

DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343914>

УДК 556.3:004.94

МАТЕМАТИЧНА ГІДРОГЕОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ЗОНИ ВПЛИВУ ЗРУЙНОВАНОГО КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ РЕГІОНУ

MATHEMATICAL HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE IMPACT ZONE OF THE DESTROYED KAKHOVKA RESERVOIR AS AN INNOVATIVE TOOL FOR MONITORING AND MANAGING REGIONAL WATER RESOURCES

E-mail:

svodgeo@ukr.net
<https://orcid.org/0009-0003-9880-2019>
rud@hydrosafe.kiev.ua
<https://orcid.org/0000-0002-4112-9746>

О. Ю. Терентієв, Ю. Ф. Руденко
Olexandr Yu. Terentiev, Yurii F. Rudenko

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str.,
Kyiv, Ukraine, 01601

Ключові слова: Каховське водосховище, гідрогеологічна модель, підземні води, експлуатаційні запаси, водний баланс, Запорізька АЕС, моніторинг.

Keywords: Kakhovka Reservoir, hydrogeological model, groundwater, exploitable reserves, water balance, Zaporizhzhia NPP, monitoring.

Наведено результати і розглянуто стратегію подальшого детального дослідження впливу знищення Каховського водосховища на гідрогеологічні умови прилеглої території та родовища питних підземних вод, в формуванні експлуатаційних запасів яких поверхневі води водосховища відігравали ключову роль. Створено математичну модель підземних вод цієї природно-техногенної системи загальною площею близько 25 тис. км² з застосуванням потужного програмного комплексу FEFLOW, що використовує алгоритм кінцевих елементів. Для виконання рішень блоку фільтраційних, міграційних, трекінгових, епігнозних і прогнозних задач у створеній математичній моделі передбачено використання інноваційних інструментів, таких як: дискретні елементи, рух води в умовах насиченого/ненасиченого середовища з вільною поверхнею, що є інструментами програмного комплексу FEFLOW. Застосування в роботі цих інструментів та алгоритмів дає змогу кількісно оцінити і спрогнозувати рух води та вологи в новоутвореній, значній за розмірами гідрогеологічній системі, що сформувалась у заплаві та надзаплавних терасах р. Дніпро внаслідок знищення Каховського водосховища. Визначення генетичних складових балансу формування експлуатаційних запасів родовищ питних підземних вод, що розташовані в зоні впливу водосховища, та оцінку їх змін, дасть змогу визначити подальший статус цих родовищ як джерел саме питної води. Попередньо проаналізовано ситуацію з водозбором Запорізької АЕС після втрати водосховища, про що детально буде викладено в окремій публікації. Створена гідрогеологічна модель є важливим інструментом у розробці технологій моніторингу та відновлення геологічного середовища в басейні нижнього Дніпра. Інноваційні інструменти та алгоритми, що містяться у цій моделі, дадуть змогу кількісно оцінити наслідки зниження рівня підземних вод, втрати експлуатаційних запасів родовищ води питної якості.

The paper presents the results and the strategy for further detailed investigation of the impact of the destruction of the Kakhovka Reservoir on the hydrogeological conditions of the affected territory as a whole, with particular attention to groundwater deposits whose

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Цитування: Терентієв О. Ю., Руденко Ю. Ф. Математична гідрогеологічна модель зони впливу зруйнованого Каховського водосховища як інноваційний інструмент моніторингу та управління водними ресурсами регіону. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025. Том 18. Вип. 2. С. 85–96. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343914>.

Citation: Terentiev O. Yu., Rudenko Yu. F., 2025. Mathematical hydrogeological model of the impact zone of the destroyed Kakhovka reservoir as an innovative tool for monitoring and managing regional water resources. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 85–96. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.343914>.

exploitable reserves were strongly dependent on the surface-water inflow formerly provided by the reservoir. A mathematical groundwater model of this large natural–technogenic system (total area approximately 25,000 km²) was developed using the advanced finite-element simulation platform FEFLOW. The model incorporates innovative tools for solving filtration, solute-migration, particle-tracking, diagnostic and predictive tasks, including discrete elements and saturated/unsaturated flow under free-surface conditions, which are integral capabilities of the FEFLOW environment. The applied methods and algorithms enable a quantitative evaluation and forecasting of groundwater and soil-moisture dynamics within a newly formed, large-scale hydrogeological system that emerged within the floodplain and terrace complexes of the Dnieper River as a consequence of the destruction of the Kakhovka Reservoir. Determining the genetic components of the groundwater balance and assessing changes in the exploitable reserves of potable groundwater deposits located within the reservoir's former zone of influence will make it possible to unambiguously determine their future status as potable-water deposits. A preliminary analysis of the situation regarding the water supply for the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant following the loss of the reservoir has also been conducted; this issue will be discussed in detail in a separate publication. The developed hydrogeological model is an important tool for designing technologies for monitoring and restoring the geological environment within the lower Dnieper Basin. The innovative instruments and algorithms embedded in the model enable quantitative assessment of groundwater-level decline and the associated loss of exploitable reserves of potable-quality water.

ВСТУП

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023р. спричинило перебудову гідрогеологічного режиму нижнього Дніпра. Значні зміни напорів, оголення дна і трансформація водообміну створили загрозу ресурсам питних підземних вод, що потребує кількісного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Міжнародні організації (UNEP, UNOSAT, CEOBS) описують наслідки катастрофи, але не проводять 3D-кількісного аналізу підземних вод. Стаття І. В. Саніної і Н. Г. Лютої (2023) висвітлює проблеми водозабезпечення, однак в ній не моделюються фільтраційні процеси. Наукові публікації Water International та AGU зосереджені на гідрології, а не на підземній частині балансу.

Виділення невирішених частин проблеми

Залишаються невідомими такі: зміна просторової структури потоків води у даній гідрогеологічній системі в цілому; зміна балансу формування експлуатаційних запасів підземних вод з кількісним визначенням його генетичних складових; трансформація умов дренажу; ризики підтягування вод підвищеної мінералізації до водозаборів питних вод, що є суттєвою загрозою раніше розвіданим родовищам питної води; наслідки для критичної інфраструктури.

Мета та завдання статті

Метою є створення 3D-регіональної математичної моделі зони впливу зруйнованого Каховського водосховища. Завдання дослідження включають:

— створення математичної гідрогеологічної моделі даного природно-техногенного об'єкта

з використанням алгоритму кінцевих елементів і програмного комплексу FEFLOW;

— визначення сучасних і прогнозних змін просторово-часової структури потоків у даній гідрогеологічній системі в цілому;

— оцінку кількісних і генетичних змін у балансі формування експлуатаційних запасів підземних вод, що знаходяться в межах безпосереднього впливу зруйнованого водосховища;

— визначення сучасної та прогнозної динаміки розвитку депресій рівнів у водоносних горизонтах у межах діючих водозаборів для різних умов водообміну і схем водозаборів;

— оцінка ризиків підтягування до родовищ з раніше затвердженими запасами (Табл. 1) вод підвищеної мінералізації, що може призвести до втрати ними статусу власне родовищ саме питних підземних вод;

— розробка рекомендацій з організації моніторингу та управління водними ресурсами регіону на підставі прогнозних рішень математичної гідрогеологічної моделі даного природно-техногенного об'єкта.

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ

Слід підкреслити, що традиційні методи спостережень виявляються недостатніми в умовах високої просторової неоднорідності геологічного розрізу, а також складної динаміки водообміну у водоносних горизонтах району впливу водосховища, дуже мінливих за площею та в розрізі фільтраційних і міграційних параметрів водоносних горизонтів та розподільних слабофільтраційних шарів, нагальна необхідність кількісного визначення генетичних складових балансових показників водоносної системи в цілому та родовищ питних підземних вод зокрема. Тому актуальним стає використання математичного гідрогеологічного

Таблиця 1. Дані щодо кількості затверджених запасів прісних підземних вод по основним родовищам у районах безпосереднього впливу водосховища

Table 1. Data on the amount of approved reserves of fresh groundwater in the main deposits within the areas directly affected by the reservoir

№№ п/п	Родовище, ділянка	Геологічний індекс водоносного горизонту	Кількість затверджених запасів прісних підземних вод за категоріями А+В+С ₁ , тис. м ³ /Добу
1	Кам'янсько-Дніпровське – 5.2 (Енергодар)	aQ	55,1
2	Кам'янсько-Дніпровська ділянка	aQ	15,4
	Загалом по водозаборах у районі Запорізької АЕС	aQ	70,5
3	Бериславське р-ще, машинобудівний завод	N ₁ s	0,24
4	Бериславське родовище, східна ділянка	N ₁ s ₃ + N ₁ m	1,6
5	Бериславське родовище, ділянка Бериславська-1	N ₁ s ₃ + N ₁ m	20,7
6	Бериславське родовище, ділянка Бериславська-2	N ₁ s ₃ + N ₁ m	0,358
7	Бериславське родовище, ділянка Бериславська-південна	N ₁ s ₃ + N ₁ m	7,3
	Загалом по водозаборах у районі Берислава	N ₁ s ₃ + N ₁ m	30,2
8	Каховське родовище, ділянка Каховка-2	N ₁ s ₃	1,97
9	Каховське родовище, ділянка Окрема	N ₁ s ₃	7,305
10	Каховське родовище, ділянка Чумак	N ₁ s ₃	1,97
11	Каховське родовище, ділянка Каховська-1	N ₁ s ₃	5,2
12	Каховське р-ще, ділянка Каховська-2	N ₁ s ₃	41,3
	Загалом по водозаборах у районі Каховки	N ₁ s ₃	57,8
13	Ново-Каховське родовище, завод плавлених сирів	N ₁ s ₃	0,126
14	Ново-Каховське родовище, ділянка Окрема	N ₁ s ₃	14,27
15	Ново-Каховське родовище, ділянка Східна	N ₁ s ₃	22,0
16	Ново-Каховське родовище, ділянка «Таврія»	N ₁ s ₃	1,01
17	Ново-Каховське родовище, ділянка Ново- Каховська-3	N ₁ s ₃	15,0
18	Ново-Каховське родовище, ділянка Ново- Каховська-2	N ₁ s ₃	14,6
19	Ново-Каховське родовище, ділянка Ново- Каховська-1	N ₁ s ₃	10,4
	Загалом по водозаборах у районі Нової Каховки	N ₁ s ₃	77,4
	Загалом		235,9

1963; А. А. Петренко, 1999; І. І. Степанський, К. І. Плотнікова, 1972; Р. П. Труш та ін., 1949; Р. П. Труш та ін., 1950) (табл. 2).

Апроксимація простору мережею кінцевих елементів. Конструювання мережі виконано за допомогою генератора кінцевих елементів Triangl. При цьому загальну площу (суперполігон) було поділено на додаткові полігони із заданими для генератора такими умовами щільності окремих полігонів:

- правий берег р. Дніпро (згенеровано 10000 елементів);
- лівий берег р. Дніпро (згенеровано 8000 елементів);
- заплава р. Дніпро (згенеровано 5000 елементів);
- сучасне русло р. Дніпро, яке утворилося після катастрофи (згенеровано 3000 елементів).

Щільність мережі була диференційована з метою максимально точного відображення складної геометричної конфігурації меж моделі, русла р. Дніпра. При цьому було враховано наявну щільність достовірної параметричної інформації,

граничних умов, координат розміщення свердловин. Використано координатну систему WGS-84 проєкцію UTM, зона 36-N.

Після запуску згаданого вище генератора Triangl, на даному етапі досліджень було згенеровано мережу моделі, яка складається з 33 325 кінцевих елементів і 17 067 вузлів (з урахуванням всіх семи шарів). При цьому генератор використав відповідні математичні критерії для побудови коректної мережі з мінімальним рівнем числової осциляції. Потрібно наголосити, що програма FEFLOW дає змогу на будь-якому етапі рішення задач виконувати витончення мережі там, де буде потрібно.

Граничні умови (ГУ), що були задані на моделі, такі. На західному, східному, північному флангах по зовнішньому контуру моделі (по вододілах) задано умову 2-го роду (ГУ-2) з $Q = 0$. На південному фланзі (море, лимани) задано умову 1-го роду (ГУ-1) з $H = \text{const}$. Водосховище та русло р. Дніпро на різних етапах розрахунків залежно від мети задані і задаватимуться граничними умовами 1-го (ГУ-1) або 3-го роду (ГУ-3), а також

Таблиця 2. Вертикальна структура моделі (рис. 4)

Table 2. Vertical structure of the model (figure 4)

№ п/п	Назва водоносного горизонту або слабофільтраційного шару	Апроксимація на моделях
1	Водоносний та водонасичений комплекс четвертинних відкладів (суглинки лесоподібні, піски надзаплавних терас Дніпра). У заплаві р. Дніпро – водоносний горизонт алювіальних відкладів	Водоносний горизонт з вільною поверхнею, насичений/ненасичений режим з капілярною обляміркою (код-layer_1)
2	Водотривкі шари червоно-бурих глин (у районах їх поширення) і щільних вапняків різного віку та літолого-фаціального походження	Водотривкий шар (код-layer_2)
3	Водоносний шар тріщинуватих вапняків різного вікового та літолого-фаціального походження	Водоносний горизонт (код-layer_3)
4	Водотривкий шар неогенових глин	Водотривкий шар (код-layer_4)
5	Водоносний шар палеогенових відкладів різного вікового та літолого-фаціального походження, піски	Водоносний горизонт (код-layer_5)
6	Водотривкий шар палеогенових відкладів, кори вивітрювання кристалічних порід	Водотривкий шар (код-layer_6)
7	Водоносний шар тріщинуватої зони кристалічних порід і районів розміщення тектонічних порушень	Водоносний горизонт (код-layer_7)

з урахуванням результатів досліджень (Басова, 1953; Островська, Калниня, 1980).

Гідрогеологічні параметри відповідали фактичним даним, що містяться в роботах (В. Д. Островська, И. А. Калниня, 1980; Г. В. Пасечний та ін., 1963; Л. Г. Пашенко, 1973; Л. Ю. Саригіна, 2021; В. М. Шестопапов, Е. А. Яковлев, Н. С. Огняник и др., 1988–1991). Вони будуть уточнені в подальшому за результатами рішення блока обернених задач. Для їх внесення в модель для кожного з семи шарів створено комплект відповідних карт поширення водоносних горизонтів та слабофільтраційних шарів. Для цього було використано ГІС програму QGIS, карти створено у форматі *.shp, вони мають відповідні атрибутивні таблиці. Діапазон зміни фільтраційних параметрів у семи шарах створеної моделі показано у табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТИ

Зібрані для створення моделі фактичні матеріали, які систематизовані з використанням програми

ГІС QGIS, підтверджують таке. Після втрати багаторічного підпору водосховища сучасне русло Дніпра виконує роль регіональної дрени, формується залучення підземних потоків із заплави та надзаплавних терас, що узгоджується з польовими спостереженнями (падіння рівнів на 2–4 м уздовж прибережної смуги), (рис. 2). Поперечні профілі показують зміщення зони насичення вниз на оголеному дні та збільшення градієнтів у напрямку до русла (Терентієв, 2025). Така поведінка фізично очікувана і корелює з фактичними свідченнями висихання колодязів (рис. 3) і практично регіонального зменшення дебітів свердловин, підтягування до водозаборів некондиційних вод.

У заплаві Дніпра відновилась водообмінна система (яка до руйнування водосховища була затоплена водою), що діє як гідродинамічний «буфер» між вододілами та регіональною дренажною лінією – сучасним руслом. Варіабельно насичена постановка (рівняння Річардса + алгоритм рухливих вузлів мережі) відтворює сезонно-епізодичні переходи насичення/аерації, важливі для оцінки

Таблиця 3. Дані щодо фільтраційних параметрів, які задані на створеній моделі

Table 3. Data on the filtration parameters assigned in the developed model

№ п/п	Назва водоносного горизонту або слабофільтраційного шару	Коефіцієнт фільтрації $K_{x,y,z}$, м/добу
1	Водоносний та водонасичений комплекс четвертинних відкладів (суглинки лесоподібні, піски надзаплавних терас р. Дніпра). У заплаві р. Дніпро – водоносний горизонт алювіальних відкладів (код-layer_1)	1,13–8,7 (у заплаві р. Дніпро до 34,0)
2	<i>Водотривкі шари</i> червоно-бурих глин (у районах їх поширення) і щільних вапняків різного віку та літолого-фаціального походження (код-layer_2)	0,033–0,00001
.	Водоносний шар тріщинуватих вапняків різного вікового і літолого-фаціального походження (код-layer_3)	0,27–5,45
4	<i>Водотривкий шар</i> неогенових глин (код-layer_4)	0,01–0,001
5	Водоносний шар палеогенових відкладів різного вікового та літолого-фаціального походження, піски (код-layer_5)	1,5–70,0
6	<i>Водотривкий шар</i> палеогенових відкладів, кори вивітрювання кристалічних порід (код-layer_6)	0,1–0,5
7	Водоносний шар тріщинуватої зони кристалічних порід і районів розміщення тектонічних порушень (код-layer_7)	0,08–10,7



Рис. 2. Вид на канал Дніпро-Кривий Ріг в р-ні с. Мар'янське (фото з експедиції 1–5 травня 2025 р., 20 липня 2025 р.).

Fig. 2. View of the Dnipro-Kryvyi Rih Canal in the area of Maryanske village (photographs from the field expedition, 1–5 May 2025; 20 July 2025).



Рис. 3 Криниця питного водопостачання, 250 м на північ від каналу Дніпро-Кривий Ріг, яка дренує воду в лесовидних суглинках (залишкову воду техногенного підтоплення), географічні координати: N 47° 33' 55.77", E 33° 50' 40.28" (фото з експедиції 1–5 травня 2025 р., 22 липня 2025 р. ця криниця висохла, що буде враховано на етапі рішення зворотних фільтраційних задач).

Fig. 3. Drinking-water well located 250 m north of the Dnipro-Kryvyi Rih Canal, draining water from loess-like loams (residual water of technogenic inundation); geographical coordinates: N 47° 33' 55.77", E 33° 50' 40.28". (Photographs from the field expedition, 1–5 May 2025; by 22 July 2025 the well had dried up, which will be taken into account at the stage of solving inverse filtration problems).

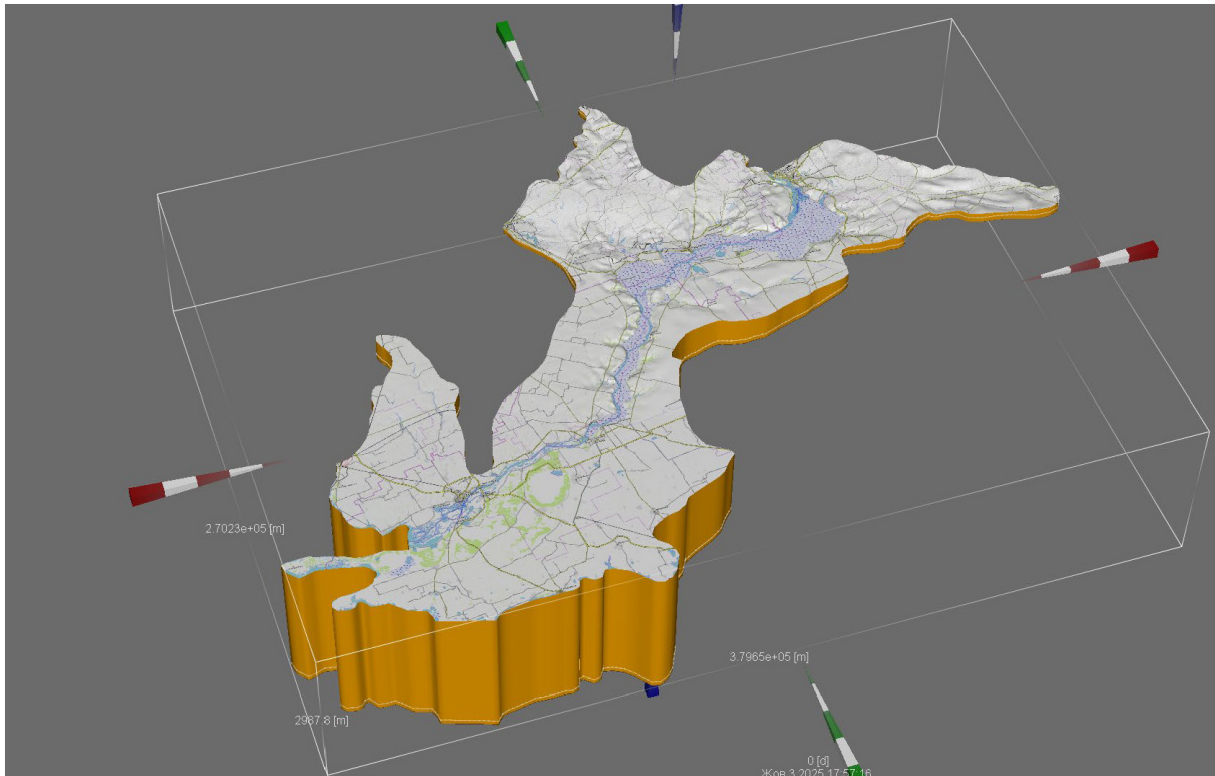


Рис. 4. 3D зображення математичної гідрогеологічної моделі зони впливу зруйнованого Каховського водосховища створеної з використанням програмного комплексу FEFLOW.

Fig. 4. 3D representation of the mathematical hydrogeological model of the impact zone of the destroyed Kakhovka Reservoir developed using the FEFLOW software package.

затримки і перерозподілу підживлення та випаровування в часі. Це забезпечує пояснення спостереженого інерційного відгуку рівнів і дебітів.

За даними сучасних спостережень групи водозаборів у районах Каховки, Нової Каховки, Берислава та особливо Кам'янки-Дніпровської (Енергодар) демонструють підвищені ризики: зменшення ефективної потужності водоносних товщ, зростання депресій у зонах інтенсивного відбору (Гур'євських, 2015), можливе підтягування вод із підвищеною мінералізацією з боку вододілів (Бруяко, 2005), оскільки з балансу зникла ключова складова підживлення з водосховища. Узагальнена величина потенційної втрати запасів питної якості за основними групами родовищ — до **235,9** тис. м³/добу (за чинними затвердженими запасами). Це може статися в тому випадку, якщо до водозаборів підтягнуться води підвищеної мінералізації. Для Запорізької АЕС (Енергодар) зниження рівнів на 6–8 м і падіння дебітів на 40–60% формують критичні сценарії щодо забезпечення технічного водопостачання.

Включення у модель дискретних елементів дало змогу відтворити позамасштабні високопровідні структури: зони аномальної провідності, які пов'язані з тектонічними утвореннями, вертикальні стовбури свердловин, які одночасно розкривають по кілька зон водоприпливів з різних за стратиграфічним поділом водоносних шарів.

Осушення спричиняє ущільнення лесових товщ, диференційні осідання та тріщиноутворення, що створює додаткові напруження в трубопроводах і ризики для інфраструктури (в тому числі систем охолодження ЗАЕС). За майбутніми модельними оцінками зниження рівнів і зміни тиску в водоносних горизонтах можна визначити зони підвищеної небезпеки. Втім, для детального вивчення цього небезпечного явища в майбутньому необхідно буде створювати детальну модель-врізку в районі розміщення цього об'єкта.

Зауважимо, що просторові рішення рівнів/потоків, які будуть отримані в FEFLOW включно з використанням алгоритмів із вільною поверхнею та рухливими вузлами мережі, відтворять очікуваний

післяруйнівний режим «річка як дрена» та нову (відновлену) буферну роль заплави р. Дніпро.

Подальше уточнення параметрів і граничних умов планується за результатами рішення блока зворотних задач з використанням часових рядів рівнів, дебітів і супутникових показників, зволоження/випаровування. Це безпосередньо передбачено у створеній моделі даного природно-техногенного об'єкта.

Оцінки якості вод є потенційним важелем розширення даних відносно складу вод і ґрунтів. Проте їх не інтерпретовано як фінальні на цьому етапі досліджень.

ВИСНОВКИ

- Станом на 2024–2025 рр. маємо сильні блоки зі спостережень (супутники, картографування) поверхневого гідробалансу. Натомість бракує інтегрованої 3D-моделі підземних вод у варіабельно насиченій постановці, що описує: перерозподіл запасів після зникнення підпору; суміжні потоки «колишне дно — заплава — русла — аквіфери»; аномальні напрямки швидкості руху підземних вод (старі русла, тектонічні утворення); загрозу для родовищ питних підземних вод; загрозу для водозабору ЗАЕС, води якого використовуються для охолодження шести реакторів станції. Це саме той прошарок, де нині прогалина.
- Руйнування греблі Каховської ГЕС кардинально змінило режим системи «річка — підземні води»: сучасне русло Дніпра стало регіональною дренажною лінією, що спричинило стійкий дрейф підземних потоків до русла та зниження рівнів у прибережній смузі на 2–4 м (локально 6–8 м у районі Енергодара), та на 4–4,5 м у районі с. Мар'янське (О. Ю. Терентієв, 2025). Це вже призвело до зменшення дебітів експлуатаційних свердловин і підвищило ризики підтягування некондиційних (солонуватих) вод до груп родовищ питних підземних вод. Сукупні затверджені запаси, які перебувають під ризиком втрати якості, становлять приблизно **235,9** тис. м³/добу.
- У заплаві Дніпра відновилась нова водообмінна підсистема, яка до руйнування водосховища була затоплена водою. Вона поводить себе як гідродинамічний «буфер» між вододілами та дренажним руслом і коректно описується тільки у варіабельно насиченій/ненасиченій постановці (рівняння Річардса) з рухомою стратиграфічно узгодженою 3D-сіткою. Такий

підхід дає змогу відтворювати сезонні переходи насичення/аерації та часові затримки реакції рівнів і витрат у загальній системі водоносних горизонтів.

- Ризики для критичної інфраструктури локалізуються насамперед у районах Кам'янсько-Дніпровського вузла (Енергодар) та груп водозаборів Каховка — Нова Каховка — Берислав: зменшується ефективна потужність водоносних товщ, зростають депресії, можливе прискорене підтягування мінералізованих вод за пріоритетними напрямками фільтрації (старі русла, тектонічні зони, дренажні об'єкти, зони аномальної водопровідності). Орієнтовно критичним для стабільного технічного водопостачання ЗАЕС є поріг ~ 12 тис. м³/добу.
- Створено регіональну 3D-математичну гідрогеологічну модель (рис. 4) зони впливу (~25,4 тис. км²; сім стратиграфічних рівнів), дискретизовану FEM-сіткою (поточна конфігурація: 33 325 елементів, 17 067 вузлів) з адаптивним часовим кроком. Застосовано DFE (дискретні елементи) для позамасштабних високопровідних структур, вільну поверхню з рухливими вузлами мережі кінцевих елементів. Задано узгоджені граничні умови (ГУ-1/ГУ-2), геометрію побудовано за SRTM і свердловинними даними з просторовою інтерполяцією. Поточні результати концептуально узгоджуються із сучасними даними польових спостережень (Бруяко, 2005; Гур'євських, 2015, Терентієв, 2025).

ОРІЄНТИРИ ПОДАЛЬШИХ ДІЙ

Моніторинг і дані (оперативний блок)

- Збір додаткових даних за результатами спостережень за рівнями у заплаві, надзаплавних терасах, зонах інтенсивного водовідбору та даних щодо водовідборів у свердловинах основних груп водозаборів питної води.
- Інтеграція супутникових продуктів (карти осушення/затоплення) як граничних умов для верхньої межі (інфільтрація/випаровування), вивчення заплавної динаміки руху обсягів води та її рівнів.

Уточнення і калібрування моделі (інверсійні задачі)

- Уточнення полів фільтраційних та ємнісних параметрів, початкових і граничних умов на підставі часових рядів спостережень за рівнями,

витратами потоків; застосування методично узгоджених інверсійних процедур у програмі FEFLOW.

- Локальне ущільнення та витончення мережі FEM-елементів у зонах очікуваних значних градієнтів (береги, заплава, русло, свердловини водозаборів), перевірка стабільності обчислень і чутливості параметрів у цілому, а також параметрів зони вільної поверхні зокрема.

Задання на створеній моделі дискретних (позамасштабних) елементів

- Геолого-гідрогеологічне обґрунтування і інтегрування в мережу створеної моделі 1D/2D високопровідних елементів (тектонічні зони, дренажі, за наявності інші лінійні об'єкти) із заданим на моделі обміном маси води та перерозподілом напору в схемі «елемент — мережна матриця моделі».
- Кількісна оцінка їх внеску у латеральні складові витрат потоків і швидкості підтягування солонуватих вод до експлуатаційних свердловин родовищ питних підземних вод.

Варіабельно насичені процеси і вільна поверхня (BASD + Richards)

- Моделювання сезонних циклів насичення/аерації заплави, берегових схилів і оголеного дна через вільну поверхню з визначенням балансових складових.
- Оцінка часових затримок реакції рівнів і витрат системи водоносних горизонтів у відповідь на кліматичні та антропогенні втручання (водовідбір/локальні підпори).

Прогнозні розрахунки для водозаборів і критичної інфраструктури

- Розрахунок масивів зниження/відновлення рівнів, зон ризику виснаження та деградації якості для груп водозаборів (Каховка, Нова Каховка, Берислав, Кам'янсько-Дніпровський).

- Визначення кількісних складових загального водообміну в районі розташування ЗАЕС із контролем порога водовідбору на водозабірній станції ~12 тис. м³/добу, підготовка базової основи даних і рішень, які необхідні для створення локальної, детальної за своїм призначенням математичної гідрогеологічної моделі цього техногенно-природного об'єкта.

Якість вод і транспорт домішок (ADR-блок, за наявності даних)

- Пілотні 3D-розрахунки міграції солей (TDS-загальна мінералізація як інтегральний показник) у варіабельно насиченій постановці.
- Окремі тестові розрахунки для зон потенційного техногенного навантаження, поєднані з картами масивів осушення/затоплення.

Управлінські сценарії та практичні рекомендації

- Сценарне планування раціонального водокористування з пріоритизацією питного водопостачання: лімітування/перерозподіл відборів, локальні підпори, оптимізація черговості включення окремих свердловин у фактичних схемах водозаборів, згідно з методичними рекомендаціями (Н. С. Огняник, 1983).
- Рекомендації стосовно геопросторового планування ЗСО (2-й і 3-й пояси), створення моніторингової мережі «мінімум — достатньо», оцінка ризиків для найбільш проблемних флангів основних водозаборів питної води.

Очікувані продукти

- Карти зниження/відновлення рівнів; карти з полігонами небезпеки для дебітів і якості (TDS-загальна мінералізація) питних вод; тривимірні схеми аномальних напрямків та швидкості фільтрації підземних вод.
- Звіт і рекомендації щодо управління водними ресурсами регіону.

REFERENCES

Basova O. B., 1953. *Kakhovka Hydroelectric Power Plant on the Dnipro River: Technical Project*. Appendix No. 2. Kharkiv (In Russian).

Bruyako A. V., 2005. *Report on the assessment of the state of prospective resources and operational reserves of groundwater in Kherson Region*. Odesa. (In Ukrainian).

Басова О. Б. Каховская ГЭС на р. Днепр: Технический проект. Приложение № 2. 1953. Харьков.

Бруяко А. В. Звіт про оцінку стану прогнозних ресурсів та експлуатаційних запасів підземних вод у Херсонській області. 2005. Одеса.

- Hurievskykh L. S., 2015. *Informational report on groundwater monitoring in Kherson and Mykolaiv Regions as of 01.01.2016*. Kherson: Prychornomor DRGP. (In Ukrainian).
- Dvoryadkin S. A., Viktorova A. F., & Lyzohub V. A., 2002. *Report on exploration of drinking groundwater and drilling of exploration and operational wells in the southern part of Mykolaiv, Kherson, and Odesa Regions*. Odesa. (In Ukrainian).
- Ohniyanik N. S., 1983. *Steady-state mathematical models of hydrogeological processes*. Kyiv: Naukova Dumka. 168 p. (In Russian).
- Ostrovskaya V. D., & Kalnynia I. A., 1980. *Report on hydrogeological survey works for domestic water supply of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant*. Riga. (In Russian).
- Pasechniy H. V. et al., 1963. *Comprehensive geological map of the territory of sheet L-36-X (Kakhovka), scale 1:200,000*. Geological Mapping Party Report No. 12. (In Ukrainian).
- Pashchenko L. H., 1973. *Detailed exploration of groundwater for water supply of Nova Kakhovka, Kherson Region, Ukrainian SSR*. Odesa: Krymmorgeologia Production Association. (In Russian).
- Petrenko A. A., 1999. *Geological re-examination of areas at a scale of 1:200,000 within sheets L-36-VI (Zaporizhzhia) and L-37-I (Pology)*. Dnipro. (In Russian).
- Sanina I. V., Lyuta N. H., 2023. Environmental consequences of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam explosion and ways to improve water supply to the population. *Mineral Resources of Ukraine*, № 2. Pp. 50–55. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>.
- Saryhina L. Yu., 2021. *Detailed geological and economic assessment of the operational reserves of potable groundwater of the Nova Kakhovka deposit*. Prychornomor DRGP Archives. (In Ukrainian).
- Stepanskyi I. I., Plotnikova K. I., 1972. *Geological Map of the USSR, scale 1:200,000. Black Sea Series, sheet L-36-XI (Zaporizhzhia and Kherson Regions)*. (In Ukrainian).
- Terentiev O. Yu., 2025. *Assessment of the impact of industrial development of the Maryanske limestone deposit on surface and groundwater bodies and the overall hydrogeological conditions in the area of its location*. Report of LLC NVP "SPECVODGEO". Kyiv. (In Ukrainian).
- Trush R. P., Boborykin Ye. K., Sukhman P. V., Kiseleva M. F., Kostina Ye. P., 1949. *Geological structure, hydrogeological conditions, and soils of the Dnipro River valley below the city of Kherson. Sheets L-36-XIV–XV, scale 1: 200 000*. Mykolaiv and Kherson Regions. (In Russian).
- Trush R. P., Kostina Ye. P., Karpinska Yu. A., Akinfiieva O. K., 1950. *Geological structure, hydrogeological conditions, and soils of the left bank of the Lower Dnipro. Sheets L-36-XI, XVII*. (In Russian).
- Shestopalov V. M. et al., Yakovlev E. A., Ognianik N. S., et al., 1988–2001. *Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine*. In 5 volumes. Kyiv: Naukova Dumka. (In Russian).
- Bear J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill, New York.
- Гур'євських Л. С. Інформаційний звіт з моніторингу підземних вод на території Херсонської та Миколаївської областей станом на 01.01.2016 р. 2015. Причорномор ДРГП. Херсон.
- Дворядкін С. А., Вікторова А. Ф., Лизогуб В. А. Звіт з пошуків питних підземних вод і буріння розвідувально-експлуатаційних свердловин у південній частині Миколаївської, Херсонської та Одеської областей. 2002. Одеса.
- Огняник Н. С. Постоянно действующие математические модели гидрогеологических процессов. 1983. Киев: Наукова думка. 168 с.
- Островська В. Д., Калніня І. А. Отчет о гидрогеологических изыскательских работах по хозяйственному водоснабжению Запорожской АЭС. 1980. Рига.
- Пасечний Г. В. та ін. Комплексна геологічна карта територій листа L-36-X (Каховка), масштаб 1: 200 000. 1963. Звіт геологнізмальної партії № 12.
- Пашенко Л. Г. Детальна разведка подземных вод для водоснабжения г. Новая Каховка Херсонской области УССР. 1973. ПГО «Крымморгеология». Одесса.
- Петренко А. А. Геологическое доизучение площадей масштаба 1: 200 000 территории листов L-36-VI (Запорожье) и L-37-I (Пологи). 1999. Днепропетровск.
- Саніна І. В., Люта Н. Г. Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*. 2023, № 2. С. 50–55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>.
- Саригіна Л. Ю. Детальна геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів питних підземних вод Новокаховського родовища. 2021. Фонди Причорномор ДРГП.
- Степанский И. И., Плотникова К. И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Причерноморская, лист L-36-XI (Веселое). 1972.
- Терентієв О. Ю. Оцінка впливу промислової розробки Мар'янського родовища вапняків на поверхневі та підземні водні об'єкти і гідрогеологічну ситуацію в районі його розташування в цілому. 2025. Звіт ТОВ НВП «СПЕЦВОДГЕО». Київ.
- Труш Р. П., Боборькин Е. К., Сухман П. В., Киселева М. Ф., Костина Е. П. Геологическое строение, гидрогеологические условия и почвы долины р. Днепр ниже г. Херсон. Лист L-36-XIV–XV. Масштаб 1: 200 000. (Николаевская и Херсонская области). 1949.
- Труш Р. П., Костина Е. П., Карпинская Ю. А., Акинфиева О. К. Геологическое строение, гидрогеологические условия и почвы левобережья нижнего Днепра. Лист L-36-XI, XVII. 1950.
- Шестопалов В. М., Яковлев Е. А., Огняник Н. С. и др. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. В 5-томах. 1988–2001. Киев: Наукова думка.
- Bear J. *Hydraulics of Groundwater*. 1979. McGraw-Hill. New York.

- Conflict and Environment Observatory (CEOBS), 2023. *Environmental Consequences of the Kakhovka Dam Destruction*.
- Diersch H.-J. G., 1998. *Interactive, graphics-based finite-element simulation system FEFLOW for modeling groundwater flow, contaminant mass, and heat transport processes: User's Manual, Version 4.9*. Berlin: WASY Ltd.
- Diersch H.-J. G., 1999. *A shock-capturing finite-element technique for unsaturated-saturated flow and transport problems*. Berlin: WASY Ltd.
- Diersch H.-J. G., 2014. *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Springer, Berlin Heidelberg.
- Diersch, H.-J. G., Kolditz O., 1998. *Coupled groundwater flow and transport: 2. Thermohaline and 3D convection systems*. *Advances in Water Resources*, 21 (5).
- Hughes T. J. R., Mallet M., 1986. *A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IV. A discontinuity-capturing operator for multidimensional advective-diffusive systems*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, #58, P. 329–336.
- Richards L. A., 1931. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. *Physics*. #1(5), P. 318–333.
- Segerlind L., 1979. *Application of the Finite Element Method*. Moscow: Mir. 392 p.
- UN Environment Programme (UNEP), 2023. *Rapid Environmental Assessment: Destruction of the Kakhovka Dam and Reservoir*. Nairobi: UNEP.
- UNITAR / UNOSAT, 2023. *Flood and Drying Dynamics after the Kakhovka Dam Collapse (Sentinel-1/2 Analysis)*. Geneva.
- Conflict and Environment Observatory (CEOBS). *Environmental Consequences of the Kakhovka Dam Destruction*. 2023.
- Diersch H.-J. G. *Interactive, graphics-based finite-element simulation system FEFLOW for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes: User's manual*. Version 4.9. 1998. Berlin: WASY Ltd.
- Diersch H.-J. G. *A shock-capturing finite-element technique for unsaturated-saturated flow and transport problems*. 1999. Berlin: WASY Ltd.
- Diersch H.-J. G. *FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. 2014. Berlin Heidelberg.
- Diersch H.-J. G., Kolditz O. *Coupled groundwater flow and transport: 2. Thermohaline and 3D convection systems*. 1998. *Advances in Water Resources*, 21 (5).
- Hughes T. J. R., Mallet M. *A new finite element formulation for computational fluid dynamics: IV. A discontinuity-capturing operator for multidimensional advective-diffusive systems*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1986. #58, P. 329–336.
- Richards L. A.. *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. 1931. *Physics*, # 1(5). P. 318–333.
- Segerlind L. *Применение метода конечных элементов*. 1979. Москва: Мир. 392 с.
- UN Environment Programme (UNEP). *Rapid Environmental Assessment: Destruction of the Kakhovka Dam and Reservoir*. 2023. Nairobi: UNEP.
- UNITAR / UNOSAT. *Flood and Drying Dynamics after the Kakhovka Dam Collapse (Sentinel-1/2 Analysis)*. 2023. Geneva.

Manuscript received October 2, 2025;
revision accepted November 28, 2025.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна