

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 контрольно-виміральної 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 (верхнє 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 (KPCM): “Городок” (HORU), “Кам’янець-Подільський” (KMPU), “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-psp> (здобувачем опрацьовано архівні матеріали та власні польові вишуковування, 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 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 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*, *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)).