracture waters in bedrock have pressure, sometimes high-pressure, and more often non-pressure occurrence. They are associated with horizons of fractured limestone in the Sarmatian, sands in the Tortonian and Upper Cretaceous, and sandstones in the Upper Proterozoic. Most of them are drained by the slopes of the Dniester River valley and large ravines.

The geodynamic conditions in the HPP and PSPP cascade operation area were characterised, where a system of seismic monitoring stations was set up, supplemented by information from the stations of the Carpathian Regional Seismic Network, in addition to digital records of the Lomachyntsi seismic station (NDNU), data from nearby seismic

stations of the Regional Seismic Network (KRN) were used: "Horodok (HORU), Kamianets-Podilskyi (KMPU), Chernivtsi (CHRU), Kosiv (KSV).

The fourth chapter is "Results of experimental studies of the impact of the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP on dynamic processes in the environment of its operation". With the help of geodetic methods, it was possible to present a study of the kinematics of modern vertical movements of the Dniester PSPP territory during 2000-2019, obtained on the basis of high-precision geometric levelling.

The quantitative parameters of the distribution of horizontal displacements in inclinometric and eccentric boreholes were determined. By combining graphs of the amplitude of water level fluctuations in the reservoir with episodes of seismic events synchronised in time, it became possible to track the occurrence of "induced earthquakes". The behaviour of dispersed soils under the influence of natural and anthropogenic loads was modelled.

**Keywords:** channel, geodetic surveying, landscape system, river, 3D surface, reservoir, HPP, flow, anthropogenic impact, GIS, reservoir, dam, GNSS, hydrology, basin system.

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

***Статті у наукових фахових виданнях України:***

1. Зигар, А. (2023). Вплив природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування. *Часопис соціально-економічної географії*, (34), 46–56. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-05>
2. Зигар, А. (2024). Дослідження гідрогеологічного режиму природно-технічної геосистеми: На прикладі Дністровської ГАЕС. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія.*, 56(1), 50–58. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.7>
3. Зигар, А. (2024b). Практичні аспекти дистанційного зондування землі дослідження причин водопроявів на ґрунтових гідротехнічних спорудах. *Науковий вісник Чернівецького університету : Географія*, (847), 23–33. <https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.23-33>
4. Зигар, А. В. (2024c). Дослідження градієнта температур води між б'єфами природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (8), 92–100. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.10>

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

1. Savchyn, I., Zyhar, A., & Romanovsky, A. (2018). Research of vertical dynamics of Earth's surface movements in areas of Dniester PSPP. International conference of young professionals «GEOTERRACE-2018». <https://openreviewhub.org/lea/paper/research-vertical-dynamics-earths-surface-movements-areas-dniester-ppp> (здобувачем опрацьовано архівні матеріали та власні польові вишукування , Savchyn, I. - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних, Romanovsky, A. – текстова корекція та редгування).
2. Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhar, A. I. (2020). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). *У Geoinformatics: Theoretical and applied aspects 2020*. European Association of Geoscientists &

Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo110> (Scopus). (здобувачем опрацьовано архівні матеріали, *Bubniak, A. M.* - власні польові вишукування , *Bubniak, A. M.* - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних, *Bubniak, I. M.* - текстова корекція та редгування).

3. Savchyn, I., & Zyhar, A. (2020). Analysis and interpretations of recent local vertical movements of Dniester PSPP territory determined from precise levelling. *У International conference of young professionals «geoterrace-2020»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205702> (Scopus). (здобувачем опрацьовано архівні матеріали та власні польові вишукування , *Savchyn, I.* - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних)

4. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Zakrevskyi, O. (2021). Evaluation of changes in rock characteristics based on analysis and interpretation of seismicacoustic observations in the area of the natural and technical system of Dniester PSPP. *У International conference of young professionals «geoterrace-2021»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k3008> (Scopus). (*Savchyn, I* - опрацьовано архівні матеріали установ, *Yushchenko, Y, Zakrevskyi, O, Zakrevskyi, O* - виконано обробку статистичних масивів цифрових, геоінформаційне і картографічне моделювання здійснено з використанням ГІС-програми QGIS 3.10 (відкрита ліцензія))

5. Zyhar, A. (2022). Complex automatic control system of structures in the area of operation of the dniester PSPP. *У International conference of young professionals «geoterrace-2022»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590005> (Scopus).

6. Zyhar, A., Zayats, I., & Zakrevskyi, O. (2023). GIS-Oriented approach to analyzing the causes of water displays on hydraulic structures. *У International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510037> (Scopus). (здобувачем опрацьовано архівні матеріали установ, виконано обробку

*статистичних масивів цифрових, геоінформаційне і картографічне моделювання Zayats, I., & Zakrevskiy, O. - здійснено з використанням ГІС-програми QGIS 3.10 (відкрита ліцензія))*

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

1. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M. (2021, June 29). Analysis of inclinometric observations and prediction of soils deformations in the area of the Dniester PSPP. *GEODYNAMICS*. *GEODYNAMICS*, 1(30)2021(1(30)), 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017> (Web of Science). (Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M: створено параметричну модель ґрунтового масиву, Zyhar, A. - Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M проведено обчислення в програмному середовищі Autodesk Inventor (навчальна ліцензія))
2. Zyhar, A. (2023, June). Application of cross-spectral analysis and fast Fourier transform to detect soil vibrations in the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP. *GEODYNAMICS*, 1(34)2023(1(34)), 19–27. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.019> (Web of Science).
3. Zyhar, A., Yushchenko, Y., & Savchyn, I. (2023, June). A study of the influence of water level fluctuations on the geodynamic situation in the natural and technical geosystem of the Dniester HPP and PSPP cascade. *GEODESY, CARTOGRAPHY, AND AERIAL PHOTOGRAPHY*, 97,2023(97), 24–31. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024> (здобувачем опрацьовано архівні матеріали установ, виконано обробку статистичних масивів цифрових даних використанням програмного продукту Matlab R2021, Yushchenko, Y., & Savchyn, I. - геоінформаційне і картографічне моделювання здійснено з використанням ГІС-програми QGIS 3.10 (відкрита ліцензія)).

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНИХ ГЕОСИСТЕМ. ....	25
1.1. Основні поняття і терміни, що описують геосистеми. ....	25
1.2. Класифікація природно – технічних геосистем. ....	35
1.3. Природно - технічна системи ГАЕС.....	41
Висновки до розділу 1 .....	47
РОЗДІЛ 2 ОПИС МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СЕРЕДОВИЩІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС.....	50
2.1. Геодезичний моніторинг.....	50
2.2. Гідрогеологічний моніторинг.....	55
2.3. Сейсмічний моніторинг. ....	59
2.4. Геотехнічний моніторинг. ....	60
Висновки до розділу 2 .....	65
РОЗДІЛ 3 ВИВЧЕНІСТЬ ВХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС.....	67
3.1. Будова геологічного середовища Дністровської ГАЕС. ....	67
3.2. Тектонічні умови території розміщення Дністровської ГАЕС.....	74
3.3. Гідрогеологічні умови середовища Дністровської ГАЕС.....	79
3.4. Геодинамічні умови середовища Дністровської ГАЕС.....	80
Висновки до розділу 3 .....	89
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВІВ ПРИРОДНО - ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС НА ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У СЕРЕДОВИЩІ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ. ....	92
4.1. Дослідження новітньої тектоніки геодезичними методами.....	92
4.2. Зміни гідрогеологічного режиму. ....	102



4.3. Дослідження локальної сейсмічності. ....	109
4.4. Дослідження горизонтальної динаміки: механізми та динаміка напружень. 119	
4.5. Дослідження вертикальної динаміки: механізми та динаміка напружень. 133	
Висновки до розділу 4 .....	147
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155
ДОДАТКИ.....	168

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

КВА - контрольно-вимірювальна апаратура

БСв - Балтійська система висот

ПТГС - природно-технічна геосистема

ТС – технічна система

ГАЕС - гідроакумлювальна електростанція

ППЕ - первинний перетворювальний елемент

НПР – нормальний підпірний рівень

ТС – технічна система

ПЗ – програмне забезпечення

абс. – абсолютна (мається на увазі відмітка висотна)

СКП - середньоквадратична похибка

АСК – автоматизована система контролю

ГТС - гідротехнічна споруда

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність теми, що висвітлюється в даній роботі, полягає в необхідності розуміння та управління впливом гідроенергетичних об'єктів на природне середовище та динаміку природних процесів. Дослідження покликане розширити знання про те, як саме інженерні споруди, зокрема Дністровська ГАЕС, впливають на навколишнє природне середовище та які наслідки цей вплив може мати для геосистеми загалом і безпеки регіону зокрема.

В умовах глобальних викликів, особливо у світлі впровадження відновлювальних джерел енергії, глибоке розуміння взаємодій між технічними об'єктами та природними системами набуває особливої актуальності.

У цьому контексті, застосування передових технологій та методів стає ключовим елементом в аналізі та плануванні. Особливо цінними інструментами в цьому аспекті є засоби параметричного проектування та програмне забезпечення для математичних обчислень. Середовища параметричного проектування відкриває нові горизонти в проектуванні складних інженерних систем, даючи змогу з максимальною точністю враховувати безліч змінних та їхній вплив на навколишнє середовище і навіть на мікрорівнях. Водночас програмні комплекси математичного аналізу надають потужні інструменти для опрацювання та аналізу даних, що сприяє глибшому розумінню динамічних процесів у природних та технічних системах. Інтеграція цих технологій у науково - дослідницьку практику не лише посилює аналітичні можливості фахівців, а й сприяє розробці більш стійких та еколого-відповідальних рішень.

Актуалізація дослідження також посилюється в контексті широкої проблематики сталого розвитку та інтеграції людської діяльності з природним середовищем.

Розгляд впливу гідроенергетичних станцій на природні та техногенні процеси дає змогу зробити висновки та розробити рекомендації для майбутніх проектів у цій галузі, а також дає поштовх до розвитку фізичної надійності (фізики відмов) та розвитку математичних засад теорії надійності саме в географії, що стали обов'язковим атрибутом розроблення та проектування складних і

відповідальних систем. У цьому ракурсі під теорією надійності розуміють наукову дисципліну, що вивчає закономірності збереження в часі технічними системами властивості виконувати необхідні функції в заданих режимах. Навіть якщо людина опанувала основами теорії на відмінно, вона може не зуміти розв'язати задачу надійності, тому що для цього недостатньо одних тільки теоретичних знань, необхідно також мати вихідні та статистичні данні про локальну геосистему щоб наблизитись до розв'язання таких задач. Такий підхід сприяє розробленню стратегій і методів управління, спрямованих на оптимізацію взаємодії між технічними об'єктами й природним середовищем, що має критичне значення для сталого розвитку та екологічної безпеки на міжнародному рівні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.** Обраний напрям досліджень відповідає тематиці науково-дослідних робіт кафедри географії України та регіоналістики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Ландшафти русел і заплав річок південно-східного Передкарпаття: стан, конфлікти, ризики, оптимізація (2021-2025)» (номер державної реєстрації 0121U100418).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є обґрунтування теоретичних положень, методичних та прикладних засад щодо впливу природно — технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування. Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання:

1. дослідити кінематику сучасних вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС
2. визначити зміни в гідрогеологічному режимі до та після введення об'єкта в експлуатацію, враховуючи вплив господарської діяльності на водні ресурси.
3. з'ясувати вплив коливань рівня води у водосховищі на геодинамічну ситуацію в природно-технічній геосистемі каскаду Дністровських ГЕС та ГАЕС, з акцентом на зв'язок між змінами рівня води та локальною сейсмічною активністю.

4. поглибити розуміння та встановити чинники, що впливають на зміну напружено-деформаційного стану ґрунтів, та з'ясувати кількісні параметри горизонтальних зміщень.
5. розширити знання про взаємозв'язок між змінами рівня води у водосховищі та деформацією ґрунту в контексті циклічних змін навантажень на ґрунтову основу резервуара Дністровської ГАЕС, при цьому розглядаючи резервуар як джерело поперечних коливань.
6. сформулювати прикладну значущість одержаних результатів для проектування та експлуатації природно — технічної геосистеми Дністровської ГАЕС.

**Об'єкт дослідження.** Природно-технічна геосистема Дністровської ГАЕС, у межах якої розглядаються динамічні процеси, пов'язані з функціонуванням гідроенергетичного комплексу.

**Предмет дослідження.** Комплексне вивчення взаємозв'язків між експлуатацією Дністровської ГАЕС та змінами у середовищі її функціонування.

**Методи дослідження.** Методологія дослідження даного дослідження інтегрує теоретичні підходи, орієнтовані на вивчення взаємодій між природними і техногенними системами, з акцентом на системний і структурний аналіз динаміки природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС. Дослідження поглиблюється в застосуванні загальнонаукових і спеціальних методів, таких як монографічний аналіз, абстрактно - логічний підхід і логічні узагальнення, для теоретичного розроблення та концептуального збагачення. У контексті практичної реалізації дослідницьких завдань, методологію обґрунтовано застосуванням комплексної автоматизованої системи контролю (АСК ГТС), що забезпечує геотехнічний моніторинг основних конструкцій ГАЕС. Введення цієї системи дає змогу здійснювати безперервний моніторинг і аналіз стану геосистеми, враховуючи дані від численних сенсорів, встановлених у ключових точках. Використання інформаційних технологій, включно з AutoCad Inventor, QGIS 3.10, Matlab R2023 та Microsoft Excel, забезпечує потужне підґрунтя для опрацювання, аналізу та

моделювання даних, посилюючи тим самим результативність дослідження. Інформаційна база дослідження, що складається з наукових публікацій, офіційних даних і результатів польових робіт, слугує надійним фундаментом для глибокого розуміння досліджуваних процесів. Інтеграція знань і методів із різних наукових дисциплін, включно з геологією, гідрологією, сейсмологією та інженерними науками, для всебічного аналізу і розуміння досліджуваних процесів. Таким чином, дана методологія являє собою збалансоване поєднання теоретичних засад і практичного моніторингу, що дає змогу комплексно вивчити вплив Дністровської ГАЕС на навколишнє середовище і розробити обґрунтовані стратегії для оптимізації управління та зниження потенційних ризиків, пов'язаних з експлуатацією природно-технічної геосистеми.

### **Наукова новизна.**

*Вперше:*

1. Застосування методу крос-спектрального аналізу за допомогою методу швидкого перетворення Фур'є, саме для виявлення низькочастотних коливань ґрунту, індукованих змінами рівня води в резервуарі Дністровської ГАЕС. Результати дослідження дають змогу з високою точністю визначити частотний спектр коливань та ідентифікувати потенційні резонансні явища в ґрунтах, що є ключовим для розуміння взаємозв'язків між гідротехнічною діяльністю та геодинамічними процесами в геосистемі. Такий підхід має значне теоретичне значення для розвитку наукових засад геодинаміки та практичну значущість для забезпечення безпеки та стійкості гідроенергетичних об'єктів, надаючи підґрунтя для розроблення ефективних стратегій моніторингу та управління ризиками, пов'язаними з експлуатацією ГАЕС;
2. Запропоновано практичний підхід до аналізу сейсмічної активності, базований на теорії Кулона - Мора, що застосовується вперше у контексті сейсмічних спостережень для визначення залежності між коливаннями рівня води у водосховищі та активацією тектонічних розломів;

3. Виявлені зміни в здатності геологічних горизонтів утримувати воду, при цьому досліджувалися фактори, включно з модифікаціями в напружено-деформованому стані гірських порід.

*Удосконалено:*

- модель безпечних навантажень на ложе водосховища, яка дозволяє уникнути потенційного ризику виникнення індукованих землетрусів та визначити оптимальні умови експлуатації гідротехнічних об'єктів;
- стратегію управління водними ресурсами, що враховують поточні та можливі майбутні зміни в гідрогеологічному середовищі.

*Отримали подальший розвиток:*

- уявлення про поліпшення систем геотехнічного моніторингу включно із застосуванням нових технологій і алгоритмів для збирання та аналізу даних у реальному часі.
- стратегії міждисциплінарного співробітництва між фахівцями різних галузей, для обміну знаннями та спільної роботи над вирішенням комплексних проблем.
- можливість розрахунку показників надійності невідновлюваних систем.

**Практичне значення отриманих результатів.** Полягає в тому, що сформульовані у дисертації наукові положення надали можливість розробити комплекс методичних засад та прикладних пропозицій, які було впроваджено у практику діяльності підприємств та проектних організацій гідроенергетичної галузі, зокрема, ПрАТ «Укргідропрект» Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження представлені у (додаток А).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація являє собою самостійно виконане наукове дослідження. Усі наукові результати, висновки та прикладні напрацювання належать винятково автору. У дисертації враховано тільки ті положення та ідеї з опублікованих у співавторстві наукових праць, які є результатом власних досліджень автора. Особистий внесок у спільно оприлюднені праці детально зазначено в переліку наукових публікацій у (додаток Є).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, результати, висновки та пропозиції роботи обговорювали на міжнародній науково – технічних конференціях. Отримані результати здобувач доповідав й отримував схвалення зокрема на таких: «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2018» ( м. Львів 18 жовтня 2018 р.), «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2020» ( м. Львів 25 жовтня 2020 р.), «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2020» ( м. Львів 25 жовтня 2020 р.), «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2021» ( м. Львів 5 жовтня 2021 р.), «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2022» ( м. Львів 20 жовтня 2022 р.), «Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених GeoTerrace – 2023» ( м. Львів 25 жовтня 2023 р.).

**Публікації.** За результатами виконаного дослідження опубліковано 13 наукових праць, із них 2 статті (у співавторстві), 5 у наукових фахових виданнях України, 6 тез у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 182 сторінок, у тому числі 136 сторінки основного тексту. Робота містить 69 рисунків та 6 таблиць. Бібліографічний список складається зі 127 джерел, серед них 86 латиницею і розміщений на 10 сторінках. Додатки включають 0 таблиць та 12 рисунків, розміщених на 15 сторінках.



# РОЗДІЛ 1

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНИХ ГЕОСИСТЕМ

### 1.1. Основні поняття і терміни, що описують геосистеми

Сучасний науково-технічний прогрес у всьому світі безпосередньо пов'язаний із глобальним використанням природних ресурсів. Розвиток трудових процесів, що зумовлюють нагромадження матеріальних благ у суспільстві, має багатоаспектний характер, який в екологічному сенсі інтегрується за трьома основними напрямками:

- формування регіональних природно - технічних геосистем (на локальному рівні) і техносфери Землі (на планетарному рівні);
- вичерпання природно-сировинних ресурсів;
- виникнення екологічного імунодефіциту планети внаслідок глобальної антропогенної трансформації природного середовища та придушення природних механізмів саморегулювання біосфери.

За висловом академіка В. І. Вернадського, "людина стає найбільшою геологічною силою, що змінює вигляд нашої планети" (Тема 3: «Біосфера. Вчення В.І. Вернадського про біосферу. Екосистеми й популяції», 2023.; Bird, 1963; Hamilton & Grinevald, 2015, Oldfield & Shaw, 2012,).

Власне кажучи. Системний аналіз і поняття система не були новими для географії. Сам характер науки, предмет дослідження передбачають детальний підхід. Особливо велику роль зіграли в становленні системного аналізу в минулому німецькі та вітчизняні географи. За радянських часів системний аналіз набув широкого розвитку. Можна відзначити низку вчених і створених ними шкіл, які творчо розвинули комплексний підхід до вивчення географічних явищ. Це фізико-географічна школа Л.С. Берга, географо - геохімічна школа В.І. Вернадського, географо - гідрологічна школа Глушкова - Муравейського.

Основна відмінність полягала в тому, що відбувся перехід від інтуїтивно-емпіричного використання системного аналізу, що не вирізнялося логічною

стрункністю і несуперечливістю, до добре обґрунтованого теоретичного, несуперечливого використання.

Перше. Необхідність вивчення складніших систем і дедалі зростаючі вимоги до якості географічної інформації.

Друге. Необхідність формалізації географічної інформації та використання математичних методів. Формалізація є головною вимогою до інформації, що обробляється за допомогою математики. А для формалізації необхідно, щоб досліджувані системи були добре обґрунтовані теоретично.

Третє. Необхідність моделювання систем і прогнозування їхнього розвитку. Для складання моделі необхідне виявлення найістотніших зв'язків, а за старих підходів не завжди було можливим чітко виділення найважливіших сторін системи.

Четверте. Необхідність нового районування природи. Ця проблема з'явилася дещо пізніше. Але вже 1950-60-ті роки було очевидно, що районування за типологічною і генетичною ознакою має низку недоліків, і потрібно шукати нові методи і принципи районування.

Основною перевагою системного підходу, в якій і полягає весь його сенс, є можливість розгляду об'єкта як єдиного цілого, що вирізняється певним рівнем організації. Такий підхід дає можливість розглянути все геосередовище як ієрархію систем. Сучасний системний аналіз відрізняється від колишнього низкою характерних ознак, притаманних всьому сучасному щаблю розвитку науки загалом і географії зокрема.

1. Посилення абстрактного підходу у вивченні природних систем і відображення їх у вигляді моделей.
2. Велика увага до вивчення внутрішньої структури систем та їх сукупностей (ієрархічні рівні, потоки, зв'язки тощо).
3. Використання понять, узятих із загальної теорії систем, логіки, фізики, теорії інформації тощо.
4. Використання математики як універсальної "мови" науки.

5. Вироблення відповідних географічних понять для кращого засвоєння досягнень інших наук.

Якщо сучасні тенденції розвитку вчення про географічні системи збережуться і посиляться в майбутньому, то можна сподіватися, що загальна теорія геосистем буде створена.

Для її створення необхідна низка умов. Однією з головних є розробка алгоритмів дослідження геосистем і опрацювання отриманої інформації. За такого підходу ми позбудемося суб'єктивних рішень у процесі дослідження. Теорія геосистем має стати частиною загальної теорії геополя або, іншими словами, теорії геопростору.

Системний аналіз вимагає класифікації, впорядкування простору. Для цього виокремлюють системи. Можна сказати, що від правильного виділення систем із простору зрештою залежать результати всього дослідження. Незважаючи на це, а можливо, і завдяки цьому, в географії, та й у науці взагалі, ще не дійшли до єдиного визначення поняття "система" і "геосистема". Науковці (Гавриленко, 2008, Денисик, 1998, 2001, Денисик, Хаєцький & Стефанков, 2007, Ліхо та ін., 2011, *Мала гірнича енциклопедія.*, 2013; Мельник & Міллер, 1993; Топчієв, 1982; Яцентюк, 2015; Armand, 1988; Bondarik, 1986; Hamilton & Grinevald, 2015; Harvey, 1985; 1989; 2019; Mukhina, 1973; "Network geography", 2014; Oldfield & Shaw, 2012; Preobrazhenskiy, 1984), наводять у своїх працях понад дванадцять визначень системи. Більшість визначень є схожими і, загалом, виражають однакове розуміння, але трапляються і несумісні визначення. У цій роботі ми розглянемо тільки чотири думки.

А.Д. Арманд - система є сукупністю елементів, які певним чином пов'язані між собою і утворюють деяку цілісність (Armand, 1988,; Skorek та ін., 1991).

Р. Чорлі, Б. Кеннеді, К. Клейтон - система визначається як упорядкована множинність предметів та/або властивостей (Clayton та ін., 1972).

Л. Берталанфі - система є комплексом елементів, що входять у взаємодію (Bertalanffy, 2002).

Д. Харвей - система інтерпретується як:

1. Безліч елементів, ідентифікованих за деякою змінною ознакою об'єкта.
2. Безліч відносин між ознаками об'єкта.
3. Множина відносин між ознаками об'єкта і зовнішнім середовищем (Harvey, 1969).

При розгляді цих визначень одразу видно, що всі автори підкреслюють внутрішній зв'язок між елементами та його впорядкованість. На нашу думку, найповнішим є визначення Д. Харвея. Воно вигідно вирізняється з-поміж решти тим, що підкреслюється цільова спрямованість систем та їхній зв'язок із зовнішнім середовищем.

Більшість радянських, а згодом і українські разом із закордонними авторами, дотримуються думки про абстрактний характер систем. При цьому підкреслюється, що в систему не обов'язково і навіть не бажано включати всі різноманітні риси даного предмета. Необхідно врахувати лише найістотніші характеристики системи. Таким чином, система не буде адекватним відображенням об'єкта. Вона є моделлю. Якщо розуміння сутності систем узагалі вирізняється певною єдністю, то з приводу системи систем, які виокремлюють і вивчають у географії, думки розходяться. Наведемо кілька визначень геосистем.

Система - це сукупність елементів, які пов'язані та взаємодіють один з одним, утворюють певну цілісність, єдність і мають інтегративну властивість (Мельник & Міллер, 1993).

За визначенням О.В. Пилипович., геосистеми - це складні земні утворення, що займають певний простір, у межах якого окремі елементи (підсистеми) природи перебувають у системному взаємозв'язку та як певна цілісність взаємодіють із сусідніми геосистемами і біосферою загалом (Пилипович & Ковальчук, 2017).

За визначенням Білецького В.С., геосистема - це сукупність природних і штучних об'єктів, що формується в результаті будівництва й експлуатації інженерних та інших споруд, комплексів і технічних засобів, які взаємодіють із

природними об'єктами, (геологічні тіла, ґрунт, рослинний покрив, рельєф, водні джерела та атмосфера, фауна і соціуми), (*Мала гірнича енциклопедія.*, 2013).

За Г.К. Бондариком, природно-технічна система - цілісна, впорядкована в просторово-часовому відношенні сукупність компонентів, що взаємодіють, яка містить знаряддя, продукти і засоби праці, природні і штучно змінені природні тіла, а також природні і штучні поля (Bondarik, 1986).

У роботі (Денисик, Хаєцький & Стефанков, 2007) автори оперують поняттям геосистем, під яким розуміють сукупність природних і штучних об'єктів, що формуються внаслідок будівництва та експлуатації інженерних та інших споруд, комплексів і технічних засобів, які взаємодіють із природними об'єктами (геологічні тіла, ґрунт, рослинний покрив, рельєф, водні джерела й атмосфера, фауна та соціуми).

За Преображенським (Preobrazhenskiy, 1984) узагальнена концепція поняття «геосистем» було представлено в працях міжнародного географічного конгресу у 1976 році, ("The types of geosystem models and aspects of geographic activities", 1976). На основі ретельного аналізу вивчених матеріалів конференції було розроблено та побудовано деталізовану схему (рис. 1.1), що відображає ключові поняття про геосистеми в цілому.

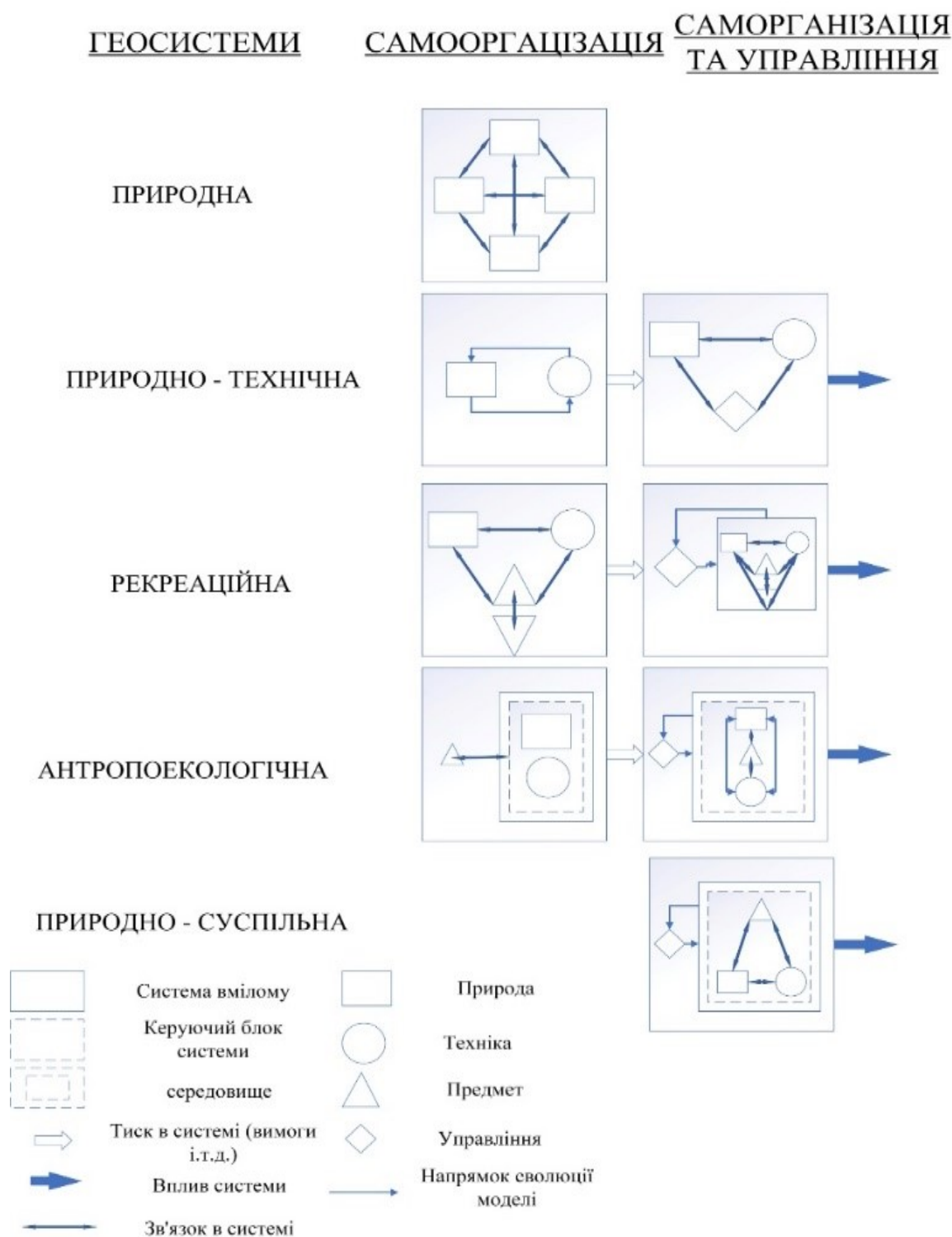


Рисунок 1.1 – Види, та принципи геосистем

Складно за даними: ("The types of geosystem models and aspects of geographic activities", 1976).

У географії погляд на сутність предмета дослідження, як було показано (див. рис. 1.1), базується на світоглядній концепції автора. Тому щоб провести науковий аналіз низки дефініцій, необхідно виходити не тільки з абстрактної концепції, а із

сутності інтересів усієї науки. Іншими словами, розглядати визначення не ізольовано, а у зв'язку з усією сумою знань.

Перш ніж перейти до розгляду природно-технічної геосистеми, необхідно висвітлити низку питань. Насамперед, з'ясувати типологію систем та вже потім спробувати систематизувати найважливіші поняття, що застосовуються в системних дослідженнях. Найповніше це питання висвітлено в роботах зарубіжних географів. Українські географи, які займаються дослідженнями, в основному дотримуються класифікацій західного походження. У даній роботі ми розглянемо класифікації Р.Чорлі та Б. Кеннеді та класифікацію Д.Харвея, Р.Чорлі та Б.Кеннеді в основу поклали дві ознаки та ведуть свою класифікацію за двома напрямками - структурним та функціональним.

Виділено такі функціональні типи систем:

1. Ізольовані системи.
2. Закриті системи. Приплив і відтік речовини неможливий, а енергії можливий.
3. Відкриті. Речовина та енергія вільно циркулюють.

Структурні типи систем:

1. Морфологічні - складаються зі структурних співвідношень між частинами системи.
2. Каскадні - визначаються шляхами проходження потоків.
3. Процес - відповідь (процесорні) - поєднання перших двох типів. Демонструють поєднання форми і процесу.
4. Керовані - системи типу процес - відповідь, у яких ключові моменти контролюються.
5. Саморегульовані - представляють найнижчу форму життя (клітини).
6. Рослини
7. Тварини
8. Екосистеми
9. Людина

10. Технічні системи

11. Екосистема людини.

Девід Харвей виділяє чотири типи систем:

1. Гомеостатична - зберігає постійні умови перед обличчям випадкових зовнішніх флуктуацій.
2. Адаптивна - дуже схожа на гомеостатичну, але відрізняється тим, що кожному впливу відповідає один або кілька привілейованих станів.
3. Динамічна - відрізняється тим, що зворотний зв'язок повторюється через послідовність одноразових неповторних станів, які називаються траєкторіями.
4. Контрольована - дуже схожа на керовану систему, але в ній можна контролювати лише частину входів (Harvey, 1969).

Необхідно зауважити, що в класифікації Д. Харвея порушено одну з найголовніших ознак наукових класифікацій - виокремлення типів за однією ознакою. У його ж класифікації типи виокремлюють за чутливістю систем (гомеостатична та адаптивна) і за структурною ознакою (динамічна та контрольована). Виділені типи систем слід розглядати в різних класифікаціях. Структурні типи - динамічна і контрольована - відповідають процесорній і керованій у класифікації Р.Чорлі та Б.Кеннеді.

Необхідність у праці над впорядкуванням понять постала внаслідок великої складності термінології. Без попереднього ознайомлення з низкою понять, що складають певний мінімум, розуміння матеріалу, що вкладатиметься, буде в низці випадків ускладнене:

1. Блок - частина потоку, що вирізняється певною цілісністю та особливими функціями, значно впливає на трансформацію речовини та енергії.
2. Вторинні зв'язки - опосередковані зв'язки, що проявляються відносно пізніше.
3. Вік - тривалість існування даної системи як певного структурного типу.



4. Час - період, що відраховується від моменту встановлення системних зв'язків, адекватних сучасним, до нинішнього моменту.
5. Вхід - змінна, через яку надходять імпульси в дану систему.
6. Вихід - змінна, через яку виходять імпульси з даної системи.
7. Зовнішнє середовище системи - система вищого рівня, у яку ця система входить як частина в ціле.
8. Геомер - гомогенний ареал комплексу природних явищ.
9. Геохора - поєднання геомерів об'єднаних за певною ознакою.
10. Геом - найбільша типологічна одиниця геомера.
11. Динаміка - рух системи, який, на відміну від еволюції, проявляється в рамках однієї інваріантної структури.
12. Динамічний гомеостаз - прагнення до саморегулюючої зміни, в результаті дії зворотного зв'язку.
13. Знак кореляції - показує, збільшуватиметься чи зменшуватиметься те чи інше значення в разі зміни критерію.
14. Інваріантна структура - структура, що існує в природі об'єктивно, незалежно від системи відліку.
15. Кореляція - ступінь точності генералізованого співвідношення змінних до емпіричних даних.
16. Конфігурація - розташування змінних у системі.
17. Критичний компонент - компонент, що чинить найсильніший вплив на систему.
18. Метастабільність - перехід системи в кардинально новий стан унаслідок перевищення порога.
19. Мінімум - ареал - мінімальний простір, на якому можлива "географічна" форма руху матерії.
20. Набір можливих станів - сума всіх станів, у яких може опинитися система. Визначається кількістю і якістю змінних системи.
21. Поведінка системи - процес функціонування системи.

22. Потік - ланцюг блоків, що трансформують речовину й енергію в системі. Відрізняється великою стійкістю, упорядкованістю та односпрямованістю.
23. Поле - частина простору, в якому розглядаються явища. Являє собою ієрархію систем, утворених у результаті взаємодії групових просторів.
24. Щільність - показує наскільки тісно пов'язане коливання одних значень із коливаннями інших. Виражається в ступені подібності кривих ліній графіків.
25. Реплікація - надмірність. Має місце в тому разі, якщо результуючий ефект менший за сумарний. Це відбувається через накладення змінних, а, отже, і дублювання інформації.
26. Розмір - визначається кількістю змінних, що входять до системи.
27. Саморегуляція - сукупність внутрішніх зв'язків, що зберігають за системою певний стан.
28. Сила зв'язку - ступінь впливу зв'язку на систему. Має відносний характер.
29. Стан - сукупність значень змінних у будь-який момент часу.
30. Системоутворювальний потік - потік, що є основоположним у системі. Навколо нього формується система.
31. Ступінь свободи - ступінь взаємозв'язку змінних. Визначається кількістю повністю вільних змінних.
32. Тотальна система - включає в себе все, що оточує суспільство. Це комплекс середовищ і взаємопов'язаних систем.
33. Траєкторія - послідовність одноразових станів, через які проходить система при порушенні її сучасного стану.
34. Посилення - стан, коли результуючий ефект більший за сумарний. Є наслідком емерджентності системи.
35. Еволюція - зміна геосистеми, зі зміною її інваріанта.
36. Емерджентність - наявність у системи таких властивостей, які не спостерігаються в елементів, що входять до цієї системи.

При визначенні понять ми спиралися на широко поширені визначення. Більша частина понять була запозичення з робіт Д.Харвея, Р.Чорлі та Б. Кеннеді, А.Д. Арманд.

## **1.2. Класифікація природно – технічних геосистем**

Природно – технічні геосистеми (ПТГС) виокремлюють та класифікують на підставі функціонального підходу, за якого розкриється механізм функціонування природи. Л. Берталанфі вважає, що в межах геосистеми поверхня має являти собою "живе" ціле. Єдність геосистеми забезпечується потоком (Bertalanffy, 2002, с. 67). Для виявлення "ділянок локальної організації матерії" Л. Берталанфі пропонує проводити уявний експеримент, по черзі ізолюючи частини території і припускаючи, які це викличе зміни в системі. Потім, виділивши всі сильні частини, з'єднати їх так, щоб вони склали єдине ціле.

Більш об'єктивним є метод виокремлення меж ПТГС за допомогою виявлення і вивчення потоків. Щоб обґрунтувати межі геосистеми, необхідно виділити потік. Він не має бути традиційним, інакше доведеться розширити межі системи. Транзитність властива всім потокам. Не транзитних потоків не буває. Але тут необхідно ввести визначення порогового значення, ступеня нерозрізнуваності, за яких ми умовно вважатимемо, що потік не є транзитним і існує тільки в межах даної системи. Важливим моментом є те, що однорідність компонентів не є необхідною умовою для класифікації геосистем. Швидше навпаки. Як зазначає А.Д. Арманд, однорідний район не є системою, тому що градієнти на його периферії є вищими, ніж у центрі, а отже, й інтенсивність обміну на периферії є вищою (Armand, 1988). Однорідні райони є антисистемними, і якщо правильно виокремлювати однорідні райони, то легко можна виокремити і системи, що знаходяться на кордонах однорідних районів.

Треба зазначити, що це питання класифікації ПТГС, опрацьовано дуже слабо. Г.І. Денисик неодноразово зазначав, що необхідно провести класифікацію геосистем за їхніми інваріантами. Це завдання поки не виконано через брак

інформації. Для інтегральних геосистем до яких належить ПТГС, класифікацій не існує взагалі. Усе обмежується простим декларуванням їхнього існування. У роботах О.Д. Лаврика та Г.І. Денисика простежується концепція класифікації антропогенних ландшафтних геосистем за об'ємом та площею.

У 70-х – 80-х рр. ХХ ст. техногенні ландшафти детально вивчав І. Г. Денисик (Денисик, 2001). Паралельно проводяться дослідження з питань екологічного обґрунтування створення гідротехнічних систем (Мельник & Міллер, 1993).

У процесі цих досліджень зазначалось, що предметом вивчення антропогенного ландшафтознавства є не лише антропогенні ландшафти, але й ландшафтно - технічні системи. Останні є блоковими системами, головну роль у розвитку яких відіграє технічний блок (функціонування і розвиток контролюється людиною). Науковці виділяють дві категорії ландшафтно - технічних систем: активні (властивості техногенного покриття є змінними, залежно від його функціонального призначення) і пасивні (властивості техногенного покриття залишаються незмінними з моменту створення).

Однак зазначено, що класифікація цих систем потребує подальших наукових досліджень. Детальніше ландшафтно - технічні системи досліджував Г. І. Денисик (Г. Денисик, 1998). Він зазначив, що ландшафтно - інженерні і ландшафтно - техногенні системи доцільно об'єднати і досліджувати під загальним поняттям «ландшафтно - технічні системи», оскільки ці системи формуються природним і технічним блоками. Головною їх відмінністю є наявність блоку управління, тобто під ландшафтно - інженерними системами дослідник розуміє «...активно діючі заводи і фабрики, кар'єри і шахти, дороги й водоканали, міста і села з усією інфраструктурою, що забезпечує належне їх функціонування», а під ландшафтно - техногенними – «...системи, у яких відсутній блок управління і лише частково функціонує технічний блок» (Г. І. Денисик, 2008). Г. І. Денисик вказав на беззмістовність таких понять, як «антропогенноприродні», «природно-антропогенні», «техногенно-антропогенні» і «антропогеннотехногенні», оскільки

антропогенні ландшафти є природними, а техногенні є однією з генетичних груп антропогенних.

Пилипович О.В. у своїх дослідженнях підкреслює важливість використання специфічних наукових підходів у аналізі геосистем. Історично склалося так, що у дослідженнях геосистем застосовують два основні підходи — ландшафтний та екологічний, які є ключовими для геоecологічного аналізу.

Для ландшафтно - екологічного підходу характерне уявлення простору як сукупності територіальних одиниць, у межах яких компоненти природного середовища (геокомпоненти) протягом тривалого розвитку пристосувались один до одного, взаємодіють як єдине ціле і цілісно реагують на антропогенні впливи.

Ознакою ландшафтного підходу є положення про ієрархічність ландшафтно - територіальної структури, де головним об'єктом дослідження є територіальні одиниці — геосистеми як інтегральні системи.

Пилипович О.В. також розглядає річкові басейни як особливі регіональні природно-географічні термодинамічні геосистеми. В межах системного підходу вона виділяє екологічний підхід, сутність якого полягає у вивченні живих об'єктів, насамперед людини, з позицій їх взаємовідносин з навколишнім середовищем. Це дозволяє встановити негативні для людини зміни середовища та завчасно передбачити заходи із їх нейтралізації і пом'якшення наслідків впливу на річково - басейнову систему. Такий підхід є базовим, у його межах предмети та явища об'єктивної реальності розглядаються як середовище життєдіяльності суб'єкта, що передбачає біоцентризм та антропоцентризм досліджень і заходів, які розробляють.

Антропоцентричний підхід, реалізований під час екологічної оцінки змінних станів ландшафту стосовно людини, та біоцентричний підхід, що базується на аналізі взаємодії абіотичних та біотичних компонентів ландшафту, визначають стан його біоти. Розуміння та дослідження геосистеми як поліструктурної системи є центральною методологічною установкою ландшафтно - екологічного підходу. Увага акцентується на процесному та функціональному аналізі геосистеми на регіональному рівні та характеристиці впливу зовнішніх, передусім антропічних

факторів, на природні системи, підкреслюючи проблеми діяльності людини у процесі використання природного середовища і природних ресурсів (Пилипович & Ковальчук, 2017).

Виділяють низку геомірів і низку геохор, (Г. Денисик, 1998; Г. Денисик, Хаєцький & Стефанков, 2007; Г. І. Денисик, 2008; Кисельов та ін., 2023; Лаврик, 2011; *Природно-технічні системи. класифікація природно-технічних геосистем.*, б. д.; Яцентюк, 2015) (Таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Типологічна класифікація геосистем

ГЕОМІРИ	ГЕОХОРИ
Виокремлення фації (біоценоз)	Мікрогеохора (урочище)
Група фації	Мезогеохора (місцевість)
Клас фації	Топогеохора (район)
Геом	Макрогеохора (регіон)

*Узагальнено автором на основі праць* (Г. Денисик, 1998, с. 26; Г. Денисик, Хаєцький & Стефанков, 2007; Г. І. Денисик, 2008; Кисельов та ін., 2023; Лаврик, 2011; *Природно-технічні системи. класифікація природно-технічних геосистем.*, б. д.; Яцентюк, 2015)

Обсяг геосистем є важливою ознакою під час їх вивчення. Але також необхідно враховувати не тільки об'єм, а й його конфігурацію, що також є вкрай важливим. Ю. Одум, В. Сочева, визначає такі цифри (Odum & Barrett, 2004; Sochava, 1975):

Макрогеохора = 7000 кв. км.  $h = 2$  км.

Топогеохора = 500 кв.км.  $h = 0.7$  км.

Мезогеохора = 9 кв. км.  $h = 0.2$  км.

Необхідно сказати, що наведені дані недостатньо обґрунтовані.

Аналогічна структура, але для ПТГС за Г.К. Бондариком який виокремлює кілька категорій (структурних рівнів) ПТГС:

1. Елементарний,
2. Локальний,

3. Регіональний,

4. Глобальний.

Елементарною слід вважати природно-технічну систему, компонентами якої є окрема споруда та сфера взаємодії геологічного середовища з цією спорудою.

Найвищою категорією є локальна ПТГС, яка формується і функціонує під впливом взаємодії комплексу споруд (місто, ГЕС, промисловий комплекс) з літосферою. Локальна ПТГС складається з елементарних структур, зв'язки між якими формують її структуру. Наступна категорія ПТГС - регіональна. Її підсистемними компонентами є локальні ПТГС, розташовані на території регіону, та природні геосистеми, в які "вмонтовані" локальні ПТГС. Подібна структура, але в більшому масштабі, характерна і для глобальної ПТГС. Слід зазначити, що категорія ПТГС визначається її структурою, а не територією, яку вона охоплює.

Елементарну ПТГС, що охоплює одну споруду і навколишнє природне середовище, можна розділити на підсистеми, кожна з яких складається з певної ділянки літосфери, атмосфери, гідросфери, біосфери і частини споруди, що взаємодіє з нею. Кількість підсистем буде відповідати кількості компонентів природного середовища, які взаємодіють зі спорудою.

Просторові межі ПТГС проходять по межах зони впливу технічної системи (ТС) на природне середовище, що взаємодіє з нею. Технічна система може мати різні види впливу: механічний (пов'язаний з ущільненням ґрунту), хімічний (забруднення викидами), порушення теплового і водного режиму ґрунту тощо. З цієї причини межа ТС буде знаходитися за межами максимальних меж зон впливу.

Період дії ПТГС не збігається з терміном експлуатації ТС. ПТГС починає своє життя з моменту проведення підготовчих робіт на будівельному майданчику. Після введення в експлуатацію до впливу на довкілля самої технічної системи (тиск споруди на ґрунт, трансформація ландшафту тощо) додаються продукти її експлуатації (викиди в атмосферу, гідросферу, забруднення літосфери відходами виробництва). Коли ТС виводиться з експлуатації, його вплив на довкілля зменшується, але не зникає. Вплив закінчується тоді, коли технічна система

ліквідована, а наслідки її експлуатації перестають існувати. Основними методами, що використовуються для вивчення ПТГС, є екосистемний аналіз, системний аналіз, моделювання та геоecологічний аналіз (Bondarik, 1986).

На основі викладеного можна спробувати описати ПТГС Дністровської ГАЕС (рис. 1.2).

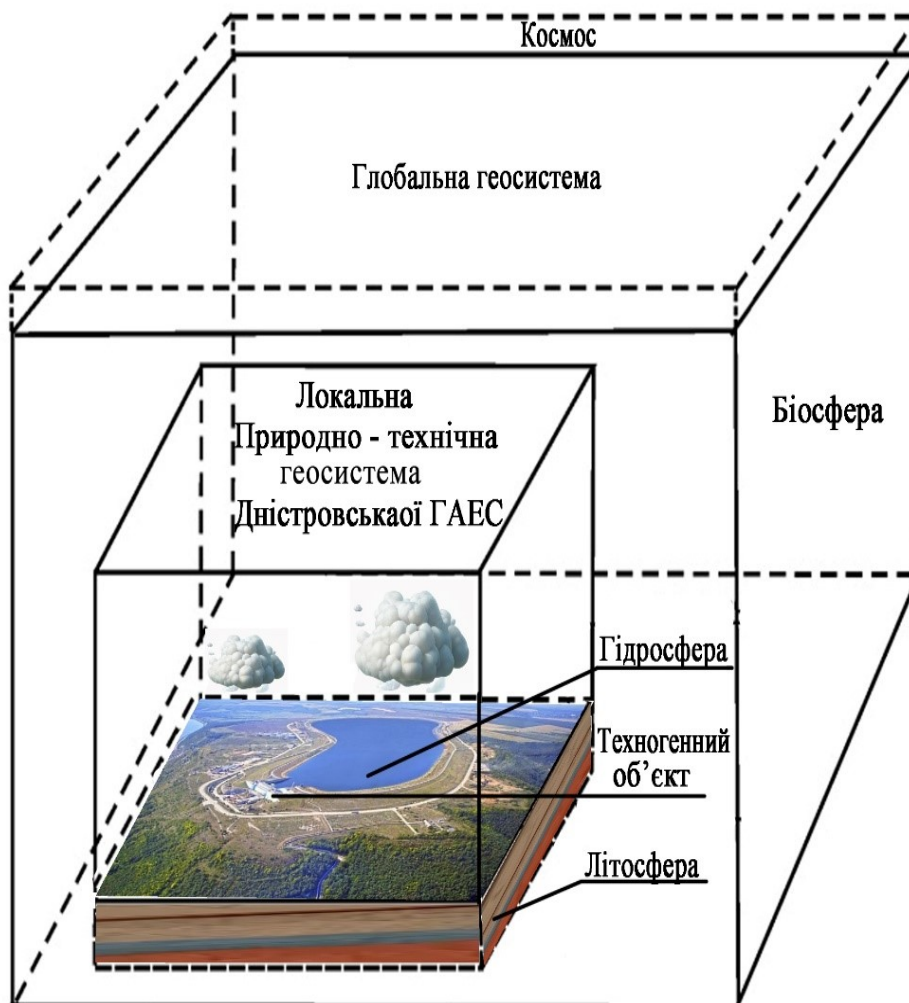


Рисунок 1.2 – Концептуальна схема ПТГС Дністровської ГАЕС  
(розроблено автором)

Прикладом ПТГС може слугувати гідровузол, у якому штучні об'єкти - гідротехнічні споруди та водосховище - взаємодіють між собою і з навколишнім їх середовищами літосфери, гідросфери, атмосфери, біосфери.

Взаємодія проявляється в різноманітних геологічних, гідрологічних, атмосферних і біологічних процесах. Компоненти природного середовища, що



взаємодіють зі штучними об'єктами, різні. Набір їх залежить від класу ПТГС. В деяких ПТГС зі штучними об'єктами активно взаємодіють межуючи з ними ділянки літосфери, атмосфери, біосфери (меліоративні системи), в інших - ділянки гідросфери (портові споруди) або літосфери (підземні споруди, котловани і кар'єри, експлуатаційні свердловини).

### 1.3. Природно - технічна системи ГАЕС.

Дністровська гідроакумулююча електростанція (ГАЕС) є частиною дністровського гідроенергетичного комплексу, розробленого в 70-х роках минулого століття, що включав такі гідроенергооб'єкти, як дві гідроелектростанції (ГЕС), атомну електростанцію (АЕС) і власне гідроакумулюючу електростанцію (ГАЕС). Через низку причин фахівці відмовилися від планів будівництва та включення АЕС до цього комплексу, внаслідок чого 1983 року було завершено тільки будівництво гідроелектростанцій (Дністровська ГЕС), (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Вид на Дністровську ГЕС

Джерело: (Учасники проєктів Вікімедіа, 2007)

Завданням Дністровської гідроакумулюючої електростанції (ГАЕС) є регулювання пікових навантажень в електричній мережі в такий спосіб: вода закачується з резервуара гідроелектростанції до резерва гідроакумулюючої

електростанції, який розташований на висоті 150 м (рис. 1.4). При цьому споживання електроенергії з мережі відбувається під час низьких робочих навантажень (тобто, в період низької потреби в електроенергії), а спуск води з резервуару через турбіни дає змогу давати електрику під час пікових (максимальних) навантажень (*Укргідроенерго - провідна гідрогенеруюча компанія в Україні | Укргідроенерго, б. д.*).



Рисунок 1.4 – Вид на Дністровську ГАЕС

Джерело: (Економічна правда, 2021)

Необхідність регулювання виробничих навантажень здебільшого визначається низькими маневровими якостями атомних електростанцій (тобто, їхньою здатністю регулювати свій режим виробництва електроенергії). Спочатку в Дністровський гідроенергетичний комплекс входила атомна електростанція, що і послужило причиною включення ГАЕС у цей комплекс.

Будівництво Дністровської ГАЕС розпочалося ще за радянських часів, і було призупинено через відсутність фінансування (Zyhar, Zayats & Zakrevskiy, 2023).

Наразі ситуація загострилася у зв'язку з переважанням частки атомних електростанцій в Україні: загальна кількість електроенергії, що виробляється атомними електростанціями, досягає 49%. Існує ціла низка серйозних технічних, економічних, енергетичних та екологічних проблем і ризиків, пов'язаних із цим

проектом. Це - геологічні, сейсмічні та гідрологічні ризики (*Дністровська гідроакумулююча електростанція, Україна - Bankwatch, 2023*).

Під час детального розгляду об'єкта в профілі (рис. 1.3) стає очевидним, що він складається з елементарних компонентів таких як:

- підземний комплекс елементарних компонентів,
- надземний комплекс елементарних компонентів,

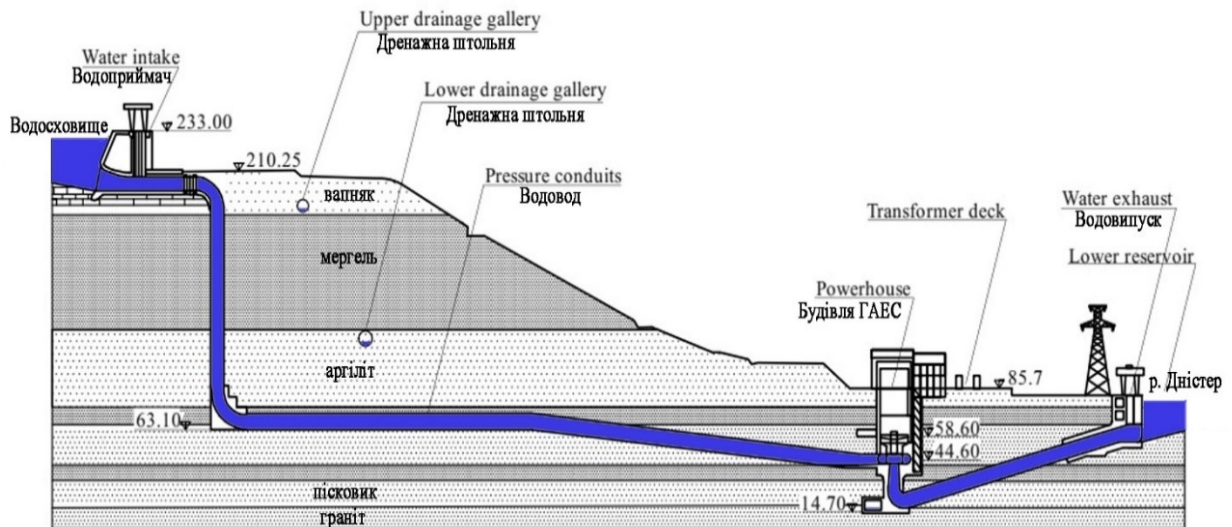


Рисунок 1.5 – Поздовжній профіль основних споруд Дністровської ГАЕС

Джерело: (Radkevych та ін., 2019)

До надземного комплексу елементарних компонентів належать:

- верхня водойма;
- водоприймач;
- будівля ГАЕС;
- водовипуск;
- нижня водойма (зрегульована частина р.Дністер).

До підземного комплексу елементарних компонентів належать:

- напірні підвідні водоводи;
- напірні відвідні водоводи;
- шахта гідроагрегатів;
- дренажні штольні.

Верхнє водосховище разом з водоприймачем (аванкамера), розташовано на плато 125 м вище від рівня р. Дністер і побудоване шляхом виїмки та насипу ґрунту

в екран дна і дамб обгородження висотою до 20 м. (рис. 1.6). Загальний об'єм водосховища 41,43 млн м<sup>3</sup>, площа дзеркала при НПР - 2,61 м<sup>2</sup> (Про затвердження Правил експлуатації водосховищ Дністровського комплексного гідровузла, 2022). Нижня водойма Дністровської ГАЕС (рис. 1.7), має загальний об'єм 58,10 млн м<sup>3</sup>, площа дзеркала при НПР - 7,30 м<sup>2</sup> (Про затвердження Правил експлуатації водосховищ Дністровського комплексного гідровузла, 2022).



Рисунок 1.6 – Вид на верхню водойму Дністровської ГАЕС

Джерело: (Укргідроенерго - провідна гідроенергуюча компанія в Україні |  
Укргідроенерго, 2023)



Рисунок 1.7 – Вид на нижню водойму Дністровської ГАЕС

Джерело: (Укргідроенерго - провідна гідроенергуюча компанія в Україні |  
Укргідроенерго, 2023)

Від верхньої водойми до агрегатних шахт будівлі ГАЕС, підходять 7 ниток напірних водоводів кожна нитка яких включає:

- вертикальна ділянка зі сталобетонним кріпленням заввишки близько 100 м, діаметром 7,5 м.
- горизонтальна ділянка діаметром 7,5 метрів, завдовжки близько 400 м., (рис. 1.8).

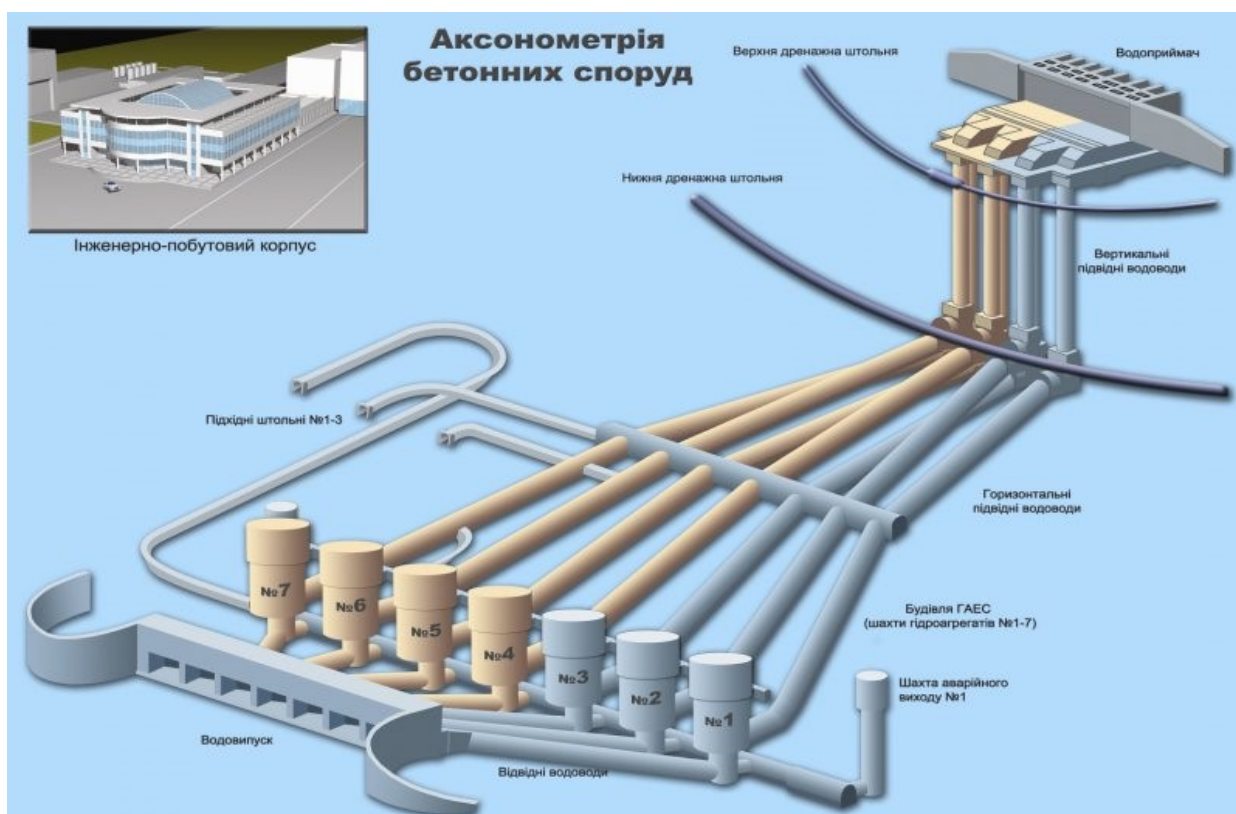


Рисунок 1.8 – Аксонометрія споруд підземного комплексу ГАЕС

Джерело: (Підземні споруди, 2023.)

Дренажна штольня верхнього ярусу довжиною 1500 м призначена для перехоплення води верхнього водоносного горизонту й запобігання виходу його на схили. Вона охоплює верхню водойму з боку схилу основних споруд ГАЕС і проходить на відмітці близько +188,000 м. Балтійської системи висот (БСв).

Дренажна штольня нижнього ярусу довжиною 2600 м охоплює верхню водойму з боку Дністровського, Сокирянського схилів і схилу основних споруд ГАЕС, призначена для перехоплення нижнього водоносного горизонту, і проходить на позначці близько +110,000 м. БСв.

З огляду на викладену інформацію, ми можемо перейти до систематизації та структуризації понять, пов'язаних із ПТГС Дністровської ГАЕС (Таблиця 1.2).

Цей етап необхідний для того, щоб забезпечити чітке та зрозуміле представлення ключових аспектів. Такий підхід дасть змогу не тільки впорядкувати зібрані дані, а й виокремити найважливіші елементи для детального аналізу та подальшої інтерпретації, сприяючи глибшому розумінню досліджуваної тематики.

Таблиця 1.2 – Структурна взаємодія елементів локальної ПТГС Дністровської ГАЕС

<b>Локальна ПТГС Дністровської ГАЕС</b>		
	<b>Елемент ПТГС</b>	<b>Взаємодія з середовищем</b>
<b>Надземний комплекс елементарних компонентів</b>	<b>Верхня водойма + Водоприймач</b>	Літосфера (геологічне середовище)
		Гідросфера (водні об'єкти)
	<b>Нижня водойма + Будівля ГАЕС та Водовипуск</b>	Літосфера (геологічне середовище)
		Гідросфера (водні об'єкти)
<b>Підземний комплекс елементарних компонентів</b>	<b>Напірні підвідні + напірні відвідні водоводи</b>	Літосфера (геологічне середовище)
		Гідросфера (водні об'єкти)
	<b>Дренажні штольні</b>	Літосфера (геологічне середовище)
		Гідросфера (водні об'єкти)
	<b>Шахти гідроагрегатів</b>	Літосфера (геологічне середовище)
		Гідросфера (водні об'єкти)

(розроблено автором)

На основі представленої таблиці (див. Таблиця 1.2), можна зробити висновок, що основна взаємодія Дністровської ГАЕС відбувається з літосферою і гідросферою. Цей факт підкреслює важливість і значущість взаємозв'язків між природними і техногенними компонентами в рамках геосистеми гідроелектростанції. Отже, основна увага в подальшій роботі буде зосереджена на аналізі впливу природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси в середовищі її функціонування. Особливу увагу буде приділено взаємодіям з літосферою та гідросферою, оскільки ці аспекти мають критичне значення для розуміння впливу ГАЕС на довкілля та забезпечення його сталого розвитку.

### **Висновки до розділу 1**

У географії розуміння об'єкта дослідження нерозривно пов'язане з авторською концепцією світу, яка визначає підхід до аналізу та інтерпретації геосистем. Це стосується і природно-техногенних геосистем, де для глибокого розуміння механізмів їх функціонування важливо використовувати комплексний підхід, що базується на сукупності знань, не обмежуючись однією теоретичною концепцією. Типологія систем, що використовується в географії, має кілька напрямків, зокрема виділяють функціональні та структурні типи систем. До функціональних типів належать ізольовані, закриті та відкриті системи, які відрізняються ступенем взаємодії з навколишнім середовищем та здатністю до обміну речовиною та енергією. Структурні типи систем, які описуються як морфологічні, каскадні, процес-реакція (процесорні), керовані, саморегульовані, також відображають різні аспекти структурної організації та взаємодії компонентів системи. Класифікація Девіда Харві додає ще один вимір, поділяючи системи на гомеостатичні, адаптивні, динамічні та керовані, кожна з яких має унікальні характеристики реагування на зовнішні впливи та здатність до самоорганізації. Така різноманітність класифікацій демонструє різноманітність підходів до вивчення геосистем і необхідність інтеграції різних наукових поглядів для всебічного аналізу та розуміння природних і штучних геосистем. Така інтеграція

дає можливість виявити і зрозуміти складні взаємозалежності та процеси, що відбуваються в ПТГС, забезпечуючи більш глибоке та об'єктивне розуміння їх функціонування та еволюції.

На основі різних інтерпретацій геосистем і відповідно природно-технічних геосистем, особливістю яких є прояв динаміки, що поділяється на стабілізуючу та перетворюючу. Розуміння цих двох видів динаміки є ключовим для дослідження та управління геосистемами, а також для перетворення природних геосистем на природно-технічні. Цілісність геосистем підтримується завдяки комплексу зав'язків, включно з другорядними, і дії різних потоків. Геосистеми розглядаються не як проста сума елементів, а як інтегроване утворення з емерджентністю, реплікацією і посиленням, характер яких може варіюватися. У вивченні геосистем критично важливим є визначення ключових елементів системи, оскільки від цього залежить розуміння її структури та функціонування. Згідно з представленою автором структурною взаємодією елементів ПТГС ключові системи взаємодіє є літосфера (геологічне середовище), та гідросфера (водне середовище).

Слід зауважити, що емерджентність у ПТГС підкреслює виникнення нових властивостей і якостей, які не притаманні окремим компонентам системи, а є результатом їхньої взаємодії, до прикладу - сейсмічна подія. Це ключовий момент у розумінні складності та унікальності природно – технічних геосистем. Реплікація та посилення в контексті ПТГС відображають здатність систем до самоорганізації та розвитку, де певні процеси та структури відтворюються або посилюються, роблячи свій внесок у динамічність та адаптивність системи – до прикладу здренованість ґрунту, консолідація, та деформація ґрунтів. Ці процеси можуть бути нелінійними та залежними від початкових умов, що додає пласт складності у вивчення геосистем.

Згадка про критичні та вторинні елементи підкреслює необхідність диференційованого підходу до аналізу геосистем. Питання полягає що вважати критичними елементами, як-от дамба або турбіни, які мають вирішальне значення для функціонування станції, чи штольні, шахти, штучні басейни. Звичайно



критичним елементом буде середовище функціонування. Розуміння, які елементи є ключовими (критичними) і як вони взаємодіють між собою і з менш значущими (вторинними) елементами, дає змогу глибше аналізувати і моделювати динаміку геосистем.

У цьому контексті, управління геосистемами вимагає комплексного підходу, що містить у собі як технологічні, так і екологічні аспекти, щоб забезпечити стійке і гармонійне співіснування природних і техногенних компонентів. Впровадження кібернетичних принципів в управління геосистемами.

## РОЗДІЛ 2

# ОПИС МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СЕРЕДОВИЩІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

### 2.1. Геодезичний моніторинг

Для підвищення надійності, довговічності, безпеки експлуатації споруд необхідна об'єктивна і точна інформація взаємодій конструкцій із ґрунтовою основою і зовнішнім середовищем.

Таке рішення є основою для успішного виконання концепцій з безпечної експлуатації технічних систем у сейсмонебезпечних умовах. Достовірна інформація геологічної вивченості на ділянці будівельного об'єкта, результати геодезичних спостережень, сприяють визначенню надійності загального стану цих споруд, вибору методів спостережень і дає змогу зробити об'єктивну оцінку гранично допустимих значень можливих деформацій.

Основною метою геодезичного моніторингу зі спостереження деформаційних процесів стану Дністровської ГАЕС є: - визначення абсолютних і відносних величин деформацій;

- виявлення причин виникнення і ступеня небезпеки деформацій;
- визначення характеристик стійкості основ і надійності фундаментів споруд;
- під час будівництва та експлуатації, а також зміни цих впливів;
- попередження можливих ризиків.

Під час розв'язання цих завдань за допомогою сучасних приладів та обладнання встановлюють розміри, типи та якість влаштування фундаментів, деформації споруд, а також стан і переміщення ґрунтів, а також під час розроблення мережі геомоніторингу беруть до уваги особливості споруд.

Місцезнаходження та кількість елементів спостережної мережі для кожного конкретного об'єкта можна розробити індивідуально. Визначення напружено-деформованого стану технічних елементів енергооб'єкта необхідне для забезпечення нормальної експлуатації системи в цілому.

Це вимагає від виконавців геодезичних спостережень, залежно від параметрів об'єкта, створення спеціального проєкту ведення геодезичних робіт. На підставі аналізу результатів вимірювань деформацій робиться технічний висновок про стан і прогноз розвитку виявлених деформацій, розробляються рекомендації щодо продовження моніторингу та геодезичних спостережень, або, навпаки, - щодо збільшення кількості циклів вимірювань деформацій і придатності їх до подальшої експлуатації.

Процедура моніторингу деформацій інженерних споруд містить в собі дві стадії:

1. Моніторинг деформації споруди за допомогою виконання серії вимірювань, виконаних протягом деякого часу з метою визначення змін геометричних параметрів (розмірів) цієї споруди в одних, двох або тривимірних розмірах відносно первісного як похідної від функції зміщення;

2. Моніторинг діючих навантажень і внутрішньої напруги, які можуть бути виміряні безпосередньо або отримані за допомогою спеціальних вимірювань.

Деформація інженерних споруд виникає внаслідок впливу природних і техногенних чинників, форми, розмірів і жорсткості фундаменту, розподілу навантажень усередині споруди. Деформації споруд можна розділити на повільні та швидкі. Повільні деформації відбуваються внаслідок постійних навантажень (власна маса споруди), теплового навантаження, стискаючого навантаження, тектонічної діяльності тощо. Швидкі деформації відбуваються, сейсмічного впливу або навантаження від аварійних ситуацій пов'язаних з технічною експлуатацією споруди. Ці два типи можуть бути визначені відстанню або точками переміщення (зсуву), кутовими переміщеннями (обертання) і напруженими стресовими умовами. Різниця координат і різниця спостережень циклів вимірювань - два основних методи, що використовуються для визначення деформації інженерних споруд за геодезичними даними. Метод різниці координат рекомендується для більшості випадків, у яких потрібен довгостроковий періодичний моніторинг.

Метод різниці в спостереженнях використовується в основному для короткострокового моніторингу проектів або як швидка перевірка вихідних даних в міру їх збирання.

Під час вивчення деформацій споруд геодезичними методами виникає необхідність призначення або розрахунку точності вимірювань. Важливість цього питання безсумнівна, тому що від його розв'язання залежить вибір методу і засобів вимірювань, витрати трудових і матеріальних ресурсів і, що найважливіше, - правдивість одержуваних результатів.

У нормативних документах вимоги до точності визначення осідань або горизонтальних зсувів характеризуються величинами середніх квадратичних помилок (СКП) (Мельник, 2022) для будівель і споруд, які зводяться на ґрунтах. Вибір методу визначення величин деформацій залежить, в основному, від виду споруд і наявного геодезичного обладнання. Деформація інженерних споруд визначається як геодезичними, так і негеодезичними методами.

За результатами вимірювань, що виконуються негеодезичними методами, такими як індикатори годинникового типу, рівнеміри, датчики рівня, тензометри тощо, отримують величини так званих відносних осадок.

Прилади для таких вимірювань встановлюють безпосередньо на самій споруді або всередині неї з таким розрахунком, щоб вони переміщалися разом зі спорудами. За допомогою геодезичних методів знаходять абсолютні величини деформацій споруд щодо знаків, установлених на певній відстані від споруд, які приймаються практично за нерухомі. Для вимірювань деформацій інженерних споруд може бути використане різне обладнання: оптичні та цифрові нівеліри, теодоліти, електронні тахеометри, GPS, лазерні сканери, датчики кутів нахилу та інші. Усі результати вимірювань деформацій споруд, отримані за допомогою різних методів, синхронізують за часовими мітками та систематизують у вигляді графіків для подальшого опрацювання й оцінювання.

Спостереження на об'єктах Дністровської ГАЕС ведуться за допомогою геодезичної контрольно-вимірювальної апаратури (КВА), що, залежно від призначення, встановлюється в основі, тілі дамби й на прилеглий території.

Склад та обсяг проведених спостережень залежать від класу капітальності станції, її конструкції, а також інженерно-геологічних умов основи. Дані натурних спостережень дозволяють порівняти фактичний стан ГАЕС із проєктним в ході будівництва й контролювати всі зміни в процесі експлуатації, тобто діагностувати споруди в різні періоди їхнього існування.

Контрольно вимірювальна апаратура поділяється на висотну і планову мережу. Висотна геодезична мережа (рис. 2.1) Дністровської ГАЕС складеться з:

- поверхнева марка, основа марки закладається в шурф глибиною 0,5 м, нижче глибини сезонного промерзання ґрунту;
- бокова марка, встановлюється в стінах споруд, стоянах;
- глибинна марка. Закладається в корінні породи на значну глибину 20-30м;
- фундаментальний репер, закладається в корінні породи на значну глибину 20-30м.

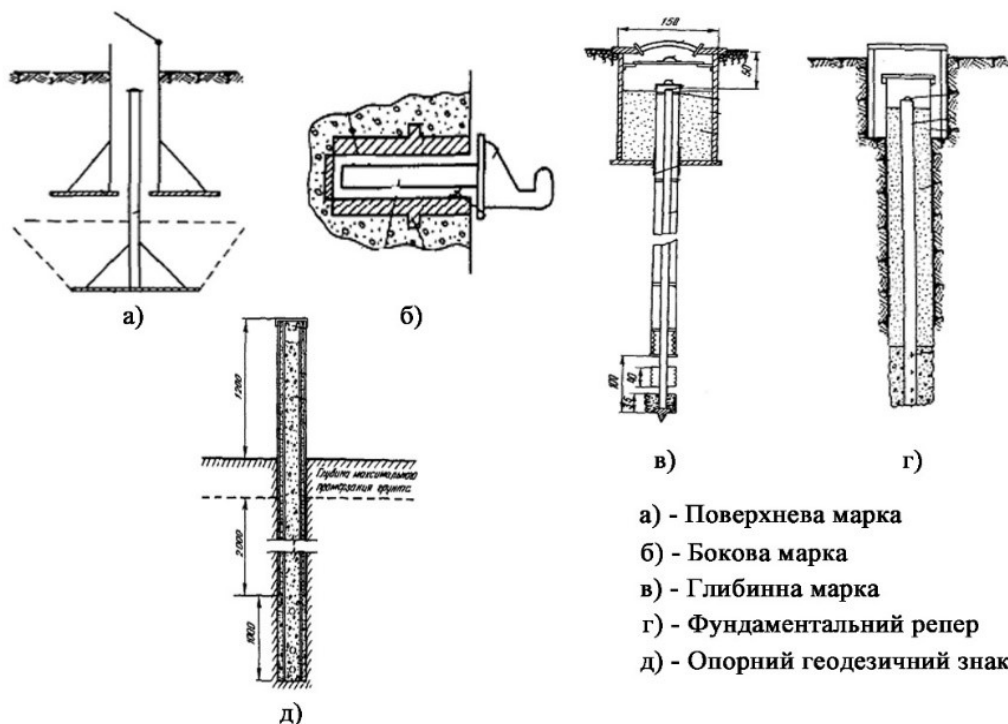


Рисунок 2.1 – Типова схема будови геодезичної КВА.

*(розроблено автором)*

Планова геодезична мережа Дністровської ГАЕС складається з :

- Опорний геодезичний знак, використовується для закріплення лінійно-кутової мережі та спостережень ГНСС.

Контроль вертикальних (висотних) зміщень контрольно-висотної апаратури здійснюється з використанням методу геометричного нівелювання за програмою першого класу (Островський та ін., 2012), що забезпечує високу точність і надійність одержуваних даних.



Рисунок 2.2 – Опорний геодезичний знак GNSS планових зміщень геодезичної КВА.

*Джерело: (Моніторинг ГЕС та АЕС | geoterrace, 2023.)*

Схему розміщення геодезичної КВА (див. додаток Б).

## 2.2. Гідрогеологічний моніторинг

Для вимірювання рівня ґрунтових вод ручному режимі  $W_p$  зазвичай використовують п'єзометри. П'єзометр (рис. 2.3) - це трубка, розміщена в ґрунті на глибині нижче рівня ґрунтових вод, яка виходить на поверхню ґрунту і відкрита до атмосфери. Дно п'єзометра перфороване, щоб ґрунтова вода під позитивним гідростатичним тиском могла потрапляти в трубку. Вода потрапляє в трубку і піднімається на висоту, що дорівнює висоті безнапірного рівня ґрунтових вод.

Висота безнапірного рівня ґрунтових вод вимірюється відносно поверхні ґрунту за допомогою сталеві стрічки з хлопавкою або іншим електричним пристроєм, який вказує на глибину залягання ґрунтових вод (див. додаток Б).

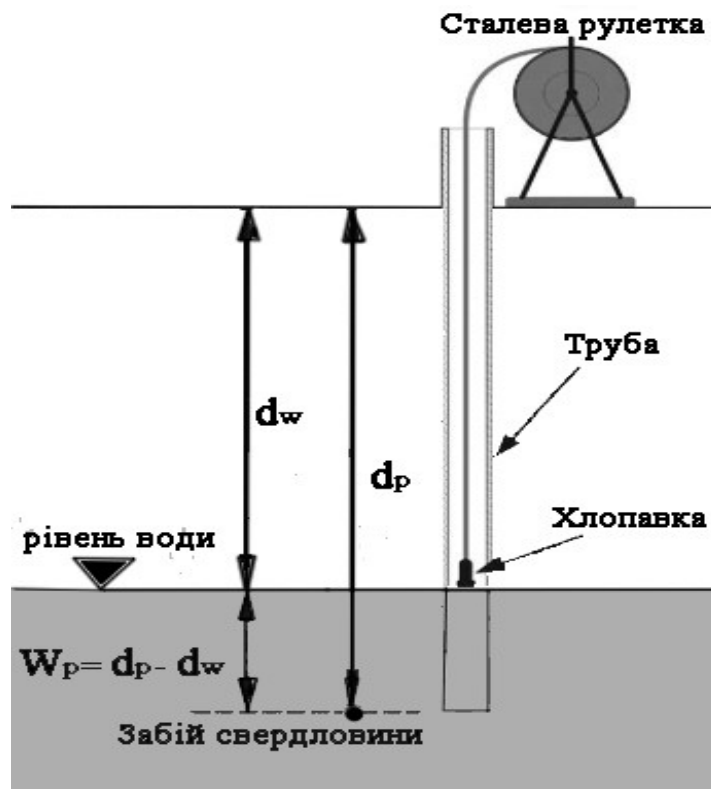


Рисунок 2.3 – Принцип роботи опускного п'єзометра.

*(розроблено автором)*

Значення потенціалу тиску, виражене як енергія на вагу, є просто вертикальною відстанню від точки, що нас цікавить, до поверхні вільного рівня ґрунтових вод. Потенціал тиску над поверхнею ґрунтових вод завжди дорівнює нулю. Гідрогеологічні дослідження у складі інженерно-геологічних вишукувань виконуються для виявлення взаємодії об'єкта, що проєктується, з геологічним середовищем, визначення залягання підземних вод, їхніх властивостей і стану, прогнозу процесу підтоплення, вивчення впливу підземних вод на інтенсивність розвитку геологічних та інженерно-геологічних процесів (карст, суфозія, зсуви, зсув, та ін.), зміни властивостей ґрунтів під впливом підземних вод (Паланичко, 2023; Зигар, 2024с). На етапі проєктування необхідно вивчити гідрогеологічні умови на майданчику будівництва. Вплив підземних вод може бути настільки значущим, що докорінно змінить проєкт будівлі або споруди. Недооцінка або невірний прогноз такого впливу можуть призвести до плачевних результатів: затоплення підземної частини будівлі, руйнування частини фундаменту і втрати будівлі цілком, у зв'язку з неможливістю її експлуатації.



Методи визначення гідрогеологічних параметрів ґрунтів і водоносних горизонтів встановлюють, зважаючи на умови їхньої застосовності, з урахуванням стадії розроблення документації, характеру і рівня відповідальності проєктованих будівель і споруд, а також складності гідрогеологічних умов. Необхідно визначати агресивність підземних вод для вибору матеріалів, використовуваних під час будівництва (бетону, арматури, трубопроводів і газопроводів). Через свій хімічний склад вода може більше або менше впливати на руйнування тих чи інших типів матеріалів. Правильні рішення при виборі матеріалів забезпечують довговічність споруди. гідрогеологічне вишукування інженерний Дослідно-фільтраційні роботи на майданчику будівництва виконуються з метою отримання гідрогеологічних параметрів і характеристик для розрахунку дренажів, водознижувальних систем, протифільтраційних завіс, водоприпливу в будівельні котловани, колектори, тунелі, фільтраційних витоків із водосховищ і накопичувачів, а також для складання прогнозу зміни гідрогеологічних умов.

У разі виявлення горизонтів підземних вод свердловинним методом проводять дослідне відкачування для з'ясування напрямку руху підземних вод і змін їхнього рівня в точках спостереження в різні або певні проміжки часу. Паралельно вивченню підземних вод виникає необхідність захисту від них, і в цьому випадку основну роль відіграють дренажні системи. Особливо вони важливі під час планування та організації будівельних робіт, коли результати гідрогеологічної розвідки території, що їм передуює, вказують на необхідність застосування дренажу. Основним завданням дренажної системи є безперервне зниження рівня підземних вод до прийняттого показника для запобігання негативного впливу вологи на підземні частини споруд, зокрема, фундаменти. Щоб уникнути підтоплення будівель, рівень підземних вод має бути нижчим за основу споруди не менше ніж на пів метра, оптимальною ж величиною буде 1 метр. Однак для великих будівель глибина підземних вод від основи будови має бути не менше 3-4 метрів для більш високого рівня захисту від руйнівного впливу вологи. Виходячи з масштабів будівництва і показань розвідки, власне, і проводяться гідрогеологічні розрахунки

найбільш оптимального розташування дренажних систем щодо поземних вод. Під час проектування особливо складних об'єктів виконується моделювання, спеціальні гідрогеологічні роботи та дослідження. Дослідно-експлуатаційні відкачування виконуються для встановлення закономірностей зміни рівня і хімічного складу підземних вод у складних гідрогеологічних умовах.

Дослідно - виробничі водопониження - для обґрунтування розроблення проекту водозниження (постійного або тимчасового). Зводяться споруди і проводяться випробування дослідної ділянки дренажу. Також вивчають процеси соле- і вологопереносу в зоні аерації, сезонного промерзання і обдимання ґрунтів, водний і сольовий баланс підземних вод. Серед небезпечних геологічних процесів трапляються карст, зсуви ґрунту, обвали, соліфлюкція, селі, кам'яні глетчери, геодинамічні та кріогенні процеси, переробка берегів річок, озер, морів і водосховищ, вивітрювання порід. Щоб вивчити динаміку розвитку небезпечних геологічних процесів, ведуться стаціонарні спостереження. стаціонарні спостереження виконуються для прогнозу підтоплення, контролю за деформацією підроблених територій, осіданням і просіданням території, зокрема внаслідок сейсмічної активності, визначення стану і властивостей ґрунтів, рівневого, температурного та гідрохімічного режимів підземних вод, глибин сезонного промерзання та танення ґрунтів, вивчення опади, набрякання й інших змін стану ґрунтів підстави фундаментів будинків та інших будівель, а також для визначення їхніх характеристик. Стаціонарні спостереження проводять у складних інженерно-геологічних умовах для відповідальних споруд, розпочинаючи їх під час вишукувань для передпроектної документації або проекту та продовжуючи під час подальших вишукувань. Якщо можливий розвиток небезпечних геологічних та інженерно-геологічних процесів, спостереження продовжують у процесі будівництва та експлуатації об'єктів (локальний моніторинг компонентів геологічного середовища). Під час стаціонарних спостережень забезпечується одержання кількісних характеристик зміни окремих компонентів геологічного середовища в часі та в просторі, які мають бути достатніми для оцінювання та

прогнозування можливих змін інженерно-геологічних умов досліджуваної території, вибору проектних рішень та обґрунтування захисних заходів і споруд. Стаціонарні спостереження проводять на спеціально обладнаних пунктах спостережної мережі, частину з яких рекомендується використовувати для спостережень після завершення будівництва об'єкта. Як найефективніші засоби проведення стаціонарних спостережень використовують режимні геофізичні дослідження - вимірювання, які проводять періодично в одних і тих самих точках або за одними і тими самими профілями, вимірювання із закріпленими датчиками і приймачами, а також режимні спостереження на спеціально обладнаних гідрогеологічних свердловинах. Склад спостережень (види, розміщення пунктів спостережної мережі), обсяги робіт (кількість пунктів, періодичність і тривалість спостережень), методи проведення стаціонарних спостережень (візуальні та інструментальні), точність вимірів обґрунтовують у програмі вишукувань залежно від природних і техногенних умов, розміру досліджуваної території, рівнів відповідальності будівель та споруд і етапу (стадії) проектування. За наявності спостережної мережі, створеної на попередніх етапах вишукувань, використовується вона ж і за необхідності здійснюється її розвиток, уточнюється частота спостережень, точність вимірювань та інші параметри відповідно до результатів вимірювань, отриманих у процесі функціонування мережі. Тривалість спостережень обирають не менше одного гідрологічного року або сезону прояву процесу, а частота спостережень забезпечується реєстрацією екстремальних (максимальних і мінімальних) значень зміни компонентів геологічного середовища за період спостережень.

Схема розміщення фільтраційної КВА, (див. додаток В).

### **2.3. Сейсмічний моніторинг.**

В рамках Програми моніторингу за станом геологічного середовища в зоні основних споруд каскаду Дністровських ГЕС - ГАЕС та Договору №1 від

01.09.2020 р. на околиці с. Ломачинці в орендованому приміщенні продовжує функціонувати тимчасова сейсмічна станція “Ломачинці”.

На станції “Ломачинці” в якості основного модуля використаний цифровий автоматичний сейсмограф DAS-05. Цифровий автоматичний сейсмограф DAS-05 забезпечує реєстрацію параметрів коливань за ортогональними координатами N-S, E-W і Z в динамічному діапазоні до 140 дБ та синхронізацію вступів сейсмічних хвиль з еталонним часом.

В (Таблиця 2.1) наведено дані про апаратуру, якою обладнана сейсмічна станція “Ломачинці” та її координати.

Таблиця 2.1 – Параметри сейсмопункту NDNU

Код станції	Назва станції	Координати		Н, км	Апаратура	Давачі
		$\phi^{\circ}\text{N}$	$\lambda^{\circ}\text{E}$			
NDNU	Ломачинці	48.5947	27.3664	242	DAS-05	СМ-ЗКВ

*Джерело:* (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

Апаратура обладнана системою гарантованого живлення з автоматичним перемиканням (електромережа 220 В – акумуляторні батареї 12-24 В (Вербицький & Вербицький, 2005; Вербицький, Кендзера та ін., б. д.).

#### 2.4. Геотехнічний моніторинг.

Це дослідження демонструє унікальність підходу, що полягає в застосуванні безпосередніх та польових інструментальних методів для вивчення природно-технічних геосистем, що дає змогу забезпечити неперевершену точність і глибину аналізу. Геодезичний моніторинг, деталізоване спостереження за фільтраційним режимом, а також застосування інклінометричних, ексцензометричних і сейсмологічних методик у синергії з автоматизованими системами контролю, розкривають нові горизонти для розуміння складних взаємодій всередині середовищ геосистеми. Ці методи не тільки дають змогу провести детальну діагностику стану геосистем, а й формують підґрунтя для комплексного розуміння механізмів їхнього функціонування та взаємодії з навколишнім природним середовищем. Інструментальні дослідження, проведені в рамках цієї роботи, не

обмежуються поверхневим зондуванням, а прагнуть до проникнення в глибинні процеси, що керують динамікою і стабільністю геосистем.

У сфері дистанційних методів дослідження використовується передова система моніторингу, яка базується на мережі елементарних датчиків, інтегрованих для забезпечення комплексного збору даних. В рамках неперервної експлуатації активно функціонує система автоматизованого контролю, відома як «АСК ГТС», яка представляє собою втілення передових технологій в області нагляду за гідротехнічними спорудами.

Переходячи від загального розгляду системи моніторингу до її елементарної одиниці – датчик. Датчик - це складний пристрій, основною функціональною частиною якого є перетворювач фізичних величин заводського виготовлення. Він перетворює значення контрольованого показника (переміщення, деформації, напруги та ін.), в зручну для передачі форму у вигляді електричних чи інших сигналів-характеристик. Перетворювач може бути встановлений на поверхні або в масиві. Сигнали датчика, які в умовній формі відображають контрольований показник, зазвичай передаються по кабельній чи іншій лінії зв'язку на доступний пункт, де відбувається вимірювання і фіксація показань за допомогою вимірювальних приладів. Далі, умовні значення показань знову перетворюються, із використанням відповідних формул чи калібрувальних залежностей, у значення основного контрольованого показника.

Здебільшого датчик є поодинокими: точковими або одновісними. Але бувають двовісні чи тривісні пристрої.

Треба розуміти, що поняття "Датчик" застосовується в двох значеннях:

1. В значенні одиниці обладнання, що поставляється відповідною фірмою із додаванням відповідної технічної документації, а також, при необхідності, різних комплектуючих.
2. В значенні "функціонуючий дистанційний пристрій КВА", який встановлений в контрольній точці згідно із технічними вимогами,

підключений до кабельної лінії, введений в дію і видає відповідну інформацію.

Давач-перетворювач, як одиниця обладнання, в загальному випадку включає три основні конструктивні і функціональні частини:

3. Корпус із порожниною.
4. Первинний перетворювальний елемент ППЕ (струнного чи іншого типу).
5. Кабельний вивід.

Крім того, залежно від типу і призначення давачів, до їх складу входять деякі додаткові індивідуальні компоненти. Наприклад, у конструкції давача для контролю загальних макродеформацій присутня рухома механічна частина.

Призначення корпусу - бути основою (опорою) і захистом для точних і вразливих деталей перетворювального елемента. В ряді випадків корпус працює разом із перетворювальним елементом.

Перетворювальний елемент призначений для перетворення контрольованої фізичної величини в електричний сигнал. Найширше застосовуються такі перетворювальні елементи:

1. Струнно-індукційного (вібраційного) типу;
2. Резистивні;
3. Індукційні;

По типу з'єднання із спорудою давачі діляться на групи:

1. Давачі відкритого типу, які установлені на поверхні конструкцій і до них є доступ в період експлуатації;
2. Давачі закритого типу, які установлені в масиві конструкцій і до них відсутній доступ в період експлуатації.

Опис та вигляд давачів відображено (додаток Г). Схема розміщення КВА (рис. 2.4).

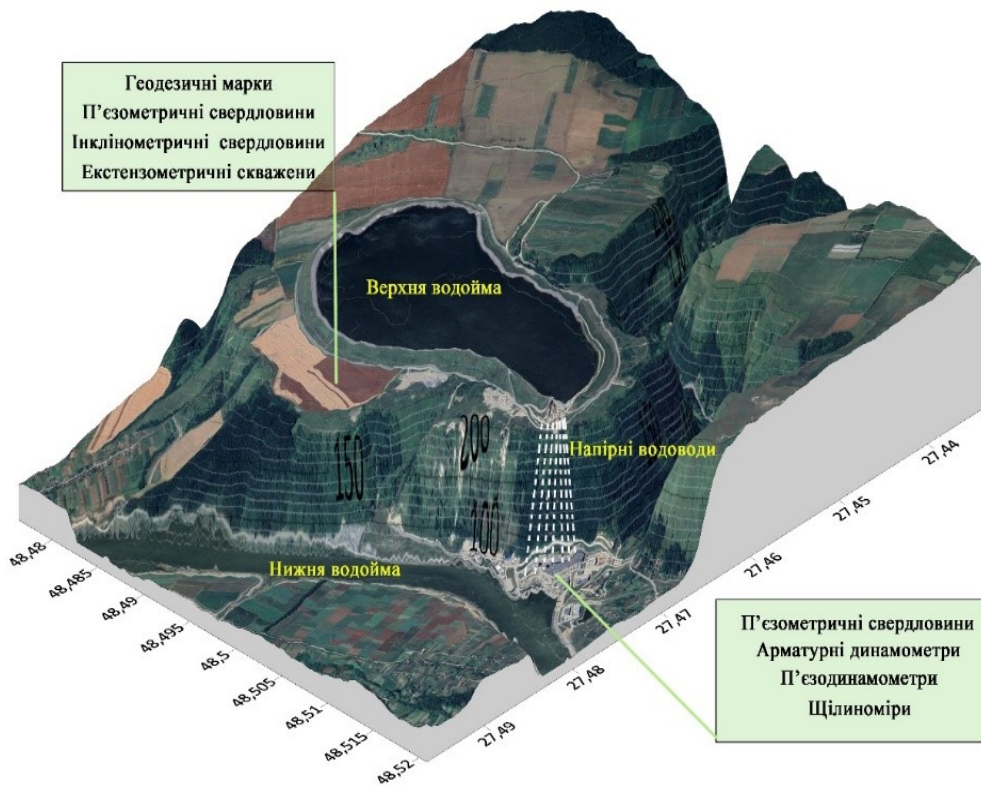


Рисунок 2.4 – Схема розміщення КВА Дністровської ГАЕС  
(розроблено автором)

Невід'ємною частиною автоматизованої системи контролю є програмна частина - спеціальне програмне забезпечення «Титан» (рис. 2.5).

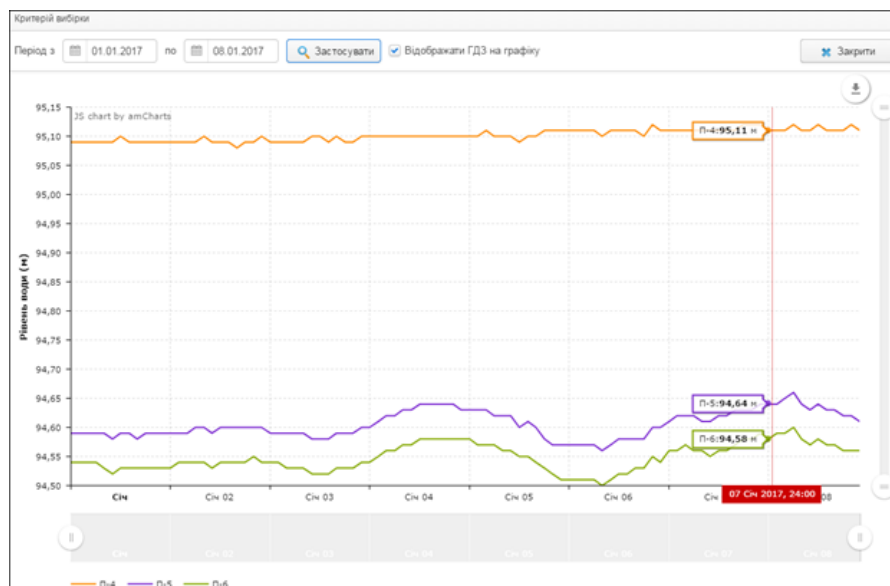


Рисунок 2.5 – Вікно інтерфейсу ПЗ «Титан»  
(Zyhar, 2022)

АСК ГТС вирішує наступні задачі:

1. Автоматичне вимірювання та реєстрація фізичних величин, які характеризують стан споруд:

- розміри температурних швів залізобетонних конструкцій;
- нахил опорних конструкцій відносно горизонтальної площини;
- напруженість матеріалів опорних конструкцій та основ;
- зміщення споруд відносно реперних (опорних) точок;
- зміщення горизонтальних площин одна відносно одної;
- деформації конструкцій та основ бетонних споруд.

2. Автоматичне вимірювання та реєстрація природних та техногенних параметрів, що впливають на стан споруд:

- рівень та температура ґрунтових вод;
- рівень та температура води в річці (каналі);
- кількість води, яка протікає через дренажні канали споруд;
- тиск води на рівні фундаменту споруди;
- кількість опадів;
- атмосферний тиск;
- температура та вологість повітря;
- сила та напрямок вітру.

Виконується автоматичне порівняння показників датчиків з гранично допустимими значеннями та сигналізація про перевищення вказаних меж значень.

АСК ГТС «Титан» має рівневу ієрархічну структуру:

1. перший рівень – датчі;
2. другий рівень – мультиплексори;
3. третій рівень – локальні концентратори даних;
4. четвертий рівень – центральний вузол обробки даних.

Перший рівень забезпечує отримання інформації про стан об'єкта у вигляді аналогових сигналів. Охоплює залізобетонні споруди, металеві конструкції та ґрунтові греблі. На об'єкті, у відповідності з моделлю найбільш вразливих місць, встановлюються електричні датчі.



Другий рівень забезпечує мультиплексування аналогових сигналів контрольно-вимірювальної апаратури на локальні концентратори даних.

Третій рівень забезпечує збереження показників контрольно-вимірювальної апаратури в пам'яті локальних концентраторів даних з наступною їх передачею на центральний вузол обробки даних.

Четвертий рівень забезпечує збір та збереження даних від локальних концентраторів з їх наступною обробкою.

Кожен станційний рівень обладнано автоматизованими робочими місцями на базі сучасних комп'ютерних систем, на яких встановлюється необхідне програмне забезпечення та, безпосередньо, виконується робота з ПЗ «Титан».

## **Висновки до розділу 2**

У процесі моніторингу природно-технічних геосистем Дністровської ГАЕС, що реалізується через систематичні геодезичні та геотехнічні спостереження, виявляються як значні переваги, так і певні обмеження. З одного боку, систематичний моніторинг дає змогу виявляти найменші зміни в структурі та стані гідротехнічних споруд, що є критично важливим для раннього виявлення потенційних загроз і запобігання аварійним ситуаціям. Використання сучасних інструментальних методів, як-от інклінометрія, екстензометрія та сейсмологія, у поєднанні з автоматизованими системами контролю, забезпечує високу точність даних, що сприяє об'єктивному та всебічному аналізу поточного стану об'єктів. З іншого боку, головним недоліком моніторингу є його залежність від якості та точності вимірювального обладнання, а також від професійності та кваліфікації операторів, які здійснюють спостереження та обробку даних. Неправильне калібрування приладів або помилки в інтерпретації результатів можуть призвести до хибних висновків, що, своєю чергою, може стати причиною недооцінки ризиків. До того ж висока вартість сучасного обладнання та необхідність його регулярного оновлення і технічного обслуговування збільшують експлуатаційні витрати, що може обмежувати можливості для проведення більш широкомасштабних або частих досліджень. Таким чином, незважаючи на очевидні переваги

систематичного моніторингу для забезпечення безпеки та стійкості функціонування гідроенергетичних об'єктів, необхідно також враховувати й наявні обмеження, розробляючи заходи щодо їх мінімізації та підвищення загальної ефективності моніторингових систем.

## РОЗДІЛ 3

### ВИВЧЕНІСТЬ ВХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

#### 3.1. Будова геологічного середовища Дністровської ГАЕС

Виходячи з особливостей геологічної будови (літологічного складу порід, структурно-тектонічних умов їх залягання), а також історії геологічного розвитку району, що складають його розріз, геологічні утворення підрозділяються на наступні три структурні поверхи (комплексу): - архейський (кристалічний (гранітний) фундамент; - верхнедокембрійський (верхнепротерозойський) складений метаморфічними породами (перешарування пачок алевролітів, аргілітів і піщаників (різної потужності); - мезокайнозойський, складений осадовими утвореннями крейди, неогену й четвертинними відкладеннями різного генезису й потужності.

Архейські граніти AR<sub>1</sub> нижнього структурного поверху залягають на глибині близько 80 м нижче уріза р. Дністра в створі ГАЕС, вище за течією ріки в районі Дністровської ГЕС виходять на поверхню в руслі. Вони представлені розовато-сірими біотит - плагіоклазовими різницями з малопотужними лінзами гнейсів і мігматитів, інтенсивно дислоковані, з поверхні вивітрілі, покрівля їх сильно розмита. Кристалічний фундамент має разламно-блокова будова.

Відкладення нижнього структурного поверху перекриті теригеними утвореннями верхнього протерозою (V<sub>2</sub>). В складі цього комплексу послідовно виділяються 12 шарів, об'єднаних в чотири світи, а останні - в дві серії, відповідно до зі стратиграфічною схемою (див. рис. 3.5). Загальна потужність відкладань цього структурного поверху становить близько 140 м. В товщі аргілітів і алевролітів (V<sub>2</sub>), в інтервалі абс. відміток 60-20 м (зиньковецькі, броницькі, бернашовські та лядовські шари), міститься більш 20 витриманих прошарків високодисперсних глин потужністю від 1-2 до 20 см, що мають згодне залягання з вміщуваними породами і утворені з вулканічного попелу, видозміненого на стадії епігенеза ("бентонітові глини"), (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Керн геологічного шару  $V_{2cs}$  (пісковики сокілецькі)  
(розроблено автором)

З поверхні, у межах зони гіпергенеза, товща ( $V_2$ ) розвантажена, в різному ступені змінена процесами фізико-хімічного вивітрювання (виділяються 3 зони збереження (I - інтенсивного вивітрювання, II - підвищеної тріщинуватості, III – дещо збережених порід), (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Керн геологічного шару  $V_{2br}$  (аргіліти барнашівські)  
(розроблено автором)

Верхній мезокайнозойський комплекс залягає вище абсолютних відміток 126-130 м на різній поверхні верхнього докембрію. Нижню частину розрізу складає товща кремністих верхньокрейдяних порід сеноманського ярусу ( $K_{2c}$ ), що складається з трьох пачок:

– нижньої (потужністю близько 30 м) - кременисті стягнення халцедонового складу розміром від декількох до 10-15 см, у піщано-глауконітовому, а в самій підшві – з мергелістим заповнювачем, до 70- 80%;

– середньої (потужність 15-20 м), що відрізняється надзвичайно великою мінливістю навіть у межах такої невеликої ділянки, як розглянута, складена (знизу нагору): піщаними вапняками - вапняковий пісковик; мергелем або крейдоподібним вапняком кременистими стягненнями до 20%; мергелем з кременистими стягненнями до 40%; вище органічним вапняком з кременистими стягненнями;

– верхньої (потужність 5-10 м) близька по літології нижній пачці; у її низах глинистий заповнювач 20-45% (легка глина, опоковидна), у верхній частині - піщаний (пісок мілкий, глинистий).

Неогенові відкладення мають широке поширення в межах верхніх частин схилів, залягаючи на абс. відмітках вище 190 м в північній і 170 м - в південній частинах району. Загальна потужність відкладів від 30 - 40 м в присхиловій частині та до 80-100 м - на вододільному плато.

Неоген представлений теригенно - морських відкладів тортонського і сарматського ярусів і товщею алювію пліоценових терас р. Дністер, що залягають зі стратиграфічною незгодою. Тортон  $N_{1t}$  (потужність 6 - 8 м) складений кварцовими пісками, у нижній частині відсортованими, у верхній – слабо глинистими. В складі сармата  $N_{1s}$  виділяються нижній і середній під 'яруси.

Нижній сармат  $N_{1s_1}$  (потужність 15 - 22 м) - оолітові вапняки, місцями з прошарками вапнякових (мергелистих) глин невеликої потужності (звичайно від 0,1-2 м до 5 м), перетворені на стадії епігенеза (часткова доломітизація, перекристалізація, ділянками окремнення), (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Керн геологічного шару  $N_1S_1$  (вапняк оолітовий)  
(розроблено автором)

Середній сармат  $N_1S_2$  (потужність 17-40 м) - глини важкі, жирні, набухаючи, в покрівлі опіщанені, місцями сильно деформовані (рис. 3.4).

Пліоценові алювіальні відкладення  $aN$  складають присхилову частину вододільного плато у вигляді звивистої смуги шириною до 1 - 1,5 км. У межах району встановлене, як мінімум, чотири терасованих рівня з висотою поверхні над меженням урізом р. Дністра відповідно 135 - 140 м, 145 - 155 м, 160 - 170 м і 170 - 180 м. На ділянці ГАЕС прослідковується єдиний акумулятивний цикл в інтервалі абс. відміток 212 - 225 м (висота 145 - 156 м). Розріз досить чітко диференціюється на фації: у нижній частині - піски мілкі і середньої крупності, кварцові, добре промиті руслової фації (потужність 5 - 7 м), підстилаються пісками грубозернистими і гравелистими фації розмиву (потужність 2 - 7 м); у верхній частині - зв'язні породи (глини й суглинки) фації старичної, можливо, і заплавної, досить мінливої потужності (до 3 - 5 м) і поширення. Загальна потужність світи 8 - 15 м.



Рисунок 3.4 – Керн геологічного шару з глибини 35 – 37 м  
(прошарки бентонітових глин)  
(розроблено автором)

Четвертинні відкладення поширені майже повсюдно, але більш значну потужність мають у нижній частині схилів, і на вододілах. Вони представлені алювіальними, делювіальними і еолово - делювіальними (лесоподібними), зсувними, а також що мають обмежений розвиток делювіально - пролювіальним і алювіально-пролювіальними відкладами.

Алювіальні відкладення широко розвинені в долині р. Дністра і його притоків, складаючи розріз заплави і 6 надзаплавних терас ділянок меандрових вузлів каньйоної частини долини. Характерною рисою терас є цокольна будова (за винятком заплави), диференціація на фації при загальному двошаровому їх складанні. Нижня частина розрізу (20 - 40% потужності) представлена піщано-гравелистими відкладами, верхня, потужністю 12 - 20 м - зв'язними породами (суглинки, супіски, глини).

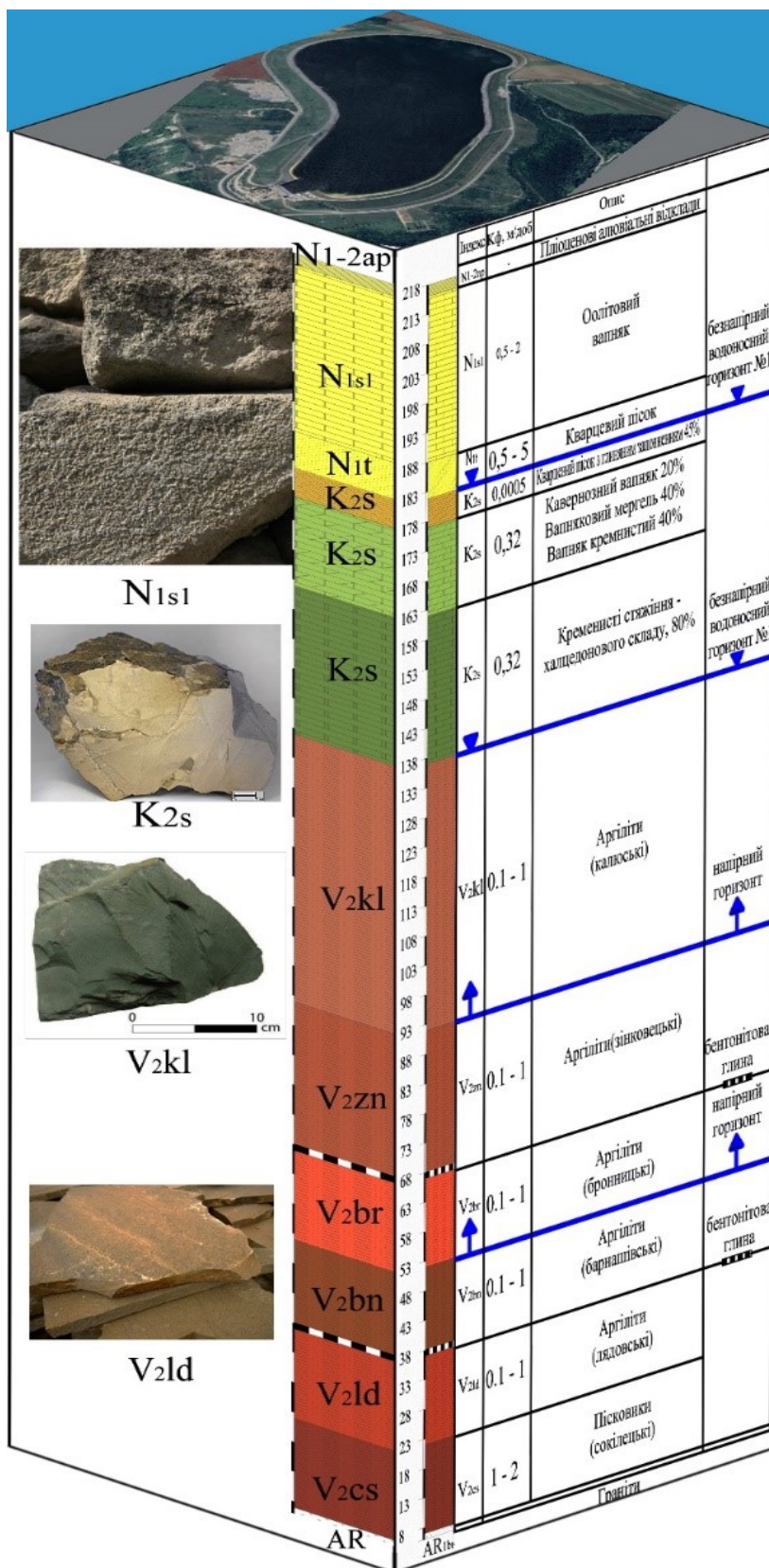


Рисунок 3.5 – Стратиграфічна схема

Складено за даними: (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020.)



Загальна потужність алювію коливається в більших межах, залежить від гідрологічного й неотектонічного режимів конкретних ділянок ріки, досягаючи 20 м і більш (надзаплавні тераси) і 10 - 15 м (заплава). Делювіальні відкладання у вигляді суцільного чохла розвинені на пологих (крутизною до 10 градусів, рідко більше) схилах, перекриваючи корінні й алювіальні відкладення. Представлені вони суглинками, супісками, місцями глинами, карбонатними, пілуватими, з рідким щебенням корінних порід (його зміст збільшується вбік джерел зносу, досягає іноді 10 - 20%), в більш прадавніх товщах вміщуючих 2 - 3 прошарка похованого ґрунту. Потужність їх у верхніх частинах схилів звичайно становить 3 - 10 м, збільшуючись до підосви до декількох десятків метрів (на низьких терасах місцями до 20 - 30 м).

Середньо-верхнєплейстоценові еолово-делювіальні відкладення розвинені в межах верхнєпліоценових терас і корінного плато, представлені просадними пілуватими лесовидними різницями звичайно суглинного й глинистого складу, рідше супіщаного. Загальна їхня потужність до 5 - 10 м.

Нерозчленовані делювіально-обвальні-осипні відкладення розвинені в нижніх частинах схилів і зсувних западинах. Зміст уламків корінних порід в суглинноглинистій товщі коливається в межах 10 - 70%, а потужність - до 10 м.

Зсувні відкладення пов'язані з наявністю в розрізі слабких літологічних різниць аргілітів і алевролітів зиньковсько-бронницьких і інших шарів верхнього протерозою, що містять прошарки високопластичних "бентонітових" глин, що виявляють основним горизонтом, що деформується в зсувному процесі в зоні вивітрювання цих і інших глинистих порід. Представлені вони складним комплексом порід, потужність їх коливається в більших межах (від декількох метрів до 10 - 30 м).

### 3.2. Тектонічні умови території розміщення Дністровської ГАЕС.

На тектонічній карті Дністровський гідровузол розташований на краю південно-західної частини Східноєвропейської платформи в межах (тектонічному вузлі) Волино-Подільської та Молдавської плит з наявністю Українського щита.

Щит розрізаний Подільською зоною розломів, яка є південно-західною межею Українського щита. Подільська зона розломів має північно-західне простягання і простягається на 320 км, розбита як північно-західними, так і північно-східними розломами. За даними Сарнавського, Овсяннікова (Sarnavski & Ovsianikov, 2005), в зоні зчленування Українського щита і Волино - Подільської плити розломи мають характер скидів з амплітудою 50 - 100 м. Значна частина розломів розриває товщу неоген-четвертинних відкладів і пов'язана з активізацією більш давнього шару. Круглов, 1986 (Вигон та ін., 1986), зазначає, що Дністровський, Могилів-Подільський, Калинівський, Чугурський та Кайнарський розломи є одними з основних глибинних розломів Дністровського гідровузла (рис. 2). Детальні дослідження Подільського (Середнього) Придністров'я показують, що цей район є тектонічним вузлом у ротаційному полі розвантажувальних напружень у вигляді "вихрової" системи розломів. Структурний план визначається поєднанням різноспрямованих складчастих і розривних деформацій.

Визначальною рисою структурно - тектонічного плану району є його розташування в межах південно - західного занурення Українського щита, приуроченість до Подільської тектонічної зони, вісь якої (Подільський або Ямпольський глибинний розлам) проходить в 5 - 10 км східніше ділянки ГАЕС. Територію перетинають великі розлами другого - третього - четвертого порядків, що розчленовують її на ряд структурно - тектонічних блоків, кожний зі своєю історією розвитку. Сарнавський та Овсянніков, 2005 (Sarnavski & Ovsianikov, 2005) зазначають, що структурно - геоморфологічні особливості Подільської зони розломів у пізньому протерозої полягають у каньйоноутворенні, яке включає базальний потік та окремі центри впливу. Занурення фундаменту і нарощування потужності осадового чохла відбувається на південний схід у напрямку до

Складчастих Карпат з нахилом 1:200. Річка Дністер перетинає майже всю товщу осадового чохла в субмеридіональному напрямку в межах гідровузла. Структурно-фаціальні границі, пов'язані із зоною розлому, простежуються в кембрії, ордовику, силурі та девоні, а також чітко відображені в крейді, неогені та антропогені (рис. 3.6).

На схід від Чугурського розлому розташована зона підняття, в межах якої швидкість підняття становить 0-4 мм/рік, а ділянка будівництва Дністровської ГАЕС належить до зони опускання зі швидкістю 0-2 мм/рік за даними Круглова, 1986 (Вигор та ін., 1986). Верхнє водосховище Дністра розташоване в зоні активного карсту на вапнякових породах.

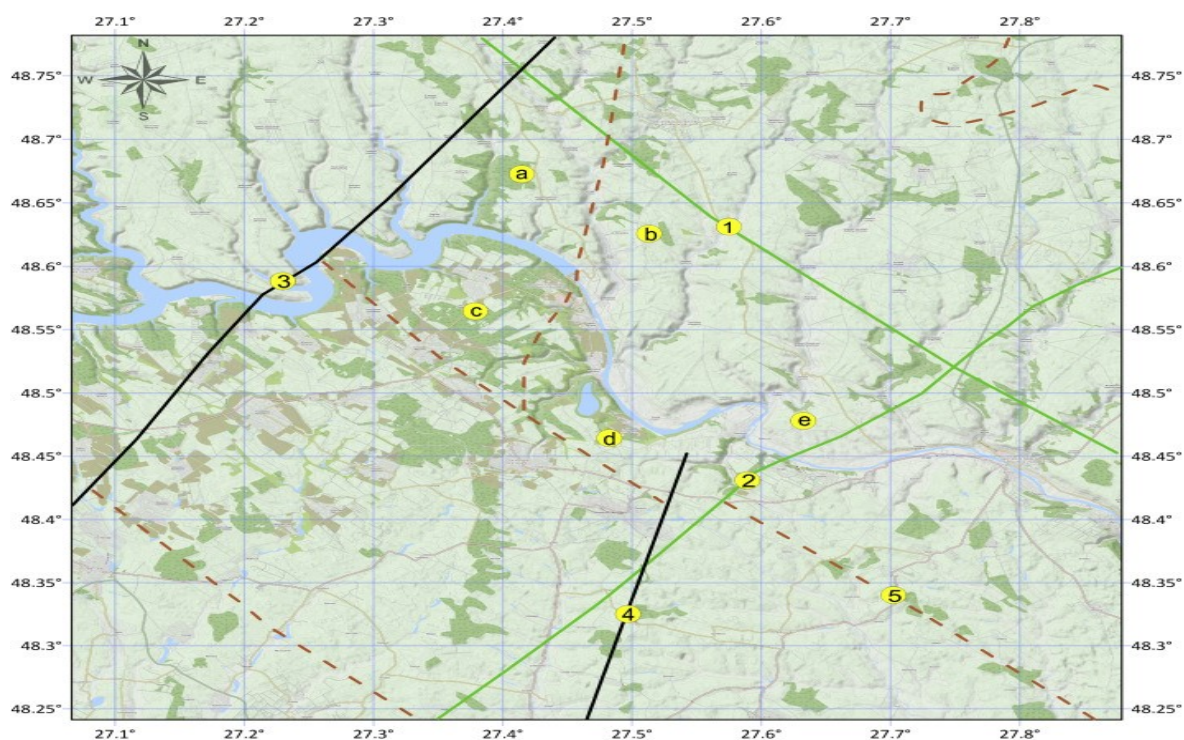


Рисунок 3.6 –Тектонічна будова Дністровського гідровузла згідно С. Круглов.

Глибинні розломи:

головні (1 - Дністровський; 2 - Могилів-Подільський), регіональні (3 - Калинівський; 4 - Чугурський; 5 - Кайнарський); структурні підрозділи: а - Бернашівський; d - Липчанський; b - Василівський; с - Волошково-Козловський; е - Лядовський.

Джерело: (Savchyn & Pronyshyn, 2020)

Згідно досліджень інституту «Гідропроект» (рис. 3.7), ділянка ГАЕС входить у межі Василівського блоку, який складається з більш дрібних структур, розчленованих розривами IV порядку і великими тріщинами V порядку, у тому числі похилими (25 - 40 градусів), а також мережею дрібних тектонічних тріщин VI - VII порядків, що становлять фонову тріщинуватість, на яку (у зоні гіпергенезу) накладається складна мережа екзогенних тріщин (вивітрювання і розвантаження). Найбільш великі тектонічні порушення, задокументовані при проходці споруд підземного комплексу, винесені на карту фактичного матеріалу. Субвертикальні тріщини, в основному, прямолінійні, без зсувів, належать до кінематичного типу тріщин відриву. Середні і дрібні розлами та великі тріщини IV і V порядків - похилі, відносно короткі, дугоподібні в плані, сколового (скидного) типу, часто зі зсувом (від 0,1 - 2 до 4 м по вертикалі) і зоною дробління потужністю 0,1 - 0,5 м, із глинкою тертя й кальцитовим заповнювачем тріщин. Дрібна тріщинуватість часто має в'язкоподібний характер, переривчастість розвитку, концентрується звичайно у прошарків міцних порід (піщаників).

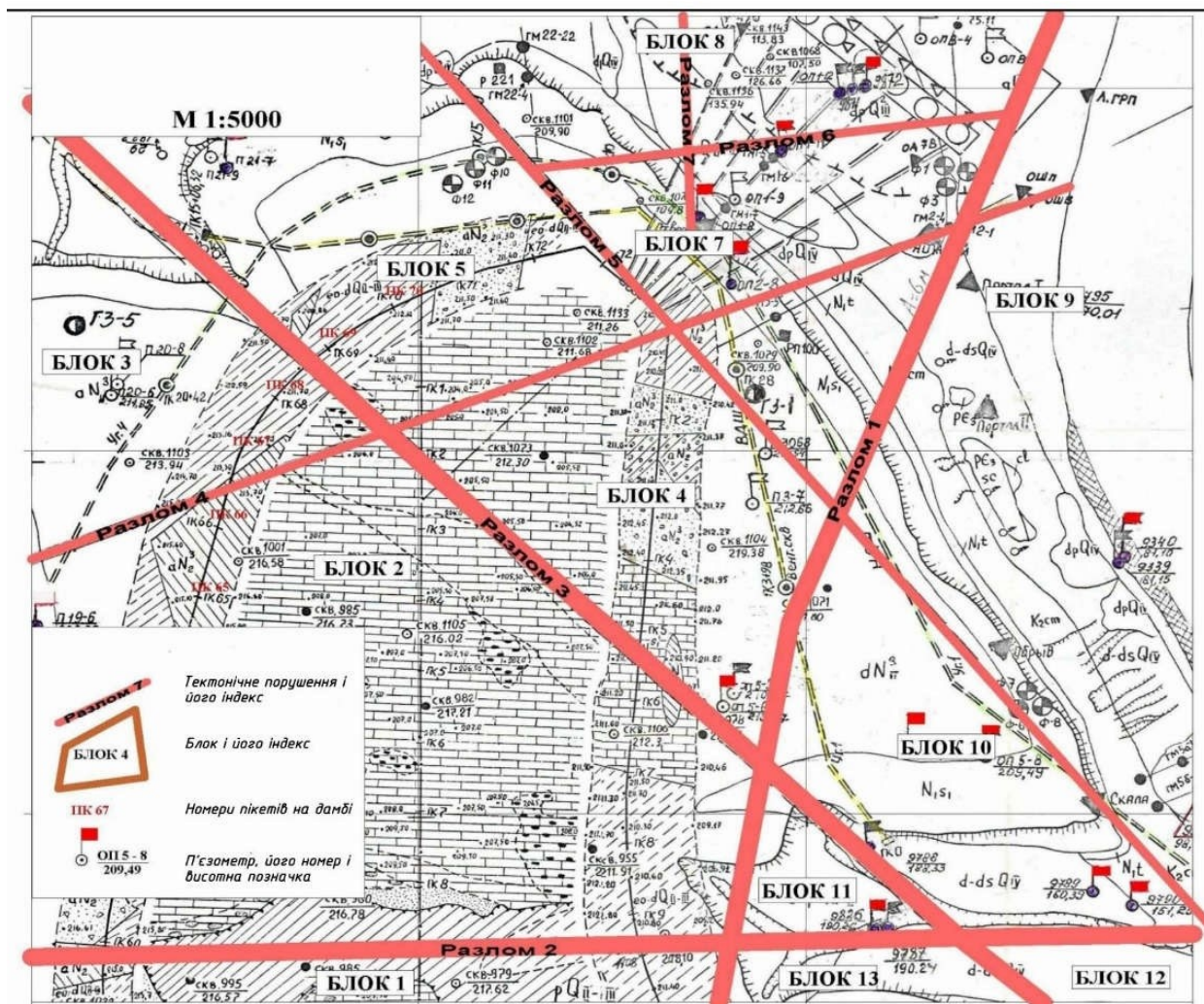


Рисунок 3.7 – Локальна схема тектонічних порушень

Джерело: (Укргідропроєкт, б. д.)

Субгоризонтальні тріщини відносяться до литогенетичного типу (тріщини нашарування); по них відзначаються тектонічні рухи (штрихи й дзеркала). В прошарках піщаників зони розвантаження поширено 2 системи субвертикальних тріщин віддільності, що створюють блоковий вигляд товщі. Вторинний піщано-глинистий заповнювач тріщин розвинений, в основному, зоні розвантаження й вивітрювання, де тріщини відкриті, а вся товща порід значно перетворена процесами гіпергенезу.

Основні структурно - тектонічні форми є активними неотектонічними блоками, що відчувають на всьому протязі геологічної історії (від пізнього пліоцену до голоцену) диференційовані підняття загальною амплітудою до 200 м, в тому числі за четвертинний час близько 120 м.

Найбільш піднятими неотектонічними блоками в межах водосховища є Бернашовсько - Ожевський (район Дністровської ГЕС) і Лядовський (район Нижньодністровської ГЕС) блоки, а опущеними – Волошковсько - Козловський і Васильєвський (район Дністровської ГАЕС) блоки. Дані особливості різної швидкості неотектонічних рухів різних ділянок проявляються в більш інтенсивному розмиві схилів ділянок, що активно піднімаються, їх великого ступеня оголеності та крутості, широкому розвитку на схилах гравітаційних процесів.

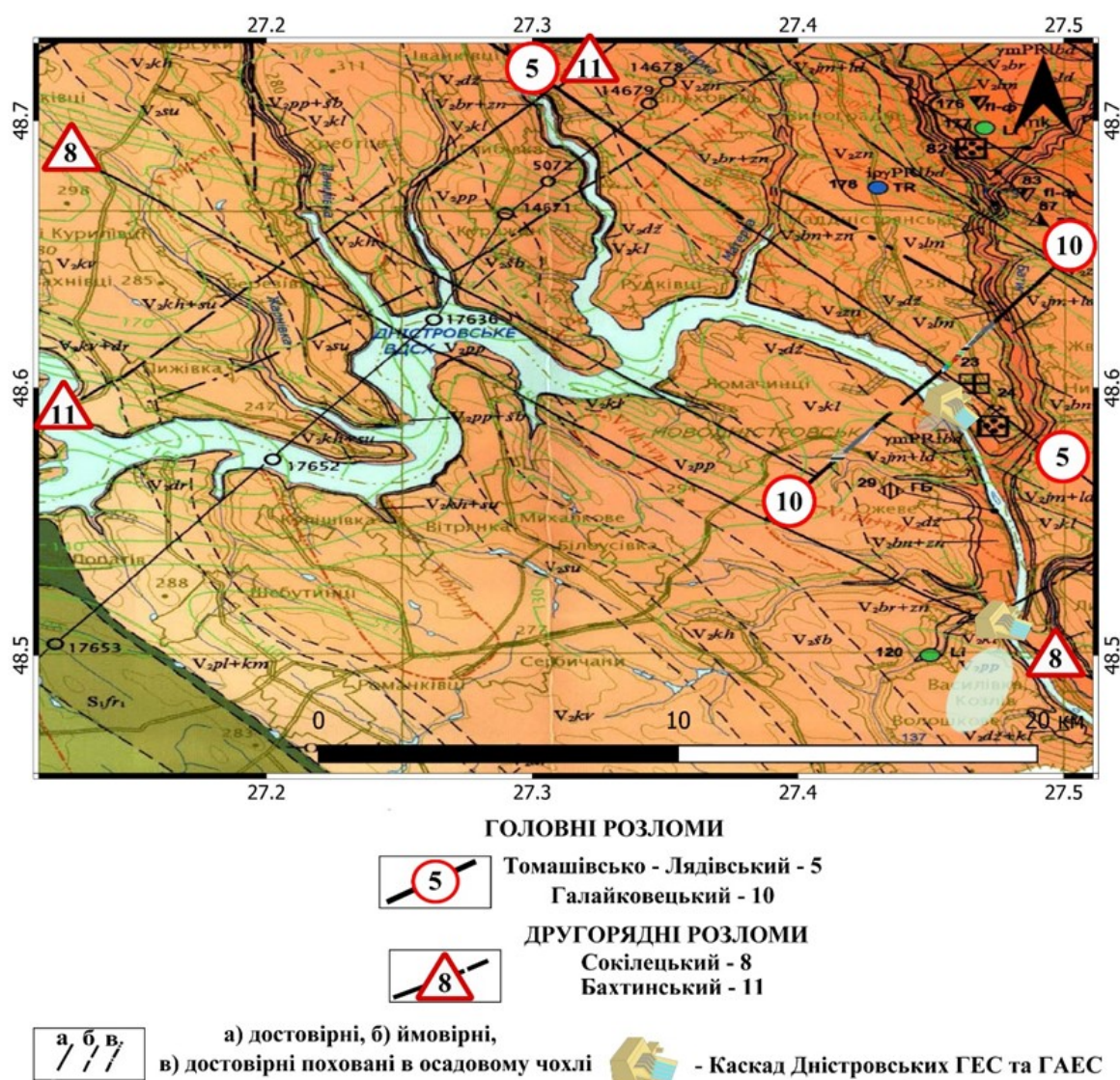


Рисунок 3.8 – Мапа місцевих розломів

Складено за даними: (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020.)

Згідно інформацією Державної служби геології України (рис. 3.8), зону експлуатації каскаду ГЕС та ГАЕС, перетинають головні розломи це Томашівсько – Лядівський, Галайковецький та другорядні Сокілецький, Бахтинський.

### 3.3. Гідрогеологічні умови середовища Дністровської ГАЕС

Гідрогеологічні умови району складні. Спостерігається розвантаження декількох водоносних горизонтів з різним режимом живлення. Пластово-тріщинні й тріщинні води в корінних породах мають напірний, іноді високонапірний, а частіше безнапірний характер залягання. Вони приурочені до горизонтів тріщинуватих вапняків в сарматі, пісків у тортоні та верхній крейді, пісковиків у товщі верхнього протерозою (див. рис. 3.5). Більша їхня частина дренується схилами долини р. Дністер і великими ярами. У цілому для території характерна сильна здренованість і слабка обводненість порід.

Залягаючи на глибині 20-25 м від поверхні вододілу неогеновий водоносний горизонт, що утворюється безпосередньо шляхом інфільтрації атмосферних опадів, не має суцільного поширення, представляє окремі обводнені ділянки, що формуються на поверхні невитриманого шару тортонських глин. Він бере активну участь у живленні (шляхом перетікання води через роздільні шари), залягаючи нижче водоносних горизонтів, особливо верхньокрейдяного, в обводнюванні прилеглих схилів, по яких спостерігаються джерела, пов'язані із цими двома водоносними горизонтами. У зоні розташування верхньої водойми він має гідравлічний зв'язок з фільтраційними витоками з верхньої водойми. Перший від поверхні постійний водоносний горизонт – верхньокрейдяний, залягає на глибині 70-90 м, тісно пов'язаний з водами тріщинуватої зони аргілітово - алевролітової товщі ( $V_2$ ), інтенсивно дренується долинами рік. По фільтраційним вікнам він підживлюється підземними водами неогенового водоносного горизонту. До пачок пісковиків ( $V_2$ ) приурочений ряд слабковміщуючих, але високонапірних пластово - тріщинних водоносних горизонтів, як і відзначені вище водоносні горизонти, вони мають строкатий хімічний склад і різну мінералізацію (до 1 г/дм<sup>3</sup>), малий дебіт

підземних джерел. В днищі долини р. Дністер розповсюджений єдиний водомісткий комплекс, приурочений до алювію та тріщинуватої зони корінних порід ( $V_2$ ), близький за хімічним складом до охарактеризованих водоносних горизонтів, його глибина залягання 3-10 м. В зв'язку з розвантаженням (по тектонічних зонах) глибинних вод відзначається місцями підвищена мінералізація ґрунтових вод (до 3,3 г/дм<sup>3</sup>), прояви сірководню (будинок ГАЕС). Зміни в гідрогеологічному режимі після наповнення нижнього водосховища вже відбулися в рівневому режимі джурджівського і бернашівського водоносних горизонтів, які на ділянці між с. Бернашівка - Липчани залягають нижче НПР і в умовах експлуатації водосховища набудуть локальних й незначних напорів, а також в джурджівському водоносному горизонті на Дністровському схилі в зоні водоводів. Після заповнення верхньої водойми на локальних ділянках прилеглих до огорожувальних дамб ВВ піднявся рівень підземних вод неогенового водоносного горизонту. Він дренається верхньою дренажною штольнію, що не дозволяє збільшувати обводнення схилів.

Водопроникність ґрунтів визначалася польовими (випомповування, наливи, нагнітання) і лабораторними методами, використанням балансових розрахунків теоретичних формул, методом аналогій і ін., (Укргідропроект, 2023.).

### **3.4. Геодинамічні умови середовища Дністровської ГАЕС**

Для надійного вивчення геодинамічних умов у зоні експлуатації каскаду ГЕС і ГАЕС було облаштовано систему пунктів сейсмічного моніторингу, яку доповнено інформацією від станцій Карпатської регіональної сейсмічної мережі, крім цифрових записів сейсмічної станції “Ломачинці”(NDNU), додатково використовувалися дані з ближніх сейсмічних станцій регіональної сейсмічної мережі (КРСМ): “Городок” (HORU), “Кам’янець-Подільський” (КМРУ), “Чернівці” (CHRU), “Косів” (KSV), (Апробація апаратно-програмних засобів для формування бази даних сейсмологічної інформації, б. д., с. 20; Олещук & Прокопишин, 2005). Після детального комплексного аналізу був складений каталог



сейсмічних подій з листопада по грудень 2019 року, який приведено в (Таблиця 3.1), що являє собою продовження каталогу сейсмічних подій з січня по жовтень 2019 р.

Землетрус - це природне явище, пов'язане з геологічними процесами, що відбуваються в літосфері Землі. Землетрус проявляється у вигляді підземних поштовхів і коливань земної поверхні, що виникають унаслідок раптових зсувів і розривів у земній корі або у верхній частині мантії. Ці зсуви і розриви зумовлені глибинними процесами, що відбуваються в літосфері і пов'язані з рухом літосферних плит. У гірських поясах і поблизу них внутрішньоземне напруження наростає і зростає доти, доки не перевищить опір гірських порід, унаслідок чого відбувається розрив гірських порід та їхній зсув. Внутрішньоземне напруження стрибкоподібно скидається. Потенційна енергія деформації переходить у кінетичну енергію, яка розсіюється в різні боки від місця розриву у вигляді сейсмічних хвиль. Сейсмічні хвилі коливають Землю. Сейсмічний розрив земної кори зароджується завжди в глибині. Дуже рідко буває, коли глибина розриву не перевищує 3-5 км, найчастіше це відбувається на глибині 10-15 км. Встановлено, що на глибинах до 5 км зазвичай виникають слабкі підземні поштовхи, потужні землетруси зароджуються на глибині 40-60 км.

Місце руйнування гірської породи називають осередком землетрусу або гіпоцентром. Осередок землетрусу - це простір усередині Землі, де відбулося розламування гірських порід. Для вимірювання енергії, що виділяється в осередку землетрусу, було введено шкалу Ріхтера (Чарльз Ріхтер - найбільший американський сейсмолог), що має 9 поділок - від 1 до 9. За одиницю виміру в шкалі Ріхтера взято магнітуду - умовну величину, яка показує не енергію, що виділилася під час розлому, а величину, пропорційну їй. Магнітуда - це безрозмірна величина, яка характеризує загальну енергію сейсмічних коливань.

Епіцентр землетрусу - це умовна точка на землі, розташована над осередком землетрусу, над тим місцем, де в глибині Землі зародився перший поштовх коливання і зсуву гірських порід, виникли сейсмічні хвилі, які розбіглися від

центру в різні боки. Сейсмічні хвилі можуть бути різних типів - поздовжні, поперечні та поверхневі. У них різні швидкості руху, енергія і сила впливу. Що далі хвиля від епіцентру, то слабший землетрус. Сила землетрусу, його інтенсивність оцінюється в балах за шкалою Меркалі (Джузеппе Меркалі - італійський учений). Оцінка сили землетрусів у балах - величина умовна і відносна. Бали не є фізичними одиницями, але служать для зручності визначення відносної сили землетрусу за зовнішніми його проявами. Шкала Меркалі має 12 поділок - від 1 до 12. Це означає, що всі можливі землетруси розбиті на 12 груп за наростальною силою їхнього прояву. 1 бал (непомітний) - землетрус, за якого тільки прилади вловлюють коливання ґрунту. 2 бали (дуже слабкий) - землетрус практично не відчувається людьми. 3 бали (слабкий) - коливання відзначаються небагатьма людьми. 4 бали (помірний) - землетрус відчувається багатьма людьми; відчиняються нещільно зачинені вікна та двері. 5 балів (досить сильний) - розгойдуються предмети, що висять, скриплять підлоги, деренчать стекла, обсипається побілка в будинках. 6 балів (сильний) - землетрус призводить до легкого пошкодження деяких будівель: з'являються тонкі тріщини в штукатурці, в печах. 7 балів (дуже сильний) - неминучі значні пошкодження деяких будівель: з'являються тріщини в штукатурці, відламуються окремі її шматки, виникають тонкі тріщини в стінах, пошкоджуються димові труби. 8 балів (руйнівний) - спостерігаються руйнування в будівлях: утворюються великі тріщини в стінах, падають карнизи, димарі, димарі; на схилах гір з'являються зсуви та тріщини шириною до кількох сантиметрів. 9 балів (спустошливий) - відбуваються обвали в багатьох будівлях, обвалюються стіни, перегородки, покрівля; у ґрунтах утворюються тріщини завширшки 30 см і більше; спостерігаються обвали, осипи, зсуви в горах. 10 балів (нищівне) - руйнування більшості будівель; у деяких - серйозні пошкодження; утворюються тріщини в ґрунті до 1 м завширшки, відбуваються обвали, зсуви; за рахунок завалів у річкових долинах виникають озера. 11 балів (катастрофа) - характерні численні тріщини на поверхні землі та вертикальні переміщення по них, великі обвали в горах; загальні руйнування будівель. 12 балів (сильна катастрофа) - відбувається сильна зміна

рельєфу місцевості; утворюються численні тріщини, вертикальні та горизонтальні переміщення по них; величезні обвали та зсуви ґрунту; змінюються русла річок, утворюються водоспади й озера; характерне руйнування всіх будівель і споруд. Таким чином, поштовх землетрусу виникає всередині земних надр, при цьому виділяється кінетична енергія, що вимірюється в магнітудах; виникають сейсмічні хвилі, що розповсюджуються на всі боки та, досягнувши поверхні Землі, спричиняють коливання земної поверхні, сила яких вимірюється в балах і визначає наслідки, до яких призвели ці коливання. Сила землетрусу залежить від величини магнітуди та відстані певної точки поверхні Землі від осередку землетрусу (гіпоцентру). За однакової магнітуди землетрусу (за однакової енергії, що вивільнилася під час розлому гірських порід) сила землетрусу може бути різною залежно від глибини вогнища землетрусу. Наприклад, Ташкентський землетрус 1966 р. мав магнітуду 5,3, глибина вогнища була на 8 км, сила землетрусу досягла 8 балів в епіцентрі, який припав на центр міста. Якби землетрус із такою самою магнітудою стався на глибині 15-25 км, підземні поштовхи спричинили б землетрус силою не більше 4-5 балів.

Таблиця 3.1 – Каталог  
сейсмічних подій з листопада по грудень 2019 року

№п/п	Дата	Час в епіцентрі			Координати		Н, км	К	М	Район
		h	m	s	φ°N	λ°E				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
125	2.11	23	47	23	48.64	27.37	2		-0.5	Хмельницька обл., р-н с.Рудківці
126	5.11	2	44	41	48.57	27.4	2		-0.6	Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
127	5.11	23	52	54	48.58	27.33	2		0.5	Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
128	8.11	18	7	9	48.57	27.41	2		-0.8	Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
129	9.11	19	30	58	48.57	27.41	2		-0.4	Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
130	10.11	9	51	17	48.58	27.32	2	0.1		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
131	10.11	10	8	15	48.58	27.41	2	0.1		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
132	10.11	11	53	58	45.57	26.35	154	9.6	3.1	Карпати, р-н Вранча
133	15.11	8	53	25	48.63	27.37	2	-0.8		Хмельницька обл., р-н с.Рудківці
134	16.11	6	35	4	48.56	27.34	2	-0.1		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
135	16.11	7	46	22	48.56	27.33	2	0.6		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
136	19.11	13	51	57	48.64	27.39	2	-0.8		Вінницька обл., р-н с.Наддністрянське
137	19.11	18	49	43	48.56	27.43	2	-0.5		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
138	20.11	10	20	17	48.62	27.38	2	-0.1		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
139	22.11	12	40	37	48.53	24.26	0			Прикарпаття, р-н с.Старуня
140	1.12	5	11	15	48.62	27.35	2	-1.4		Хмельницька обл., р-н с.Рудківці
141	3.12	21	25	49	50.06	24.96	4.3	8.3	2.3	Львівська обл. р-н с.Велин
142	12.12	12	44	39	50.22	27.44	0			Хмельницька обл., р-н м.Полонне
143	24.12	22	58	24	48.63	27.38	2	-0.9		Чернівецька обл., р-н м.Новодністровськ
144	25.12	5	5	55	46.8	27.46	2	9.6	3.1	Румунія, р-н Бакеу

Джерело: (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

В каталозі приведено дату і час виникнення сейсмічної події, її географічні координати  $\phi^{\circ}\text{N}$  та  $\lambda^{\circ}\text{E}$ , глибину вогнища – Н в км., енергетичний клас – К, магнітуду – М, а також район її виникнення.

Як бачимо, в табл. 2 представлено 20 зареєстрованих сейсмічних подій за період з листопада по грудень 2019 р. Два з них складають промислові кар’єрні вибухи або інші події техногенного характеру, записи яких використовуються для тестування роботи сейсмічної апаратури. Всі вибухи мають нульову глибину. Один вибух зафіксовано на території Хмельницької області і один – на Прикарпатті. Глибокофокусні землетруси з зони Вранча в Румунії, які є тестовими для Карпатського регіону, залучались для контролю за роботою комп’ютерних програм при визначенні гіпоцентральної відстаней до джерел струшувань.<sup>10</sup>

Всього з листопада по грудень 2019 року з даного району було зареєстровано один землетрус 10 листопада з  $M=3.1$ .

В районі Дністровського енергокомплексу з листопада по грудень 2019 року зареєстровано 15 землетрусів лише однією тимчасовою сейсмічною станцією “Ломачинці” (NDNU), по якій встановити їх точні координати практично неможливо. Всі вони розташовані на відстані 1-12 км від сейсмічної станції “Ломачинці” в азимуті від  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  і ймовірно знаходяться в районі Подільського та Немирівського розломів, а також Жмеринської системи розломів, виділеної за матеріалами космічної зйомки (N.A.Krylov, 1988), яка простягається з північного сходу на південний захід. В каталозі для цих землетрусів подано їх гіпотетичні координати. Їх магнітуди дуже малі і коливаються, в основному, в межах від  $-1.4$  до  $0.6$  (див. Таблиця 3.1), що відповідає енергетичним класам – від  $K=1.5$  до  $K=5.1$ .

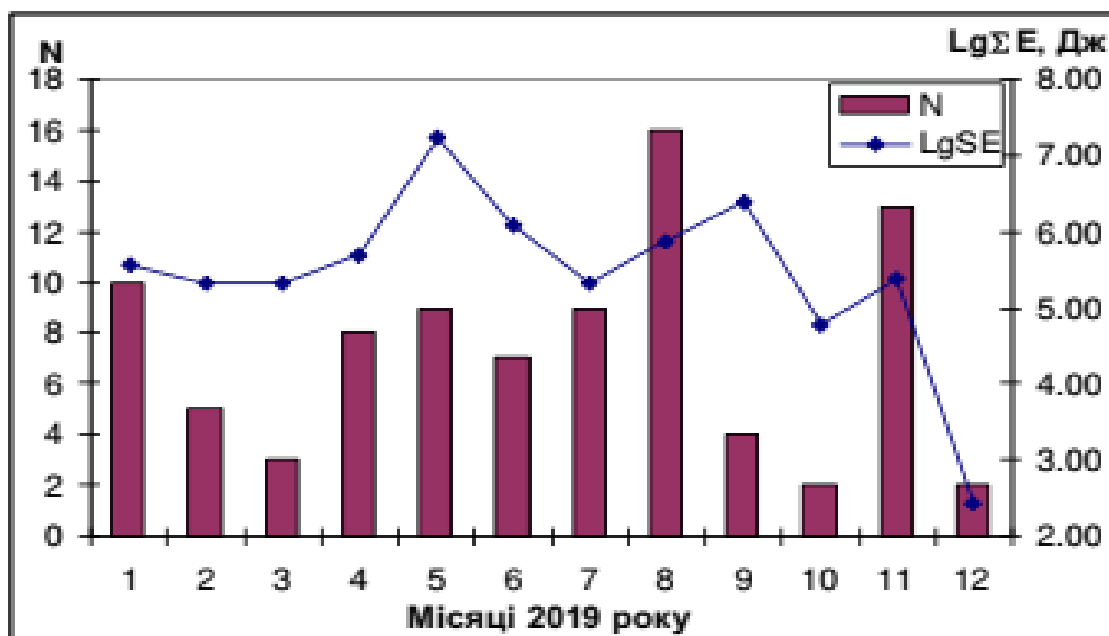


Рисунок 3.9 – Розподіл кількості землетрусів  $N$  і логарифма сумарної виділеної сейсмічної енергії  $E$  в джоулях по місяцях у 2019 році в районі Дністровського енергокомплексу.

*Джерело:* (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

На (рис. 3.9) для наочності представлена гістограма розподілу кількості землетрусів та логарифма сумарної виділеної сейсмічної енергії по місяцях за весь 2019 рік в районі Дністровського енергокомплексу. Згідно (див. рис. 3.9) максимальна кількість енергії виділилася у травні місяці ( $1.72 \cdot 10^7$  Дж), мінімальна – у грудні ( $2.7 \cdot 10^2$  Дж). Максимальна кількість землетрусів ( $N=16$ ) зареєстровано у серпні, а мінімальна ( $N=2$ ) – у жовтні і грудні.

З травня 2019 р. почався поступовий спад виділеної сумарної енергії, а кількість землетрусів змінювалася від місяця до місяця, досягнувши два максимуми у серпні ( $N=16$ ) і листопаді ( $N=13$ ).

На (рис. 3.10) приведено гістограму розподілу 88 землетрусів за енергетичним класом  $K$  з січня по грудень 2019 р. Енергетичний клас  $K$  землетрусів обчислювався через магнітуду  $M$  за рівнянням Т.Г.Раутиан (Rautian, 1960):

$$K = 1.8M + 4.0 \quad (3.1)$$

Де  $K$  - енергетичний клас землетрусів;  $M$  – магнітуда.

Як бачимо на даному рисунку спостерігається періодичність максимумів та мінімумів виділеної енергії.

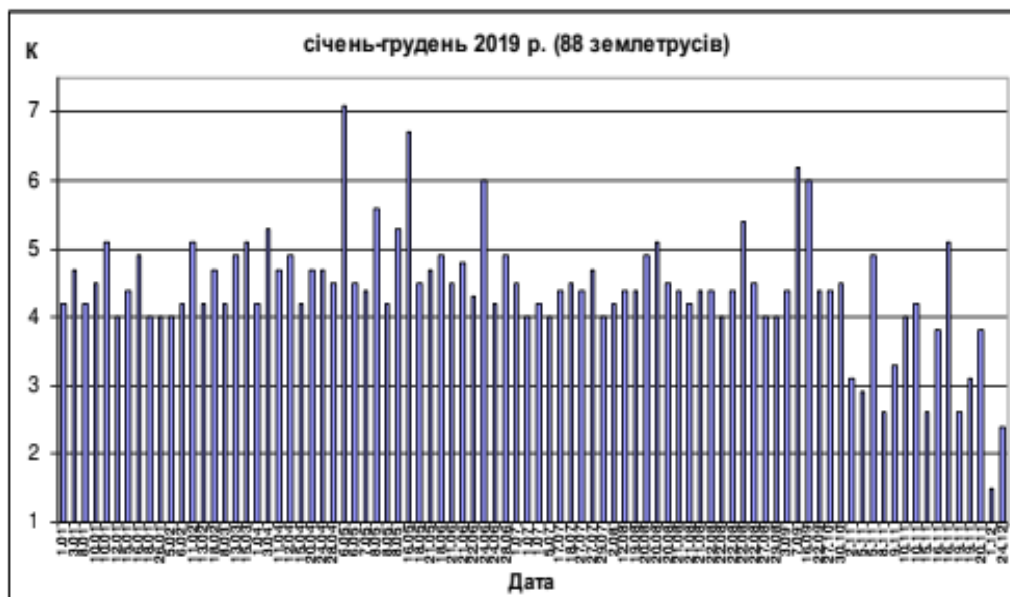


Рисунок 3.10 – Розподіл 88 землетрусів за енергетичним класом К з січня по грудень 2019 р. в районі Дністровського енергокомплексу.

*Джерело:* (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

В даному розділі приведено приклади записів деяких землетрусів, зареєстрованих в районі Дністровського водосховища 8.01.2020 р., 27.04.2020 р., 20.05.2020 р., 18.07.2020 р. на сейсмічних станціях “Ломачинці” (рис. 3.11).

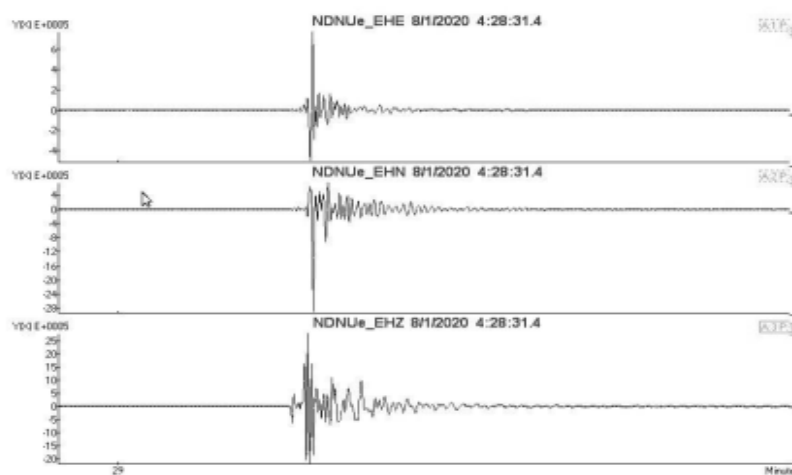


Рисунок 3.11 – Запис слабкого землетрусу, зареєстрованого на сейсмічній станції “Ломачинці” (NDNU), 8 січня 2020 року о 04 год 29 хв з  $M=0.1$  в районі м.Новодністровськ.

*Джерело:* (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

За останні 8 років зібрано достатньо даних про сейсмічність в районі Дністровського енергокомплексу, що дає можливість провести її аналіз. Так починаючи з 2013 р. відбулося зростання кількості слабких місцевих землетрусів в районі Дністровського енергокомплексу з магнітудою  $M \geq 0$ , що відповідає енергетичному класу  $K \geq 4$ .

У 2013 році тут було зареєстровано 61 місцевий землетрус, енергетичний клас  $K$  яких знаходився в межах від 3.6 до 8.4, а сумарна сейсмічна енергія за рік склала  $\Sigma E = 4.13 \cdot 10^8$  Дж. У 2014 році тут відбулося 160 місцевих землетрусів з енергетичним класом  $K = 4 \div 8.5$  ( $M = 0 \div 2.5$ ), а їх сумарна сейсмічна енергія  $\Sigma E = 4.67 \cdot 10^8$  Дж. У 2015 р. кількість місцевих землетрусів дещо зросла і склала 177, а їх сумарна сейсмічна енергія також зросла в порівнянні з 2014 роком і склала  $\Sigma E = 6.54 \cdot 10^8$  Дж. У 2016 році в районі Дністровського енергокомплексу 24 зареєстровано 167 місцевих землетрусів з сумарною сейсмічною енергією  $\Sigma E = 9.82 \cdot 10^9$  Дж, що на порядок вище 2015 р.

Магнітуди землетрусів 2016 року коливалися в основному від  $M = 0.1$  до  $M = 1.5$ . Лише 4 землетруси мали магнітуду  $M > 2$ , а саме: 7.02 з  $M = 2.9$  ( $K = 9.2$ ), 8.02 з  $M = 2.2$  ( $K = 7.9$ ), 9.03 з  $M = 2.2$  ( $K = 8.0$ ) та 12.07 з  $M = 3.4$  ( $K = 9.9$ ). Ці 4 землетруси внесли основний вклад у сумарну сейсмічну енергію за 2016 рік. До речі, землетрус 12 липня відчувався в багатьох населених пунктах Чернівецької області з інтенсивністю до 5 балів за 12-ти бальною шкалою MSK-64 (Blume, 1969).

У 2017 р. з лютого по грудень відмічено спад сейсмічної активності - зареєстровано лише 78 місцевих землетрусів з магнітудою від  $M = 0$  до  $M = 1.8$ . яка відповідає енергетичному класу від  $K = 4.0$  до  $K = 7.5$ . З них 71 землетрус зареєстровано лише однією тимчасовою сейсмічною станцією "Ломачинці". Сумарна сейсмічна енергія, яка виділилася у цьому районі за одинадцять місяців 2017 року складає  $\Sigma E = 1.06 \cdot 10^8$  Дж. Як бачимо, кількість землетрусів у 2017 р. у два рази менша ніж у 2016 р., а їх сумарна енергія також зменшилася майже на 2 порядки у порівнянні з 2016 р. (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020).



У 2018 році відмічено деяке збільшення сейсмічної активності – зареєстровано 90 місцевих землетрусів з магнітудою від  $M=-0.6$  до  $M=2.6$ , яка відповідає енергетичному класу від  $K=2.9$  до  $K=9.4$ . З них 86 землетрусів знову таки зареєстровано лише однією тимчасовою сейсмічною станцією “Ломачинці”. Сумарна сейсмічна енергія, яка виділилася у цьому районі за 2018 рік складає  $\Sigma E=2.61 \cdot 10^9$  Дж, що на порядок вище у порівнянні з 2017 роком. 3. У 2019 році в районі Дністровського енергокомплексу зареєстровано 88 місцевих землетрусів, 87 з яких зареєстровані лише однією тимчасовою сейсмічною станцією “Ломачинці”. Їх магнітуди, в основному, коливаються від  $M=-1.4$  до  $M=1.0$ , яка відповідає енергетичному класу від  $K=1.5$  до  $K=5.8$ . Сумарна сейсмічна енергія, яка виділилася у цьому районі за 2019 рік складає  $\Sigma E=2.35 \cdot 10^7$  Дж. Як бачимо, кількість землетрусів за 2019 р. майже така сама як і у 2018 р., але їх сумарна сейсмічна енергія аж на два порядки нижча у порівнянні з 2018 роком. 4. (Zyhar, Savchyn та ін., 2021,)

У 2020 році в районі Дністровського енергокомплексу зареєстровано 48 місцевих землетрусів, 47 з яких зареєстровані сейсмічною станцією “Ломачинці”. Магнітуди, в основному, коливаються від  $M=-0.8$  до  $M=1.0$ , яка відповідає енергетичному класу від  $K=2.6$  до  $K=5.8$ .

Сумарна сейсмічна енергія, яка виділилася у цьому районі за 10 місяців 2020 р. складає  $\Sigma E=1.67 \cdot 10^8$  Дж. Як бачимо, кількість землетрусів за 2020 р. майже в два рази менша ніж у 2019 р., а їх сумарна сейсмічна енергія на один порядок вища у порівнянні з 2019 роком. (Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, 2020)

### **Висновки до розділу 3**

У будові геологічного розрізу виокремлюють три структурно-стратиграфічні комплекси, що формують геологічну структуру даної території. Архейський комплекс представлений кристалічним фундаментом, що включає біотит-плагіоклазові граніти з лінзами гнейсів і магматитів, що характеризуються інтенсивною дислокацією і вивітрюванням на поверхні.

Верхньодокембрійський комплекс складається з метаморфічних порід, зокрема алевролітів, аргілітів і пісковиків різної потужності, складених у багат шарову структуру.

Мезокайнозойський комплекс сформований осадовими формаціями крейди, неогену і четвертинного періоду, що мають різноманітний генезис і потужність. У верхньопротерозойському комплексі виокремлюються прошарки бентонітових глин, що утворилися з вулканічного попелу в процесі епігенезу, які стратиграфічно корелюють із навколишніми породами.

Визначальною рисою структурно - тектонічного плану району є його розташування в межах південно - західного занурення Українського щита, приуроченість до Подільської тектонічної зони, що стало визначальним у рішенні відмови від проєкту будівництва АЕС, тому, що потенційна територія будівництва являла потенційну сейсмічну небезпеку.

Гідрогеологічні умови даного району є складними. Спостерігається розвантаження кількох водоносних горизонтів, які відрізняються режимами живлення. Води в корінних породах проявляються як пластово - тріщинні та тріщинні, часто мають напірний, у рідкісних випадках високонапірний, а в більшості ситуацій - безнапірний характер. Ці води асоціюються з горизонтами тріщинуватих вапняків у сарматських відкладах, пісках тортону та верхньої крейдяної системи, пісковиках у структурі верхнього протерозою. Основна частина цих вод дренується схилами долини річки Дністер і великими ярами. Загалом, територія характеризується високою здренованістю і низькою насиченістю водою порід.

Річні коливання кількості землетрусів у районі Дністровської ГАЕС можна пояснити зміною напруженого стану земної кори в даному регіоні. З 2013 по 2020 рік було зареєстровано 869 землетрусів із сумарною енергією  $\Sigma E = 1.19115 \times 10^{10}$  Дж.

Сумарна енергія землетрусів, що дорівнює  $1.19115 \times 10^{10}$  Дж, є значною величиною, особливо якщо розглядати її в контексті землетрусів. Для порівняння:

$1 \times 10^7$  Дж відповідає енергії землетрусу магнітудою приблизно 4.0 за шкалою Ріхтера.  $1 \times 10^{12}$  джоулів відповідає магнітуді близько 5.0.

Значення  $1.19115 \times 10^{10}$  Дж вказує, що загальна енергія реєстрованих подій у районі Дністровської ГАЕС значна за 7 років, але не досягає масштабу великих катастрофічних землетрусів. Ця енергія може включати безліч дрібних і помірних землетрусів, кожен з яких здатний викликати відчутні, але не руйнівні ефекти.

Така активність свідчить про можливу індуковану природу походження сейсмічних подій у даному геологічному регіоні і потребує ретельного моніторингу та вивчення.

## РОЗДІЛ 4

# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВІВ ПРИРОДНО - ТЕХНІЧНОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС НА ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У СЕРЕДОВИЩІ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ

### 4.1. Дослідження новітньої тектоніки геодезичними методами

Панівною рисою новітнього етапу розвитку геологічної будови Дністровського гідровузла є безперервна тектонічна активність розривних деформацій, що розділяють блоки четвертинних структур, для дослідження деформацій використовується моніторинг деформаційних процесів.

Моніторинг деформаційних процесів - це комплекс безперервних спостережень за станом земної поверхні, будівель і споруд з метою збереження життя і здоров'я людей, навколишнього середовища та господарської інфраструктури.

Особливе місце в такому контролі займають спостереження за вертикальними переміщеннями, які переважно здійснюються класичними геодезичними методами, найсучаснішим і найточнішим з яких є високоточне геометричне нівелювання (Lyon та ін., 2018). Цей метод полягає у високоточному визначенні різниць між двома або більше геодезичними точками, закріпленими на місцевості. (Spampinato та ін., 2013), зазначають, що цей тип вимірювання є фундаментальним для оцінки нещодавніх вертикальних деформацій. Тому наявність високоточних даних геометричного нівелювання за три і більше років дозволяє виявити і пояснити складні кінематичні процеси, які є унікальними для різних регіонів і об'єктів. Наприклад, (Spampinato та ін., 2013) проаналізували високоточні дані нівелювання за останні 40 років вздовж італійської базової мережі, щоб оцінити нещодавні вертикальні рухи на сході Сицилії та півдні Калабрії (Італія). Крім того, кореляція інструментальних і геологічних даних дозволяє ідентифікувати активні тектонічні структури, накопичення пружних напружень в яких може бути причиною вертикальних деформацій. Кореляція між областями максимальних відносних вертикальних переміщень і геолого-

тектонічною структурою була виявлена в роботі (Grzempowski та ін., 2020) на основі результатів високоточного нівелювання I класу в зоні розлому Середня Одра у Вроцлавському регіоні (Польща). (Kaczmarek, 2015) представили результати аналізу архівних даних про повторні вимірювання високоточних нівелірних мереж.

Результати аналізу були використані для створення карт вертикальних рухів поверхні земної кори. Аналіз зосереджено на частині нівелірних ліній, що перетинають Судетський головний тектонічний розлом (Польща-Чехія). Результати високоточного нівелювання (Galindo-Zaldívar та ін., 2013) були використані для визначення короткострокової активності зони Баланегрського розлому (Іспанія). Автори виявили, що зона розлому Баланегра демонструє складну поведінку в період між сильними землетрусами, що є прикладом часової мінливості деформацій.

У роботі (Tretuyak та ін., 2014) визначено лінійний тренд, тривалість періоду та амплітуду коливань геодезичних пунктів і проведено районування досліджуваної території за результатами високоточного нівелювання I класу на території Рівненської АЕС (Україна) в період з 1984 по 2013 роки. Існує також багато прикладів аналізу та інтерпретації результатів високоточного нівелювання територій гідроелектростанцій.

Цей метод тривалий час використовується для моніторингу вертикальних переміщень території та основних споруд ГЕС Ататюрка (Туреччина) (Kalkan, 2012), та багатьох інших.

Відомо, що створення водосховищ порушує природний хід формування схилів річкових долин, тому на зміну річковій ерозії приходить хвильова абразія, яка призводить до виникнення деформаційних процесів на об'єктах, розташованих на береговій лінії. (Savchyn & Pronyshyn, 2020) зазначають, що Дністровська ГАЕС побудована в складних інженерно-геологічних умовах, що характеризуються великим перепадом висот та крутими схилами між Дністровським русловим буферним водосховищем та Дністровським верхнім водосховищем, наявністю зсувних ділянок, а також небезпекою фільтрації води в нижні горизонти.

Відповідно до (Tretiyak та ін., 2014) в процесі будівництва Дністровської ГАЕС відбулися досить серйозні техногенні втручання в сформовану природну структуру масиву, а також у процеси, що в ньому перебігають. Циклічність роботи станції також призводить до додаткового техногенного навантаження, а також до зміни гідродинамічного режиму.

У зв'язку з цим виникає необхідність виконати аналіз та інтерпретацію вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС (Україна) отриманих із результатів високоточного геометричного нівелювання. А також встановити кінематику сучасних локальних вертикальних рухів, кореляційні зв'язки і залежності між кінематикою, тектонічною будовою.

Структура дослідження полягає у зборі даних, їх аналізі, фільтрації, опрацюванні та інтерпретації одержаних результатів (Зигар, 2024b). Методологія і теоретична основа досліджень базується на системно-структурному підході і кореляційному аналізі, теорії математичної обробки та інтерпретації результатів геодезичних спостережень. Вхідними даними для виконання дослідження є результати геодезичних вимірювань, а також чинники техногенного характеру.

В якості вихідних даних використано висоти геодезичних пунктів отримані у різних циклах високоточного нівелювання на вибраних геодезичних пунктах опорної висотної мережі Дністровської ГАЕС, яка складалась із 12 фундаментальних реперів, 11 глибинних марок та 7 пунктів опорної ГНСС-мережі, розміщених на пристанційному майданчику, схилі основних споруд та на придамбововій ділянці.

Глибина закладання фундаментальних реперів знаходиться в межах від 5 до 19 м, глибинних марок - від 4 до 49 м, а пунктів опорної ГНСС-мережі - від 5 до 27 м. Слід зазначити, що усі геодезичні пункти закладені на глибину не менше ніж 0.5 м в скельний ґрунт (рис. 4.1).

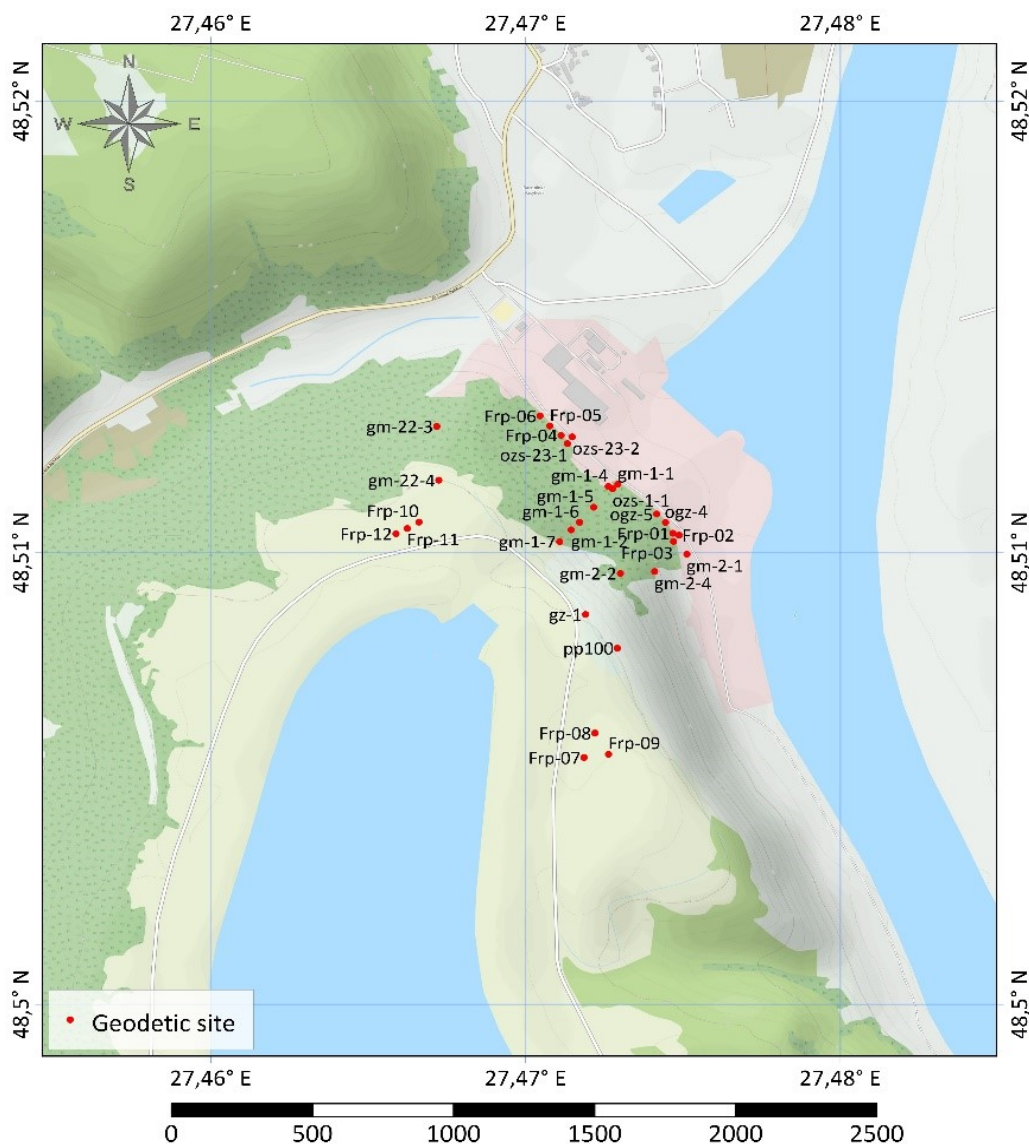


Рисунок 4.1 – Схема розташування вибраних геодезичних пунктів опорної висотної мережі Дністровської ГАЕС

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

Впродовж досліджуваного періоду з 1999 по 2019 роки на кожному із геодезичних пунктів проведено від 24 до 46 циклів нівелювання, в середньому по 2 цикли в рік із періодом в пів року (після 2011 року виконувалось по 4 цикли в рік). Висоти геодезичних пунктів визначені високо-точним геометричним нівелюванням I-го та II-го розрядів, це особливий спосіб нівелювання короткими промінями згідно з інструкцією П-648 Гідропроєкт 1980р. Згідно з інструкцією СКП перевищення на станції (із усіх вимірів) для I-го розряду 0,08 мм, для II-го 0,13мм.

Середня довжина ходу між фундаментальними реперами складає 800-1000м. Висоти геодезичних пунктів отримані у різних циклах високоточного нівелювання використано для обчислення середніх лінійних швидкостей вертикальних рухів за заданий період. Точність визначення значень швидкостей вертикальних рухів знаходиться в межах  $\pm 0.01$  мм/рік. Ці значення використано для ілюстрації просторового розподілу поля швидкостей вертикальних рухів території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС.

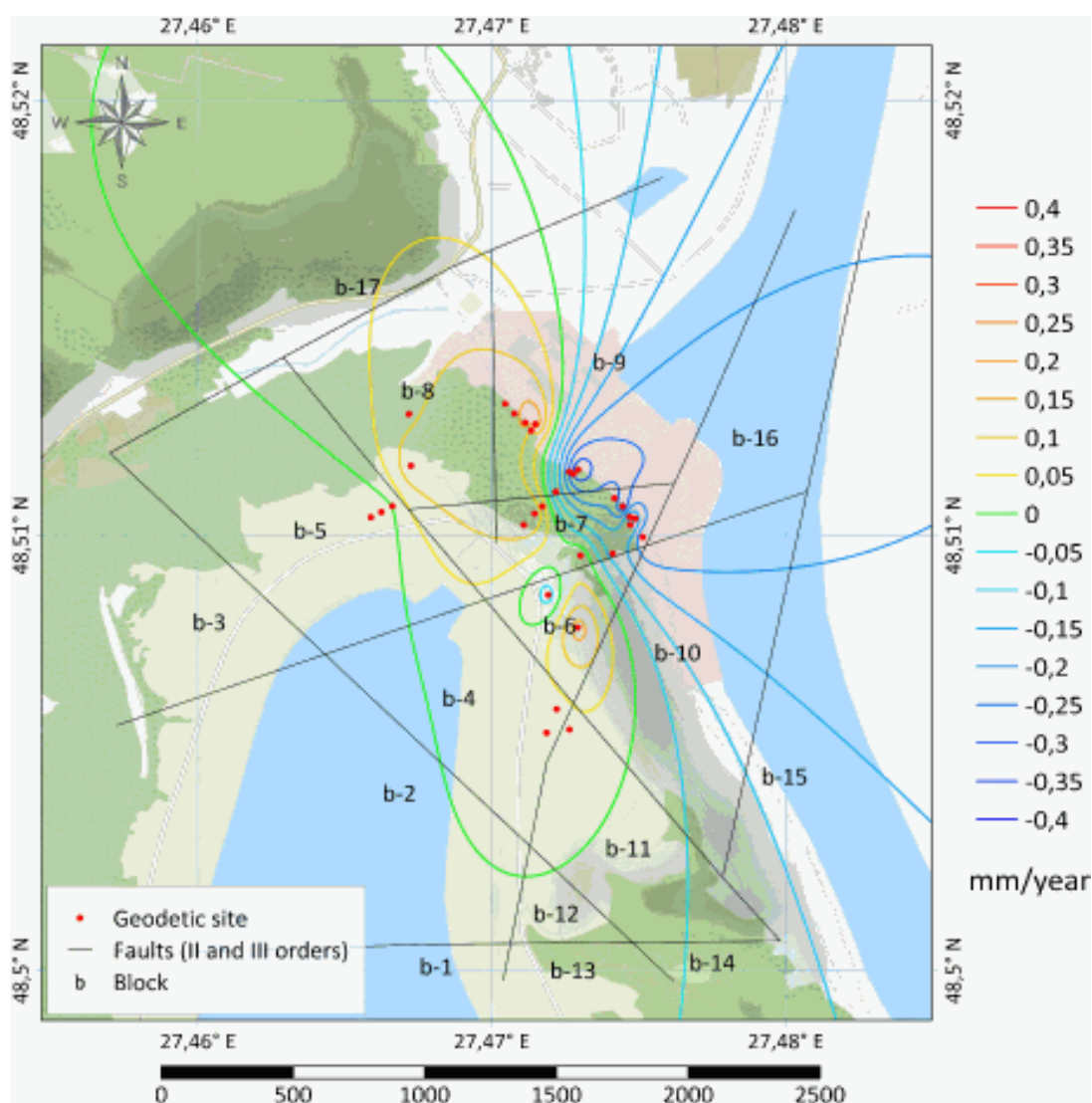


Рисунок 4.2 – Просторовий розподіл поля швидкостей вертикальних рухів на території Дністровської ГАЕС Карта доповнена розломами (див. рис. 3.7)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

Слід зазначити, що для уникнення спотворень результатів, всі зони в яких значення швидкостей вертикальних рухів земної поверхні знаходились в межах



$\pm 0.04$  мм/рік вважалися стабільними. Аналізуючи просторовий розподіл поля швидкостей вертикальних рухів (див. рис. 4.2) можна зауважити, що в загальному, території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС зазнає опускання із швидкістю від  $-0.04$  мм/рік до  $-0.34$  мм/рік, проте на межі декількох блоків ідентифікуються 2 зони підняття.

Перша зона підняття знаходиться на межі блоків 7, 8 та 9 (приблизний розмір 1300 м на 700 м, витягнута в північному напрямку) і характеризується швидкістю підняття від  $+0.07$  мм/рік до  $+0.19$  мм/рік.

Друга зона підняття знаходиться на межі блоків 6 та 10 (приблизний розмір 500 м на 250 м, також витягнута в північному напрямку) і характеризується швидкістю підняття від  $+0.05$  мм/рік до  $+0.18$  мм/рік. Слід зазначити, що в результаті порівняння отриманих даних із сучасними локальними горизонтальними рухами виявлено збіг меж ідентифікованих зон підняття із межами зон екстремальних додатних значень дилатації (збільшення площі), а також меж зон опускання із межами зон екстремальних від'ємних значень дилатації (зменшення площі).

Отримані результати підтверджують наявність на території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС сучасних вертикальних рухів. Проте, вони не дають змоги визначити коротко термінові кінематичні особливості території. Тому для виявлення таких особливостей території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС виконано перехід від вимірних висот геодезичних пунктів до значень зміни висоти відносно їх початкового положення. В результаті кореляційного та візуального аналізу отриманих значень встановлено, що деякі геодезичні пункти опорної висотної мережі Дністровської ГАЕС мають подібні кінематичні характеристики. Групування таких геодезичних пунктів дало змогу виділити на території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС, 5 основних зон із різними кінематичними характеристиками (рис. 4.3).

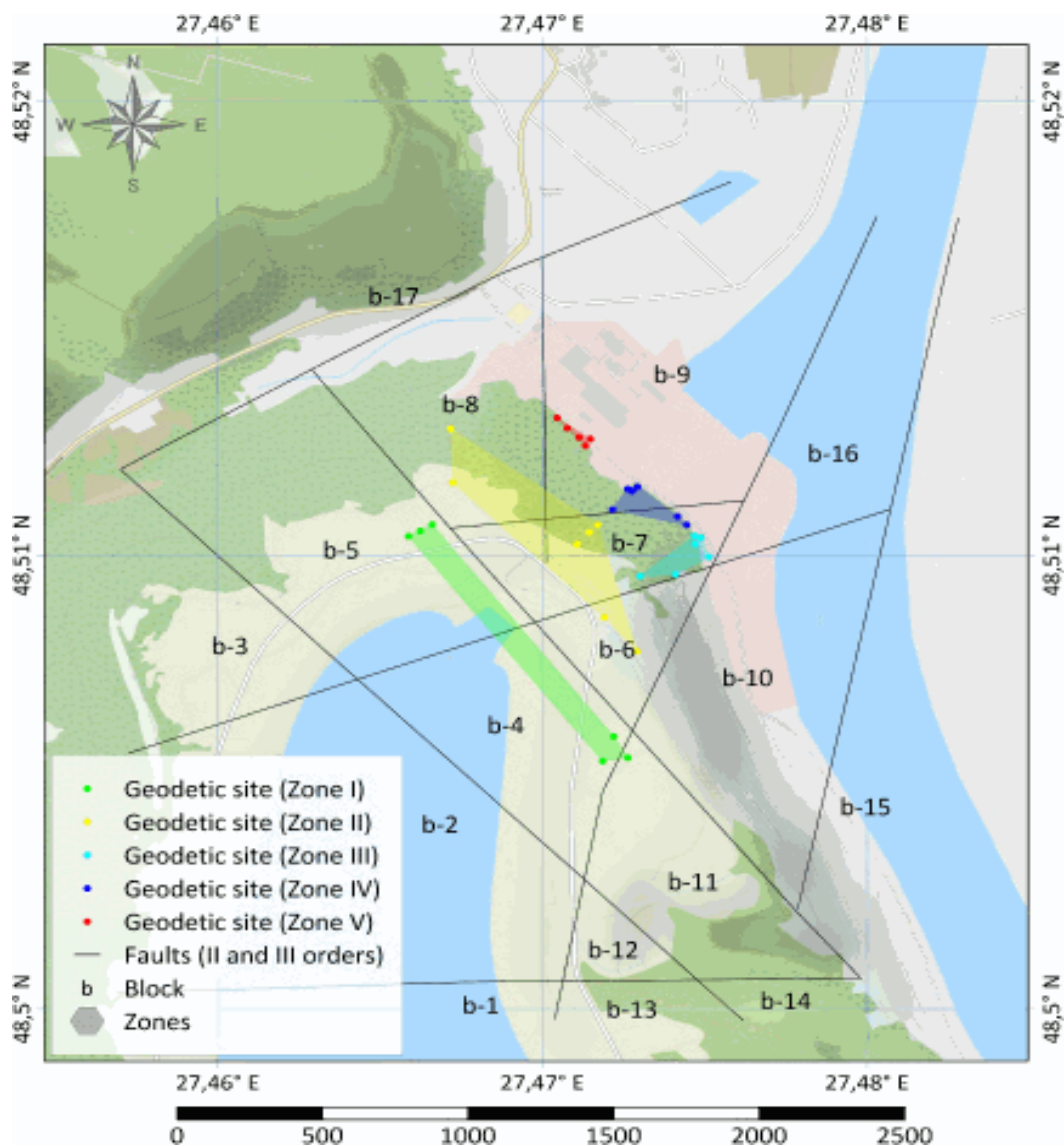


Рисунок 4.3 – Зонування території будівельного майданчика Дністровської ГАЕС.

Карта доповнена розломами (див. рис. 3.7)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

Слід зазначити, що межі виділених зон (Рис. 4.3) побудовані по периметру групи геодезичних пунктів із подібними кінематичними характеристиками.

Такий підхід ґрунтується виключно на основі аналізу результатів високоточного геометричного нівелювання. Очевидно межі виділених зон можна було б значно уточнити виконавши додатковий комплексний аналіз сучасних локальних горизонтальних та вертикальних рухів, а також аналіз геологічної структури регіону. В результаті порівняння меж виділених зон із наявною тектонічною структурою (див. рис. 4.3) встановлено, що найскладнішою для інтерпретації є ситуація в блоках 7 та 9, до яких потрапляють відповідно 3 та 2 зони

із різними кінематичними характеристиками. Наявність зон із різними кінематичними характеристиками в межах одного блоку, на нашу думку, може бути спричинено додатковим техногенним навантаженням отриманим в результаті будівництва Дністровської ГАЕС. Для детального аналізу та інтерпретації кінематичних характеристик кожної із виділених зон на рисунках (рис. 4.4 - 4.8), представлено графіки зміни значень висоти геодезичних пунктів, які входять до цих зони відносно їх початкового положення впродовж періоду досліджень.

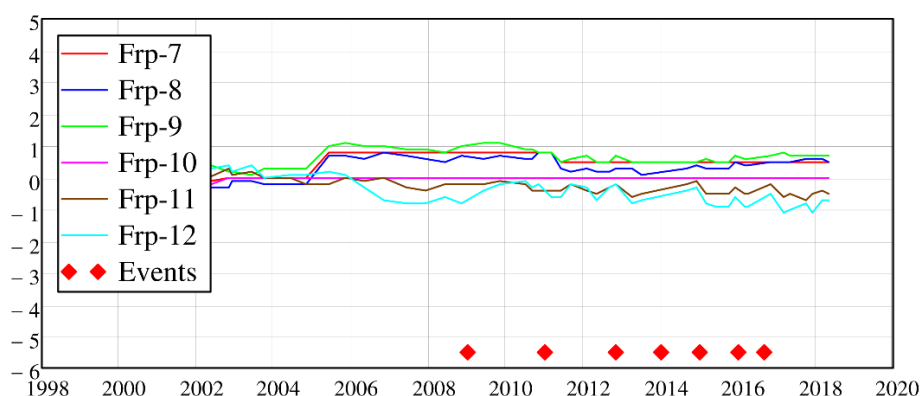


Рисунок 4.4 – Зміни висот геодезичних пунктів протягом досліджуваного періоду  
(Зона I)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

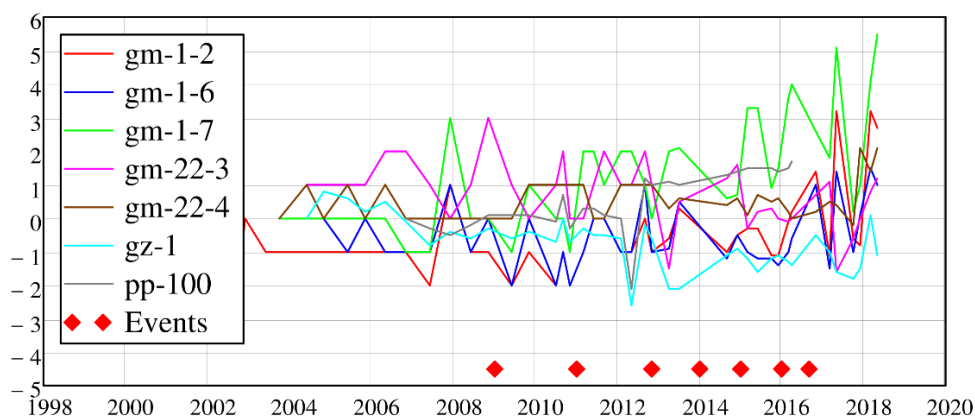


Рисунок 4.5 – Зміни висот геодезичних пунктів протягом досліджуваного періоду  
(Зона II)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

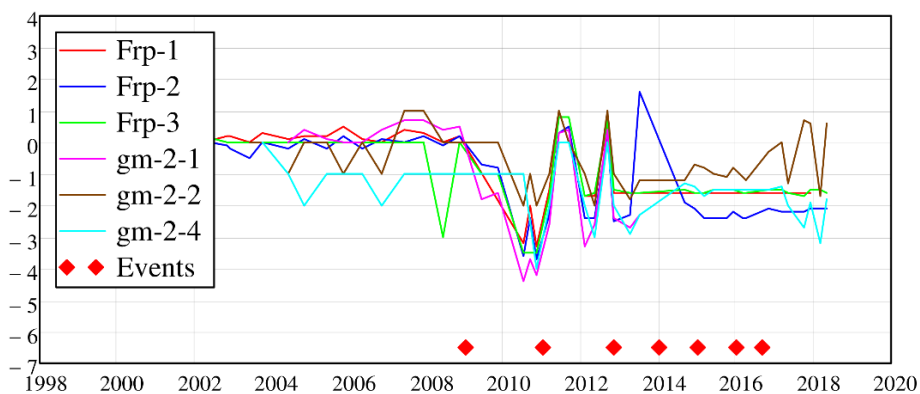


Рисунок 4.6 – Зміни висот геодезичних пунктів протягом досліджуваного періоду  
(Зона III)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

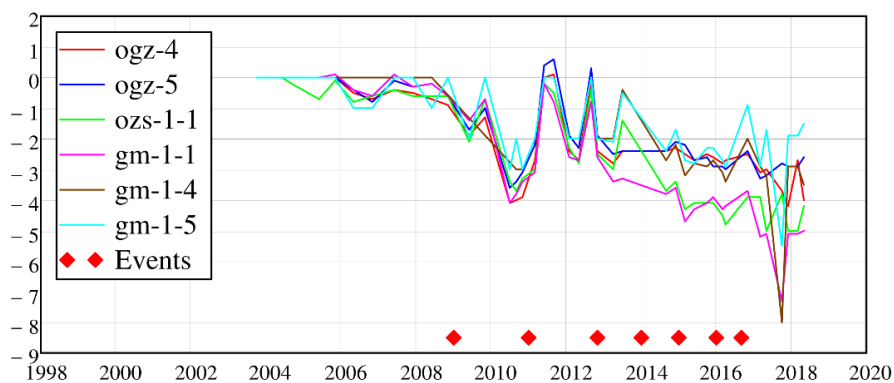


Рисунок 4.7 – Зміни висот геодезичних пунктів протягом досліджуваного періоду  
(Зона IV)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

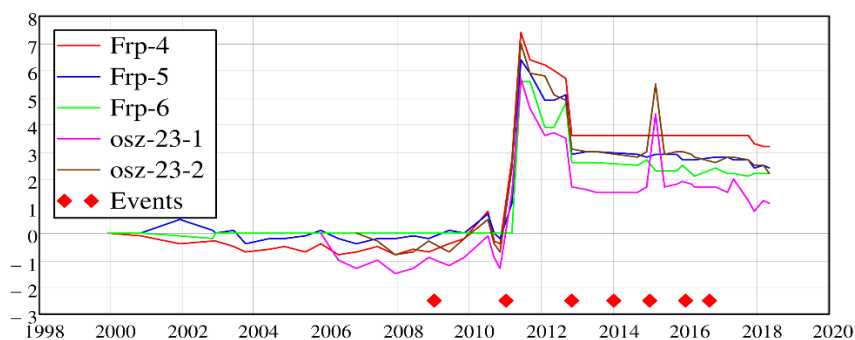


Рисунок 4.8 – Зміни висот геодезичних пунктів протягом досліджуваного  
періоду (Зона VI)

*Джерело: (Savchyn & Zyhar, 2020)*

В результаті аналізу наведених графіків (див. рис. 4.4-4.8) встановлено, що існує кореляція між появою критичних (граничних) значень вертикальних рухів у зонах III, IV та V, а також додатковим техногенним навантаженням спричиненим в результаті будівництва Дністровської ГАЕС. В цих зонах до грудня 2008 року спостерігається відносна стабільність майже всіх геодезичних пунктів, проте пізніше в зонах III та IV чітко ідентифікуються опускання, а у зоні V - підняття геодезичних пунктів. Очевидно такі вертикальні рухи спричинені початком пускових операцій на першому гідроагрегаті - 21 грудня 2008. Введення у промислову експлуатацію першого гідроагрегат 22 грудня 2010 стало причиною значного підняття (в межах 3-9 мм) усіх геодезичних пунктів у зонах III, IV та V.

Натомість після введення в експлуатацію верхнього водоймища по всій площі 20 жовтня 2012 року спостерігаються значне опускання (в межах 2-4 мм) всіх геодезичних пунктів. Інші основні етапи, які входили до першої черг будівництва Дністровської ГАЕС мали вплив тільки на незначну кількість геодезичних пунктів у виділених зонах III, IV та V. Із 2015 року спостерігається відносна стабільність вертикального положення геодезичних пунктів у зонах III та V, а також систематичне опускання у зоні IV. Зона I впродовж всього періоду досліджень характеризується незначними вертикальними рухами геодезичних пунктів в межах  $\pm 1$  мм.

Вертикальне зміщення у зоні II знаходяться у межах від +7 до -2 мм та мають хаотичний характер, тому кореляційних зв'язків із іншими зонами, а також із додатковим техногенним навантаженням спричиненим в результаті будівництва Дністровської ГАЕС для цієї зони не виявлено. Сучасні зміни вертикальних деформацій станом на 2023 рік відображено (додаток Д).



Рисунок 4.9 – Фото візуального проявлення похованого яру (тектонічного порушення) станом на 2024 рік.

*(розроблено автором)*

Для безперервного контролю та оцінки небезпеки, в районі гідровузла необхідно збільшити кількість давачів (АСК) деформацій. Вона дасть можливість постійних спостережень за станом будівництва та експлуатації Дністровської ГАЕС з метою забезпечення умов її безпечної експлуатації для збереження життя людей, навколишнього середовища та господарської інфраструктури.

#### **4.2. Зміни гідрогеологічного режиму.**

Для вивчення фільтраційного режиму ґрунтів у меж гірського плато на якому розташована Дністровська ГАЕС, було пробурено низка п'єзометричних свердловин (рис. 4.10),.

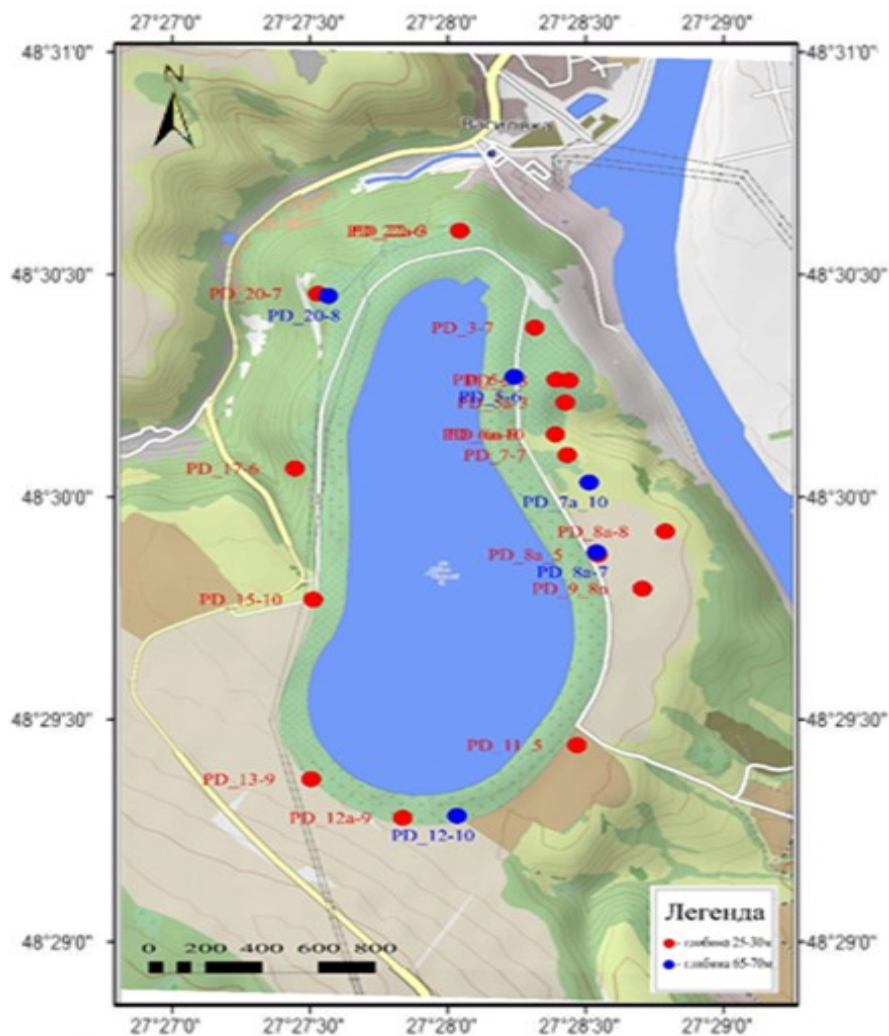


Рисунок 4.10 – Схема розташування п’езометричних свердловин.

(Зигар, 2024а)

Свердловини охоплюють два основні структурно-стратиграфічні комплекси, які беруть участь у геологічній структурі регіону – мезо - кайнозойський, складений осадовими утвореннями крейди, неогену й четвертинними відкладеннями різного генезису й потужності. Свердловина оснащена металевією трубою з сітчастим фільтром на кінці, з різним кроком заглиблення 25 - 33 метри та 65 - 75 метрів. Для дослідження було обрано за період з 01.01.2010 р. по 12.12.2023 р., впродовж якого отримано в середньому 267 значень окремо по кожній із точок, в загальному разом води було опрацьовано 6142 значень. Слід зазначити, що дані були отримані безпосереднім заміром в ручному режимі. Це дозволяє отримувати однозначні результати. Геологічний розріз розташування безнапірних водоносних горизонтів №1, та №2 відповідно для п’езометрів (див. рис. 2.3), заглиблених на 25-30 метрів

та п'єзометрів заглибленням 65-75 метрів з наведеними коефіцієнтами фільтрації (рис. 4.11).

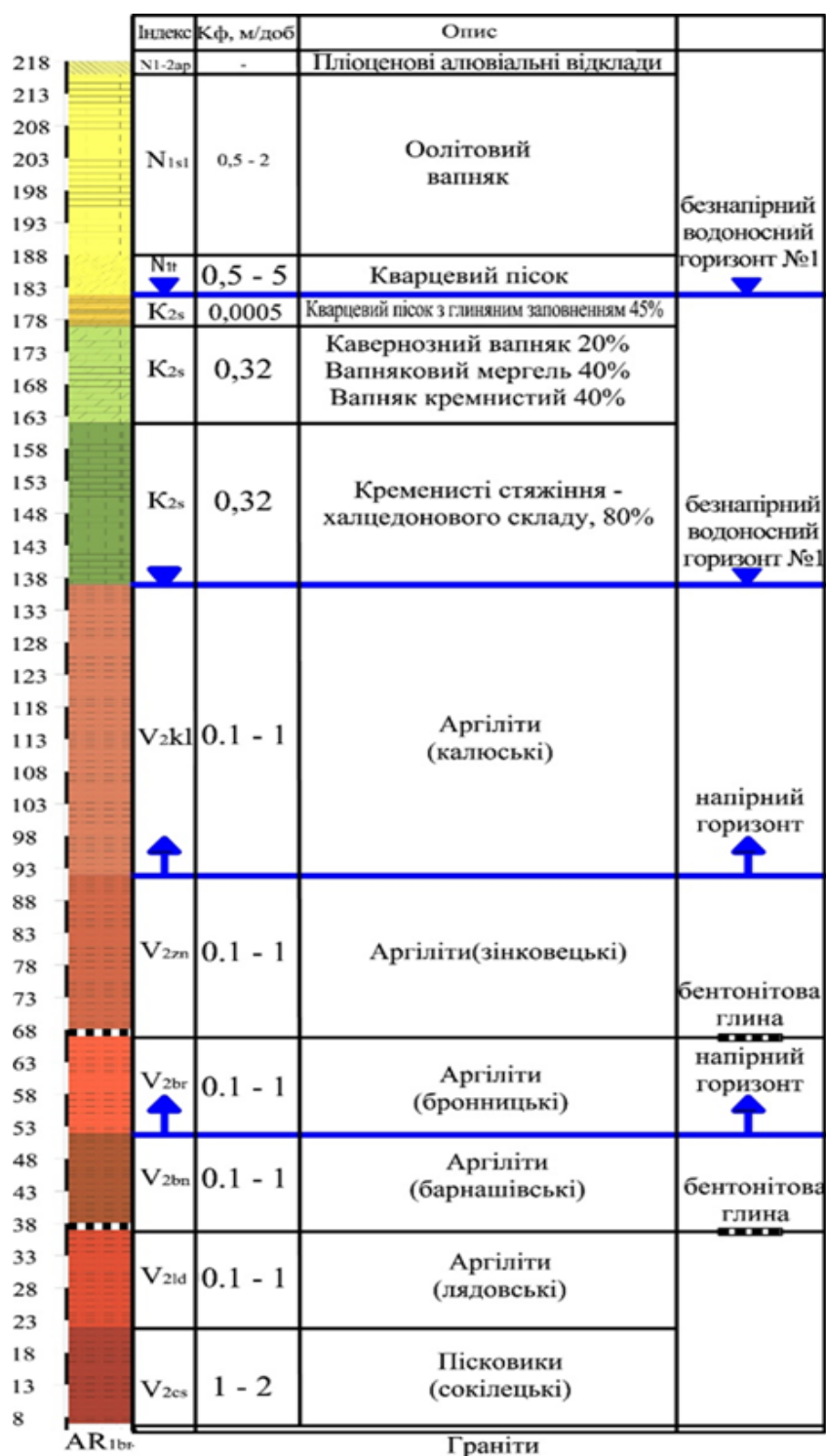


Рисунок 4.11 – Геологічний розріз з відображенням безнапірних та напірних водонасичених горизонтів №1, №2.

Складено за даними: (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020)



В процесі дослідження було встановлено наступне: гідрогеологічні умови району складні. Тут спостерігається розвантаження декількох водоносних горизонтів з різним режимом живлення. Пластово - тріщинні й тріщинні води в корінних породах мають напірний, іноді високонапірний, а частіше безнапірний характер залягання. Вони присвячені до горизонтів тріщинуватих вапняків ( $N_{1s1}$ ), пісків у тортонському шарі ( $N_t$ ) та верхній крейді, піщаників у товщі верхнього протерозою ( $V_2$ ). Більша їхня частина дренується схилами долини р. Дністер і великими ярами. У цілому для території характерна сильна дренованість і слабка обводненість порід. (Vainberg, 1993).

Перший безнапірний водоносний горизонт залягає на глибині 20-25 м абсолютна відмітка 180-185 м Балтійська система висот БС (Gruber та ін., 2020; Wolski та ін., 2016), від поверхні вододілу неогеновий водоносний горизонт, що утворюється безпосередньо внаслідок інфільтрації атмосферних опадів та штучної водойми, не має суцільне поширення, представляє обводнені ділянки, що формуються на поверхні невитриманого шару тортонських глин. Він бере активну участь у живленні (шляхом перетікання води через роздільні шари) залягаючи нижче водоносних горизонтів, особливо верхньокрейдяного, в обводнюванні прилеглих схилів, по яких спостерігаються джерела, пов'язані із цими двома водоносними горизонтами.

Другий від поверхні постійний водоносний горизонт – верхньокрейдяний, залягає на глибині 65-70 м, відмітка 140-145 м (БС) тісно пов'язаний з водами тріщинуватої зони аргілітової алевролітової товщі ( $V_2$ ), інтенсивно дренується долинами рік. До пачок ( $V_{2br}$ ) приурочиний ряд слабо водонасичених, але високонапірних пластово-тріщинних водоносних горизонтів. Як і відзначені вище водоносні горизонти, вони мають строкатий хімічний склад і різну мінералізацію (до 1 г/л). В днищі долини р. Дністер розповсюджений єдиний водомісткий комплекс, приурочений до алювію та тріщинуватої зони корінних порід ( $V_2$ ), близький за хімічним складом до охарактеризованих водоносних горизонтів.

У зв'язку з розвантаженням (по тектонічних зонах) глибинних вод відзначається місцями підвищена мінералізація ґрунтових вод (до 3,3 г/л). Зміни в гідрогеологічному режимі після наповнення нижнього водосховища відбулися в барнашівському водоносних горизонтах, які на ділянці між с. Барнашівка-Липчани умовах експлуатації водосховища набувають локальні й незначні напори, а також в джурджевському водоносному горизонті на Дністровському схилі в зоні водоводів. Отже, після аналізу геологічної структури можемо безпосередньо зосередитись на конкретних показниках рівнів води у п'єзометрах, та еволюції гідрогеологічних умов до та після запуску в експлуатацію, з урахуванням змін, що відбулися в гідрологічному середовищі водоносного горизонту №1 (рис. 4.12).

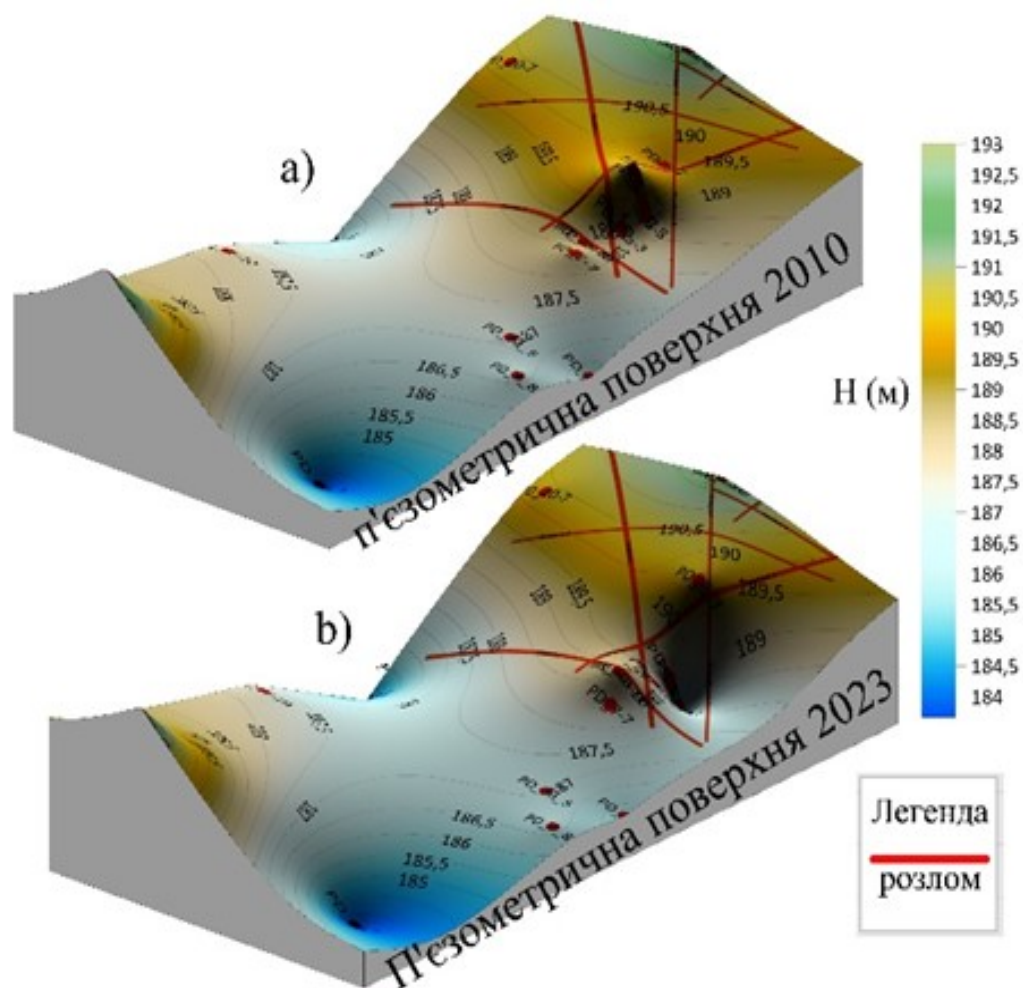


Рисунок 4.12 – а) П'єзометрична поверхня безнапірного водоносного горизонту №1 у 2010 році. б) П'єзометрична поверхня безнапірного водоносного горизонту №1 у 2023 році.

(Зигар, 2024а)

Графік зміни рівня води у безнапірному водоносному горизонті №1 за період 2010 – 2023 роки. (Рис. 4.13).

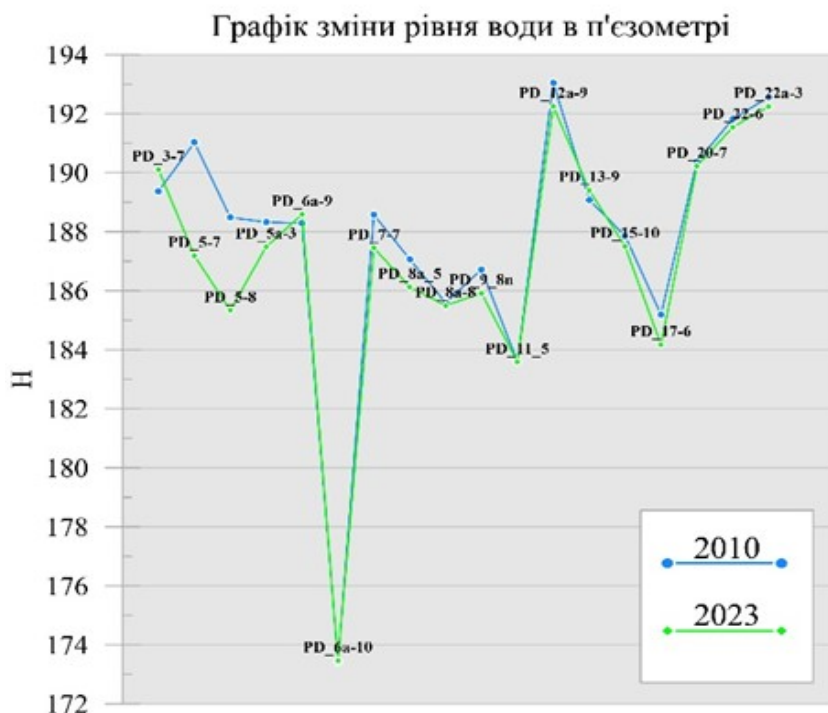


Рисунок 4.13 – Графік зміни рівня води у безнапірному водоносному горизонті №1 за період 2010 – 2023 роки.

(Зигар, 2024а)

Гідрогеологічні умови масиву гірських порід в інтервалі досліджуваних глибин раніше характеризувалися наявністю неогенового водоносного горизонту який залягав в підшві товщі вапняків. Водотривким шаром для неогенового водоносного горизонту служить шар тортонської глини. Нині як ми можемо спостерігати цей горизонт на локальних ділянках сильно здренований. Зміни в гідрогеологічному режимі можуть бути спричинені як розущільненням гірської породи внаслідок зміни напруженого деформаційного стану, так і активацією геодинамічних процесів, що, у свою чергу, сприяють дренажу через розломи у гірському масиві (Day та ін., 1998; Howells, 1974; Karl, 1962; Keith та ін., 1982; Tretuyak та ін., 2024). Під товщею ( $N_t$ ) залягають верхньокрейдяні кремнисто – піщано -глинисто - мергелісті відкладення ( $K_2s$ ).

Аналогічно розглянемо зміну гідрогеологічних умов до та після запуску в експлуатацію (Рис. 4.14), та графік зміни рівня води у безнапірному водоносному горизонті №2 за період 2010 – 2023 роки (Рис. 4.15).

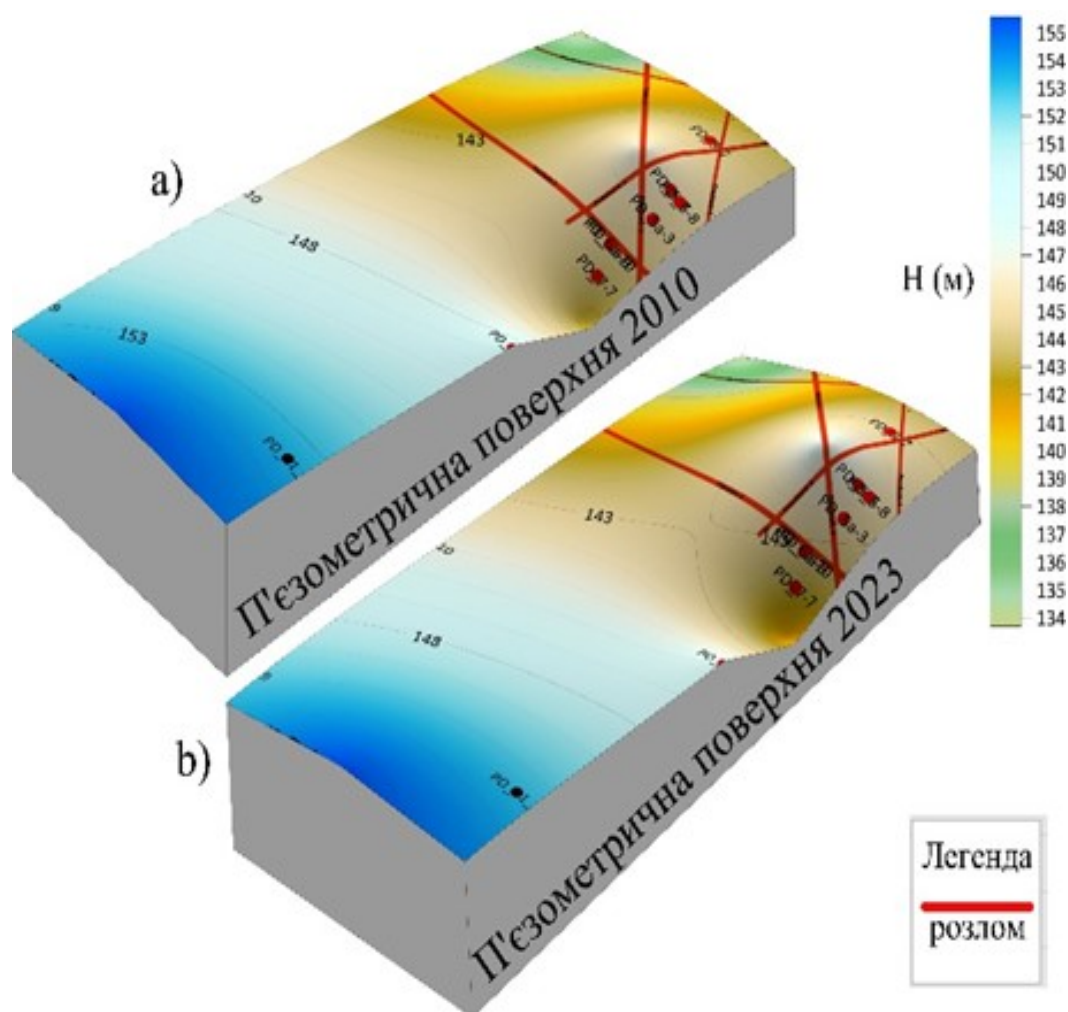


Рисунок 4.14 – а) П'єзометрична поверхня безнапірного водоносного горизонту №2 у 2010 році. б) П'єзометрична поверхня безнапірного водоносного горизонту №2 у 2023 році.

(Зигар, 2024а)

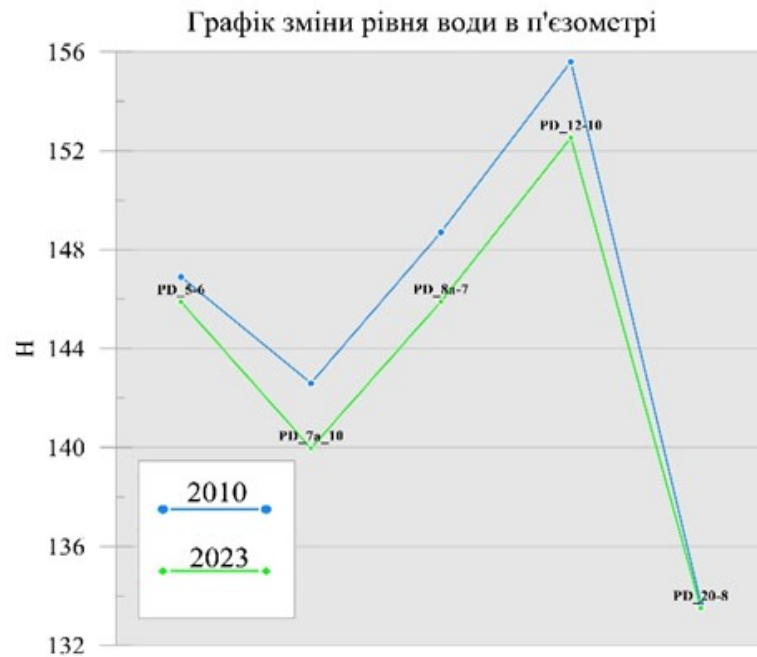


Рисунок 4.15 – Графік зміни рівня води у безнапірному водоносному горизонті №2 за період 2010 – 2023 роки.

(Зигар, 2024а)

Дослідження свідчать, що протягом періоду з 2010 по 2023 рік відбулися суттєві зміни в гідрогеологічному режимі безнапірних горизонтів №1 та №2.

### 4.3. Дослідження локальної сейсмічності

У контексті, аналізу локальної сейсмічної активності та її зв'язку з функціонуванням гідровузла має велике значення для забезпечення безпеки та стабільності роботи цього важливого об'єкта. Основна мета дослідження полягає у виявленні залежності між змінами рівня води та локальною сейсмічною активністю регіону в якому функціонує каскад ГЕС та ГАЕС. Для аналізу сейсмічної активності було використано статистичну зібрану за період з 2016 по 2021 рік, інформацію, отриману з відкритого джерела (International seismological centre, 2023.). Використовуючи фільтрацію, було відібрано гіпоцентри в радіусі 30 км від сейсмічної станції з індексом NDNU, за допомогою інструментів геоінформаційних технологій, гіпоцентри землетрусів були нанесені на картографічну основу (Рис. 4.16).

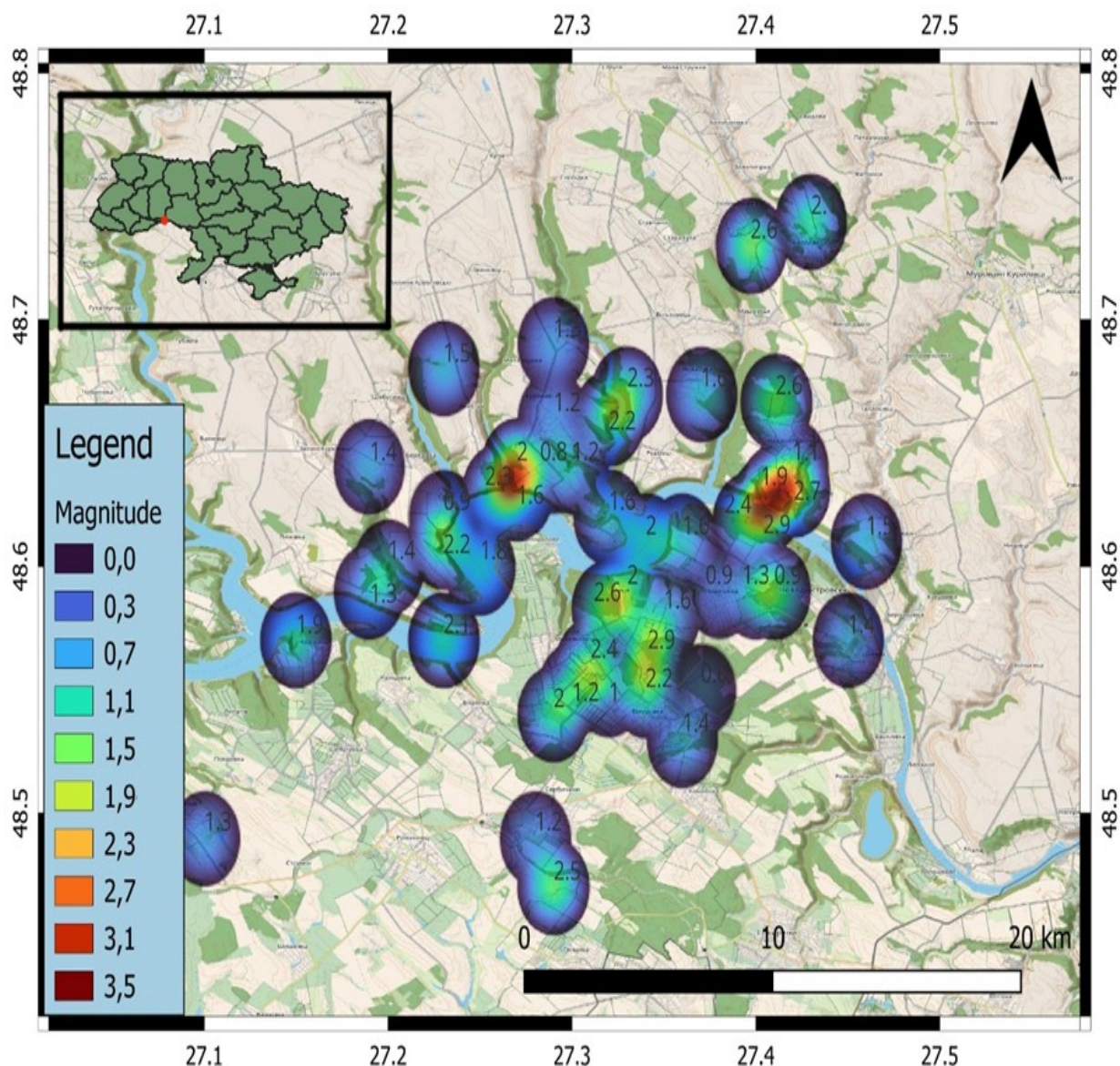


Рисунок 4.16 – Карта щільності сейсмічних явищ за період з 2016 по 2021 роки.

*Джерело : (Zuhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)*

Як ми бачимо (див. Рис. 4.16), у регіоні, який ми розглядаємо, спостерігаються зони з високою щільністю сейсмічних явищ, особливо координати гіпоцентрів зосередженні на Пн-Сх, Пд, та центральній частині карти переважно із низькою магнітудою. Аналогічним способом у системі координат WGS – 84 на основі інформації (International seismological centre, б. д.) було нанесено на базову карту глибини землетрусів (Рис. 4.17).

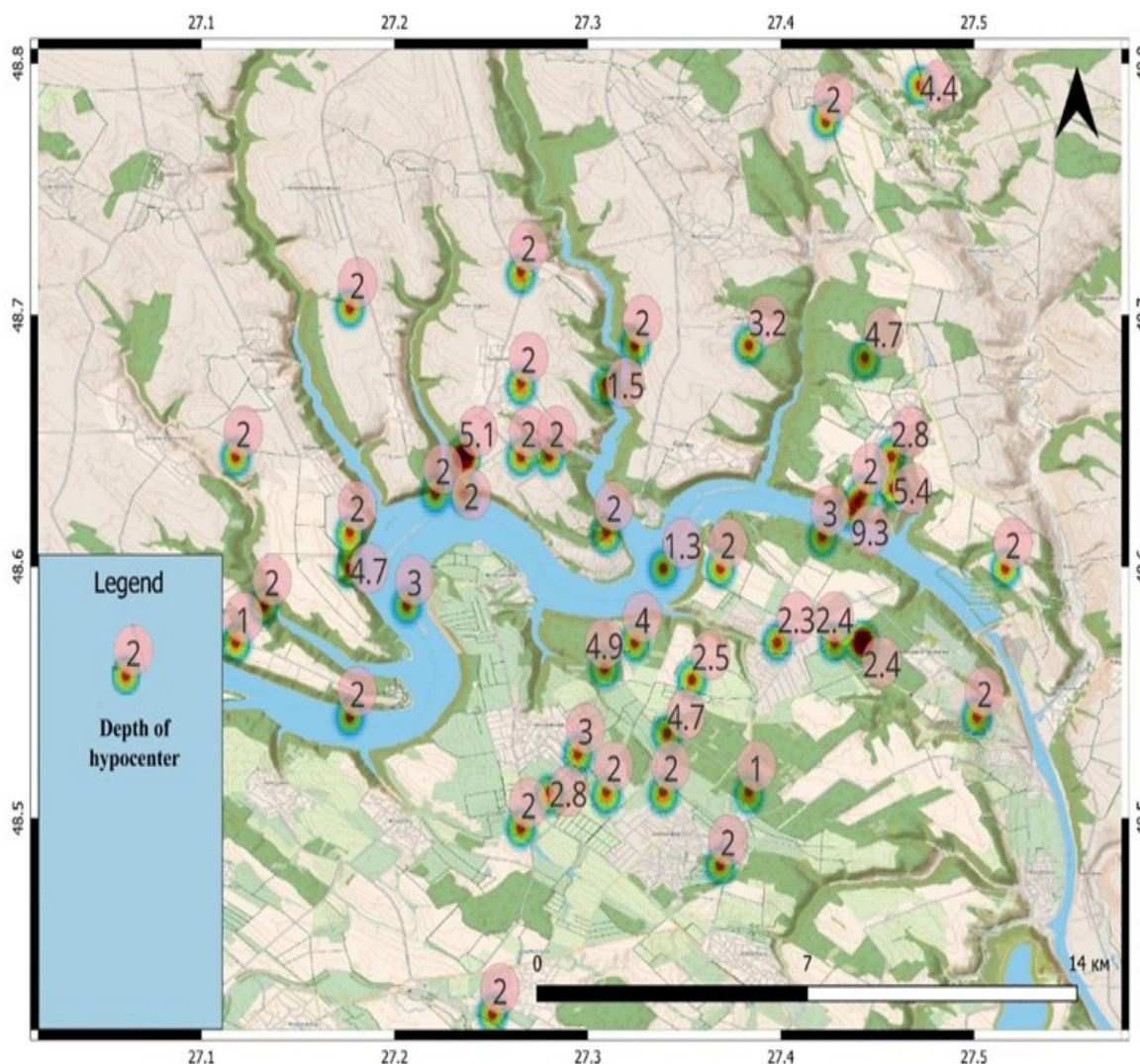


Рисунок 4.17 – Карта гіпоцентрів з глибинами сейсмічних явищ за період з 2016 по 2021 роки.

*Джерело* : (Zuhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)

З огляду на отриману інформацію про щільність епізодів, сконцентрованих у зоні експлуатації водосховища, а також магнітуду і невелику глибину, можна зробити такі висновки: низька глибина гіпоцентра землетрусу вказує на близькість гіпоцентра до поверхні землі й активацію розломів в геологічних шарах. Зазвичай глибокі осередки землетрусів (понад 70 км) пов'язані з тектонічними плитами (Purcaru & Berckhemer, 1982). Низька магнітуда ж може вказувати на індукування сейсмічних епізодів у зв'язку зі зміною напружень у ґрунті (Chopra & Chakrabarti, 197; Day та ін., 1998; Zhao та ін., 2022). Для подальшого аналізу сейсмічної активності необхідно звернутися до геологічної карти (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020.), (рис. 4.18), на якій позначено осередки

гіпоцентрів землетрусів. Для підтвердження гіпотези про можливий зв'язок між сейсмічною активністю та лініями розломів слід перевірити наявність кореляції між розташуванням цих осередків і розташуванням ліній розломів на карті.

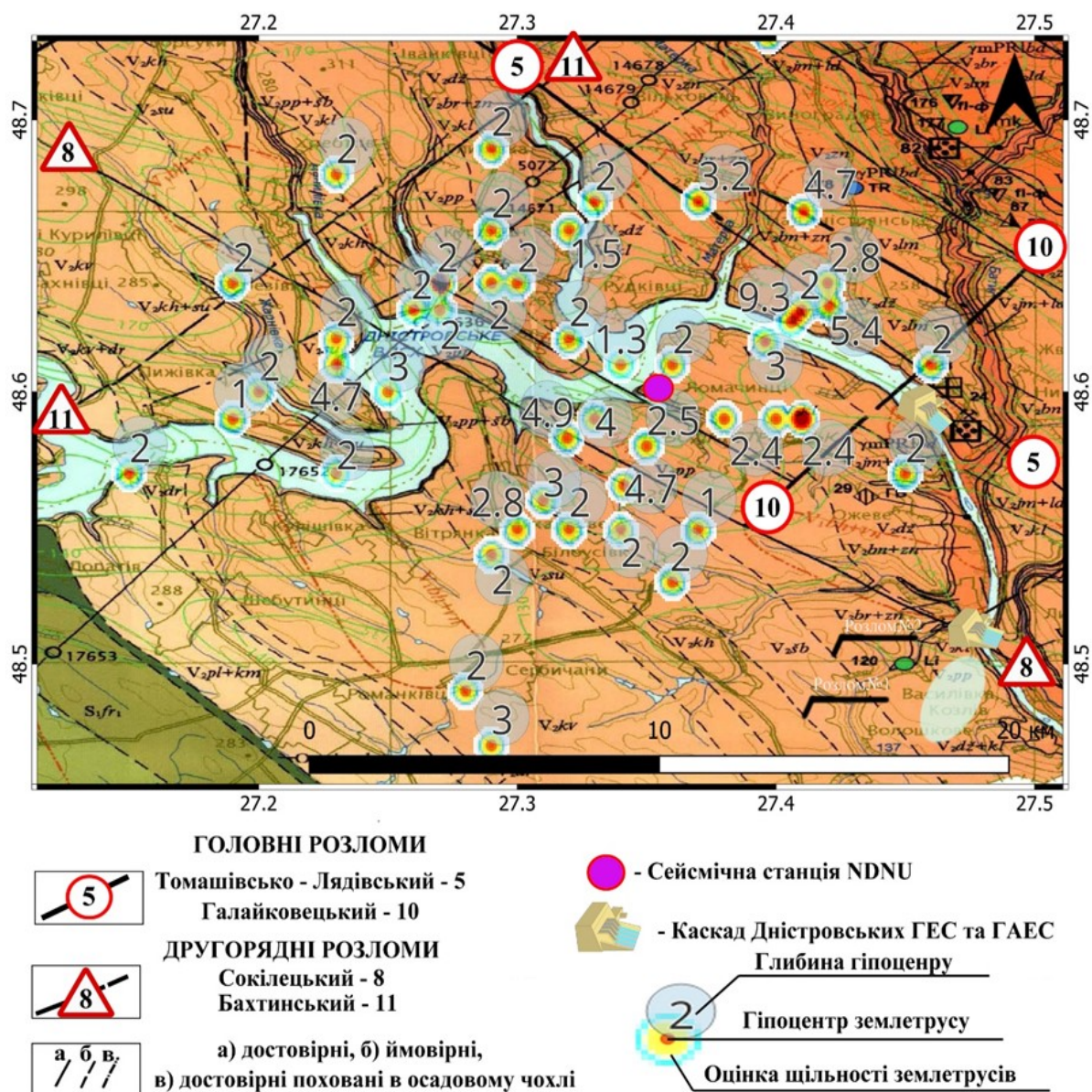


Рисунок 4.18 – Локальна ділянка геологічної карти домезозойських утворень.

Джерело : (Zyhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)



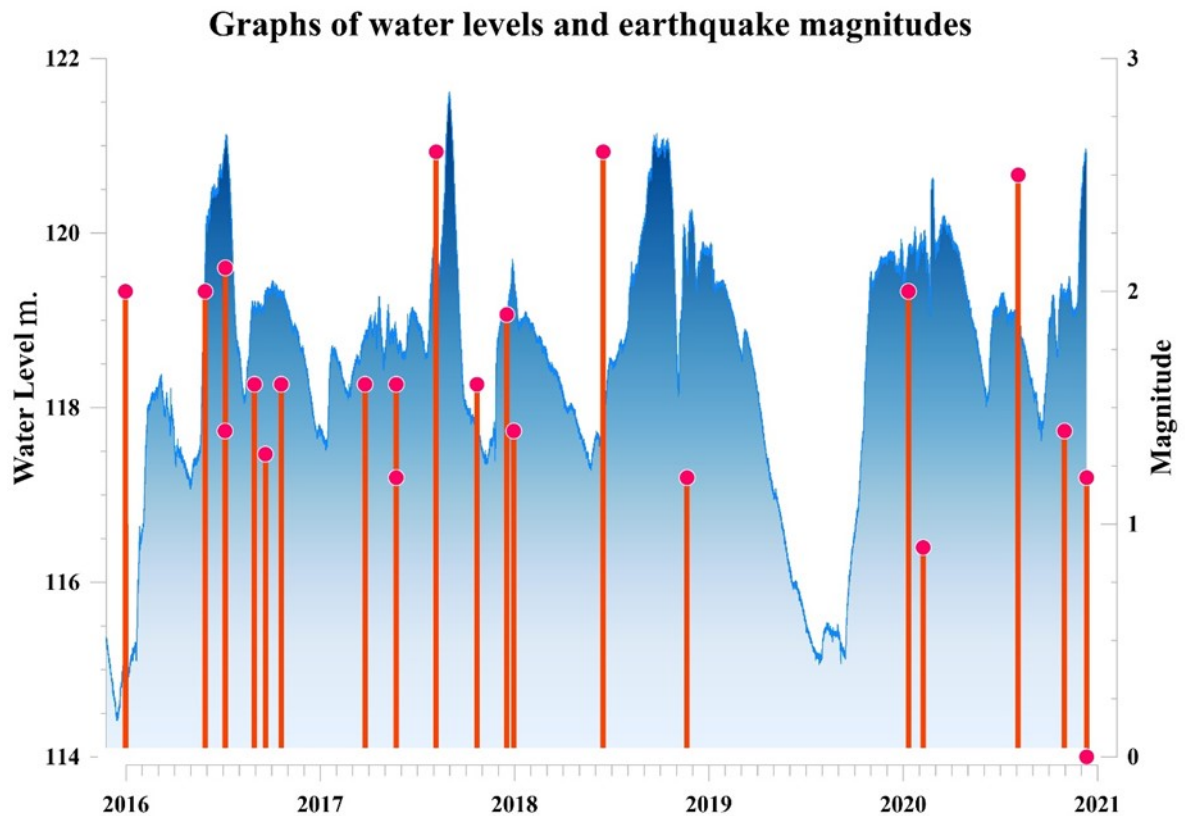


Рисунок 4.19 – Графік залежності рівня води від магнітуди землетрусів із синхронізованими датами подій.

*Джерело : (Zyhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)*

Виходячи з проведеного аналізу геологічної карти (рис. 4.19) з нанесеними гіпоцентрами землетрусів і лініями розломів, можна зробити висновок, що спостерігається чітка кореляція між гіпоцентрами землетрусів і лініями розломів.

Це може свідчити про те, що активація цих зон розломів відбувається внаслідок динамічних впливів, пов'язаних із коливаннями рівня води в резервуарі водосховища. Таким чином, можна з більшою впевненістю припустити, що землетруси відбуваються в районах, прилеглих до розломів. Вивчення геологічної карти з нанесеними гіпоцентрами землетрусів і лініями розломів показало, що деякі гіпоцентри розташовані на розломах які на карті зазначені як «ймовірні» а саме розлом 1 з координатами розлом 2. Це вказує на те, що виникнення землетрусів у зонах ймовірних розломів була підтверджена, і що ці зони слід розглядати як потенційно небезпечні з точки зору сейсмічної активності.

Для того, щоб дослідити зв'язок між частотою виникнення землетрусів і змінами рівня води в резервуарі Дністровського водосховища, необхідно було зібрати інформацію з гідропостів, де відображено динаміку зміни рівня води в часі. Було опрацьовано близько 40000 замірів рівнів коливань води у резервуарі водосховища за період з 2016 – 2021 років. Також потрібно було синхронізувати час настання сейсмічного явища, відлік якого ведеться за міжнародним часом, до місцевого, в якому були виконані заміри рівнів води (рис. 4.18). Проаналізувавши графік (див. рис. 4.18), ми спостерігаємо приклад так званих «індукованих землетрусів». Відомо, що індуковані землетруси можуть виникати внаслідок різних людських дій, включно з наповненням водосховищ. Такі землетруси, як показує графік, мають свою характеристичну залежність між магнітудою і зміною рівня води. Незважаючи на те, що це явище не нове і вже давно вивчене, а саме розкрито в роботах (Gupta, 1992; Keith та ін., 1982; Talwani & Acree, 1986), воно залишається актуальним сьогодні та потребує постійної уваги з боку наукового товариства, тому що може призводити до негативних наслідків для людської діяльності та навколишнього середовища.

Для проведення більш детального аналізу було досліджено вплив температури води вимірюваної у придонних шарах водосховища, (рис. 4.20) на епізоди сейсмічних явищ. Результати аналізу не дають чітко встановити прямий зв'язок між температурним режимом води і виникненням сейсмічних явищ. Натомість отримані дані підтверджують гіпотезу про те, що активація землетрусів пов'язана переважно зі циклічною зміною напружень у ґрунтах, відповідно і в розломах.

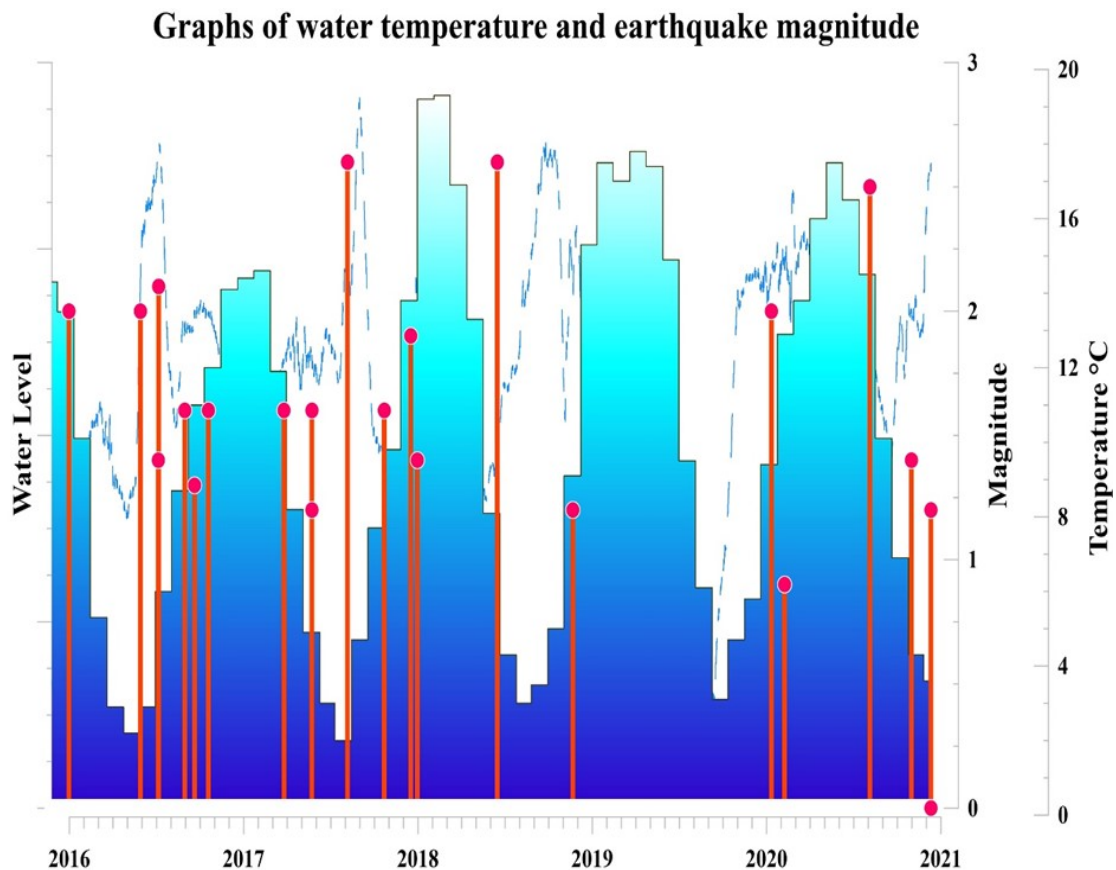


Рисунок 4.20 – Графік залежності температури за місяць води від магнітуди землетрусів із синхронізованими датами подій.

*Джерело: (Zyhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)*

Враховуючи вище сказане проведемо уявний експеримент. Уявімо що ми маємо площину, до якої прикладений вектор напруги під кутом відмінним від нормалі, відомо що це напруження завжди буде розкладатися на нормальне ( $\delta$ ) та дотичне ( $\tau$ ) згідно з теорією Кулона – Мора (Howells, 1974b; Parotidis та ін., 2003; Talwani, 1976; Talwani & Acree, 1986).

Спробуємо в уяві розвернути площину перпендикулярно силі напруження, тоді у нас максимально починає діяти нормальні напруження, а дотичні будуть дорівнювати нулю. Враховуючи те, що ми не володіємо надточною інформацією про геологічну структуру водосховища, азимути падіння розломів, зводимо умову до твердження того - що на ложе водосховища діють тільки нормальні ( $\delta$ ) напруження (Zoback, б. д., с. 7). напруження, у вигляді стовпа води, та дві горизонтальні напруги, які є взаємно перпендикулярні. Враховуючи те що наша площина знаходиться на розподілі середовищ, а саме ґрунт – вода, можемо задля

спрощення геомеханічної моделі допустити, що діє тільки вертикальна складова напруги, а саме стовп води який і створює тиск в МПа на ґрунт (Célérier, 2008; Petruscelli та ін., 2019). Для опису геомеханічної моделі використовуємо класифікацію (Anderson, 1905), а саме режим «dropout mode». Це найпоширеніший режим взаємодії тектонічних блоків по лінії розлому. Без особливих математичних обчислювань ми можемо графічним способом оцінити напруженість в ґрунтах. В лабораторних умовах використовується прилад одноплощинного зрізу де створюється вертикальний тиск без застосування бокових напружень. Такий дослід проводять до моменту повного руйнування зразка. Аналогічно можна припустити що руйнація структурних зв'язків в ґрунті призводить до землетрусу.

Основним показником який характеризує міцність цих структурних зав'язків – коефіцієнт зчеплення (C). За допомогою теорії Кулона – Мора, визначають граничні напруження які призводять до руйнування структурних зв'язків. Дотичні напруження ( $\tau$ ) вісь Y, згідно з умовами завдання відсутні та дорівнюють нулю, на вісь X наносимо величину напруження в МПа, в момент якої стався землетрус (рис. 4.20), і так по кожному епізоду сейсмічного явища. Величина вертикального напруження вирахована по закону Паскаля знаючи висоту стовпа води.

### Mohr's diagram for ultimate stresses in uniaxial compression.

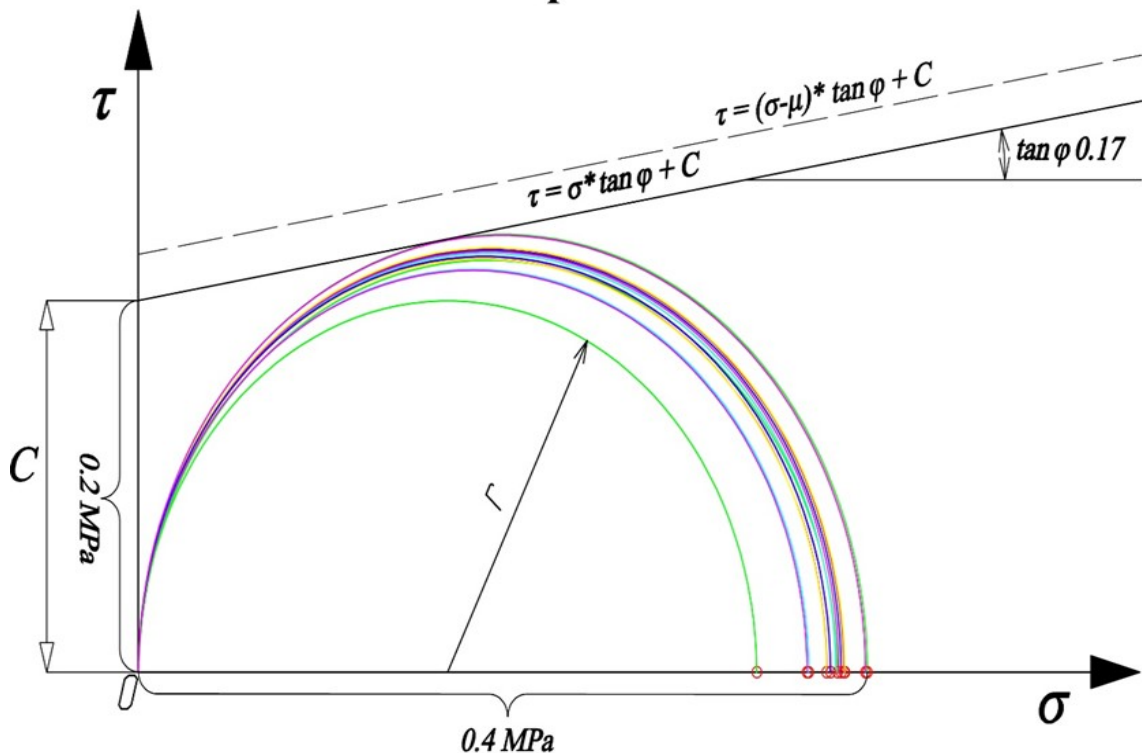


Рисунок 4.21 – Діаграма Мора для граничних напружень у ґрунтах, розташованих у зоні дії Дністровського водосховища.

Джерело: (Zyhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)

Отже, після виконаних розрахунків ми можемо припустити що основна щільність землетрусів відбувається в ґрунтах з коефіцієнтом внутрішнього зчеплення  $C = 0,2$  МПа, враховуючи те що відсутня інформація стосовно показників порового тиску згідно з теорією Карла Терцагі, чим вищий поровий тиск – ( $u$ ), тим менший зовнішній механічний тиск ( $\sigma$ ) передається на скелет ґрунту (Karl, 1962), цей показник буде вищим, (див. рис. 4.21) зображено штрихпунктирною лінією, та кутом внутрішнього тертя  $\text{tg}(\phi) = 0.17$ , на глибині переважно 2-3 км. Отримані значення геотехнічних показників дають змогу схарактеризувати ґрунт як достатньо міцний, та щільний, про що свідчить кут внутрішнього тертя  $\text{tg}(\phi) = 0.17$ , який можна інтерпретувати як показник кількості дефектів ґрунті. У природному стані ці дефекти утримуються між собою за допомогою  $C = 0,2$  МПа. Відповідно таким ґрунтам властива крихкість. Тому важливо дотримуватися безпечних

градієнтів швидкості скиду навантаження. Аналізуючи вище сказане ми можемо наближено визначити оптимальні режими роботи водосховища, цей показник буде знаходитись в межах 0,2 – 0,3 МПа (рис. 4.22).

### Differentiation of load zones on the reservoir bed

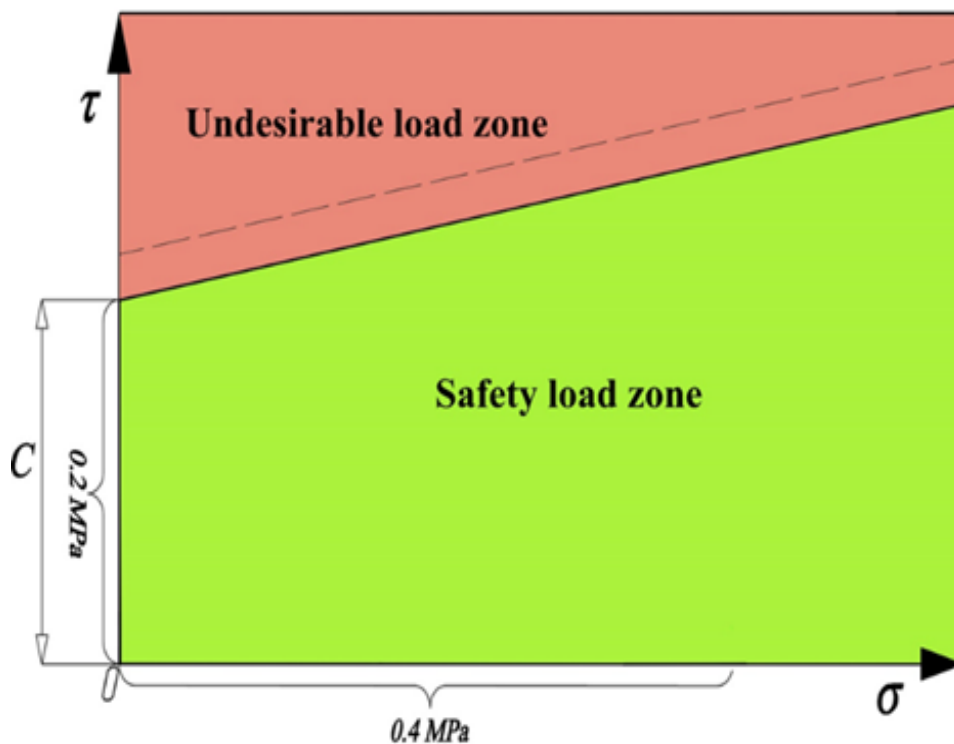


Рисунок 4.22 – Інтерпретація діаграми Мора для наближеного визначення оптимальних градієнтів навантажень на ґрунти, розташованих у зоні експлуатації Дністровського водосховища.

*Джерело: (Zuhar, Yushchenko & Savchyn, 2023)*

Практичне значення цього дослідження полягає в розумінні впливу градієнта напруги на індукційні землетруси. Описаний метод який базується на принципах закону Кулона та теорії Мора, дозволяє дистанційно дослідити поведінку матеріалу за різних умов навантаження. Дане дослідження і розробка геомеханічної моделі дають змогу краще зрозуміти і передбачати поведінку землетрусів і визначити безпечні зони навантаження. Це має практичне значення при проєктуванні та будівництві споруд, а також для оцінювання ризиків і вжиття відповідних заходів щодо забезпечення безпеки.

#### **4.4. Дослідження горизонтальної динаміки: механізми та динаміка напружень**

Для вивчення напружено-деформаційної поведінки ґрунтів у межах плато, на якому розташована Дністровська ГАЕС, було закладено дві інклінометричні свердловини №1 та №2 (рис. 4.23). Свердловини охоплюють два основні структурно-стратиграфічні комплекси, які беруть участь у геологічній структурі регіону – фундамент Східноєвропейської платформи (протерозой) та її осадовий покрив (фанерозойські утворення), (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020.). Слід зазначити, що неогенові слабкі та нестійкі шари були видалені з основи, під час будівництва верхнього басейну Дністровської ГАЕС. Стратиграфічне розташування геологічних шарів для обох свердловин практично однакове, азимут простягання шарів становить  $\text{ПнЗх} = \pm 78^\circ$ , свердловини не обводнені (рис. 4.24). В районі свердловин вивчений керн і проведені пресометричні дослідження деформованості порід, лабораторно обчислений модуль деформації геологічних шарів (E) (Укргідропроєкт, 2023) . Також в працях (Bubniak та ін., 2020) ґрунтуючись на лініаметному аналізі встановлено, що Дністровська ГАЕС знаходиться в зоні із середньою густиною лініаметів.

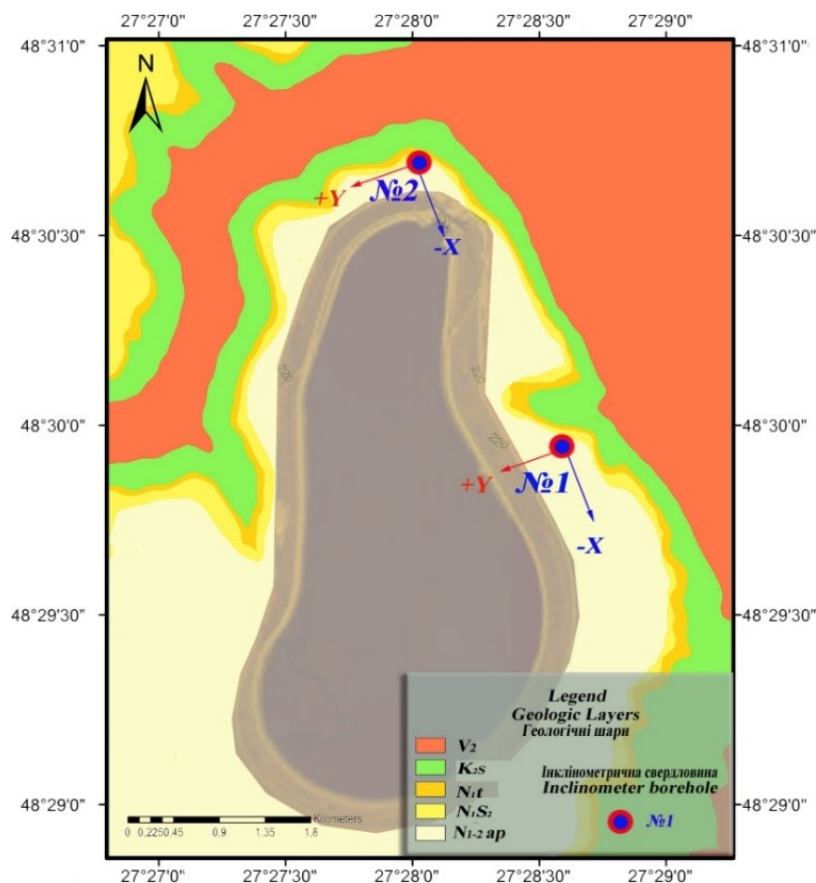


Рисунок 4.23 – Мапа розташування інклінометричних свердловин №1 та №2.

Джерело (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)

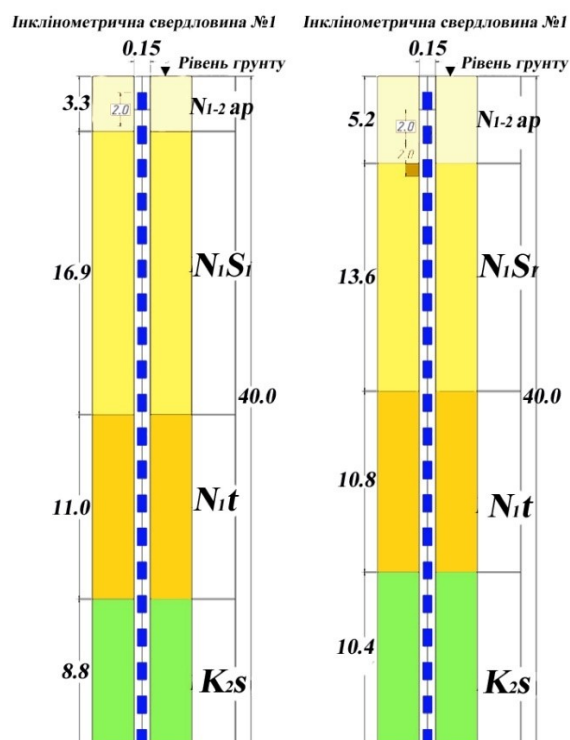


Рисунок 4.24 – Геологічний розріз вздовж осі свердловини

Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)



Відстань між свердловинами – 1400 м. Вісь X паралельна руслу Дністра, вісь Y доповнює систему праворуч.

Свердловини оснащені 20 стаціонарними двовісними вертикальними інклінометричними сенсорами Geokon модель 6150 B-2 (GEOKON® | geotechnical + structural instrumentation, б. д.) з кроком заглиблення 2 метри. Глибина забою для кожної свердловини становить 40 метрів. Усі сенсори автоматизовані з використанням мікроелектромеханічної технології системи (MEMS).

Дані сенсори проводять вимірювання автоматично 4 рази на день, тобто кожні 8 годин. Для дослідження було обрано період з 01.01.2018 р. по 31.12.2020 р., впродовж якого потримано 116 800 значень. Отримані значення були усереднені до одного на день для кожного датчика.

Слід зазначити, що принцип дії датчиків ґрунтується на визначенні відхилень контрольної маси через вимірювання диференціальної ємності. За допомогою цього методу можна визначити як динамічне (удар або вібрацію), так і статичне прискорення (нахил або обертання).

Для аналізу та інтерпретації результатів вимірювань здійснено перехід від вимірних кутів нахилу  $\alpha_{xi}$  та  $\alpha_{yi}$  до переміщень  $M_{xi}$  and  $M_{yi}$ , а також до вектора переміщення  $M_i$   $i$ -го датчика відповідно:

$$M_{xi} = L \times \sin \alpha_{xi} \quad (4.1)$$

$$M_{yi} = L \times \sin \alpha_{yi} \quad (4.2)$$

$$M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \quad (4.3)$$

де  $L$  – базова лінія вимірювань (для конструкції, використаної в цьому дослідженні,  $L = 2000$  мм).

Отримавши дані  $i$ -го (одинарного) датчика, можна визначити сумарні переміщення всього профілю вздовж осей X та Y відповідно:

$$M_x = \sum_1^n M_{xi}, M_y = \sum_1^n M_{yi} \quad (4.4)$$

Значення переміщень, отримані в процесі обробки вздовж кожної з осей, було використано для побудови кумулятивних кривих розподілу горизонтальних переміщень у кожній свердловині (рис. 4.25 та рис. 4.26). Слід зазначити, що діапазон вимірювань датчиків цього типу становить  $\pm 10^\circ$ , а при незмінному положенні інклінометричної свердловини точність вимірювання переміщень становить  $\pm 2$  мм (GEOKON® | geotechnical + structural instrumentation, б. д.).

Аналізуючи отримані результати, можна відзначити негативну динаміку в геологічних шарах  $N_{1-2ap}$  та  $N_1S_1$ , свердловина №1, оскільки ці шари піддаються сильним дотичним напруженням  $\tau$  (у площині XY). Шари  $N_{1-2ap}$  в обох свердловинах мають різноспрямований вектор деформації  $\gamma$ , а шари  $N_1S_1$  і нижче мають близькі до односпрямованого переміщення вздовж осі (-Y), що вказує на такий тип деформації як зсув (у напрямку -Y). Відомо, що зі збільшенням напруги зростає деформація, тобто при пружних деформаціях шари  $N_{1-2ap}$  та  $N_1S_1$  відновлюються до початкових значень при знятті навантаження.

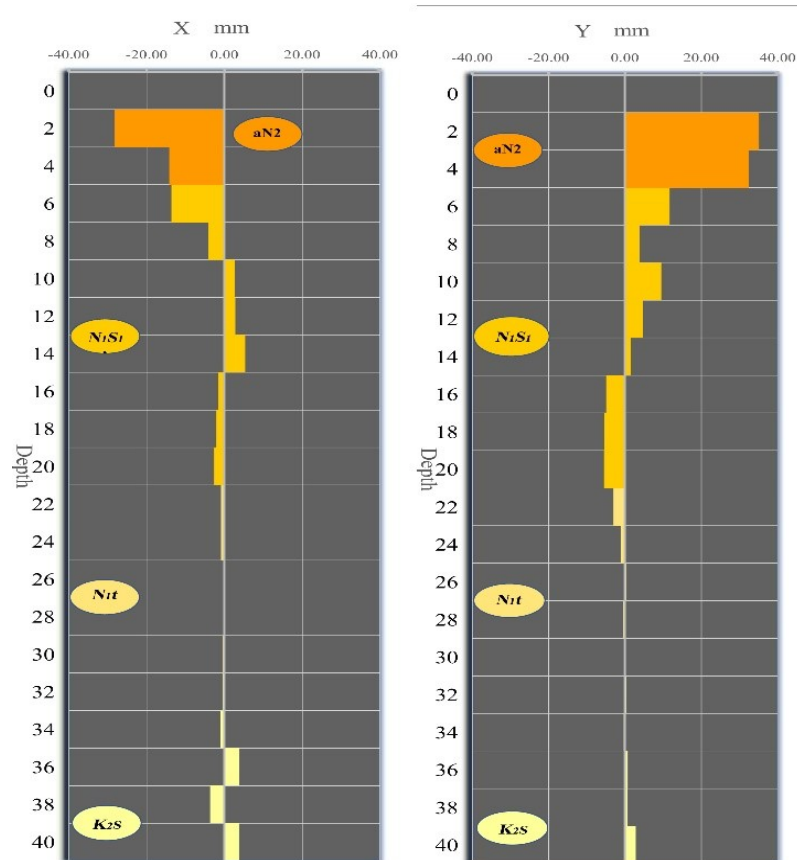


Рисунок 4.25 – Кумулятивні профілі горизонтальних переміщень свердловини №1  
Джерело (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)

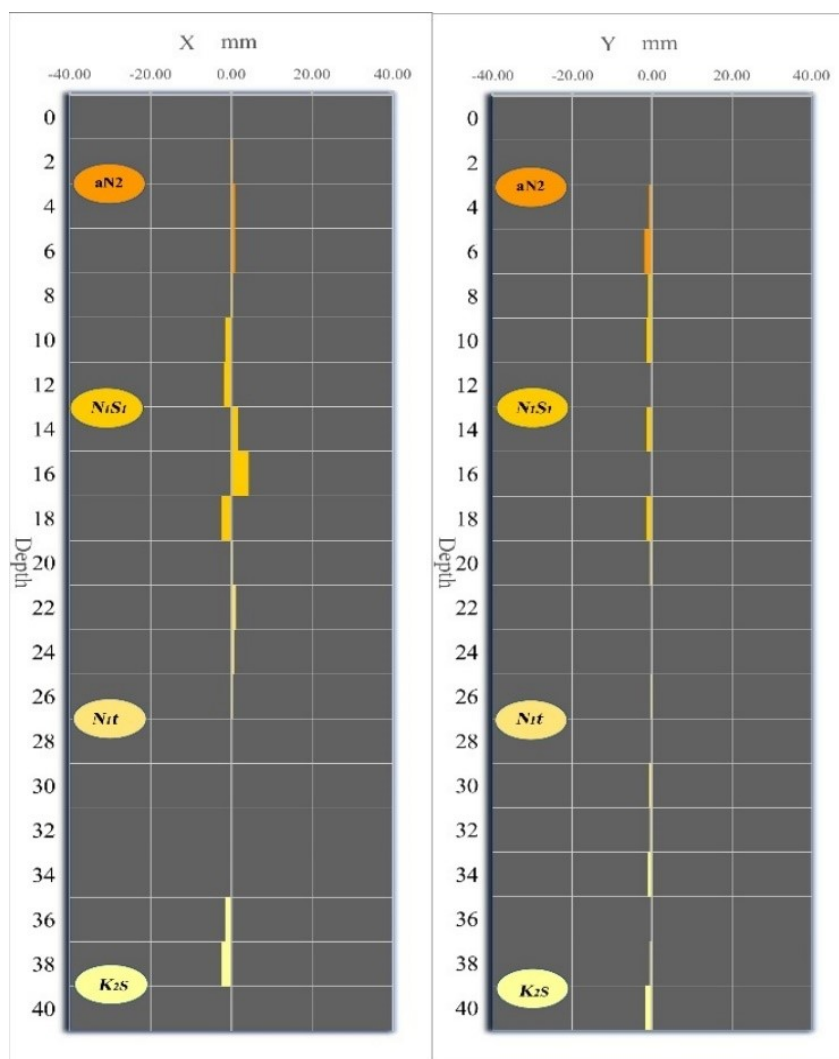


Рисунок 4.26 – Кумулятивні профілі горизонтальних переміщень свердловини №2  
*Джерело (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)*

Оскільки цього не сталося, розглянуті типи шарів перейшли в нелінійну фазу закону Гука (Thompson, 1926), тобто в незворотні деформації. Причина цих зсувних деформацій та напружень може полягати в нерівномірному розподілі навантаження на вершину плато в поєднанні з динамічними коливаннями, спричиненими експлуатацією Дністровської ГАЕС. На основі цих припущень, а також на підтримку теорії причин виникнення деформації було вирішено провести комп'ютерне моделювання процесів, що відбуваються в гірській масі, ґрунтованому на методі кінцевих елементів ("Computer analysis of cylindrical shells", 1964; Davoodi та ін., 2018; Howlett та ін., 1966; Pawsey & Clough, 1971; Tokyo), 1973; Too, 1971; Venkataramana & Rao, 1975; Zienkiewicz та ін., 1971).

Через обмежену обчислювальну потужність середовище моделювання було прийнято за ізотропне, ступінь свободи (защемлення) для моделі максимально наближений до природного. Зовнішні навантаження, що передаються на ґрунт, являють собою механічні сили, які можуть бути поверхневими або об'ємними.

Поверхнєве навантаження викликане що діє на поверхню тіла (масиву ґрунту, зразка тощо) силами, що створюються інженерною спорудою або дією сил від сусіднього об'єму ґрунту. Інтенсивність ( $q$ ) поверхневого навантаження дорівнює відношенню сили ( $P$ ) до площі її дії ( $S$ ):  $q = P/S$ . Поверхнєві навантаження поділяються на рівномірно- і нерівномірно-розподілені. Рівномірно - розподілене навантаження викликане однаковими за величиною силами, що діють на всій поверхні, яку розглядають; нерівномірно-розподілене навантаження викликане різними або однаковими силами, що діють на окремі ділянки поверхні. Якщо розміри площі дії поверхневого навантаження малі порівняно з площею всього тіла, то його можна вважати зосередженим. Зосереджене навантаження, що діє в точці, є окремим випадком нерівномірно-розподіленого навантаження, коли площа накладення навантаження прагне до нуля  $S \rightarrow 0$ :  $q = \lim P/S$ . Об'ємні навантаження можуть бути прикладені до будь-якої частини об'єму, одним з об'ємних навантажень ґрунту є його власна вага. Під дією зовнішніх (поверхневих і/або об'ємних) сил у ґрунті виникають механічні напруження, які є мірою цих сил. Розглянемо довільний об'єм ґрунту, на який діють зовнішні сили  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ . Проведемо через тіло довільний переріз, що проходить через точку  $M$ , і подумки відкинемо його праву частину.

Частина, що залишилася, перебуває в рівновазі, а рівнодійність сил, що діють на елементарному майданчику  $\Delta S$ , нормаль якого збігається з віссю  $x$ , дорівнюватиме  $\Delta P$ . Їхня інтенсивність дорівнює величині  $q = \Delta P/\Delta S$ , напругою в точці  $M$  буде межа інтенсивності  $q$  за  $\Delta S \rightarrow 0$ , тобто  $q = \lim(\Delta P/\Delta S)$ , звідси одиниця виміру напруженості - Паскаль ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 10^{-1} \text{ кгс/см}^2$ ). Розклавши  $q$  на складові, що діють за нормаллю до площини  $\Delta S$  і вздовж неї, отримаємо  $q^2 = \sigma^2 + \tau^2$  (пласка задача, коли  $\Delta P$  лежить у площині  $z, x$ ), або для об'ємного випадку  $q^2 =$

$\sigma^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2$ , де  $\tau_y$  та  $\tau_z$  - компоненти напруг  $\tau$ , які лежать у площині  $z, y$ , та діють уздовж осей  $Z$  і  $Y$ . Напруги, що діють за нормаллю до майданчика  $\Delta S$ , називаються нормальними ( $\sigma$ ), а ті, що діють уздовж неї, - дотичними ( $\tau$ ). Напруга є векторною величиною, що характеризується точкою прикладання і напрямком дії. Сукупність усіх векторів напружень для всіх майданчиків, що проходять через точку  $M$ , характеризує напружений стан у точці. Він визначається тензором напружень ( $T_\sigma$ ), компонентами якого є три нормальні ( $\sigma_x, \sigma_y$  і  $\sigma_z$ ) і шість дотичних ( $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ ) напружень. Компоненти нормальних ( $\sigma_x, \sigma_y$  і  $\sigma_z$ ) і дотичних ( $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ ) напружень викликають відповідні їм компоненти нормальних ( $\epsilon_x, \epsilon_y$  і  $\epsilon_z$ ) і дотичних ( $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$ ) деформацій.

Під час дії на тіло всебічних навантажень, наприклад, гідростатичного обтиснення ( $\sigma_v = \sigma_y = \sigma_z = \sigma_x$ ), у ньому виникають об'ємні деформації ( $\epsilon_v$ ). Нормальні напруження можуть бути позитивними при стисненні або негативними при розтягуванні. Вони спричиняють зміну об'єму і форми тіла; дотичні напруження спричиняють зміну форми тіла, тобто відображають деформації. Цей тензор  $T_\sigma$  належить до тензору другого рангу, тому його можна представити як у вигляді ряду лінійних рівнянь, так і у вигляді матриці (Benjamin, 1970; Tonon та ін., 2000):

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Слід зазначити, що послідовність індексів компонентів тензору (3) характеризує орієнтацію компонентів. (Зигар, 2023)

Відомо, що різні типи напружень спричиняють різні типи деформацій, а саме:

- нормальне напруження  $\sigma$  – викликає нормальні деформації ( $\epsilon$ ),
- дотичні напруження  $\tau$  – спричиняють дотичні деформації ( $\gamma$ ),
- об'ємні напруження,  $\sigma_v$  – спричиняють об'ємні деформації ( $\epsilon_v$ ).

Додатні значення напружень і деформацій характеризують стиск, від'ємні значення – розтяг. Як і тензор напружень (3), тензор деформацій ( $T_\epsilon$ ) також можна записати у вигляді матриці:

$$T\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Оскільки деформація зсуву здійснюється у двох взаємно перпендикулярних напрямках, дотичні компоненти тензора деформації (4.5) діляться на два.

Основний фокус дослідження буде зосереджено на геологічних шарах  $N_{1-2ap}$  та  $N_1S_1$ , які викликають особливе занепокоєння. Основні фізико-механічні властивості цих шарів представлені в (Таблиці 4.1).

Фізико-механічні властивості ґрунтів - це властивості, що характеризують виникнення, розподіл і зміну механічних напружень і деформацій у ґрунтах під час впливу механічних навантажень. У піщаних, грубоуламкових і глинистих ґрунтах під час цього відбувається зміна внутрішньої композиції та об'єму (ущільнення), тобто зменшення пористості та збільшення концентрації мінеральних частинок в одиниці об'єму.

Чим значніші зміни ґрунтів під впливом певного навантаження, тим більшу деформованість вони мають. Коли під впливом зовнішніх зусиль у ґрунтах виникають дотичні сили, що перевищують сили опору зсуву, ґрунти починають руйнуватися, настає втрата міцності. Тому, залежно від умов взаємодії ґрунтів із навантаженнями виділяються: - деформаційні властивості, що проявляються за навантажень, нижчих за критичні, тобто таких, що не призводять до руйнування, - властивості міцності, що проявляються за навантажень, які перевищують критичні, тобто під час руйнування ґрунту.

Таблиця 4.1 – Фізико-механічні властивості ґрунтів

Геологічний шар	Щільність ( $\gamma_s$ ), $10^4$ N/m <sup>3</sup>	Опір зсуву		Коефіцієнт Пуассона ( $\mu$ )	Модуль деформації ( $E$ ), МПа
		Коефіцієнт внутрішнього тертя ( $tg \varphi$ )	Коефіцієнт сцеплення ( $C_0$ ), МПа		
N <sub>1-2ap</sub>	2.00	0.45	0.25	0.22	20
N <sub>1S1</sub>	2.70	0.75	1.50	0.25	1500
N <sub>1t</sub>	2.05	0.30	0.35	0.30	50
K <sub>2S</sub>	2.20	0.50	0.20	0.33	120

Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)

Значення показника ( $tg \varphi$ ) (див. таблицю 1) можна інтерпретувати як показник кількості дефектів ґрунту. У природному стані ці дефекти утримуються між собою за допомогою так званих структурних зв'язків (Masoom та ін., 2016), при розриві яких ґрунт переходить в розуцільнений стан і прагне утворити кут природного укосу на основі теорії Кулона (Vainberg, 1993) про кореляцію між дотичними та нормальними напруженнями (рис. 4.27).

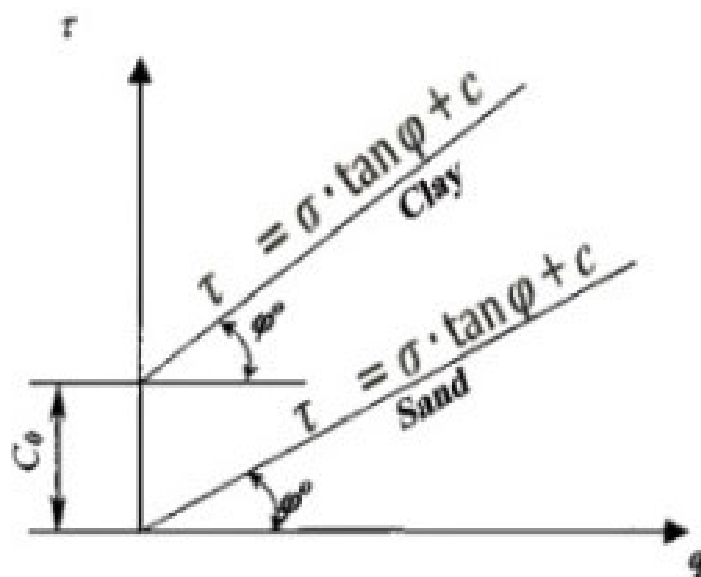


Рисунок 4.27 – Ілюстрація теорії Кулона

Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)

Особливості прояву фізико-механічних властивостей ґрунтів у часі характеризуються реологічними властивостями (проявляються під час дії в часі статичних навантажень) або віброреологічними (проявляються під час дії в часі багаторазових динамічних навантажень). Залежно від характеру прикладання діючих навантажень розрізняють: - статичні фізико-механічні властивості, що проявляються під час дії одноразових постійних стаціонарних полів механічних напружень, - динамічні фізико-механічні властивості, що проявляються під час дії багаторазових змінних навантажень або багаторазових нестаціонарних полів напружень.

З цього випливає, що в полі механічних напружень що з'являється в процесі експлуатації Дністровської ГАЕС коефіцієнт внутрішнього зчеплення  $C_0$  геологічного шару N1-2ар прямує до нуля ( $0.25 \rightarrow 0$ ). Крім того, через не замкнутість геологічної системи відбувається відтік і, можливо, віджим вологи з ґрунту, що зменшує поровий тиск. Згідно з теорією Карла Терцагі, чим вищий поровий тиск –  $u$ , тим менший зовнішній механічний тиск  $\sigma$  передається на скелет ґрунту. (Howells, 1974a; Karl, 1962; Vainberg, 1993):

$$\tau = (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg}\varphi + c \quad (4.7)$$

Як було зазначено вище, механічні властивості ґрунтів проявляються під впливом на них зовнішнього навантаження (ваги споруд і вищерозміщених шарів ґрунту), під впливом якого вони перебувають у напруженому стані. К. Терцагі запропонував для повністю водонасиченого глинистого ґрунту, що деформується під навантаженням, модель двокомпонентного ґрунтового середовища у вигляді заповненого водою циліндра, усередині якого міститься сталева пружина, що імітує ґрунтовий скелет Циліндр закритий поршнем, під час руху якого відбувається стиснення пружини і відтік води через малі отвори в поршні.

У початковий момент часу переміщення поршня відсутнє і все навантаження приймається водою. Якщо відкрити кран, то разом із відтисканням води тиск у пружині зростатиме, а у воді - зменшуватиметься. Що менший діаметр отворів (пор), то повільніше буде швидкість віджимання (дренування) води, що жорсткіша



пружина, то менше переміститься поршень (або ущільниться ґрунт). Передумови теорії фільтраційної консолідації К. Терцаґи зводяться до таких положень: - скелет ґрунту лінійно-деформований, деформується миттєво після прикладання до нього навантаження і в'язкими зв'язками не володіє; - структурної міцності ґрунт не має, тиск у перший момент повністю передається на воду; - ґрунт повністю водонасичений, вода і скелет об'ємно нестисливі, вся вода в ґрунті гідравлічно безперервна; - фільтрація підпорядковується закону Дарсі. Реальний ґрунт складається з твердого скелета і системи сполучених пор, які частково або повністю зайняті водою. Під час прикладання до ґрунту навантаження повні напруження  $\sigma$  розподіляються між скелетом ґрунту і поровою водою. Поровий тиск води  $u$  діє однаково в усіх напрямках, отже, напруга, що діє тільки в скелеті ґрунту, являє собою різницю між повним напруженням і поровим тиском - ефективне напруження  $\sigma'$ . Вода витісняється з пір, що веде до зростання різниці  $(\sigma - u)$ , у результаті починаються деформації скелета. Швидкість витіснення води залежить від проникності ґрунту та умов дренаваності.

Для моделювання процесів, що відбуваються в гірському масиві на основі методу кінцевих елементів, була використана розрахункова схема (рис. 7), де девіатором статичного навантаження (D) буде маса споруди дамби, а також максимально заповнений басейн  $D\sigma_z=0.28$  МПа, матеріал моделі ізотропний і відповідає параметрам геологічного шару N1-2ар (див. Таблицю 4.1),  $F_g = \text{const}$ .

Використовуючи запропоновану схему (див. Рис. 4.28), проведено моделювання при двох умовах:

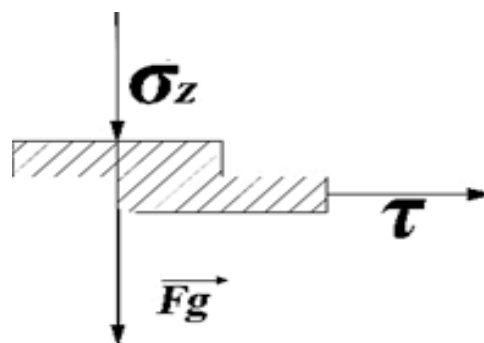


Рисунок 4.28 – Розрахункова схема

Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)

- гірський масив знаходиться в природних полях напружень ( $D\sigma_z = 0$  МПа);
- гірський масив під впливом поля механічних напружень ( $D\sigma_z = 0.28$  МПа,).

В результаті моделювання складено карто - схему розподілу природного (рис. 8) та механічного (Fig. 9) напруження досліджуваного регіону.

Аналізуючи отримані результати, простежується взаємозв'язок нормальних та дотичних напружень у масиві в природних умовах (див. рис. 4.29) та під впливом механічних напружень, що виникають внаслідок експлуатації Дністровської ГАЕС (див. рис. 4.30). У природних умовах максимальні дотичні напруження при стисненні становили 3.554МПа, а при розтягу – 1.337МПа. При навантаженні 0,2МПа показники на стиснення зросли до 2МПа, а на розтяг до – 2,77МПа, більша частина загальної площі вершини плато перемістилася із зон стиску в зони розтягу.

Зміна знаку деформації після заповнення Дністровського верхнього водосховища також відображена в роботі (Savchyn & Pronyshyn, 2020). Найімовірніше, цей процес призвів до виникнення зсувних деформацій у шарі N1-2ар інклінометричної свердловини №1.

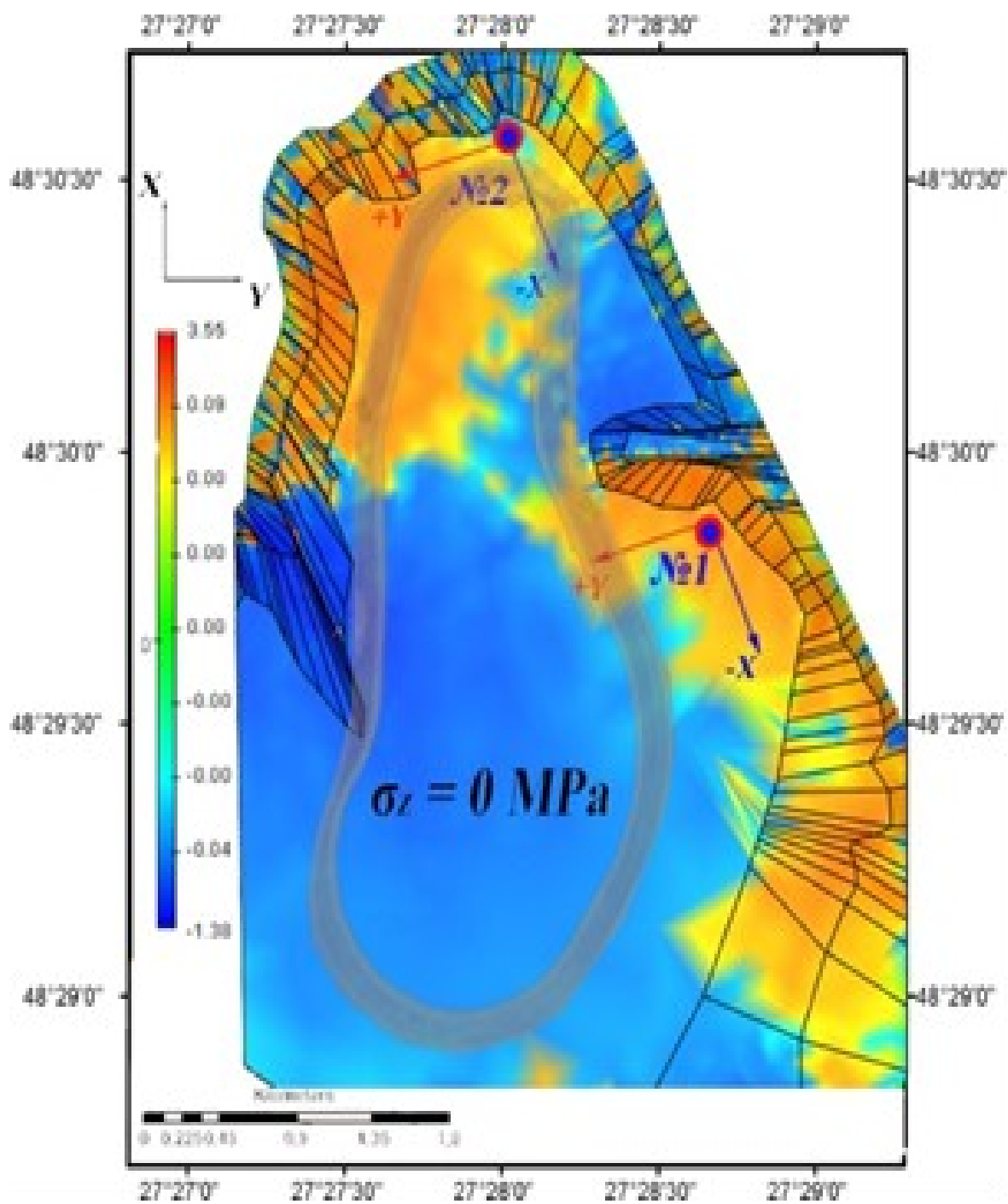


Рисунок 4.29 – Масив в полях природних (власних) напружень  
*Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)*

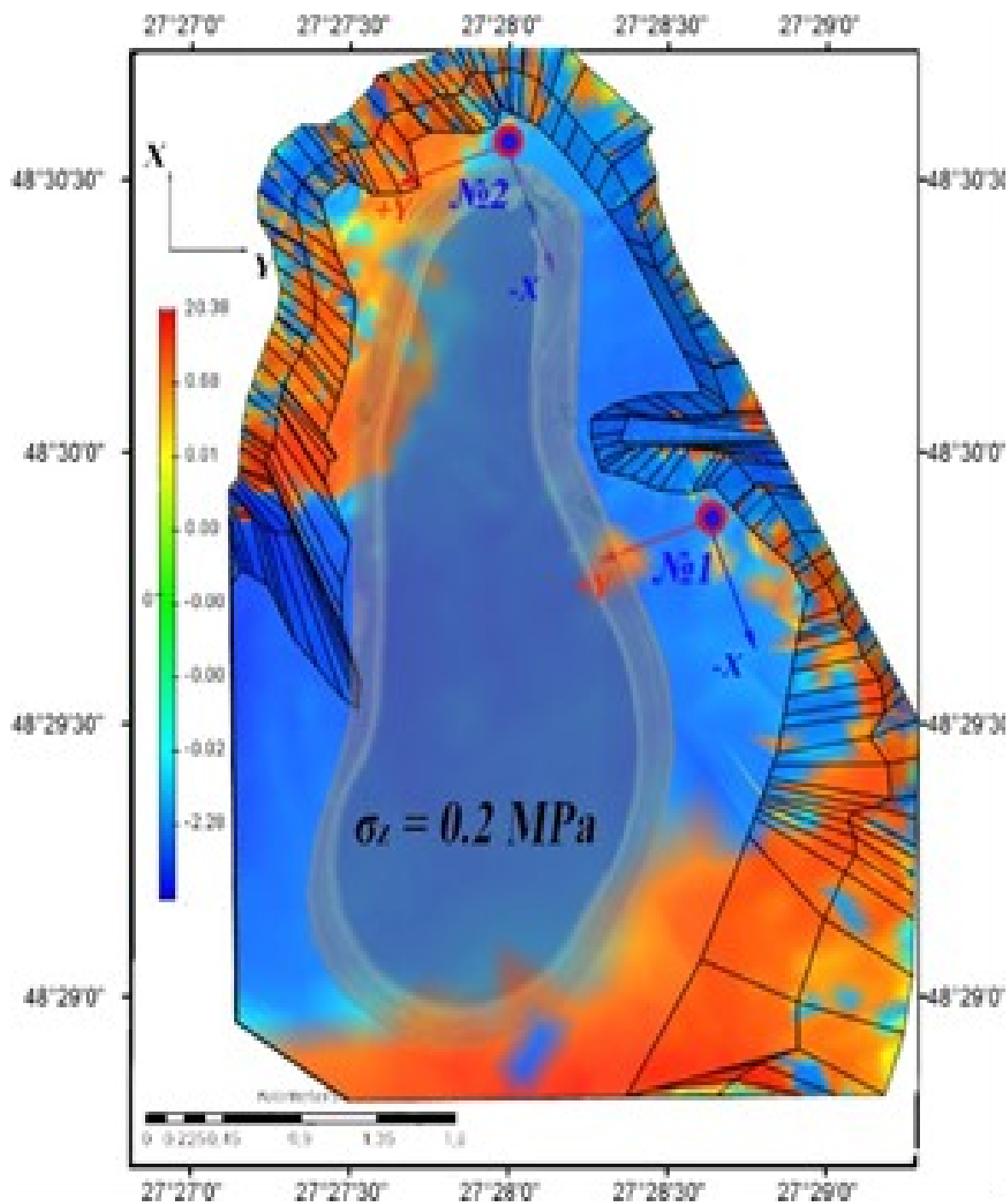


Рисунок 4.30 – Масив під впливом механічних напружень

*Джерело: (Zyhar, Savchyn та ін., 2021)*

Оскільки показники дотичного напруження не є критичними для даного геологічного шару, вірогідно що він знаходиться в процесі консолідації, тобто зміни на рівні структурних зв'язків. Згідно з даними моделювання, шар  $N_1S_1$  здійснює природний опір відповідно до третього закону Ньютона  $F_1 = -F_2$ .

Різниця напружень між шарами обумовлена локальним накопиченням пружних деформацій, або перенесенням напружень під дією гідротехнічної конструкції. Логічно також припустити, що конструкція Дністровської ГАЕС виконала корисну роботу стосовно до масиву, а саме змінила напружено-деформований стан гірської маси, передала енергію  $[E] = \text{Дж}$ , яка від потенціальної перейшла до кінетичної, провокуючи тим самим збільшення сейсмічного фону в регіоні, обговореному в (Savchyn & Pronyshyn, 2020).

Отримані результати дають загальне уявлення про характер виникнення деяких геодинамічних процесів, що виникають в зоні механічних напружень. Верхній басейн Дністровської ГАЕС активізував і посилив геодинамічні процеси в масиві (Зигар, 2023).

Постійна зміна напружено-деформованого стану може призвести до зміни структури геологічних порід, накопичення ефекту втоми, що зменшить стійкість опору гірського масиву до динамічних навантажень.

#### **4.5. Дослідження вертикальної динаміки: механізми та динаміка напружень**

Для вивчення напружено-деформаційної поведінки ґрунтів у меж гірського плато, на якому розташована Дністровська ГАЕС, була пробурена екстензометрична свердловина (рис. 4.31). Свердловина охоплює два основні структурно-стратиграфічні комплекси, які беруть участь у геологічній структурі регіону – фундамент Східноєвропейської платформи (протерозой) та її осадовий покрив (фанерозойські утворення) Свердловина оснащена стаціонарними вертикальними екстензометричними п'яти точковими сенсорами, які сполучені анкерами Geokon модель 1150 (A - 3) (GEOKON® | geotechnical + structural instrumentation, б. д.), з кроком заглиблення 10 метрів.

Глибина забою свердловини становить 50 метрів. Усі сенсори автоматизовані з використанням мікроелектромеханічної технології системи (MEMS).

Дані сенсори проводять вимірювання автоматично щогодини. Для дослідження було обрано період з 01.01.2020 р. по 31.12.2021 р., впродовж якого отримано в середньому 8760 значень окремо по кожній із точок, в загальному разом з датчиками рівня води опрацьовано 52560 значень.

Слід зазначити, що принцип дії датчиків ґрунтується на визначенні відхилень контрольної маси через вимірювання диференціальної місткості. За допомогою цього методу можна визначити динамічне (удар або вібрацію) вертикальне коливання в ґрунтах. Стратиграфічне розташування геологічного горизонту для свердловини (див рис. 4.24) визначено по зразках керна, вивчені в околицях свердловин та проведені пресометричні дослідження деформативності гірських порід, лабораторно розрахований модуль Юнга (E) шарів (Таблиці. 4.2). Більш загальну інформацію про геологічну будову досліджуваного об'єкта можна отримати (State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine., 2020.).

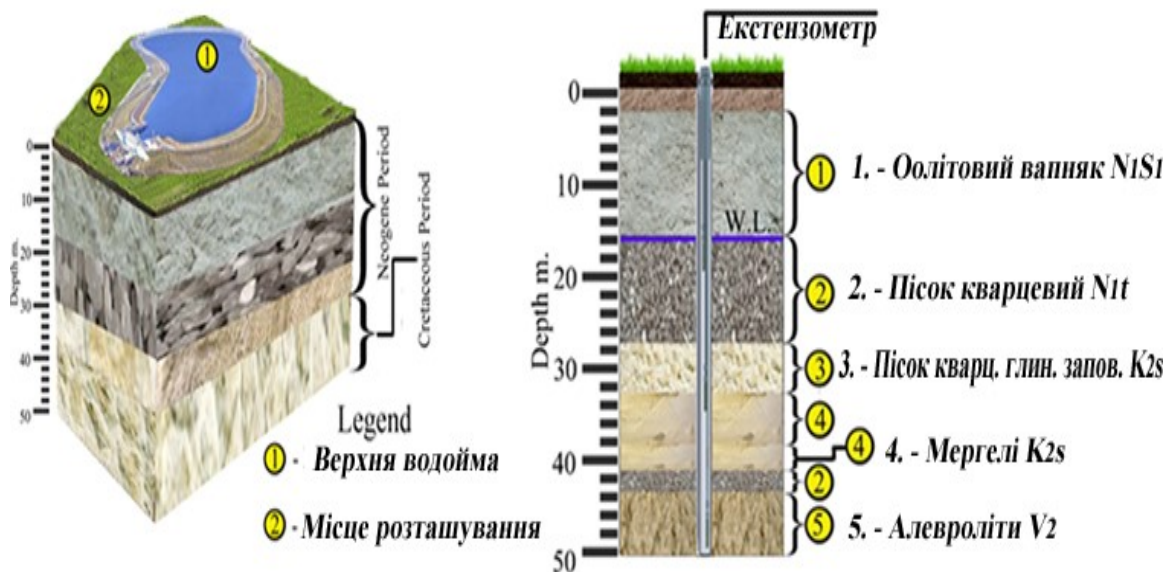


Рисунок 4.31 – Схема будови свердловини

Джерело: (Zyhar, 2023)

Таблиця 4.2 – Фізико-механічні властивості ґрунтів

Геологічний шар	Щільність ( $\gamma_s$ ), $10^4$ N/m <sup>3</sup>	Опір зсуву		Коефіцієнт Пуассона ( $\mu$ )	Модуль деформації ( $E$ ), МПа
		Коефіцієнт внутрішнього тертя ( $tg \varphi$ )	Коефіцієнт счеплення ( $C_0$ ), МПа		
N <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	2.70	0.75	1.50	0.25	1500
N <sub>1t</sub>	2.05	0.30	0.35	0.30	50
K <sub>2</sub> S	2.20	0.50	0.20	0.33	120
V <sub>2</sub>	2,70	0,75	0,25	0.25	400

Джерело: (Zyhar, 2023)

Центральним завданням є аналіз впливу водойми на геологічне середовище, з особливою увагою до поперечних хвиль, що виникають у результаті коливань водної маси верхньої водойми Дністровської ГАЕС. Використання екстензометричних методів дало змогу детально моніторити деформації, викликані динамічними навантаженнями від верхньої водойми, і визначити природу поперечних хвиль, що виникають у ґрунті.

Ці хвилі, поширюючись через геологічні шари, можуть чинити істотний вплив на структурний стан ґрунту, посилюючи ерозійні процеси та змінюючи механічні властивості матеріалів. У результаті екстензометричних вимірювань, проведених у ключових точках досліджуваної території, було отримано дані, що відображають, як коливання водойми впливають на формування і поширення поперечних хвиль у підземних шарах.

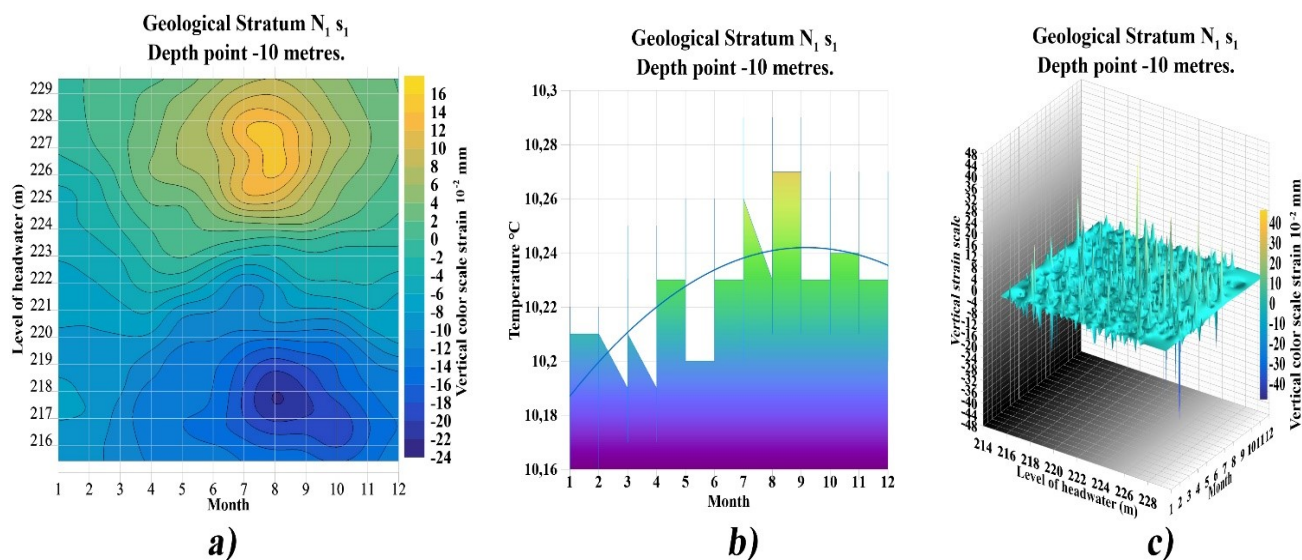


Рисунок 4.32 – Коливання ґрунту на глибині 10 метрів відповідно до зміни рівня води у верхній водоймі.

a) – мапа контурних даних, b) – графік температури на глибині 10 м., c) – мапа аксонометрії контурних даних.

*(розроблено автором)*

На представленому рисунку (рис. 4.32), спостерігається аномальна динаміка поведінки шару оолітового вапняку ( $N_1 S_1$ ) під впливом вертикальних напружень.

У звичайних умовах при збільшенні навантаження на геологічний шар очікується його опускання або усадка. Однак, у такому випадку випадку, при збільшенні одновісного навантаження, викликаного тиском води з верхньої водойми, відбувається несподіване підняття шару. Ця незвичайна поведінка може свідчити про потенційні зміни у складі або структурі нижчих шарів, що, своєю чергою, може впливати на фізико-механічні характеристики оолітового вапняку в даній локації.

Для детальнішого вивчення цієї аномалії необхідно розглянути нижні шари з інтервалом у 10 метрів. Це дасть змогу виявити можливі зміни у складі та структурі, які можуть впливати на унікальні реакції оолітового вапняку на вертикальні напруження.



Глибокий аналіз кожного з цих шарів дасть змогу краще зрозуміти механізми перерозподілу напружень і деформацій у геологічному середовищі, що є ключем до визначення причин нестандартної поведінки верхнього шару (рис. 4.33 - 4.36).

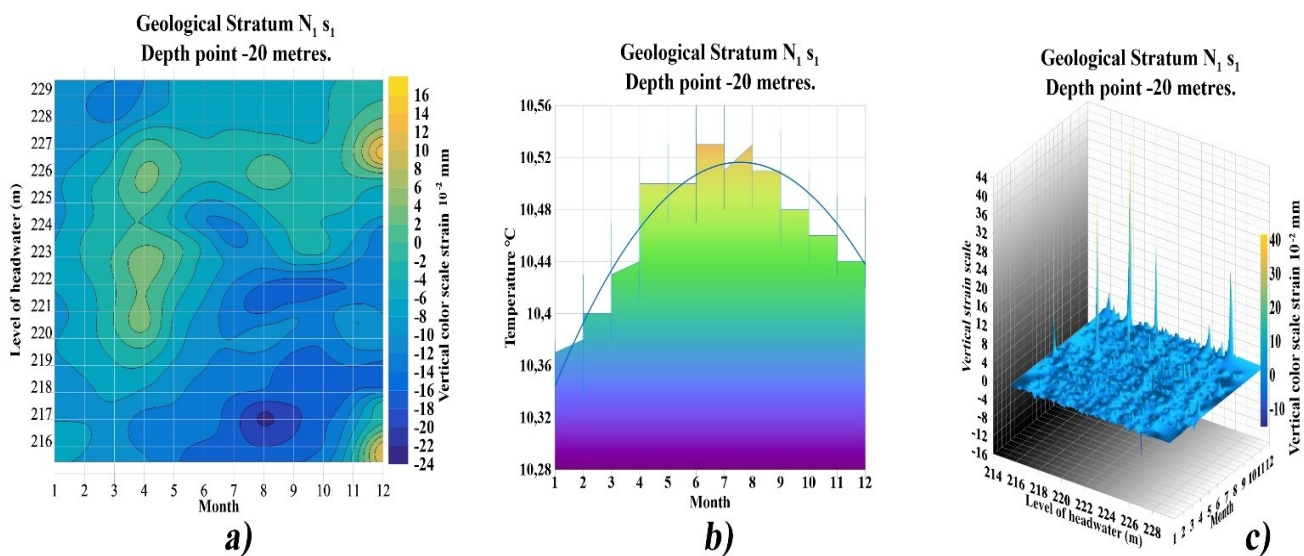


Рисунок 4.33 – Коливання ґрунту на глибині 20 метрів відповідно до зміни рівня води у верхній водоймі.

a) – мапа контурних даних, b) – графік температури на глибині 20 м., c) – мапа аксонометрії контурних даних.

(розроблено автором)

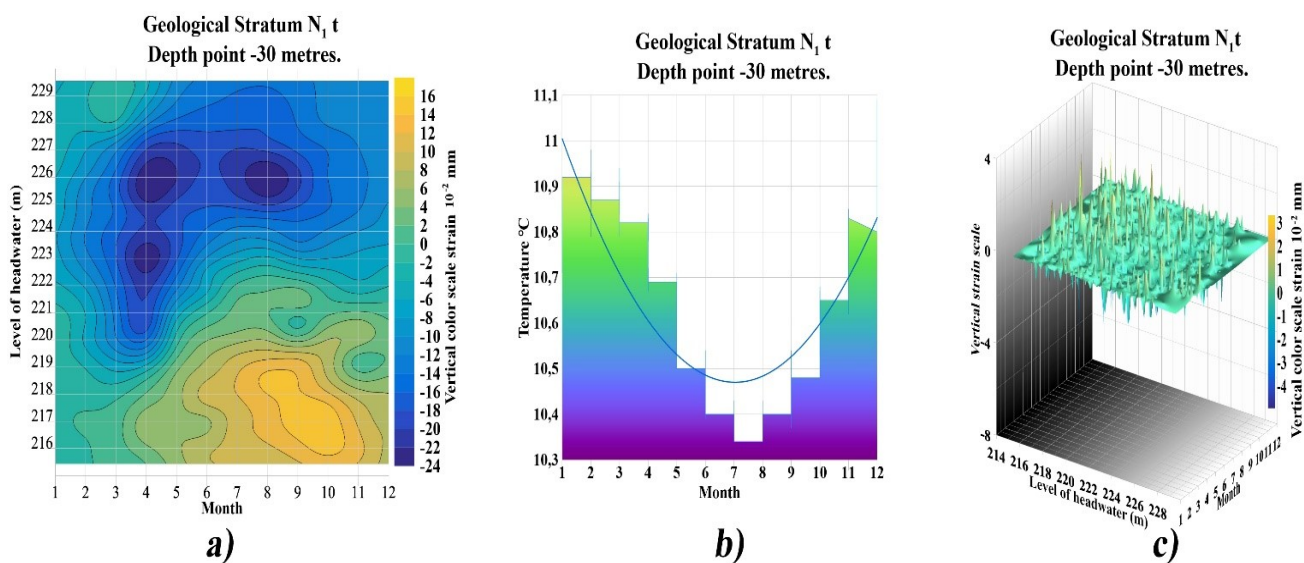


Рисунок 4.34 – Коливання ґрунту на глибині 30 метрів відповідно до зміни рівня води у верхній водоймі.

a) – мапа контурних даних, b) – графік температури на глибині 30 м., c) – мапа аксонометрії контурних даних.

(розроблено автором)

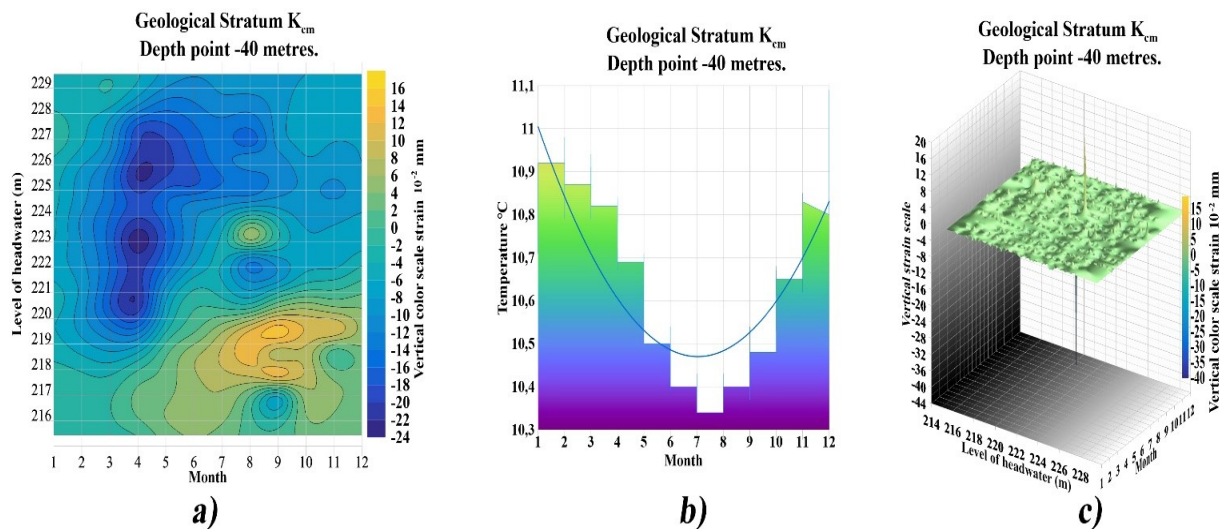


Рисунок 4.35 – Коливання ґрунту на глибині 40 метрів відповідно до зміни рівня води у верхній водоймі.

a) – мапа контурних даних, b) – графік температури на глибині 40 м., c) – мапа аксонометрії контурних даних.

(розроблено автором)

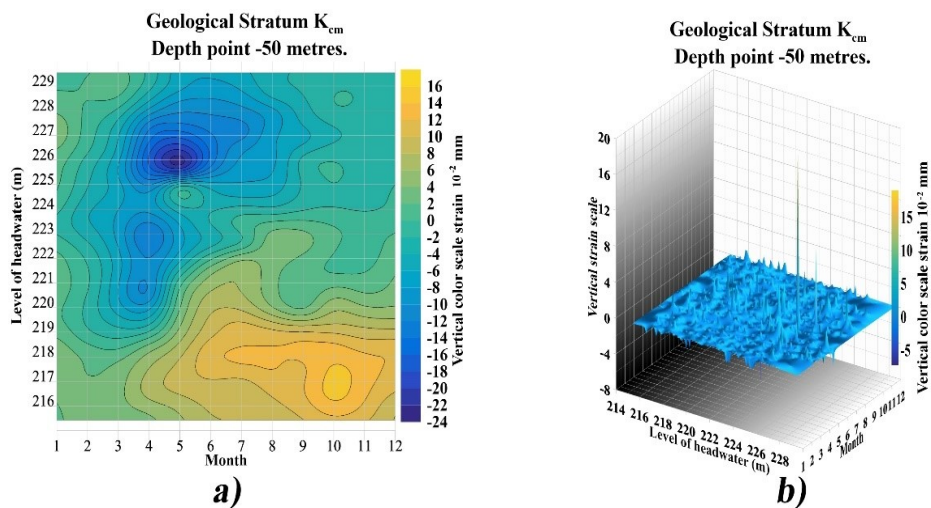


Рисунок 4.36 – Коливання ґрунту на глибині 50 метрів відповідно до зміни рівня води у верхній водоймі.

a) – мапа контурних даних, b) – мапа аксонометрії контурних даних.

(розроблено автором)

Значний внесок в коливання, вносить температура ґрунту. Питання про вплив температури на амплітуду коливань ґрунту є доволі складним, оскільки взаємозв'язок між цими параметрами залежить від безлічі чинників, включно з типом ґрунту, його вологістю, пористістю та багатьма іншими. Однак можна розглянути кілька аспектів, які допоможуть зрозуміти, впливати на коливальні властивості ґрунту.

Коли жорсткий геологічний шар, такий як оолітовий вапняк, піддається навантаженню і перебуває на м'якій подушці (наприклад, вологий кварцовий пісок нижче), він може поводитися як склепіння або арка. У цьому разі навантаження може викликати напруження в шарі, яке призводить до його підняття, а не до просідання. Це особливо ймовірно, якщо краї шару нерухомо закріплені або підтримуються більш жорсткими матеріалами.

Якщо між шарами є ґрунтові води, прикладене навантаження може викликати переміщення води або зміну тиску в порах. Це може призвести до гідродинамічних явищ, таких як спучування або реактивне підняття верхніх шарів у відповідь на зміни в нижчих шарах.

У разі, якщо пружний верхній шар, як оолітовий вапняк, перебуває у стані попереднього напруження або має історію попередніх навантажень, його реакція на нові навантаження може бути нетиповою. Пружні властивості матеріалу можуть спричинити його "відскік" або підняття під час швидкого застосування або зняття навантаження.

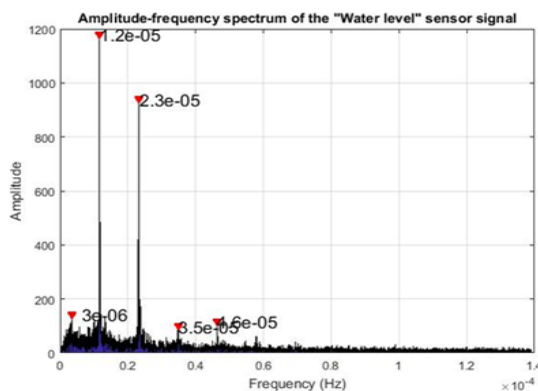
Іноді зміни температури, викликані зовнішніми умовами або навіть внутрішніми хімічними реакціями, можуть викликати розширення або стиснення матеріалів, що також може призвести до підняття шарів. Таким чином, поведінка геологічних шарів під навантаженням залежить від безлічі чинників, і спостережувані ефекти можуть сильно різнитися залежно від конкретної геологічної, гідрологічної та механічної ситуації на місцевості. Ця тема буде винесена для подальших досліджень.

Однак залишається відкритим питання про те, яку роль відіграє водосховище в динаміці геологічного середовища. Для того, щоб точно визначити внесок коливань водної маси водойми в загальну картину вертикальних коливань, необхідно витягти із сигналу датчиків ту частину спектра коливань, яка генерується верхньою водоймою Дністровської ГАЕС.

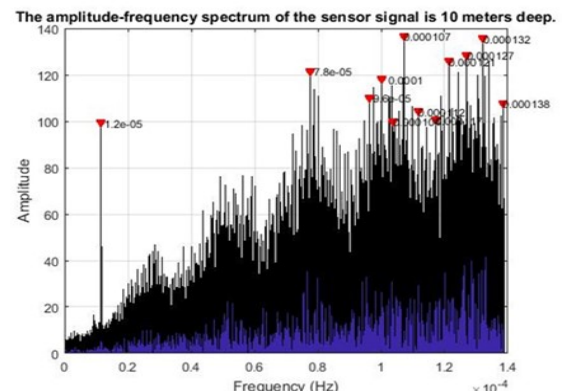
Це вимагає застосування спеціалізованих математичних інструментів, таких як швидке перетворення Фур'є, з подальшим кроспектральним аналізом, а також комплексу програмних рішень, включно з MATLAB (Matlab, 2023.) програмний код відображено в (додаток Е), в середовищі якого і будуть проводитися необхідні розрахунки.

Процедура крос-спектрального аналізу починається з перетворення Фур'є, саме для даного виду дослідження використовувалася його спрощена форма (Cooley & Tukey, 1965) швидкого перетворення Фур'є для кожного сигналу, щоб отримати їх спектри потужності.

Для початку дослідження амплітудно-частотних характеристик було необхідно згенерувати спектральні зображення коливань самої водойми. Потім потрібно було по черзі аналізувати реакції кожного з геологічних шарів окремо, щоб потім порівняти спектральну потужність коливань маси води верхньої водойми зі спектральними зображеннями ґрунту на різних глибинах. Порівняння проводилося як у частотному, так і у фазовому співвідношеннях, що дало змогу оцінити ступінь впливу водойми на ґрунтову основу. (рис. 4.37 - 4.39).



a)



b)

Рисунок 4.37 – Амплітудно-частотний спектр коливань.

- a) – амплітудно-частотний спектр коливань рівня води у водосховищі.,  
 b) – амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 10 метрів.

(розроблено автором)

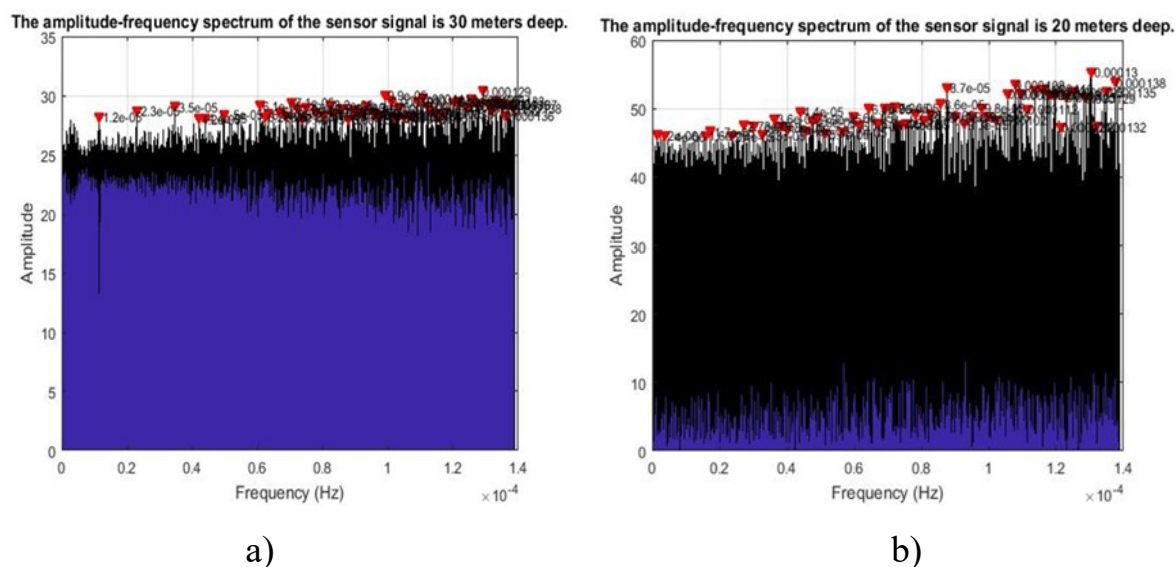


Рисунок 4.38 – Амплітудно-частотний спектр коливань.

- a) – амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 30 метрів.,  
 b) – амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 20 метрів.

(розроблено автором)

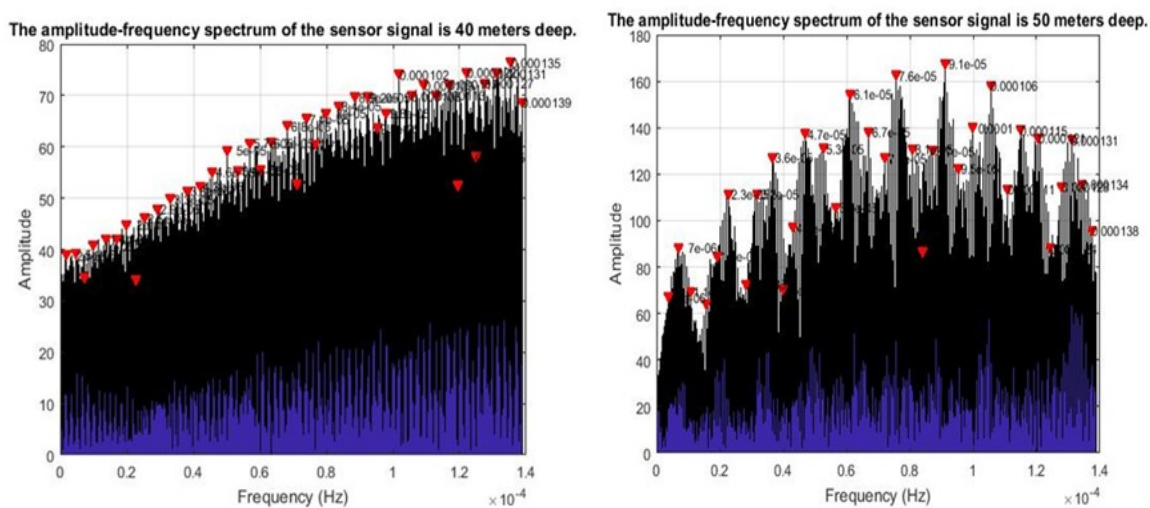


Рисунок 4.39 – Амплітудно-частотний спектр коливань.

- a) – амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 40 метрів.,  
 b) – амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 50 метрів.

(розроблено автором)

Отже, після виконаних трансформацій, ми можемо проаналізувати спектральний малюнок роботи гідроелектростанції за 2020 рік (рис. 4.34) та визначити ширину спектра частот  $1,4 \times 10^{-4}$  Гц, що еквівалентно 140 мкГц. З гармоніки коливань чітко простежується значний енергетичний внесок частот: 3 мкГц, 12 мкГц, 23 мкГц, 35 мкГц та 46 мкГц. Основна енергетична щільність спектра зосереджена в діапазоні від 3 мкГц до 60 мкГц, такі малі значення не слід вважати «шумом» з причини, що середовище, в якому проводились виміри, майже повністю контрольоване.

На глибині 10 метрів в шарі ґрунту оолітового вапняку (рис. 4.34) спостерігається східчастий, синусоподібний спектр частот з тенденцією зростання за амплітудою. Такий спектр може бути характерний для сигналів з повторюваними імпульсами, які можуть бути представлені як сума гармонійних складових. У таких випадках спектр міститиме кілька вузьких піків на частотах, кратних основній частоті імпульсів, наростаючими значеннями амплітуди на вищих частотах. Також можливо, що спектр зростає з частотою через особливості геологічного шару, температури ґрунту, гідростатичний тиск ґрунтових вод, в якій генерується сигнал, наприклад, через резонансні ефекти, зумовлені відносно високою пружністю матеріалу, в нашому випадку це оолітовий вапняк з модулем пружності  $E = 1500 \text{ Мпа}$ , та щільністю  $2,7 \text{ т/м}^3$  (Babacan & Akin, 2018; Cao та ін., 2018; Johnson та ін., 1996; Priya та ін., 2001)

В підтвердження теорії причин східчастого збільшення амплітуди, в радіусі 20 метрів від екстензометричної свердловини рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині 17 метрів. Графік зміни рівня ґрунтових вод представлений (рис. 4.40). У такому разі, якщо амплітуда коливань зростає, то це може вказувати на збільшення жорсткості оолітового вапняку. При цьому, якщо рівень ґрунтових вод знижується, то змінюється гідростатичний тиск на шар ґрунту. Зміна гідростатичного тиску на границі пластів здатна вплинути на жорсткість ґрунту, зокрема на його можливість сприймати навантаження.

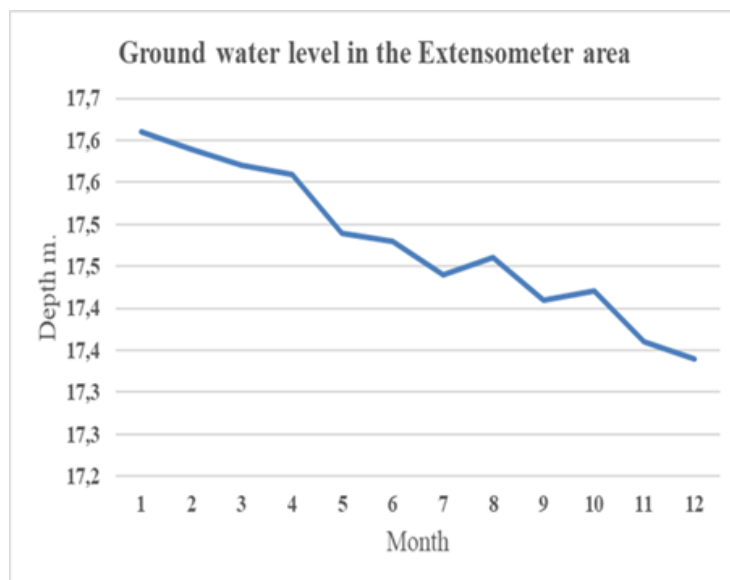


Рисунок 4.40 – Графік зміни рівня ґрунтових вод в радіусі 20 метрів від екстензометричної свердловини.

*(розроблено автором)*

На глибинах 20 та 30 метрів залягають геологічні шари з відносно низькими модулями пружності. А саме, кварцовий пісок з модулем пружності  $E = 50 \text{ Мра}$ , та кремній в піщаному заповненні з  $E = 120 \text{ Мра}$  відповідно. Не слід вважати, що ці породи ґрунтів слабкі та нестійкі до механічних коливань, навпаки, вони достатньо міцні та спресовані, мають у своєму складі включення алевролітів, важких глин і.т.д.

Значення показника ( $\text{tg } \varphi$ ) (див. таблиця. 4.2) можна інтерпретувати як показник кількості дефектів ґрунту. У природному стані ці дефекти утримуються між собою за допомогою так званих структурних зв'язків, при розриві яких ґрунт переходить в розущільнений стан і прагне утворити кут природного укосу на основі теорії Кулона (Karl, 1962; Zyhar, Savchyn та ін., 2021). Спектр сигналу в піщаному ґрунті дуже зашумлений, це може означати, що в сигналі міститься багато випадкових шумових компонент, які маскують основні сигнальні складові. Цей шум може виникати внаслідок різних чинників, таких як: обводненість горизонту, температурний шум. У піщаному ґрунті можливі коливання, викликані багатьма факторами: сила тяжіння, сили тертя і взаємодії частинок ґрунту одна з одною.

Для поліпшення якості амплітудно-частотного спектра знадобиться використання алгоритмів обробки сигналів, які дадуть змогу витягувати сигнали із зашумлених даних, наприклад, фільтрація або посилення основних сигнальних компонент. Аналогічна ситуація спостерігається в спектрі коливань на глибині 40 метрів – геологічний шар мергелів в кременистому заповненні.

На глибині 50 метрів знаходяться прошарки алевролітів  $E = 400$  Мра (див. рис. 4.31), аналогічно з оолітовим вапняком спостерігається східчастий, синусоподібний спектр частот, основна відмінність – зі збільшенням частоти амплітуда затухає.

Одне із можливих пояснень цього ефекту полягає в сезонних температурних коливаннях, на фоні з динамічним навантаженням від експлуатації гідроенергетичного об'єкта. Для визначення взаємозв'язку між сигналами, тобто кореляції між сигналами, використано метод «cross-spectral density». Кроспектральну щільність можна обчислити з використанням різних методів, включно з методом кореляційної функції, методом Фур'є - аналізу, методом гармонійного аналізу та іншими. В цьому випадку використовувався метод гармонійного аналізу описаний (Thomson, 1982,).

Результати обчислення кроспектральної щільності подаються у вигляді графіка, який відображає залежність взаємозв'язку між двома сигналами залежно від частоти на глибинах 10 -50 метрів (рис. 4.41 - 4.45).

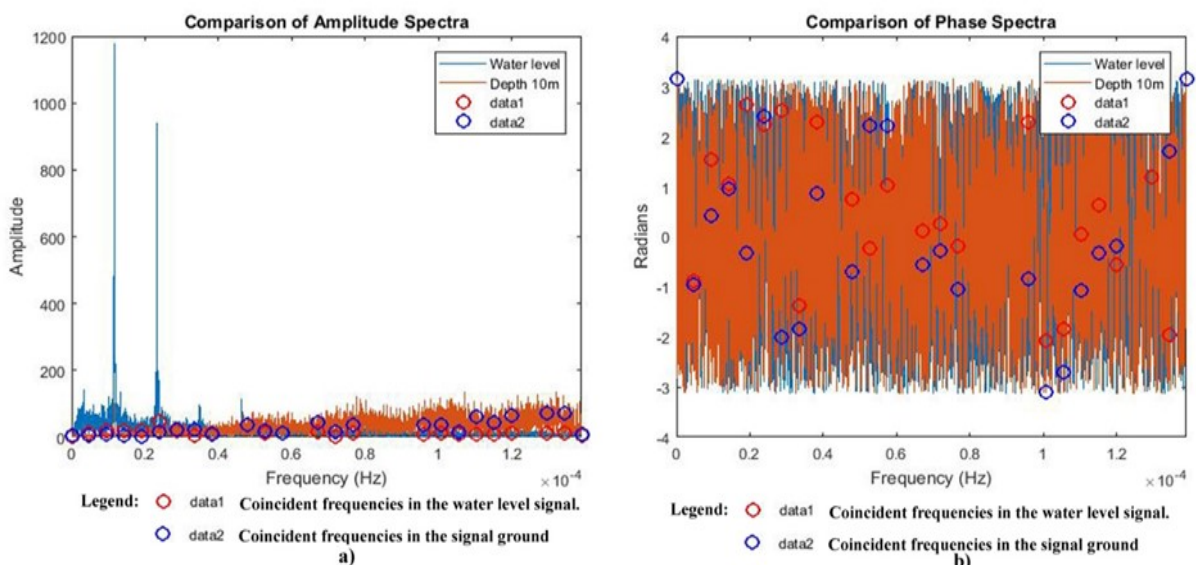




Рисунок 4.41 – а) Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика "Рівень води" та ексцентрикового датчика на глибині 10 метрів. б) Порівняння фазових спектрів.

(розроблено автором)

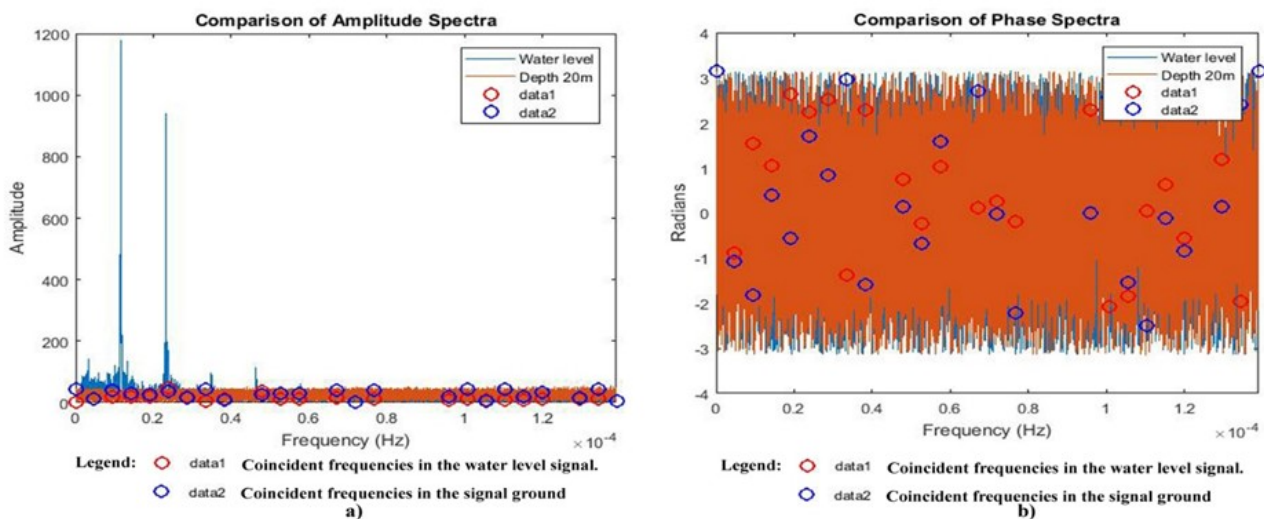


Рисунок 4.42 – а) Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика "Рівень води" та ексцентрикового датчика на глибині 20 метрів. б) Порівняння фазових спектрів.

(розроблено автором)

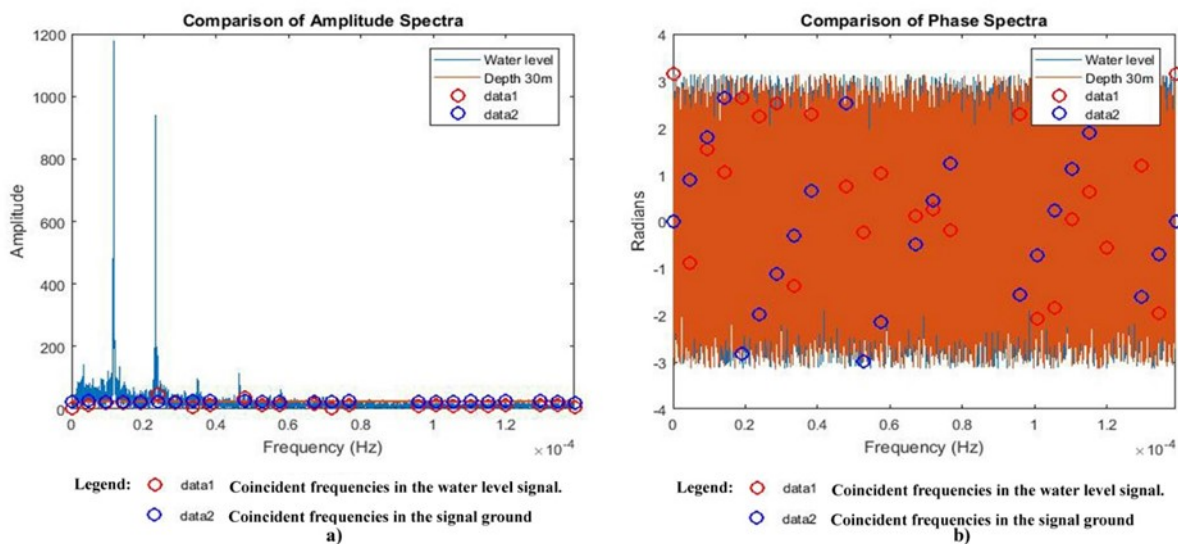


Рисунок 4.43 – а) Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика "Рівень води" та ексцентрикового датчика на глибині 30 метрів. б) Порівняння фазових спектрів.

(розроблено автором)

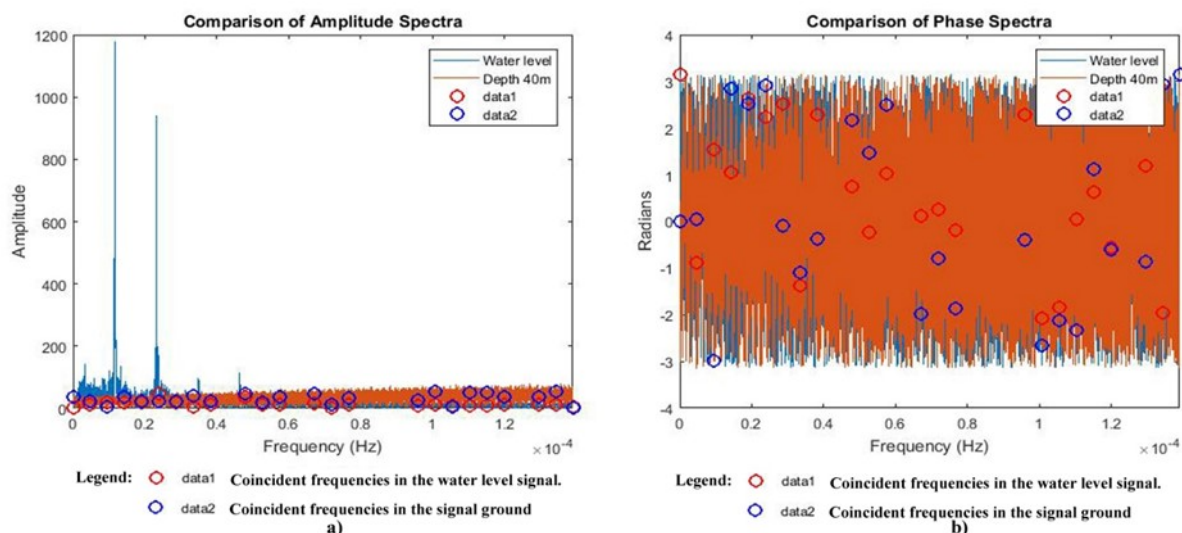


Рисунок 4.44 – а) Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика "Рівень води" та ексцентрикового датчика на глибині 40 метрів. б) Порівняння фазових спектрів.

(розроблено автором)

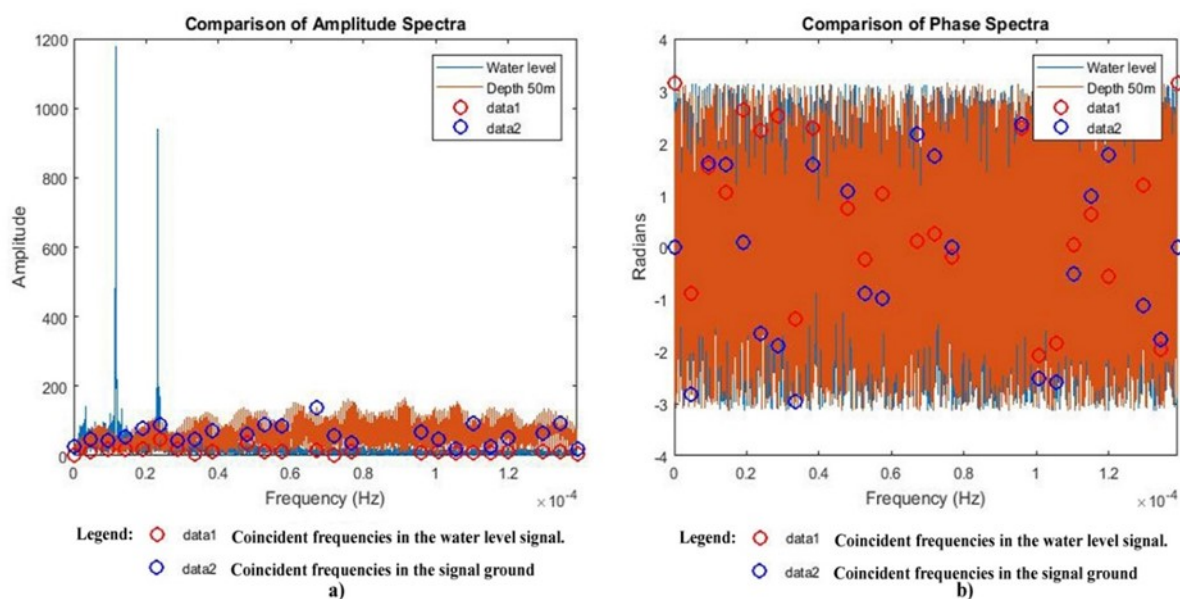


Рисунок 4.45 – а) Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика "Рівень води" та ексцентрикового датчика на глибині 50 метрів. б) Порівняння фазових спектрів.

(розроблено автором)

Результати проведеного дослідження підтвердили, що між змінами рівня води та деформацією ґрунту існує певна залежність. У цьому випадку, роль генератора напружень виконує циклічна зміна навантажень на ложе резервуара

водосховища, тобто резервуар ГАЕС відіграє роль осцилятора поперечних хвиль. Це продемонстровано на графіках, де порівняно спектри фаз. Крім того, дослідження виявило, що спектри вертикальних коливань рівня води та ґрунту мають значні перекриття, що свідчить про наявність резонансних явищ у системі "конструктив-основа".

#### **Висновки до розділу 4**

Представлено дослідження кінематики сучасних вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС впродовж 2000-2019 років отриманих на основі високоточного геометричного нівелювання.

Екстремальні значення швидкостей спостерігаються в районі основних гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС та мають пульсаційний знакозмінний характер.

В результаті кореляційного та візуального аналізу встановлено групи геодезичних пунктів із подібними кінематичними характеристиками. Та запропоновано методику зонування території Дністровської ГАЕС на основі подібності кінематичних характеристик.

Аналіз рівнів ґрунтових вод вказує на те, що у певних локальних ділянках спостерігається зниження рівня води, що свідчить про деградацію ґрунтового масиву. Ці зміни можуть бути пов'язані з ефектами дренажу, які спричинили порушення структурних зав'язків у ґрунтах та перехід їх у розущільненій стан.

В результаті проведеного дослідження було встановлено, що щільність землетрусів, сконцентрованих в зоні експлуатації водосховища, а також магнітуда і невелика глибина вказують на ймовірність активації розломів, розташованих у геологічних шарах, близьких до поверхні землі. Однак, низька магнітуда може вказувати на індукування сейсмічних епізодів у зв'язку зі зміною напружень у ґрунті.

Встановлено кількісні параметри розподілу горизонтальних зміщень в інклінометричних свердловинах. Вони дали можливість виявити негативну

динаміку у геологічних шарах N1-2ар і N1S1, яка очевидно спричинена техногенним навантаженням.

Виконано моделювання поведінки напівскельних ґрунтів під впливом природних і техногенних навантажень. На основі результатів моделювання підтверджено, зміну знаку деформацій під впливом додаткового навантаження, яким може служити наповнення Дністровського верхнього водосховища.

Встановлено основні характеристики спектра коливань ґрунту, такі як форма та амплітуда, що може допомогти в подальших дослідженнях динамічних властивостей ґрунту.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення науково - прикладного завдання, що полягає у з'ясуванні вплив коливань рівня води у водосховищі на геодинамічну ситуацію в природно-технічній геосистемі каскаду Дністровських ГЕС та ГАЕС, з акцентом на зв'язок між змінами рівня води та локальною сейсмічною активністю. Визначено зміни у гідрогеологічному режимі до та після введення об'єкта в експлуатацію, враховуючи вплив господарської діяльності на водні ресурси. Поглиблено розуміння та встановлено чинники, що впливають на зміну напружено-деформаційного стану ґрунтів, також з'ясовані кількісні параметри горизонтальних зміщень. Розширено знання про взаємозв'язок між змінами рівня води у водосховищі та деформацією ґрунту в контексті циклічних змін навантажень на ґрунтову основу резервуара Дністровської ГАЕС, при цьому розглядаючи резервуар як джерело поперечних коливань. Сформульовано прикладну значущість одержаних результатів для проектування та експлуатації природно - технічної геосистеми Дністровської ГАЕС.

У географічних дослідженнях осмислення досліджуваного об'єкта глибоко вкорінене в індивідуальному сприйнятті дослідника світу, яке формує методологічний підхід до аналізу і тлумачення геосистем. Це особливо важливо під час вивчення природно-техногенних систем, де комплексний аналіз, ґрунтований на широкому спектрі знань, є ключем до розуміння їхнього функціонування. У рамках географії використовують безліч підходів до класифікації систем, включно з поділом на функціональні та структурні типи. Функціональні типи, як-от ізольовані, закриті та відкриті системи, різняться за ступенем своєї взаємодії з навколишнім середовищем і здатністю до обміну енергією і матеріалами.

Таке різноманіття підходів підкреслює важливість інтеграції різних наукових перспектив для всебічного аналізу і розуміння як природних, так і створених людиною геосистем. У контексті природно-техногенних систем (ПТГС), важливо розуміти два типи динаміки: що стабілізує і трансформуючу.

Ці процеси ключові для розуміння, як природні системи перетворюються на техногенні. ПТГС характеризуються складною взаємодією елементів, яка може призводити до появи нових властивостей і характеристик, недосяжних для окремих компонентів системи.

Такі емерджентні властивості, як сейсмічна активність або зміна гідрологічного режиму, є результатом складних взаємодій у системі. Для адекватного управління і дослідження ПТГС необхідно глибоко розуміти структуру і ключові елементи системи, включно з такими критичними компонентами, як літосфера і гідросфера.

Різні елементи системи можуть відігравати роль у її стійкості та адаптивності, що робить їх критично важливими для аналізу та управління. Таким чином, комплексний підхід в управлінні геосистемами, що враховує як технологічні, так і екологічні аспекти, необхідний для забезпечення стійкості та гармонійного співіснування природних і техногенних компонентів системи.

Впровадження принципів кібернетики в управління геосистемами може сприяти підвищенню їхньої ефективності та адаптивності.

Моніторинг природно-технічних геосистем виявляє як значні можливості, так і певні перешкоди. Регулярне проведення геодезичних та геотехнічних спостережень є критично важливим для виявлення найдрібніших змін у стані технічних споруд, що дає змогу вчасно реагувати на потенційні загрози та запобігати аварійним ситуаціям.

Сучасні інструментальні методи, як-от інклінометрія, екстензометрія та сейсмологія, у поєднанні з автоматизованими системами контролю, забезпечують високу точність даних і сприяють ретельному аналізу поточного стану об'єктів.

Проте моніторинг залежить від точності використовуваного обладнання та кваліфікації фахівців, які проводять спостереження. Неправильне калібрування приладів або помилки в інтерпретації даних можуть призвести до неправильних висновків, упущення критичних ризиків. Високі витрати на сучасне обладнання та його обслуговування також обмежують можливості для більш широкомасштабних

досліджень. Таким чином, попри на значні переваги систематичного моніторингу в забезпеченні безпеки технічних об'єктів, необхідно враховувати і долати його обмеження для підвищення загальної ефективності моніторингових систем.

**1.** За допомогою геодезичних методів вдалося представити дослідження кінематики сучасних вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС впродовж 2000-2019 років отриманих на основі високоточного геометричного нівелювання. Встановлено, що значення середніх лінійних швидкостей вертикальних рухів знаходиться в межах від  $-0.34$  мм/рік до  $+0.19$  мм/рік. Екстремальні значення швидкостей спостерігаються в районі основних гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС та мають пульсаційний знакозмінний характер.

В результаті кореляційного та візуального аналізу встановлено групи геодезичних пунктів із подібними кінематичними характеристиками. Та запропоновано методіку зонування території Дністровської ГАЕС на основі подібності кінематичних характеристик. Проведено диференціацію сучасних локальних вертикальних рухів території Дністровської ГАЕС та встановлено кореляційні залежності між кінематикою, тектонічною будовою, сейсмічністю та техногенними чинниками.

**2.** Гідрогеологічний аналіз рівнів ґрунтових вод вказує на те, що у певних локальних ділянках спостерігається зниження рівня води, що свідчить про деградацію ґрунтового масиву. Ці зміни можуть бути пов'язані з ефектами дренажування, які спричинили порушення структурних зв'язків у ґрунтах та перехід їх у розуцільненій стан.

У випадку коли глинястий ґрунт який слугує водоупором для безнапірного горизонту №1, втрачає свої водотривкі властивості Простою мовою, коли у глинистих ґрунтах руйнуються структурні зв'язки, росте коефіцієнт фільтрації.

Отже, можна зробити висновок, що динаміка рівнів ґрунтових вод свідчить про вплив гідрогеологічних процесів на фізичні властивості ґрунтового середовища, що має важливе значення для подальшого управління водними ресурсами та збереження екологічної стійкості регіону.

**3.** Завдяки інструментам сейсмічного було встановлено, що щільність землетрусів, сконцентрованих в зоні експлуатації водосховища, а також магнітуда і невелика глибина вказують на ймовірність активації розломів, розташованих у геологічних шарах, близьких до поверхні землі.

Однак, низька магнітуда може вказувати на індукування сейсмічних епізодів у зв'язку зі зміною напружень у ґрунті. Спостерігається тяжіння гіпоцентрів землетрусів до ліній розломів, що говорить про можливу активацію зон розломів.

Деякі гіпоцентри розташовані на розломах, які на карті позначені як "ймовірні". Це вказує на те, що виникнення землетрусів у зонах ймовірних розломів було підтверджено, і що ці зони слід розглядати як потенційно небезпечні з погляду сейсмічної активності.

Поєднання графіків амплітуди коливань рівнів води у водосховищі та сейсмічних явищ, синхронізованих за часом, відображає приклад так званих "індукованих землетрусів". Цей факт підтверджує, що індуковані землетруси можуть виникати внаслідок різних людських дій, включаючи наповнення водосховищ.

Описаний метод який базується на принципах закону Кулона та теорії Мора, дозволяє дистанційно дослідити поведінку матеріалу за різних умов навантаження. Розробка геомеханічної моделі дають змогу краще зрозуміти і передбачати поведінку землетрусів і визначити безпечні зони навантаження.

**4.** Завдяки методам геотехнічного моніторингу вдалося дослідити поведінки напівскельних ґрунтів. Виконано моделювання поведінки ґрунтів під впливом природних і техногенних навантажень. На основі результатів моделювання підтверджено, зміну знаку деформацій під впливом додаткового навантаження, яким може служити наповнення Дністровського верхнього водосховища.

**5.** Встановлено основні характеристики спектра коливань ґрунту, такі як форма та амплітуда, що може допомогти в подальших дослідженнях динамічних властивостей ґрунту.



Після виконаних трансформацій ми можемо проаналізувати спектральний малюнок роботи гідроелектростанції за 2020 рік, та визначити ширину спектра частот  $1,4 \times 10^{-4}$  Гц що еквівалентно 140 мкГц. З гармоніки коливань чітко простежується значний енергетичний внесок частот: 3 мкГц, 12 мкГц, 23 мкГц, 35 мкГц та 46 мкГц. Низькочастотні хвилі мають дуже довгу довжину хвилі, вимірювану в тисячах кілометрів, і можуть поширюватися на великі відстані, шлях поширення хвилі та її розсіювання залежатиме від властивостей ґрунту, в якому вона поширюється.

Коли хвиля поширюється в більш пружний ґрунт, вона може продовжувати свій рух. Однак, під час переходу хвилі з одного типу ґрунту в інший можливе її відбиття, заломлення і розсіювання, що впливає на її форму та амплітуду. Низькочастотні хвилі можуть бути виявлені за допомогою сейсмічних приладів, таких як сейсмометри.

Результати цього дослідження допоможуть коригувати аналіз та інтерпретацію сейсмограм, що важливо для розуміння процесів, які відбуваються в зоні експлуатації гідроелектростанції. У рамках дослідження встановлено, що низькочастотні коливання, які були проаналізовані, не чинять негативного впливу на здоров'я людей і є безпечними, не потребують додаткових заходів безпеки або застережень. Насамперед, низькочастотні коливання, як показали дослідження, можуть підвищувати коефіцієнт сейсмічності в регіонах, де розташовані енергооб'єкти.

Наприклад, якщо розглянути кубічний зразок оолітового вапняку розміром  $10 \times 10$  метр і провести дослідження його власних коливань, то початкова резонансна частота буде починатись в середньому з 300 Гц. Однак, якщо провести розрахунок для кубічного зразка з довжиною граней 100 метрів, то резонансна мода починатиметься з величини 6 Гц. Таким чином, низькочастотні коливання можуть впливати на великі геологічні блоки та спричиняти накопичення напружень у розломах між ними.

У підсумку написаного можна стверджувати що в процесі аналізу взаємозв'язків між антропогенними структурами та природним середовищем, особливо в контексті дослідження впливу Дністровської ГАЕС, маємо справу з взаємодією двох світів: створеного людиною та природного.

Цей діалог, виражений через наукове дослідження, несе в собі глибинне філософське зерно щодо пошуку гармонії між технологічним прогресом і сталим розвитком природних систем. Дослідження є мостом між технічною інженерією та екологічною етикою, пропонуючи глибинний аналіз наслідків технологічних втручань у природні процеси.

**6.** Це дослідження спрямоване на розроблення таких методологічних підходів, які дають змогу не тільки оцінити поточний стан взаємодій, а й запропонувати стратегії для оптимізації цих взаємодій у майбутньому нових дисциплін в галузі географії. Таких як теорія надійності сучасних ПТГС, в ракурсі під теорією надійності розуміють наукову дисципліну, що вивчатиме закономірності збереження в часі технічними географічними системами властивості виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування таких систем. Таким чином, дослідження охоплює не тільки технічний бік питання, а й робить внесок у розвиток теорії сталого розвитку, наголошуючи на необхідності інтегрованого підходу в плануванні та експлуатації інженерних об'єктів у гармонії з природним середовищем. Це підкреслює роль людини як відповідального учасника в діалозі з природою, де кожне рішення та дія мають враховувати довгострокові екологічні наслідки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Апробація апаратно-програмних засобів для формування бази даних сейсмологічної інформації* (Науково-технічний звіт). (2023). 2010.
2. Вербицький, С., & Вербицький, Ю. (2005). *Сучасні засоби отримання та обробки сейсмологічної інформації // дослідження сучасної геодинаміки українських карпат*. Наукова думка.
3. Вербицький, С., Кендзера, О., Вербицький, Ю., Стасюк, А., & Олещук, Є. (б. д.). *Цифровий автоматичний сейсмограф DAS – 03. Міжвідомчий науковотехнічний збірник наукових праць (будівництво).*, (60), 342–348.
4. Гавриленко, О. (2008). *Геоекологічне обґрунтування проектів природокористування* (2-ге вид.). Київський університет.
5. Денисик, Г. (1998). *Антропогенні ландшафти правобережної України*. Арбат.
6. Денисик, Г. (2001). *Лісополе України: монографія*. Тезис.
7. Денисик, Г. І. (2008). Антропогенне ландшафтознавство: Початок ХХІ століття. *Український географічний журнал*, (1), 28–30.
8. Денисик, Г. (2001). *Лісополе України*. Тезис.
9. Денисик, Г., Хаєцький, Г., & Стефанков, Л. (2007). *Водні антропогенні ландшафти поділля*. ПП «Видавництво «Теза»».
10. *Днестровская гидроаккумулирующая электростанция, Украина - Bankwatch*. (б. д.). Bankwatch. <https://bankwatch.org/project/dnestrovskaya-gidroakkumuliruyushhaya-elektrostantsiya-ukraina?lang=ru>
11. Економічна правда. (2021, 24 грудня). *Дністровська ГАЕС стала найбільшою в Європі*. <https://www.epravda.com.ua/news/2021/12/24/680955/>
12. Зигар, А. (2023). Вплив природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування. *Часопис соціально-економічної географії*, (34), 46–56. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-05>
13. Зигар, А. (2024а). Дослідження гідрогеологічного режиму природно-технічної геосистеми: На прикладі Дністровської ГАЕС. *Наукові записки*

*Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія.*, 56(1), 50–58. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.7>

14. Зигар, А. (2024b). Практичні аспекти дистанційного зондування землі дослідження причин водопроявів на ґрунтових гідротехнічних спорудах. *Науковий вісник Чернівецького університету : Географія*, (847), 23–33. <https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.23-33>

15. Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. (2020). *Дністровська ГАЕС. Натурні контрольні спостереження, спеціальні дослідження і моніторинг споруд Дністровської ГАЕС (732/МЦІД-3-00-Т1012)*.

16. Зигар, А. В. (2024c). Дослідження градієнта температур води між б'єфами природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (8), 92–100. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.10>

17. Канський, В. С. (2010). *Лісові антропогенні ландшафти Поділля: Функціонування, структура, раціональне використання* [Неопубл. дис. канд. геогр. наук]. Вінницький держ. пед. ун-т ім. М. Коцюбинського, Каф. фізичної географії.

18. Кисельов, Ю. О., Браславська, О. В., Кисельова, О. О., & Сопов, Д. С. (2023). Поняттєво-термінологічна система геохоричної концепції організації ландшафтної оболонки землі. *Scientific Bulletin of Kherson State University Series Geographical Sciences*, (18), 79–89. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2023-18-9>

19. Лаврик, О. Д. (2011). *Антропогенні ландшафти річища та заплави Південного Бугу* [Неопубл. дис. канд. геогр. наук]. Вінницький держ. пед. ун-т ім. Михайла Коцюбинського.

20. Ліхо, О., Клименко, О., & Статник, І. (2011). *Антропогенний вплив на геосистеми (басейни річок)*. НУВГП.

21. *Мала гірнича енциклопедія*. (3-тє вид.). (2013). Східний видавничий дім.

22. Мельник, А. В., & Міллер, Г. П. (1993). *Ландшафтний моніторинг*. ВІПОЛ.

23. Мельник, А. (2022). *Математична обробка геодезичних вимірів*. Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича.

24. Мізіна, С. К. (2023). *Трубізька водогосподарська ландшафтно-технічна система* (Публікація № 0823U100898) [Дис. д-ра філософії в галузі географії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського]. Національний репозитарій академічних текстів.
25. *Моніторинг ГЕС та АЕС | geoterrace* [Зображення]. (б. д.). Welcome to Geoterrace | Geoterrace. <https://geoterrace.lpnu.ua/monitoring-ges-ta-aes>
26. Ожередова, М. (2023). *Тексти лекцій з дисципліни «Ландшафтна екологія»*. СНУ ім. В. Даля. <https://dspace.snu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/1c175ac8-6e1d-4684-b232-953a4adde3aa/content>
27. Олещук, Є., & Прокопишин, В. (2005). Автоматизація визначення параметрів перехідних характеристик сейсмічних давачів. У *Нові геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища*. (с. 18–19).
28. Островський, А., Мороз, О., & Тарнавський, В. (2012). *Геодезія* (2-ге вид.). Нац. ун-т «Львівська політехніка».
29. Паланичко, О. (2023). Вивчення умов руслоформування річок передкарпаття в межах алювіальних рівнин. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат та прилеглих територій*, (15), 48–65. <https://doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947>
30. Пилипович, О., & Ковальчук, І. (2017). *Геоecологія річково - басейнової системи верхнього Дністра* (І. Ковальчук, Ред.). ЛНУ імені Івана Франка.
31. *Підземні споруди* [Інфографіка]. (б. д.). Sensor.NET. <https://images.cnscdn.com/2/1/2/0/212021604508191cd15bd387c31a0035/original.jpg>
32. *Природно-технічні системи. класифікація природно-технічних геосистем*. (б. д.). StudFiles. <https://studfile.net/preview/16680979/page:7/>
33. Про затвердження Правил експлуатації водосховищ Дністровського комплексного гідровузла, Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 209 (2022) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-22#Text>

34. Рябокони́, О. В. (2015). *Натурально-антропогенні ландшафти Поділля: Структура, класифікація, оптимізація* [Неопубл. дис. канд. геогр. наук]. М-во освіти і науки України, Вінниц. держ. пед. ун-т імені Михайла Коцюбинського.
35. Самойленко, В. (2003). *Математичне моделювання в геоекології*. ВПЦ "Київський університет". [https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/samojlenko\\_mat\\_mod.pdf](https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/samojlenko_mat_mod.pdf)
36. *Тема 3: «Біосфера. Вчення в.І. Вернадського про біосферу. Екосистеми й популяції»*. (б. д.). StudFiles. <https://studfile.net/preview/7190963/>
37. Топчієв, О. Г. (1982). *Терміни і поняття в економічній географії*. Радянська школа.
38. *Укргідроенерго - провідна гідрогенеруюча компанія в Україні | Укргідроенерго*. (б. д.). Укргідроенерго. <https://uhe.gov.ua/>
39. Укргідропроєкт. (б. д.). *Інженерні вишукування (732-1-Т64)*.
40. Учасники проєктів Вікімедіа. (2007, 6 вересня). *Дністровська ГЕС — вікіпедія*. Вікіпедія. [https://uk.wikipedia.org/wiki/Дністровська\\_ГЕС](https://uk.wikipedia.org/wiki/Дністровська_ГЕС)
41. Яцентюк, Ю. (2015). *Міські ландшафтно-технічні системи (на прикладі міста Вінниці)*. Нілан-ЛТД.
42. Anderson, E. M. (1905). The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3), 387–402. <https://doi.org/10.1144/transed.8.3.387>
43. Armand, A. (1988). *Samoorganizatsiya i samoregulirovanie geograficheskikh sistem*. Nauka.
44. Babacan, A. E., & Akın, Ö. (2018). The investigation of soil–structure resonance of historical buildings using seismic refraction and ambient vibrations HVSR measurements: A case study from Trabzon in Turkey. *Acta Geophysica*, 66(6), 1413–1433. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0208-0>
45. Benjamin, J. R. (1970). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. McGraw-Hill.
46. Bertalanffy. (2002). *Theorie generale des systemes*. Dunod.

47. Bird, J. (1963). The Noosphere: A concept possibly useful to geographers. *Scottish Geographical Magazine*, 79(1), 54–56. <https://doi.org/10.1080/00369226308735884>
48. Blume, J. (1969). *Engineering intensity scale for earthquakes and other ground motion*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/4750936>
49. Bondarik, G. (1986). *Metodika inzhenergo geologicheskikh isledovanei*. Nedra.
50. Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhara, A. I. (2020). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). *Y Geoinformatics: Theoretical and applied aspects 2020*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo110>
51. Burov, V., Vishnyakov, I., Glushko, V., Dosin, G., Kruglov, S., Kuzovenko, V., Sviridenko, V., Smirnov, S., Sovchik, I., Utrobin, V., & Shakin, V. (1986). *Tectonics of the ukrainian carpathians (explanatory note to the tectonic map of the ukrainian carpathians, scale 1: 200 000)* (S. Kruglov, Ред.). Ukr NIGRI.
52. Cao, X., Li, Z., & Yao, S. (2018). Analysis on the phase frequency characteristic of soil impedance. *Energy and Power Engineering*, 10(04), 17–24. <https://doi.org/10.4236/epe.2018.104b003>
53. Célérier, B. (2008). Seeking Anderson's faulting in seismicity: A centennial celebration. *Reviews of Geophysics*, 46(4). <https://doi.org/10.1029/2007rg000240>
54. Chopra, A. K., & Chakrabarti, P. (1973). The Koyna earthquake and the damage to Koyna Dam. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63(2), 381–397. <https://doi.org/10.1785/bssa0630020381>
55. Clayton, K., Chorley, R. J., & Kennedy, B. A. (1972). Physical geography: A systems approach. *The Geographical Journal*, 138(2), 246. <https://doi.org/10.2307/1795984>
56. Computer analysis of cylindrical shells. (1964). *ACI Journal Proceedings*, 61(5). <https://doi.org/10.14359/7796>

57. Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297. <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1965-0178586-1>
58. Davoodi, M., Pourdeilami, A., Jahankhah, H., & Jafari, M. K. (2018). Application of perfectly matched layer to soil-foundation interaction analysis. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.02.003>
59. Day, S. M., Yu, G., & Wald, D. J. (1998). Dynamic stress changes during earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), 512–522. <https://doi.org/10.1785/bssa0880020512>
60. Demin, M., & Mykhailyk, O. (2023). Blue lines as a means of graphic fixation between water bodies in town planning documentation. *Spatial Development*, (3), 56–62. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.3.56-62>
61. Galindo-Zaldívar, J., Borque, M. J., Pedrera, A., Marín-Lechado, C., Gil, A. J., & López-Garrido, A. C. (2013). Deformation behaviour of the low-rate active Balanegra Fault Zone from high-precision levelling (Betic Cordillera, SE Spain). *Journal of Geodynamics*, 71, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2013.07.003>
62. GEOKON® | *geotechnical + structural instrumentation*. (б. д.). GEOKON® | Geotechnical + Structural Instrumentation. <https://www.geokon.com/>
63. Gruber, T., Ågren, J., Angermann, D., Ellmann, A., Engfeldt, A., Gisinger, C., Jaworski, L., Marila, S., Nastula, J., Nilfouroushan, F., Oikonomidou, X., Poutanen, M., Saari, T., Schlaak, M., Świątek, A., Varbla, S., & Zdunek, R. (2020). Geodetic SAR for height system unification and sea level research—observation concept and preliminary results in the baltic sea. *Remote Sensing*, 12(22), 3747. <https://doi.org/10.3390/rs12223747>
64. Grzempowski, P., Badura, J., Milczarek, W., Blachowski, J., Głowacki, T., & Zając, M. (2020). Determination of the long-term ground surface displacements using a PSI technique—case study on wrocław (poland). *Applied Sciences*, 10(10), 3343. <https://doi.org/10.3390/app10103343>



65. Gupta, H. K. (1992). *Reservoir-induced earthquakes*. Elsevier.
66. Hamilton, C., & Grinevald, J. (2015). Was the Anthropocene anticipated? *The Anthropocene Review*, 2(1), 59–72. <https://doi.org/10.1177/2053019614567155>
67. Harvey, D. (1969). *Explanation in geography*. Hodder Arnold.
68. Harvey, D. (1985). *The urbanization of capital: Studies in the history and theory of capitalist urbanization*. John Hopkins University Press.
69. Harvey, D. (1989). *The urban experience*. B. Blackwell.
70. Harvey, D. (2019). *Rebel cities: From the right to the city to the urban revolution*. Verso Books.
71. Howells, D. A. (1974). The time for a significant change of pore pressure. *Engineering Geology*, 8(1-2), 135–138. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(74\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(74)90020-9)
72. Howlett, J., Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1966). Handbook of mathematical functions. *The Mathematical Gazette*, 50(373), 358. <https://doi.org/10.2307/3614753>
73. *International seismological centre*. (б. д.). International Seismological Centre. <http://www.isc.ac.uk/>
74. Johnson, P. A., Zinszner, B., & Rasolofosaon, P. N. J. (1996). Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5), 11553–11564. <https://doi.org/10.1029/96jb00647>
75. Juvinall, R. C., Marshek, K. M., & Youssefi, K. (1991). Fundamentals of machine component design. *Journal of Engineering for Industry*, 113(2), 246. <https://doi.org/10.1115/1.2899687>
76. Kaczmarek, A. (2015). Recent relative movements in the tectonic zone of the sudety mts. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 177–184. <https://doi.org/10.13168/agg.2015.0055>
77. Kalkan, Y. (2012). Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(1), 397–405. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0765-5>

78. Karl, T. (1962). Measurement of stresses in rock. *Géotechnique*, 12(2), 105–124. <https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.2.105>
79. Keith, C. M., Simpson, D. W., & Soboleva, O. V. (1982). Induced seismicity and style of deformation at Nurek Reservoir, Tadjik SSR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B6), 4609–4624. <https://doi.org/10.1029/jb087ib06p04609>
80. Lyon, T. J., Filmer, M. S., & Featherstone, W. E. (2018). On the use of repeat leveling for the determination of vertical land motion: Artifacts, aliasing, and extrapolation errors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2018jb015705>
81. Masoom, H., Courtier-Murias, D., Farooq, H., Soong, R., Kelleher, B. P., Zhang, C., Maas, W. E., Fey, M., Kumar, R., Monette, M., Stronks, H. J., Simpson, M. J., & Simpson, A. J. (2016). Soil organic matter in its native state: Unravelling the most complex biomaterial on earth. *Environmental Science & Technology*, 50(4), 1670–1680. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03410>
82. *Matlab*. (б. д.). MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
83. Mukhina, L. (1973). *Printsipy i metody tekhnologicheskoi otsenki prirodnykh kompleksov*. Nauka.
84. N.A.Krylov. (1988). *Map of discontinuities and main lineament zones of the south-west of the USSR mba 1:1000000* [Зображення].
85. Network geography. (2014). У *Encyclopedia of social network analysis and mining* (с. 1092). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6170-8\\_100720](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6170-8_100720)
86. Odum, E., & Barrett, G. W. (2004). *Fundamentals of ecology 5th edition* (5-те вид.). Cengage Learning.
87. Oldfield, J. D., & Shaw, D. J. B. (2012). V.I. vernadskii and the development of biogeochemical understandings of the biosphere, c.1880s–1968. *The*

*British Journal for the History of Science*, 46(2), 287–310.  
<https://doi.org/10.1017/s0007087412000015>

88. Parotidis, M., Rothert, E., & Shapiro, S. A. (2003). Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophysical Research Letters*, 30(20).  
<https://doi.org/10.1029/2003gl018110>

89. Pawsey, S. F., & Clough, R. W. (1971). Improved numerical integration of thick shell finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 3(4), 575–586. <https://doi.org/10.1002/nme.1620030411>

90. Petruccelli, A., Schorlemmer, D., Tormann, T., Rinaldi, A. P., Wiemer, S., Gasperini, P., & Vannucci, G. (2019). The influence of faulting style on the size-distribution of global earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters*, 527, 115791.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115791>

91. Preobrazhenskiy, V. S. (1984). Trends in the evolution of graphic models of geosystems. *Geoforum*, 15(1), 83–88. [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(84\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0016-7185(84)90014-9)

92. Priya, S., Viehland, D., Carazo, A. V., Ryu, J., & Uchino, K. (2001). High-power resonant measurements of piezoelectric materials: Importance of elastic nonlinearities. *Journal of Applied Physics*, 90(3), 1469–1479.  
<https://doi.org/10.1063/1.1381046>

93. Purcaru, G., & Berckhemer, H. (1982). Quantitative relations of seismic source parameters and a classification of earthquakes. *Tectonophysics*, 84(1), 57–128.  
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(82\)90154-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(82)90154-8)

94. Radkevych, A., Petrenko, V., Tiutkin, O., Horbatiuk, Y., & Parinov, V. (2019). Overview of technologies for constructing the facilities at the Dniester pumped storage power station. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 31–39.  
<https://doi.org/10.33271/mining13.03.031>

95. Rautian, T. (1960). *Earthquake energy. methods of detailed study seismicity*. (9-те вид.). Proceedings of the Institute of Physics and Technology of the USSR Academy of Sciences;

96. Sarnavski, V., & Ovsiannikov, M. (2005). Tectonic structure and geodynamic mode of rock masses in the zone of interaction with hydromechanical structures of HPP and PSPP (on the example of the Dnister complex hydro unit). *Modern Achievements of Geodesic Science and Industry*, (2), 193–206.

97. Savchyn, I., & Pronyshyn, R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dnister Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11(5), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001>

98. Savchyn, I., & Zyhar, A. (2020). Analysis and interpretations of recent local vertical movements of Dnister PSPP territory determined from precise levelling. *Y International conference of young professionals «geoterrace-2020»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205702>

99. Savchyn, I., Zyhar, A., & Romanovsky, A. (2018). Research of vertical dynamics of Earth's surface movements in areas of Dniester PSPP. INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG PROFESSIONALS «GEOTERRACE-2018». <https://openreviewhub.org/lea/paper/research-vertical-dynamics-earths-surface-movements-areas-dniester-pp>

100. Skopek, V., Vachal, J., & Sterbacek, Z. (1991). A method of approach to landscape stability. Part 1: Fundamentals and methodology. *Environmental Management*, 15(2), 205–214. <https://doi.org/10.1007/bf02393851>

101. Sochava, V. (1975). *Uchenie o geosistemakh*. Nauka.

102. Spampinato, C. R., Braitenberg, C., Monaco, C., & Scicchitano, G. (2013). Analysis of vertical movements in eastern Sicily and southern Calabria (Italy) through geodetic leveling data. *Journal of Geodynamics*, 66, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.12.002>

103. Staat, M. (2021). An extension strain type mohr–coulomb criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02608-7>

104. State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine. (б. д.). *State geological map of ukraine on scale of 1:200,000 sheets M-35-XXVIII (bar), M-35-XXXIV (mohyliv-podilskyi)*. [Зображення]. <https://www.geo.gov.ua/>
105. Talwani, P. (1976). Earthquakes associated with the Clark Hill reservoir, South Carolina — A case of induced seismicity. *Engineering Geology*, 10(2-4), 239–253. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(76\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0013-7952(76)90024-7)
106. Talwani, P., & Acree, S. (1986). Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 23(4), 126. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90658-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90658-3)
107. The types of geosystem models and aspects of geographic activities. (1976). *Y International Geography '76: Climatology, hydrology, glaciology*. Pergamon.
108. Thompson, J. O. (1926). Hooke's law. *Science*, 64(1656), 298–299. <https://doi.org/10.1126/science.64.1656.298>
109. Thomson, D. J. (1982). Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 70(9), 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/proc.1982.12433>
110. Tokyo), S. o. F. E. A. (. (1973). *Theory and practice in finite element structural analysis*. Tokyo U.P.
111. Tonon, F., Bernardini, A., & Mammino, A. (2000). Reliability analysis of rock mass response by means of Random Set Theory. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(3), 263–282. [https://doi.org/10.1016/s0951-8320\(00\)00059-4](https://doi.org/10.1016/s0951-8320(00)00059-4)
112. Too, J. J.-M. (1971). *Two dimension, plate, shell and finite prism isoparametric elements and their applications* [Thesis, Swansea University]. <http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.475390>
113. Tretyak, K., Brusak, I., & Pronyshyn, R. (2024). Reservoir-triggered seismicity: Case study of the dnister hydro power complex (ukraine). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(1). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i1.298659>

114. Tretyak, K., Petrov, S., Bokhonko, S., Babiy, L., & Shpakivskyy, O. (2014). Kinematics of reference height network on the territory of rivne npp. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 96(1), 55–66. <https://doi.org/10.2478/rgg-2014-0006>
115. Vainberg, A. I. (1993). Forces in the casing of the aggregate shafts of the Dnestrovsk water-storage electric power plant. *Journal of Mining Science*, 29(1), 27–31. <https://doi.org/10.1007/bf00734327>
116. Venkataramana, J., & Rao, G. V. (1975). Finite element analysis of moderately thick shells. *Nuclear Engineering and Design*, 33(3), 398–402. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(75\)90009-6](https://doi.org/10.1016/0029-5493(75)90009-6)
117. Wolski, T., Wiśniewski, B., & Musielak, S. (2016). Baltic Sea datums and their unification as a basis for coastal and seabed studies. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 45(2). <https://doi.org/10.1515/ohs-2016-0022>
118. Yu, M.-h. (2002). Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century. *Applied Mechanics Reviews*, 55(3), 169–218. <https://doi.org/10.1115/1.1472455>
119. Zhao, R., Xue, J., & Deng, K. (2022). Modelling seismicity pattern of reservoir induced earthquakes including poroelastic stressing and nucleation effects. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac361>
120. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Too, J. M. (1971). Reduced integration technique in general analysis of plates and shells. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 3(2), 275–290. <https://doi.org/10.1002/nme.1620030211>
121. Zoback, M. D. (6. д.). The tectonic stress field. *Y Reservoir geomechanics* (c. 3–26). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511586477.002>
122. Zyhar, A. (2023). Geodynamics. *Geodynamics*, 1(34)2023(1(34)), 19–27. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.019>
123. Zyhar, A. (2022). Complex automatic control system of structures in the area of operation of the dniester PSPP. *Y International conference of young professionals «geoterrace-2022»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590005>

124. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Zakrevskyi, O. (2021). Evaluation of changes in rock characteristics based on analysis and interpretation of seismicacoustic observations in the area of the natural and technical system of Dnister PSPP. *Y International conference of young professionals «geoterrace-2021»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k3008>
125. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M. (2021). Geodynamics. *Geodynamics*, 1(30)2021(1(30)), 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017>
126. Zyhar, A., Zayats, I., & Zakrevskyi, O. (2023). GIS-Oriented approach to analyzing the causes of water displays on hydraulic structures. *Y International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510037>
127. Zyhar, A., Yushchenko, Y., & Savchyn, I. (2023). Geodesy, cartography and aerial photography. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 97,2023(97), 24–31. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024>

## ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



**ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ  
ТОВАРИСТВО  
"УКРГІДРОПРОЕКТ"**

просп. Науки, 9 м. Харків, 61165,  
тел.: (057) 702-15-07,  
факс: (057) 719-47-30,  
web: uhp.kharkov.ua,  
e-mail: water@uhp.kharkov.ua,  
e-mail: marketing@uhp.kharkov.ua,  
Код ЄДРПОУ 00114117

### Довідка

#### **про впровадження результатів наукових досліджень в практику діяльності організації**

ПрАТ «Укргідропроєкт» засвідчує, що при виконанні науково-дослідних тем ("Геотехнічний моніторинг основних споруд Дністровської ГАЕС") були використані теоретичні, методичні та прикладні розробки Андрія Зигара.

Теоретичні, методичні та прикладні розробки А. Зигара, які він отримав під час підготовки дисертації з наукового обґрунтування принципів, алгоритмів комплексного дослідження механіки ґрунтів в полях механічних напружень, були використані при виконанні науково-дослідної роботи з визначення гранично допустимих показників схилу основних споруд при роботі 4-х агрегатів.

Головний інженер проекту

Олександр ШЕВЧИК





WROCLAW UNIVERSITY  
OF ENVIRONMENTAL  
AND LIFE SCIENCES

INSTITUTE OF GEODESY AND GEOINFORMATICS

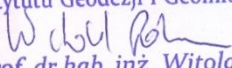
IDIG0000.44.01.2023

Wrocław, 08 September, 2023

Mr Andrii Zyhar  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

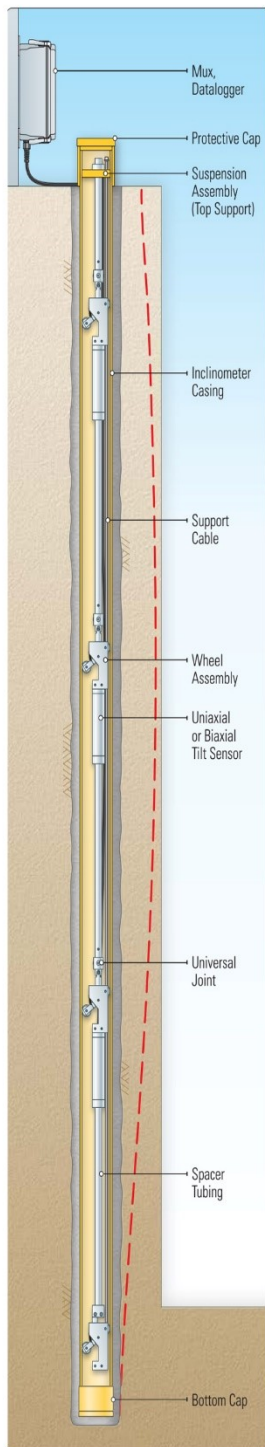
I confirm that within the two days' time 07-08.09.2023 Mr Andrii Zyhar was visiting our Institute and had a opportunity to demonstrate his work on the geological and structural measurements of Dniester PSPP and HPP. The complex system to measure the vibration, deformation and ensure safety of power plant operations.

I find it the work scientifically relevant and would like to confirm interest of Institute of Geodesy and Geoinformatics, to extend this collaboration, making use of our common structural and geometrical measurements and prediction skills. It is possible to extend this research into digital twin realm with strong interest to the safety of operations in the energy sector.

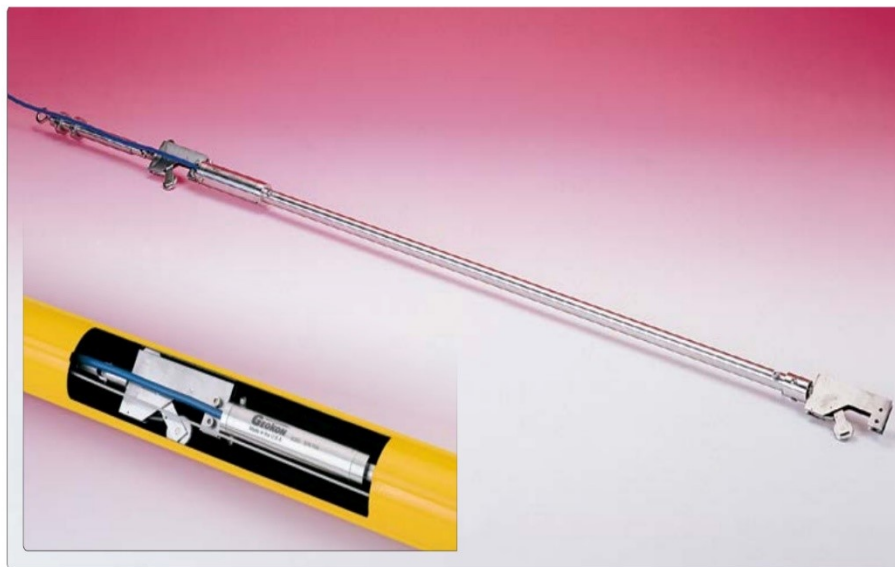
Dyrektor  
Instytutu Geodezji i Geoinformatyki  
  
prof. dr hab. inż. Witold Rohm



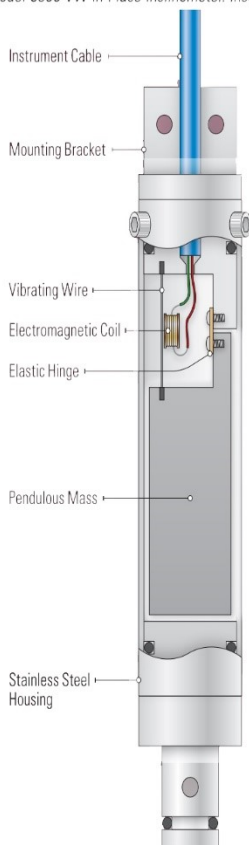




• Typical application to monitor the stability of a foundation wall.



• Model 6300 VW In-Place Inclinometer. Inset photo reveals installation detail with section of Model 6500 Inclinometer Casina removed.

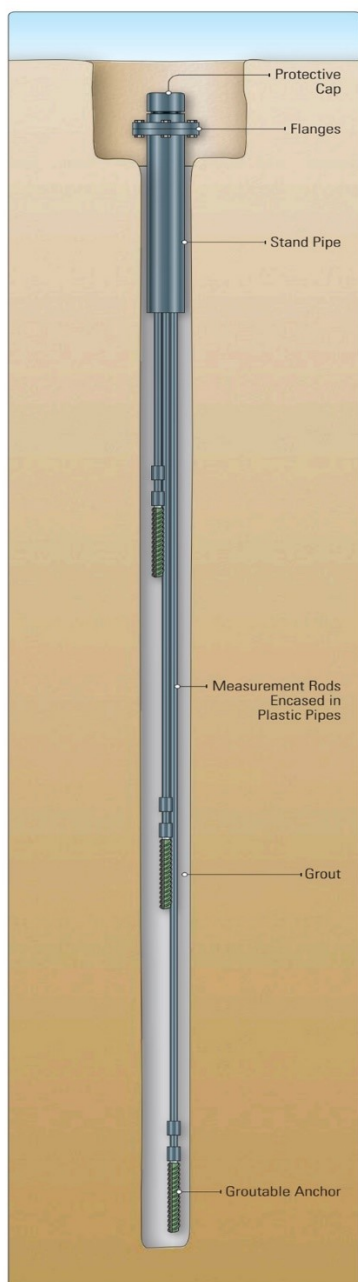


• Vibrating wire tilt sensor construction.



• Model 8600-1 Datalogger.

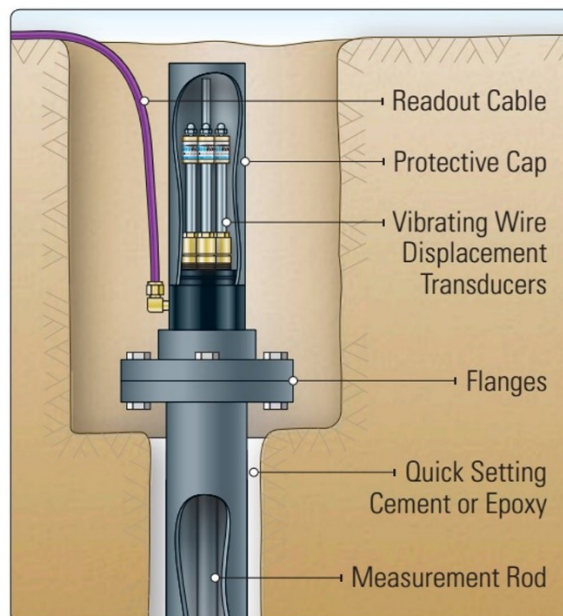
## Багатоточковий інклінометр Geokon model 6150 B-2



- Model A-3 with groutable anchors



- Groutable anchors.

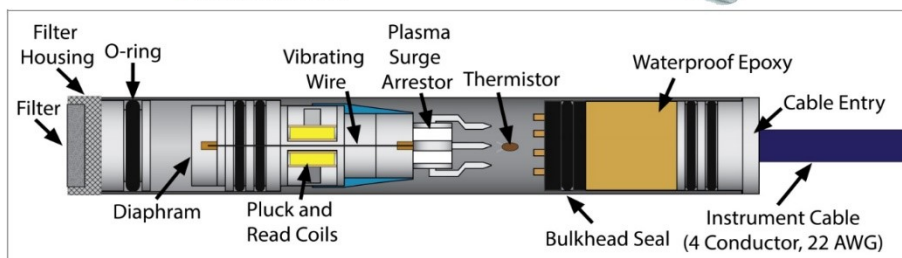


- Model 4450 Extensometer Head Assembly.

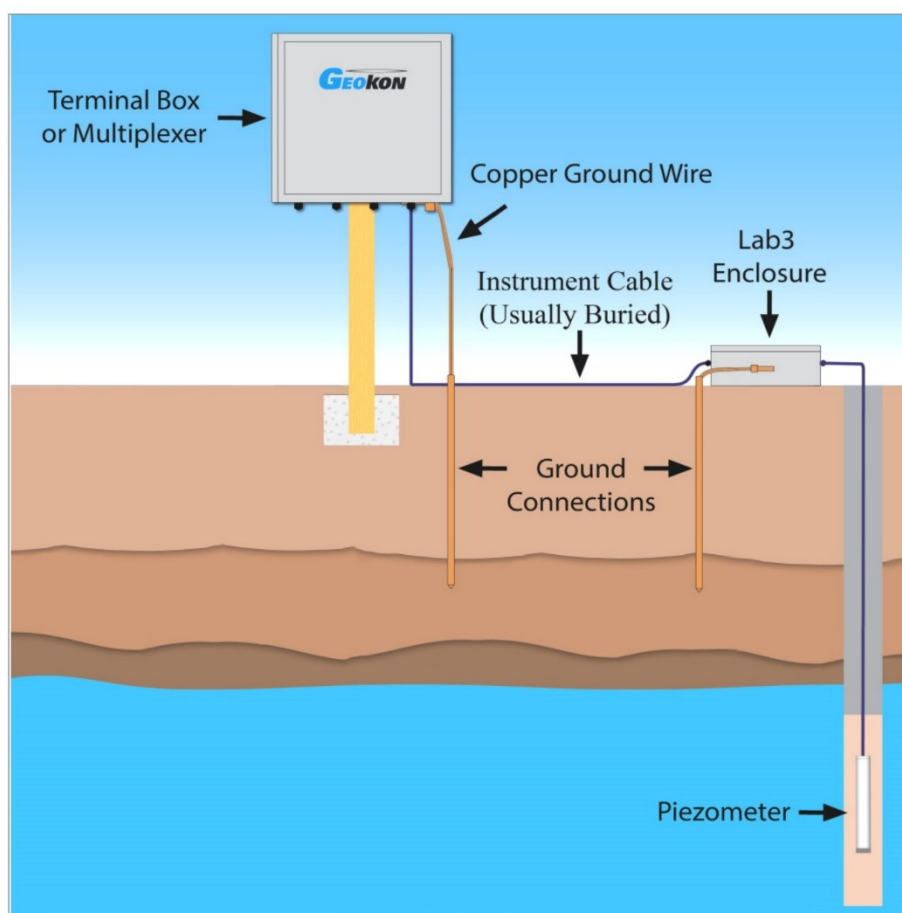
Багатоточковий екстензометр Geokon model 1150 A-3 (оголовок екстензометричної колони)



• Vibrating Wire Piezometers



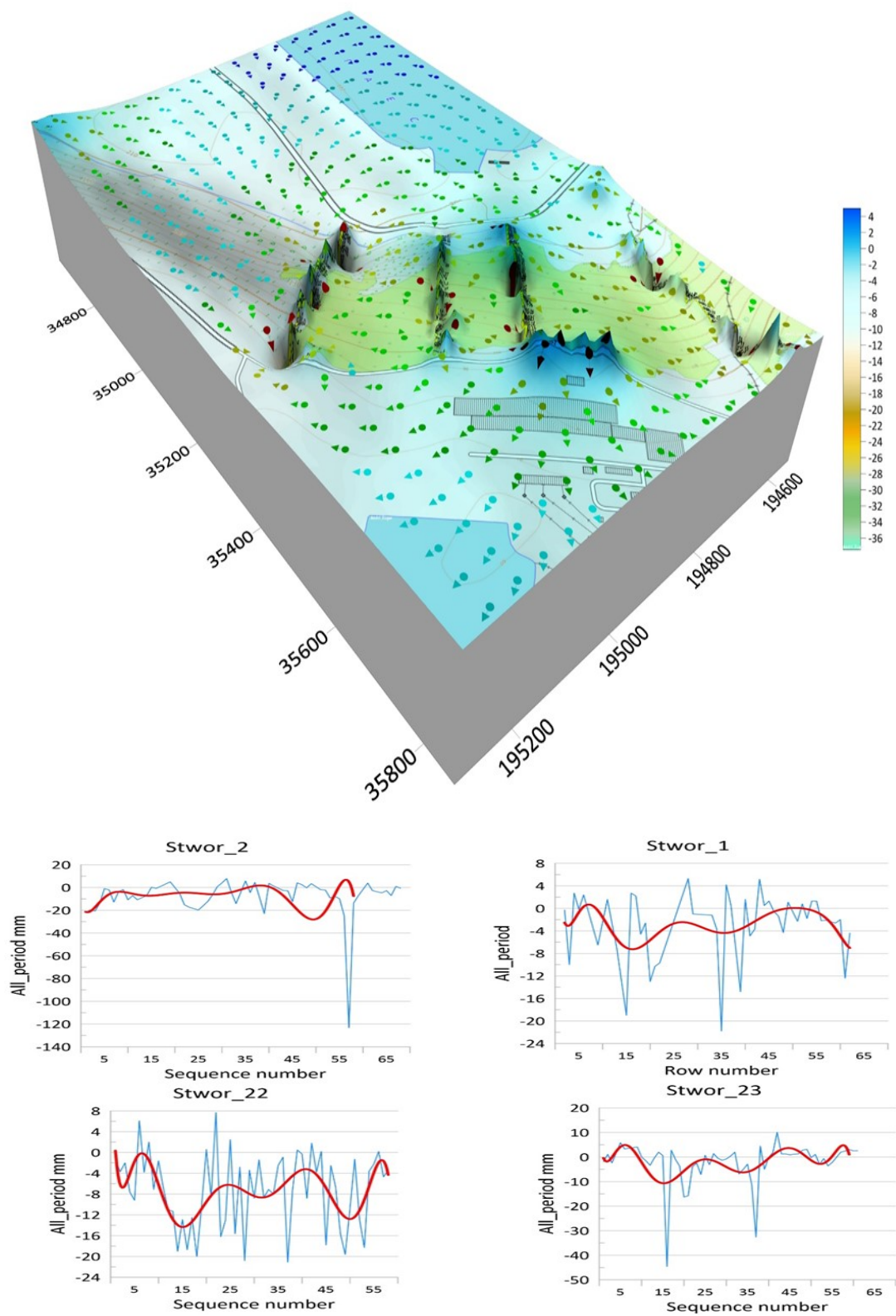
• Model 4500S Vibrating Wire Piezometer



• Recommended Lightning Protection Scheme

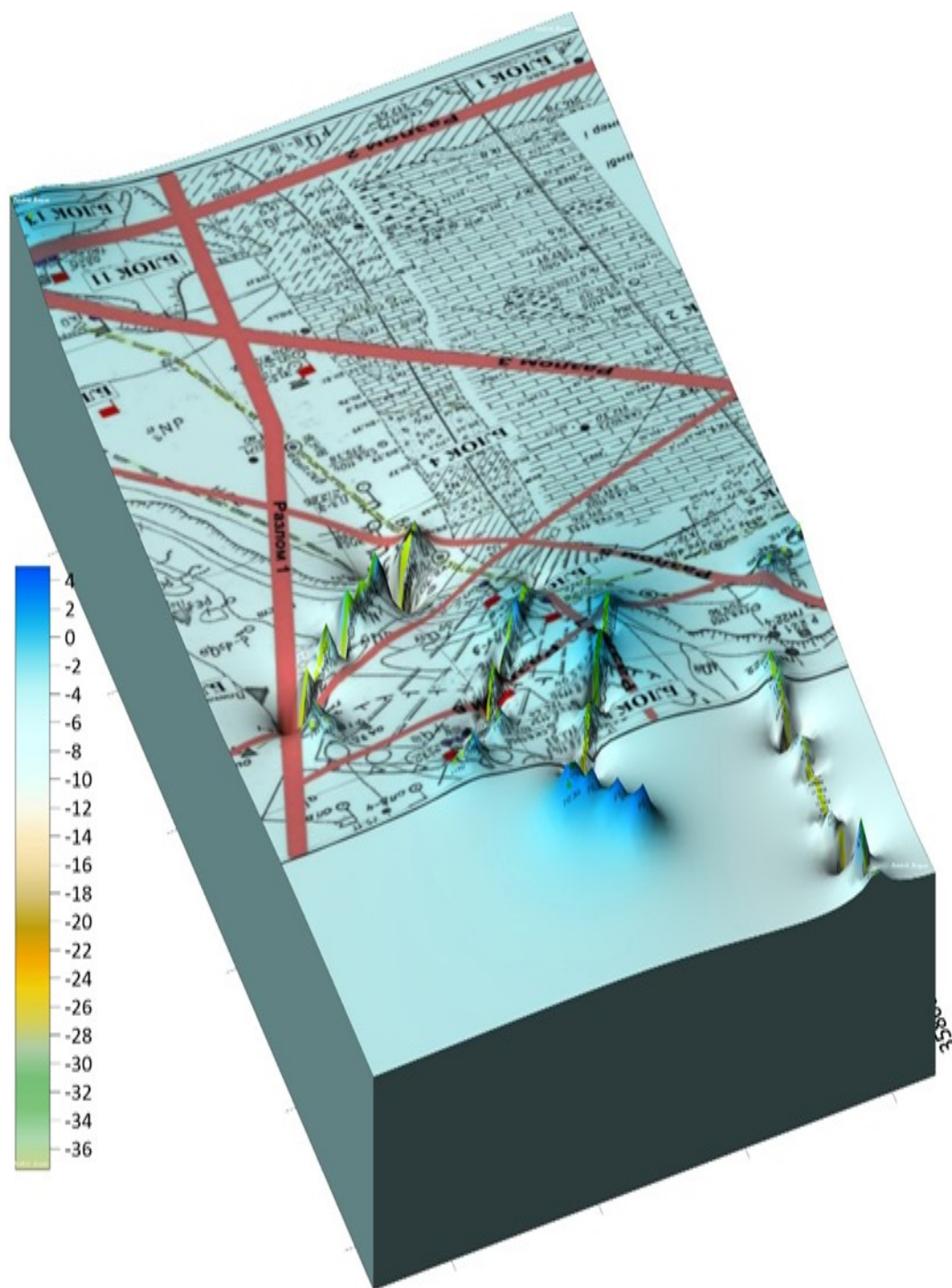
Дистанційний п'єзометр

Схил основних споруд. Аксонометрія вертикальних деформацій створів 1,2,22,23  
за весь період спостережень



Продовження додатку Д

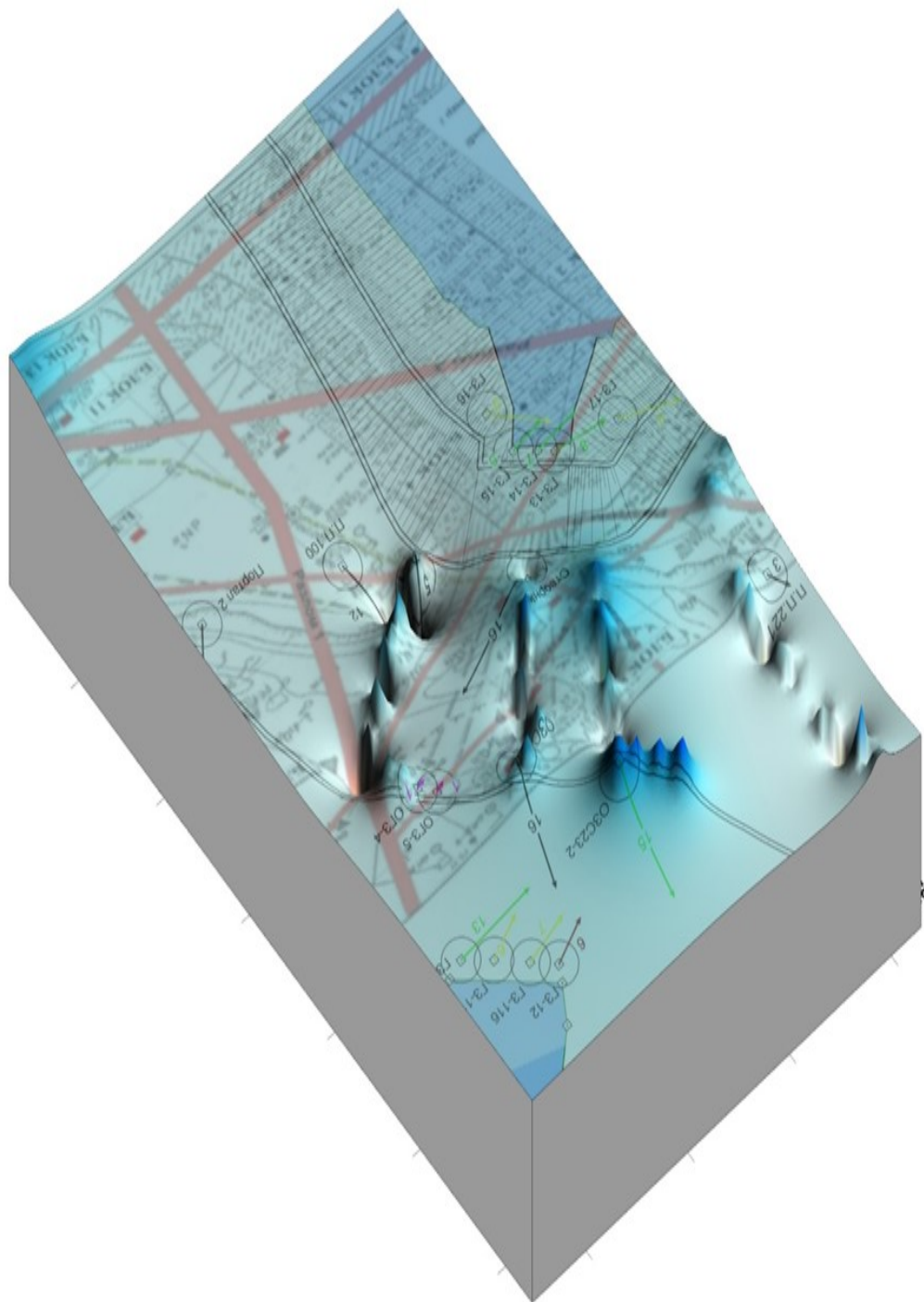
Схил основних споруд. Аксонометрія вертикальних деформацій створів 1,2,22,23  
за весь період спостережень





Продовження додатку Д

Схил основних споруд. Аксонометрія горизонтальних зміщень створів 1,2,22,23 виконаних за допомогою ГНСС за весь період спостережень, з нанесенням на карту геологічних розломів.



```
% Завантаження даних із файлів
Exel1 = xlsread('Test 24012023.xlsx', 'Лист1', 'A1:F8701');
x1 = Exel1(:,6);
Exel2 = xlsread('DET 10m A8759.xlsx', 'Лист1', 'A2:A8759');
x2 = Exel2(:,1);

% Частота дискретизації
fs = 1/3600;

% Обчислення ШПФ для кожного сигналу
X1 = fft(x1);
X2 = fft(x2);

% Обчислення амплітудних спектрів
A1 = abs(X1);
A2 = abs(X2);

% Обчислення фазових спектрів
P1 = angle(X1);
P2 = angle(X2);

% Створення вектора частот
N1 = length(x1);
N2 = length(x2);
f1 = fs*(-N1/2:N1/2-1)/N1;
f2 = fs*(-N2/2:N2/2-1)/N2;

% Візуалізація результатів
figure;
subplot(2,2,1);
plot(f1, A1);
title('Amplitude Spectrum for Signal 1');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Magnitude');
xlim([0, 0.5*fs]);
subplot(2,2,2);
plot(f2, A2);
title('Amplitude Spectrum for Signal 2');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Magnitude');
xlim([0, 0.5*fs]);
subplot(2,2,3);
plot(f1, P1);
title('Phase Spectrum for Signal 1');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Radians');
xlim([0, 0.5*fs]);
subplot(2,2,4);
plot(f2, P2);
title('Phase Spectrum for Signal 2');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Radians');
xlim([0, 0.5*fs]);
```

Програмний код перетворення Фур'є, з подальшим кроспектральним аналізом

## Продовження додатку Е

```

% Порівняння фазових спектрів
figure;
plot(f1, P1);
hold on;
plot(f2, P2);
title('Comparison of Phase Spectra');
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Radians');
legend('Signal 1', 'Signal 2');
xlim([0, 0.5*fs]);

% Візуалізація частот, що збігаються
common_freqs = intersect(f1, f2);
if ~isempty(common_freqs)
    common_indices1 = ismember(f1, common_freqs);
    common_indices2 = ismember(f2, common_freqs);

% Порівняння амплітудних спектрів з відображенням співпадаючих частот
figure;
plot(f1, A1);
hold on;
plot(f2, A2);
plot(common_freqs, A1(common_indices1), 'ro');
plot(common_freqs, A2(common_indices2), 'bo');
title('Порівняння амплітудних спектрів з відображенням співпадаючих частот');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Амплітуда');
legend('Сигнал 1', 'Сигнал 2', 'Частоти, що збігаються в сигналі 1', 'Частоти, що збігаються в сигналі 2');
xlim([0, 0.5*fs]);

% Порівняння фазових спектрів з відображенням співпадаючих частот
figure;
plot(f1, P1);
hold on;
plot(f2, P2);
plot(common_freqs, P1(common_indices1), 'ro');
plot(common_freqs, P2(common_indices2), 'bo');
title('Порівняння фазових спектрів з відображенням співпадаючих частот');
xlabel('Частота (Гц)');
ylabel('Фаза (радіани)');
legend('Сигнал 1', 'Сигнал 2', 'Частоти, що збігаються в сигналі 1', 'Частоти, що збігаються в сигналі 2');
xlim([0, 0.5*fs]);
else
    disp('Між двома сигналами немає співпадаючих частот. ');
end
end

```

Програмний код перетворення Фур'є, з подальшим кросспектральним аналізом

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

***Статті у наукових фахових виданнях України:***

1. Зигар, А. (2023). Вплив природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС на динамічні процеси у середовищі її функціонування. *Часопис соціально-економічної географії*, (34), 46–56. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2023-34-05>
2. Зигар, А. (2024). Дослідження гідрогеологічного режиму природно-технічної геосистеми: На прикладі Дністровської ГАЕС. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія.*, 56(1), 50–58. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.7>
3. Зигар, А. (2024b). Практичні аспекти дистанційного зондування землі дослідження причин водопроявів на ґрунтових гідротехнічних спорудах. *Науковий вісник Чернівецького університету : Географія*, (847), 23–33. <https://doi.org/10.31861/geo.2024.847.23-33>
4. Зигар, А. В. (2024c). Дослідження градієнта температур води між б'єфами природно-технічної геосистеми Дністровської ГАЕС. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, (8), 92–100. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.10>

***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

1. Savchyn, I., Zyhar, A., & Romanovsky, A. (2018). Research of vertical dynamics of Earth's surface movements in areas of Dniester PSPP. International conference of young professionals «GEOTERRACE-2018». <https://openreviewhub.org/lea/paper/research-vertical-dynamics-earths-surface-movements-areas-dniester-ppsp> (здобувачем опрацьовано архівні матеріали та власні польові вишукування , Savchyn, I. - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних, Romanovsky, A. – текстова корекція та редгування).
2. Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhar, A. I. (2020). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). *У Geoinformatics: Theoretical and applied aspects 2020*. European Association of Geoscientists &

Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo110> (Scopus). (здобувачем опрацьовано архівні матеріали, *Bubniak, A. M.* - власні польові вишукування ,

Продовження додатку Є

*Bubniak, A. M.* - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних, *Bubniak, I. M.* - текстова корекція та редгування).

3. Savchyn, I., & Zyhar, A. (2020). Analysis and interpretations of recent local vertical movements of Dnister PSPP territory determined from precise levelling. *У International conference of young professionals «geoterrace-2020»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205702> (Scopus). (здобувачем опрацьовано архівні матеріали та власні польові вишукування , *Savchyn, I.* - виконано обробку статистичних масивів цифрових даних)

4. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Zakrevskyi, O. (2021). Evaluation of changes in rock characteristics based on analysis and interpretation of seismicacoustic observations in the area of the natural and technical system of Dnister PSPP. *У International conference of young professionals «geoterrace-2021»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k3008> (Scopus). (*Savchyn, I* - опрацьовано архівні матеріали установ, *Yushchenko, Y, Zakrevskyi, O, Zakrevskyi, O* - виконано обробку статистичних масивів цифрових, геоінформаційне і картографічне моделювання здійснено з використанням ГІС-програми *QGIS 3.10* (відкрита ліцензія))

5. Zyhar, A. (2022). Complex automatic control system of structures in the area of operation of the dniester PSPP. *У International conference of young professionals «geoterrace-2022»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590005> (Scopus).

6. Zyhar, A., Zayats, I., & Zakrevskyi, O. (2023). GIS-Oriented approach to analyzing the causes of water displays on hydraulic structures. *У International conference of young professionals «geoterrace-2023»*. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510037> (Scopus).

(здобувачем опрацьовано архівні матеріали установ, виконано обробку статистичних масивів цифрових, геоінформаційне і картографічне моделювання

Продовження додатку Є

Zayats, I., & Zakrevskiy, O. - здійснено з використанням ГІС-програми QGIS 3.10 (відкрита ліцензія))

**Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

4. Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M. (2021, June 29). Analysis of inclinometric observations and prediction of soils deformations in the area of the Dniester PSPP. *GEODYNAMICS*. *GEODYNAMICS*, 1(30)2021(1(30)), 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017> (Web of Science). (Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M: створено параметричну модель ґрунтового масиву, Zyhar, A. - Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M проведено обчислення в програмному середовищі Autodesk Inventor (навчальна ліцензія))
5. Zyhar, A. (2023, June). Application of cross-spectral analysis and fast Fourier transform to detect soil vibrations in the natural and technical geosystem of the Dniester PSPP. *GEODYNAMICS*, 1(34)2023(1(34)), 19–27. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.019> (Web of Science).
6. Zyhar, A., Yushchenko, Y., & Savchyn, I. (2023, June). A study of the influence of water level fluctuations on the geodynamic situation in the natural and technical geosystem of the Dniester HPP and PSPP cascade. *GEODESY, CARTOGRAPHY, AND AERIAL PHOTOGRAPHY*, 97,2023(97), 24–31. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.97.024> (здобувачем опрацьовано архівні матеріали установ, виконано обробку статистичних масивів цифрових даних використанням програмного продукту Matlab R2021, Yushchenko, Y., & Savchyn, I. - геоінформаційне і картографічне моделювання здійснено з використанням ГІС-програми QGIS 3.10 (відкрита ліцензія)).