

УДК 627.8.059:550.83.04

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.52.918

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВОДОСПУСКНИХ ПРИСТРОЇВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

МАКОВЕЦЬКИЙ Б. І.¹, канд. техн. наук, доц.,
ДЬЯЧЕНКО О. С.², асист.,
ТРОШИН М. Ю.³, ст. викл.

¹ Кафедра архітектури, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-32, e-mail: bim953@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7406-1207

^{2*} Кафедра архітектури, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-32, e-mail: olgadiachenko303@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2591-3274

³ Кафедра архітектури, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-32, e-mail: michaeltopol1964@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8731-1842

Анотація. Постановка проблеми. Гідротехнічні споруди проходять обстеження на предмет технічного стану. Це необхідно для підтримки довговічності споруди. У процесі експлуатації виникають дефекти конструкцій, обстежити і дослідити які важко через неможливість доступу для візуального огляду. До таких дефектів належать ті, які утворюються в тілі земляних дамб гравітаційного типу. Це стосується, в першу чергу, конструкцій і пристроїв, які розташовуються в тілі дамб у процесі їх будівництва. До них, зокрема, належать водоскиди, трубопроводи. Дефекти в цих конструкціях спричиняють витoki води в тіло дамби, яка з часом руйнується зсередини. Своєчасне виявлення дефектів запобігає руйнуванню дамб шляхом термінового ремонту, і це подовжує довговічність споруди. **Мета** роботи полягає в розробленні аналітично-інструментального методу знаходження, без руйнації тіла дамби, розмивних, розушільнених ділянок у зонах протікань та визначення їх обсягів. **Методика.** Застосовується сучасний метод геофізики – електротомографія. Як теоретичне обґрунтування взято за основу метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (МПІЕПЗ). **Результат дослідження** – розробка методики із застосуванням методів інженерної геофізики: методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі та геоелектричної томографії. **Наукова новизна** полягає в тому, що метод розроблено вперше для обстеження водоскидів земляних дамб. **Практична значимість роботи.** За допомогою розробленого методу в подальшому є можливість проводити обстеження земляних дамб гідротехнічних споруд усім організаціям, які займаються такими роботами і мають необхідний інструментарій. **Висновки.** Розроблено аналітично-інструментальний метод дослідження ділянок земляних дамб, які перетинають конструкції водоскидів ставків, водосховищ. Виявлено місцезнаходження ореолу розушільненого ґрунту навколо труб водоскиду всередині тіла земляної дамби, визначено обсяги такого ґрунту.

Ключові слова: водоскид; земляна дамба; верхній б'єф; декомпація ґрунту; геофізичні методи

INVESTIGATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF WATER DISCHARGE DEVICES OF HYDRAULIC STRUCTURES

МАКОВЕЦЬКИЙ Б.І.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
ДЬЯЧЕНКО О.С.^{2*}, Ass.,
ТРОШИН М.Ю.³, Senior Lect.

¹ Department of Architecture, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-32, e-mail: bim953@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7406-1207

^{2*} Department of Architecture, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-32, e-mail: olgadiachenko303@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2591-3274

³ Department of Architecture, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-32, e-mail: michaeltopol1964@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8731-1842

Abstract. Problem statement. Hydrotechnical structures undergo a process of inspection for their technical condition. This is necessary to maintain the durability of the structure. In the process of operation, structural defects occur, which are difficult to examine and investigate, due to the impossibility of access for visual inspection. Such defects include those formed in the body of gravity-type earth dams. This applies, first of all, to structures and devices that are located in the body of dams during their construction. They include, in particular, spillways and pipelines.

Defects in these structures lead to leakage of water into the body of the dam, which eventually collapses from the inside. Timely detection of defects prevents the destruction of dams due to urgent repairs, and this extends the durability of the structure. **The purpose of the article** is to develop an analytical-instrumental method of finding, without destroying the body of the dam, erosional, loosened areas in leakage zones, and determining their volumes. **Method.** A modern method of geophysics, which is electrotomography, is used. As a theoretical justification, the method of the Earth's natural pulsed electromagnetic field (MENPEF) was taken as a basis. The result of the research is the development of a methodology using the methods of engineering geophysics: the method of the Earth's natural pulsed electromagnetic field (MENPEF) and geoelectric tomography. **Scientific novelty** lies in the fact that the method was developed for the first time for the examination of earth dams spillways. **Practical value.** With the help of the developed method, in the future it will be possible to conduct surveys for earth dams of hydrotechnical structures for all organizations that are engaged in such work and have the necessary tools. **Conclusions.** An analytical-instrumental method of researching the sections of earth dams that cross the structures of ponds spillways and reservoirs has been developed. The location of the loosened soil halo around the spillway pipes inside the body of the earth dam was identified, and the volume of such soil was determined.

Keywords: *spillway; earth dam; upper buff; soil decompaction; geophysical methods*

Постановка проблеми. У низці випадків виникає потреба усунути причини, які загрожують виходом із ладу гідротехнічних споруд. Це в першу чергу стосується земляних дамб гравітаційного типу, які становлять складову комплексу гідротехнічної споруди. Дамби утримують воду, утворюючи ставки, водосховища, електростанції.

Для обстеження технічного стану дамб робота поділяється на декілька етапів. Один із них – обстеження дамби в місцях поперечного перетину через тіло дамби водоскидів, якщо є підозра порушення цілісності земляного масиву від рушійної дії води, яка витікає через дефектні ділянки конструкцій водоскиду.

У процесі тривалої експлуатації гідроспоруди у водоскидах можуть виникати дефекти порушення цілісності конструкцій, які спричиняють витік води в середину тіла земляної дамби. Таким чином, дамба може руйнуватись, якщо не запобігти необхідними заходами. Такі заходи проєктуються на основі обстеження тіла дамби в передбачуваних місцях витоків води, з точним визначенням цих місць та обсягів порушення цілісності дамби.

Наразі постає проблема, що і яким методом необхідно дослідити досить швидко, з найменшими витратами встановити місцезнаходження ореолу витоків води навкруги конструкцій водоскидів із визначенням обсягів розуцільненого ґрунту дамби.

Мета дослідження – розробити аналітично-інструментальний метод дослідження ділянок земляних дамб, які перетинають конструкції водоскидів ставків, водосховищ (цей метод повинен відповідати вимогам неруйнівного контролю); виявити місцезнаходження ореолу розуцільненого ґрунту навколо труб водоскиду всередині тіла земляної дамби, визначити обсяги такого ґрунту.

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом обстеження обрано ділянку дамби ставка-охолоджувача Криворізької ТЕС ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго» в межах пікетів ПК, над водоскидним трубопроводом. За інформацією замовника робіт (гідротехнічний відділ ТЕС), на цій ділянці начебто передбачається витік води через нещільність у конструкціях водоскидних колодязів.

Методи обстеження земляних дамб. Найбільш поширений метод обстеження – візуальний, який фіксує видимі дефекти. У зв'язку з тим, що у даному випадку дефекти можуть утворюватися в середині тіла дамби, він не передбачався до використання. Один із найпоширеніших методів обстеження в товщі землі – метод нерушійного контролю за допомогою приладу георадар [8; 9]. Це доволі універсальний прилад, але для досягнення нашої мети він має суттєві недоліки. Основний із цих недоліків – недостатньо чітка інтерпретація сканування товщі ґрунту дамби. Результат залежить від кваліфікації оператора, також присутня

суб'єктивна оцінка під час камеральної обробки [11].

Метод дипольного індукційного зондування застосовується у випадках, коли аномальний об'єкт (витік води) міститься між джерелом первинного поля і вимірювальним пристроєм [6; 7]. У нашому випадку для вимірювання перешкодою стає бетонне покриття дороги на гребені дамби. До недоліків цього методу також відносять невизначеність точки запису.

Перераховані недоліки відсутні в сучасному методі геофізики, яким є електротомографія (складова більш загального методу електророзвідки). Цей метод більш інформативний і точніший, ніж георадарний [5; 13]. Методом електричної розвідки роблять сканування товщі ґрунту у вигляді розрізу на шукану глибину.

Щоб виявити обсяг обстежуваної ділянки, потрібно мати зображення результату в 3D вигляді, або зображення, де накладені одна на одну проєкції плану та розрізу. Цим методом необхідно, аби досягнути вказаного, зробити досить багато паралельних розрізів із дрібним кроком. Практичне виконання такого обсягу робіт пов'язане з великими трудозатратами. На рисунку 1 показано геоелектричний розріз, зроблений нами під час обстеження цілісності ділянки дамби в подовжньому напрямку.

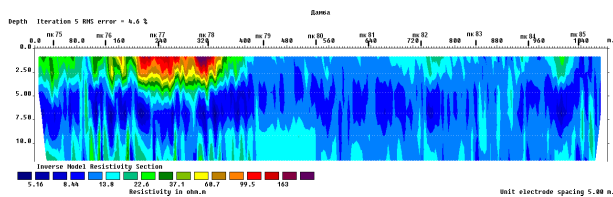


Рис. 1. Геоелектрична секція за профілем № 1

Для визначення аномальних зон на плані місцевості застосували метод, розроблений для прикладних цілей і випробуваний нами у праці [12]. Як теоретичне обґрунтування взято за основу метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (МПЕПЗ). У науковій літературі використовується більш скорочена назва – метод поля Землі. Він заснований на випромінюванні хвиль у зворотному

напрямку, з глибини Землі на її поверхню [1].

Потужність цих електромагнітних хвиль не велика, тому натурні виміри досить кропіткі й потребують делікатного підходу. Частота хвиль у діапазоні від 1 до 50 КГц. На рисунку 2 показано плани зображення ділянки земляної дамби з покриттям верхнього б'єфа залізобетонними плитами. На зображенні позначені зони порожнин під плитами [12]. Отож маємо намір перевірити працездатність моделі, представленої у праці [12], у випадку описаної проблеми з витоком води в тіло дамби під час виконання робіт для замовника.

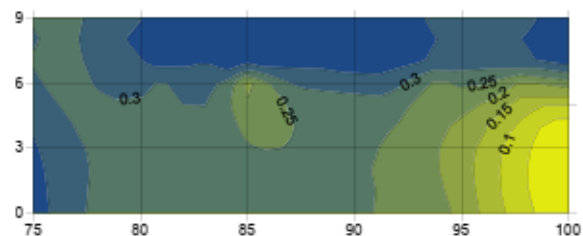


Рис. 2. ПК 75+75 – ПК 76+00: ізолювана аномалія 4, значне зволоження (або змивання) ґрунту на глибині до 1,0 м

Теорія та розрахунки. Метод електротомографії, який ми будемо застосовувати – це вимірювання системою електродів, попередньо заглиблених у ґрунт по прямолінійному профілю з обраним кроком між електродами. Комутація електродів здійснюється за допомогою каналного комутатора. Таким чином, спостерігають одночасно розріз і профіль по глибині.

Для візуалізації картини, тобто інверсії польових вимірювань, використовується програма *ges2Dinv*. В основі цієї програми лежить метод квазіньютонівської оптимізації. Двовимірна (2D) модель, яка використовується цією програмою, ділить півпростір на серію прямокутних блоків. Призначення програми – визначити опори прямокутних блоків, що дають псевдоріз видимих опорів, які збігаються з польовими вимірами. Для дипольної осьової установки потужність першого ряду блоків становить 0,3 інтервала електроду. Потужність кожного більш глибокого шару зазвичай

підвищується на 10 % (або на 25 %). Глибини шарів також можуть бути змінені користувачем вручну.

Метод оптимізації зазвичай намагається зменшити різницю у значеннях видимого опору, що розраховується і вимірюється шляхом варіювання опорів блоків моделі. Мірою цієї різниці є середня квадратична похибка кореня (RMS). Однак модель із найменшою можливою помилкою RMS іноді може видавати великі й нереальні зміни опорів моделі і не завжди може бути «найкращою» моделлю геологічно.

Загалом, найбільш раціональним методом став вибір моделі для тієї ітерації, після якої помилка RMS вже істотно не змінюється.

Гірська порода являє собою суміш породотвірних кристалів, скріплених між собою силами міжмолекулярної взаємодії. За дії тектонічних сил міжмолекулярні зв'язки розриваються і середовище збуджується, спричинюючи порушення її термодинамічної рівноваги.

Більшість породотвірних матеріалів належить до числа іонних кристалів. Найзначнішу роль у взаємодії окремих мікрочастинок речовини в іонному кристалі відіграють поперечні коливання іонів щодо напрямку поширення випромінювання.

Ці коливання, попадаючи на земну поверхню, перетворюються на електромагнітне випромінювання, а спектр і поляризація цього випромінювання несуть у собі унікальну інформацію про будову земної кори і динаміку тектонічних процесів. Зони збудженого стану збігаються із зонами підвищеної сейсмічної активності.

Метод МПЕПЗ заснований на явищі генерації електромагнітних імпульсів гірськими породами в умовах їх природного залягання. У змінному полі механічних напружень гірські породи, що містять діелектрики мінералів, унаслідок механоелектричних перетворень випромінюють електромагнітні імпульси. У глинистих породах, крім розщеплення і деформації частинок мінерального скелета, в утворенні імпульсних електромагнітних полів беруть участь і подвійні електричні

шари. Інтенсивна фільтрація рідини в капілярах, порах та інших порожнинах також супроводжується поляризацією і виникненням МПЕПЗ. Гідродинамічні напружені поля пов'язані з фільтрацією підземних потоків.

Методика виконання робіт. На дамбі ставка-охолоджувача Криворізької ТЕС на пікеті ПК 66 + 30 м розташований пристрій водоскиду залишкової води за межі ставка. Пристрій складається із трьох колодязів. Донний колодязь № 1, поверхневий колодязь № 2, а також колодязь для засувок № 3. Колодязі з'єднані сталевими трубами діаметром 1 500 мм (рис. 3). З колодязів № 1 і № 2 залишкова вода ставка витікає по трубах, які проходять через колодязь № 3, де витік води може регулюватися засувками. Після цього дві паралельно лежачі труби з'єднуються в одну, і далі вода стікає по ній у водобійний пристрій, де втрачає енергію потоку. Далі вода стікає по лотку в знижене місце за межі нижнього б'єфа дамби. Перепад висот від рівня дзеркала поверхні води становить 7,42 м.

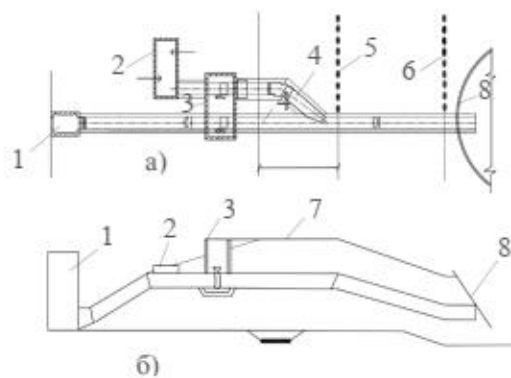


Рис. 3. Схема розташування елементів споруди водоскиду: а) план, б) розріз: 1 – основний колодязь водоскиду; 2 – другий колодязь; 3 – колодязь із засувками; 4 – труба водоскиду $D = 1\,200$ мм; 5 – місце профілю № 1; 6 – місце профілю № 2; 7 – ширина гребеня дамби(автодорога); \rightarrow – прийом води з поверхні ставка; 8 – водобійний пристрій

Профілі для електрогеологічної томографії тіла греблі на місці водоскидних труб були розміщені таким чином. Стальні штирі, які слугують електродами, забивають у землю, тому профіль № 1 проходить по узбіччю проїжджої частини дороги на

гребені дамби на відстані 4,5 м від колодязя № 3. Профіль перетинає дві труби, як показано на рисунку 3. Профіль № 2 прокладено нижче, перед водобійним пристроєм.

Аналізуючи результат вимірів, представлених на рисунку 4, прийдемо до висновку, що вздовж труб від колодязя № 3 іде зона декомпації (розмиву), яка утворилася від протоку води, на рисунку 4 зображено блакитним і салатним кольором навкруги темно-синього кольору тіла труб.

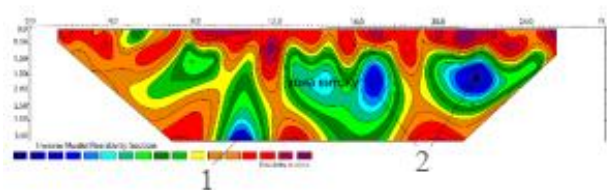


Рис. 4. Картина томографії профілю № 3:
1 – дренажна труба, 2 – водозливні труби,
3 – зона витoku

Для визначення початку шляху витoku води проведено вимірjувальні роботи методом МПЕПЗ для побудови горизонтальної карти ліній рівного рівня. Прокладка профілів утворила мережу з коміркою 1,0 × 1,0 м.

Загальний розмір цієї мережі утворив прямокутник розміром 8,0 × 7,0 м з 72 точками виміру в перехресті ортогональних профілів (рис. 5).

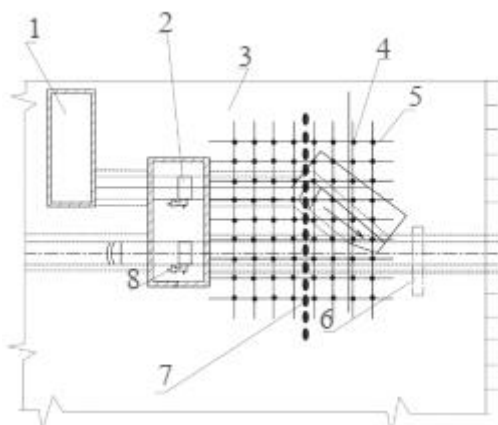


Рис. 5. Сітка профілів 1.0x1.0 для вимірювань методом МПЕПЗ

Для вимірювань користувались приладом РДВІНС. На рисунку 6 показано результат вимірювання у вигляді карти

ізоліній, представлених жовтим кольором різної інтенсивності. Чітко видно фізичну картину декомпації ґрунту греблі навколо труб, що виходять із колодязя № 3. При цьому видно, що з труби колодязя № 2 витік води більший, ніж із колодязя № 1.

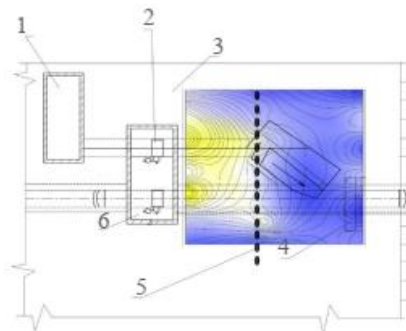


Рис. 6. Карта ізоліній методом МПЕПЗ

Якщо об'єднати карту МПЕПЗ і томографію профілю № 1 (рис. 7), побачимо, що біля колодязя № 3 розмивається товща ґрунту навколо труб (на розрізі позначено стрілками), збігається з розташуванням на плані (пунктирні стрілки), а глибина декомпації становить близько 2,5 м. Довжина розуцільненої ділянки ґрунту навколо труб близько 5 м. Загальний обсяг не ущільнених ділянок – 13 м³.

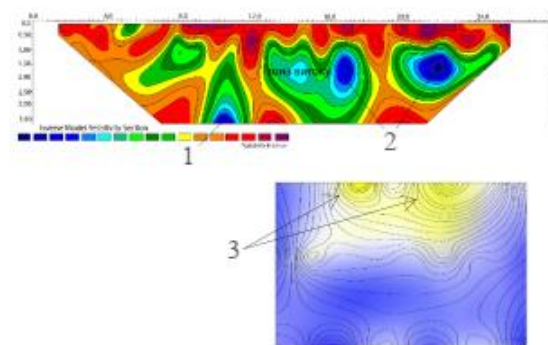


Рис. 7. Об'єднання профілю № 3 та карти МПЕПЗ:
1 – дренажна труба, 2 – водозливні труби,
3 – розуцільнення ґрунту в районі виходу труб з колодязя із засувками

Результати досліджень

1. Окремими методами інженерної геофізики, які використали спільно, вперше отримано результат, що показує працездатність запропонованого методу.

2. Така робота виконана вперше на конкретному об'єкті гідротехнічної споруди. Результат поставленої мети дає можливість і далі застосовувати методику для обстеження аномальних зон у тілі земляних дамб.

3. Для усунення витоків у зоні водоскиду ми запропонували такі заходи: герметизувати гідроізоляційним покриттям місце виходу труб із колодязя № 3; шляхом бітумізації обробити ділянки, зазначені на рисунку 7, на глибину близько 3 м.

Наукова новизна полягає в тому, що аналітично-інструментальний метод розроблено вперше для обстеження водоскидів земляних дамб.

Практична значимість. За допомогою розробленого методу в подальшому є можливість проводити обстеження земляних дамб гідротехнічних споруд усім організаціям, які займаються такими роботами і мають необхідний інструментарій.

Висновки

Розроблено аналітично-інструментальний метод дослідження ділянок земляних дамб, які перетинають конструкції водоскидів ставків, водосховищ.

Виявлено місцезнаходження ореолу розуцільненого ґрунту навколо труб водоскиду всередині тіла земляної дамби, визначено об'єми такого ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ахметов Е. М., Асемов К. М., Жуматаева М. О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности. *Известия Томского политехнического университета*. Алматы : Инжиниринг георесурсов, 2020. Т. 331, № 4. С. 70–82.
2. Беляева Л. И. Основы геофизики : учеб. пособ. Ухта : УГТУ, 2016. 182 с.
3. Варганов А. З., Набатов В. В. Термографический контроль для строительства. Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва : Московский государственный горный университет, 2011. № 9. С. 193–200.
4. Клименко С. В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд : навч. посіб. Київ : Центр навчальної літератури, 2014. 304 с.
5. Пігулевський П. Г., Свистун В. К., Кирилук О. С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Ч. 3. Результати застосування геоелектричних методів при вирішенні інженерно-геологічних завдань. *Геоінформатика*. 2017. № 2 (62). С. 55–63.
6. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индукционной электроразведки. Москва : Недра, 1973. 254 с.
7. Чистосердов Б. М. Исследование компенсационных установок при индукционном зондировании и профилировании аномальных объектов. Деп. в ВИНТИ, № 565-B2008. 33 с.
8. Eskin A., Dzhurin V., Serebryannikov S., Bryizhak U. Regime studies of the dynamics of the physical characteristics of the rock fill dam *J. Success of Modern Natural Science*. 2016. № 12 (2). 394 p.
9. Glazunov V., Danilev S., Efimova N. Application of the GPR method for assessing the state of fastening upper slope of land dams. *Journal of Applied Geophysics*. 2011. № 74 (2–3). Pp. 131–141.
10. Glazunov V. V., Shtengel V. G., Nedyalkov V. S., Efimova N. N., Danilev S. M. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. *Conference proceedings : Engineering and Mining Geophysics*. 2018. Pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.3997/22144609.201800474>
11. Kokinou E. and Sarris A. Detection of the near surface structure through a multidisciplinary geophysical approach. 2011. № 3 (4). Pp. 349–357. URL: <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0034-2>
12. Makovetskyi B. I., Sankov P. N., Papirnyk R. B., Tkach N. O., Trifonov I. V. Management of the technical condition of hydraulic structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. № 1021 (1). Pp. 012022. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012022.
13. Xingxin Xu, Qiaosong Z., Dong Li, Jin Wu. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. *Engineering Geology*. 2010. № 111 (1). Pp. 31–42. DOI:10.1016/j.enggeo.2009.12.001.
14. Pueyo A., Frongia P., Di Gregorio F., Kasas A., Pokovi A. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis : a case study of the Medau Zirimilis Dam Sardiniya, Italiya. 2018. № 237. Pp. 129–139.

REFERENCES

1. Ahmetov E.M., Asemov K.M. and Zhumataeva M.O. *Issledovanie avariyn na gidrotehnicheskikh sooruzheniyah i metody kontrolya ih bezopasnosti* [Research of accidents of hydraulic structures and safety control methods]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. Almaty : Geo Assets Engineering, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 70–82. (in Russian).
2. Belyaeva L.I. *Osnovy geofiziki : ucheb. posobie* [Fundamentals of geophysics : a textbook]. Uhta : UGTU Publ., 2016, 182 p. (in Russian).
3. Vartanov A.Z. and Nabatov V.V. *Termograficheskiy kontrol dlya stroitelstva* [Thermographic control for construction]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. Moscow : State Mining University, 2011, no. 9, pp. 193–200. (in Russian).
4. Klymenko Ye.V. *Tekhnichna eksploatatsiia ta rekonstruktsiia budivel i sporud : navchalnyi posibnyk* [Technical operation and reconstruction of buildings and structures : a textbook]. Kyiv : Training Center literature, 2014, 304 p. (in Ukrainian).
5. Pihulevskiy P.H., Svystun V.K. and Kyrlyuk O.S. *Doslidzhennia heoelektrychnymy metodamy inzhenerno-heolohichnoho stanu pivdenno-zakhidnoho Kryvbasu. Chastyna 3. Rezultaty zastosuvannya heoelektrychnykh metodiv pry vyrishenni inzhenerno-heolohichnykh zavdan* [Goelectric study of engineering-geological condition of southwestern Kryvbas. Part 3. The results of application geoelectric methods in solving geotechnical problems]. *Heoinformatyka* [Geoinformatyka]. 2017, no. 2 (62), pp. 55–63. (in Ukrainian).
6. Svetov B.S. *Teoriya, metodika i interpretatsiya materialov nizkochastotnoy induktsionnoy elektrorazvedki* [Theory, methodology and interpretation of materials of low-frequency induction electrical prospecting]. Moscow : Nedra Publ., 1973, 254 p. (in Russian).
7. Chistoserdov B.M. *Issledovanie kompensatsionnykh ustanovok pri induktsionnom zondirovanii i profilirovanii anomalnykh obiektov* [Study of compensation installations for induction sounding and profiling of anomalous objects]. Dep. v VINITI, no. 565-V, 2008, 33 p. (in Russian).
8. Eskin A., Dzhurin V., Serebryannikov S. and Bryzhak U. Regime studies of the dynamics of the physical characteristics of the rock fill dam J. Success of Modern Natural Science. 2016, no. 12 (2), 394 p.
9. Glazunov V., Danilev S. and Efimova N. Application of the GPR method for assessing the state of fastening upper slope of land dams. *Journal of Applied Geophysics*. 2011, no. 74 (2–3), pp. 131–141.
10. Glazunov V.V., Shtengel V.G., Nedyalkov V.S., Efimova N.N. and Danilev S.M. Combined investigation by thermal imaging and georadar scanning for voids detection under reinforced concrete slabs of fastening soil slopes of hydraulic structures. *Conference proceedings : Engineering and Mining Geophysics*. 2018, pp. 1–11. URL: <https://doi.org/10.3997/22144609.201800474>
11. Kokinou E. and Sarris A. Detection of the near surface structure through a multidisciplinary geophysical approach. 2011, no. 3 (4), pp. 349–357. URL: <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0034-2>
12. Makovetskiy B.I., Sankov P.N., Papirnyk R.B., Tkach N.O. and Trifonov I.V. Management of the technical condition of hydraulic structures. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021, no. 1021 (1), pp. 012022. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012022.
13. Xingxin Xu, Qiaosong Z., Dong Li and Jin Wu. GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams. *Engineering Geology*. 2010, no. 111 (1), pp. 31–42. DOI:10.1016/j.enggeo.2009.12.001.
14. Pueyo A., Frongia P., Di Gregorio F., Kasas A. and Pokovi A. Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis : a case study of the Medau Zirimilis Dam Sardinia, Italiya. 2018, no. 237, pp. 129–139.

Надійшла до редакції : 17.01.2023.