

Ю.О. Чорноморець¹

ORCID:0000-0002-9785-9019
ulia@uhmi.org.ua

І.М. Перевозчиков²

i.perevozchikov@meteo.gov.ua

А.В. Орещенко¹

ORCID:0000-0002-8363-6885
andrey_o@uhmi.org.ua

Л.М. Мала²

mala.liudmyla@gmail.com

УДК 556.048

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2023.04.051>

ВИЗНАЧЕННЯ СТОКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖЬОГО ДНІПРА З УРАХУВАННЯМ ПІДРИВУ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОЇ ГЕС

Повномасштабне вторгнення російської федерації значно вплинуло на кількість і якість води річок, що знаходяться у зоні бойових дій. Найбільш катастрофічними наслідками для гідрологічних систем супроводжувався підриг греблі Каховської ГЕС. Через тривалі активні військові дії, безпосередні вимірювання стоку в регіоні катастрофи неможливі. Тому у даному дослідженні стоківі характеристики Нижнього Дніпра у створі колишньої Каховської ГЕС за 2023 рік були обчислені з використанням розрахункових методів. У цій статті окремо розглядався стік без підриг Каховської ГЕС та реальний стік 2023 року. Час добігання стоку на ділянці між греблею Дніпровської ГЕС та греблею колишньої Каховської ГЕС обчислений через спільні щоденні спостереження за витратою води 1952 року на постах Дніпровська ГЕС та Берислав. Різниця між обчисленим нами реальним стоком 2023 року та приведеним стоком до умов без підриг греблі — це вода, яку не змогло утримати Каховське водосховище і яка мала б використовуватися для промислового і сільськогосподарського виробництва, водозабезпечення і водовідведення, нормального функціонування об'єктів природного заповідного фонду, туризму, водного транспорту і ще багато чого іншого. Всі ці втрати дуже важко оцінити, але фіксувати їх одно-значно потрібно.

Ключові слова: підриг Каховської ГЕС, річка Дніпро, середня річна витрата води, рівень води.

ВСТУП

Неспровокована агресія російської федерації впливає на кожен елемент навколишнього природного середовища України. В цьому дослідженні мова йтиме про річки, які, з одного боку, виступають об'єктами подібних впливів через зміну якісних та кількісних характеристик стоку, а з іншого — вони безпосередньо використовуються як інструмент агресії, коли такі випадки як руйнування гребель за кількістю жертв та масштабами наслідків можна прирівняти до уражень зброєю стратегічного рівня.

Саме тому дослідженню специфічної ролі водних ресурсів у військових діях приділяється значна увага і суспільства і відповідних експертів. Так, у роботі (Gleick, et al., 2023) навіть йдеться про створення онлайн бази даних з відкритим кодом, яка відстежує водні конфлікти в усьому світі.

Напередодні підриг греблі Каховської ГЕС, за даними мережі спостережень Українського гідрометеорологічного центру, рівень води у Каховському водосховищі (на 20 годину 5 червня) дорівнював 16,77 метрів у Балтійській системі висот (м БС), що на 0,77 м вище за нормальний підпірний рівень

водосховища (НПР). Наповнення водосховища до таких відміток було спричинене відсутністю роботи Каховської ГЕС. Вона перебувала в окупації (рис. 1) у період пропуску весняного водопілля 2023 року каскадом дніпровських водосховищ (квітень-червень). За супутниковими знімками можна простежити, що у декількох місцях водозливної греблі були пошкоджені щити водоскидів, через які самопливом пропускалась вода. Але кількість цієї води була дуже незначною, порівняно з об'ємом, який потрібний для пропускання хвилі водопілля вниз за течією Дніпра.

Для наочного представлення наслідків підриг нами оброблені спектросональні знімки території Каховського водосховища, надані Європейським космічним агентством (супутник Sentinel-2A), які потім були накладені на картографічну основу. Результати наведені у вигляді карт та космічних знімків короткохвильового інфрачервоного композитного спектру (Shortwaveinfrared (SWIR)) на рис. 1. Отримані таким чином зображення відображають площу водного дзеркала Каховського водосховища до та після підриг греблі Каховської ГЕС станом на 05.06.2023 та на 20.06.2023.

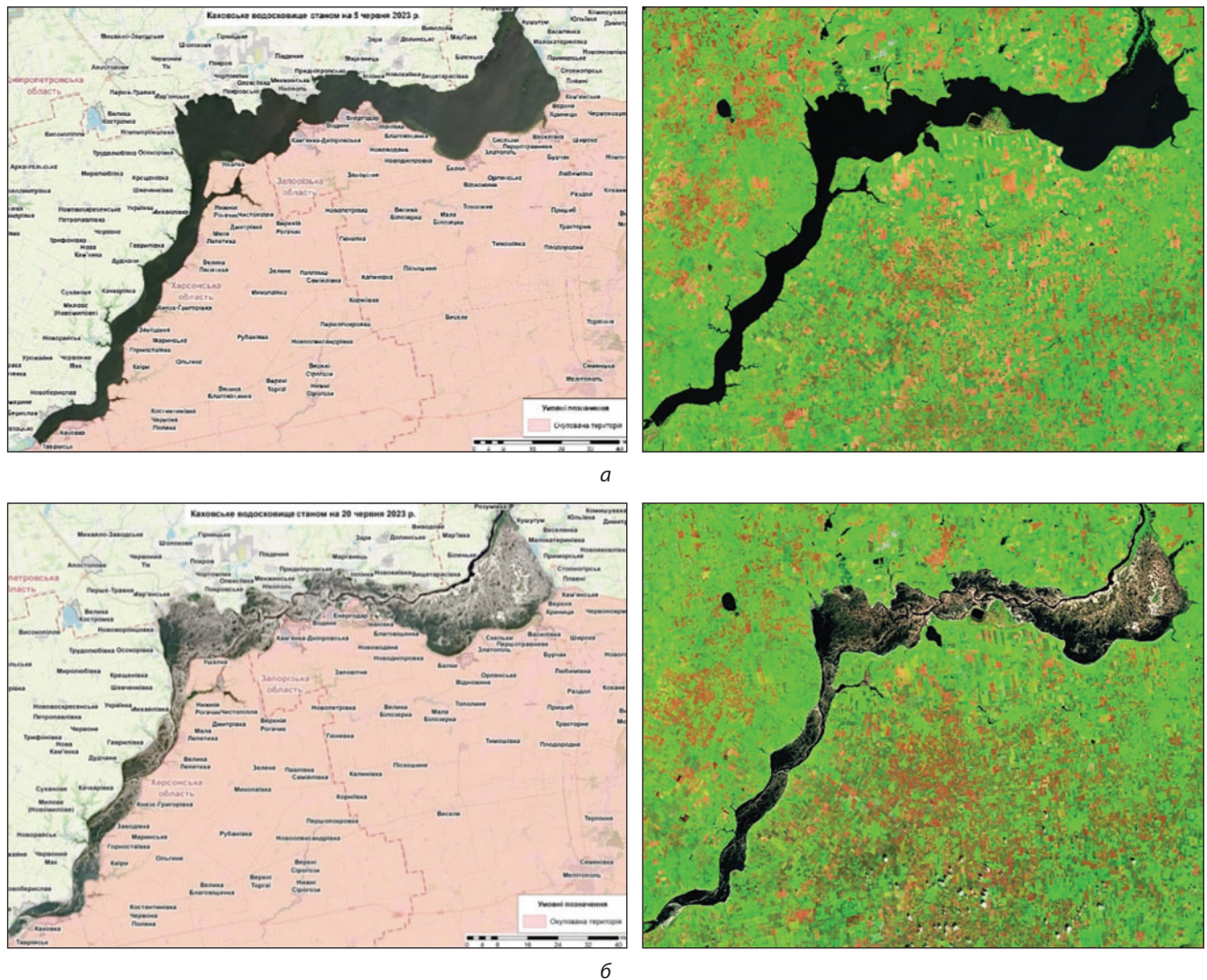


Рис. 1. Площа водного дзеркала Каховського водосховища станом на 05.06.2023 (а) та на 20.06.2023 (б). Межі окупованих територій наведені за даними DeepStateMap

Детальна характеристика наслідків підриву греблі Каховської ГЕС та впливу спричиненої ним катастрофи на екосистеми регіону наводяться робочою групою експертів ООН у звіті UNEP (United Nations Environment Programme, 2023).

На нашу думку, наслідки підриву умовно можна поділити на коротко-, середньо- та довготермінові. Короткотермінові наслідки зафіксовані безпосередньо після вибуху у вигляді двох взаємно протилежних процесів — затоплення нижнього б'єфу та зневоднення верхнього (рис.1) з одночасним (різним за генезисом і етимологією) забрудненням водної маси. До середньотермінових можна віднести формування специфічного гідрологічного режиму Дніпра нижче Запоріжжя, який зараз фактично повністю знаходиться під регулюючим впливом Дніпровської ГЕС. Зокрема, це зниження базисів ерозії, утворення тимчасових форм руслової або

навіть запlavної багаторукавності (залежно від того у якому вигляді стабілізується русло), поява нової екосистеми у структурі "нижній–середній–верхній" ярус рослинності всього руслозапlavного комплексу колишнього ложа Каховського водосховища, власне заплави та першої надзапlavної тераси (там де вона виражена) і т.п. Та врешті, довгострокові наслідки, які на даному етапі спрогнозувати досить важко, але надзвичайно важливо вже зараз формулювати стратегічне бачення ситуації що склалася. У майбутньому воно має забезпечити появу надзвичайно сучасного комплексу, фактично нової екосистеми Нижнього Дніпра з урахуванням природних, соціальних, промислових і навіть історичних запитів післявоєнної України.

Метою статті є встановлення стокових характеристик Нижнього Дніпра з урахуванням підриву греблі Каховської ГЕС.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В межах території дослідження детальна оцінка поточної гідрологічної ситуації, реагування на викиди та усунення негативних наслідків на сьогодні практично неможливі через активні військові дії, звіт UNEP (2023). Тому тут ми зосередилися на аналізі гідрологічного режиму Нижнього Дніпра за фактичними даними спостережень протягом попереднього періоду.

Вихідна інформація. Періоди спостережень за стоком води дуже неоднорідні: Дніпро–Київ 1881–1964 роки, тобто до початку наповнення Київського водосховища, Прип'ять–Прип'ять 1974–1986 роки, Прип'ять–зона ЧАЕС 1986–2023 роки; Дніпро–Неданчичі, Десна–Літки 1973–2023 роки; Київська ГЕС 1966–2023, Канівська ГЕС 1973–2023 роки, Кременчуцька ГЕС 1961–2023 роки, Середньодніпровська ГЕС 1964–2023 роки, Дніпровська ГЕС 1952–2023 роки, Каховська ГЕС 1956–2022 роки, тобто до початку окупації в період повномасштабного вторгнення російської федерації.

Після повноцінного відновлення роботи Дніпровської ГЕС (за наслідками обох підривів греблі) у 1952 році та до початку наповнення Каховського водосховища влітку 1955 року, гідрологічний режим Дніпра визначався дуже подібно до сьогоднішніх умов, тобто стік Нижнього Дніпра переважно регламентувався роботою Дніпровської ГЕС. Але при цьому доступних матеріалів спостережень того періоду опубліковано досить мало. Так, ми маємо щоденні спостереження за витратами води Дніпро-Берислав протягом 1952 року та за рівнями води на Дніпрі — Нікополь, Берислав і Каховка 1952–1954 роки — саме ці відомості і були покладені в основу оцінок сучасного стоку Дніпра нижче Запоріжжя через фактично повну відсутність результатів проведення інструментальних спостережень на даній території.

Як бачимо, подібна строкатість вихідних матеріалів унеможлиблює використання єдиного розрахункового періоду та обумовлює необхідність залучення диференційованого підходу до оцінювання водності Дніпра.

Методика дослідження. Оскільки безпосередні вимірювання характеристик стоку в районі Нижнього Дніпра неможливі, у даній роботі використані їх залежності за попередні роки.

Вивчення зв'язків між гідрологічними величинами традиційно здійснюється через визначення основних параметрів статистичного ряду та встановлення кореляційних залежностей між двома або більше змінними (Методичні вказівки до виконання робіт із дисципліни "Математичні методи в гідрометеорології", 2010).

Зокрема у гідрології, для відновлення стоку з використанням пунктів-аналогів (Пособие по определению основных гидрологических характеристик, 1984) у профільних нормативних документах (Определение расчетных гидрологических характеристик СниП 2.01.14-83., 1983) рекомендується наступним чином використовувати рівняння лінійної регресії:

$$Q = k_0 + k_1 Q_1, \quad (1)$$

де Q — витрата води у відновлювальному створі; Q_1 — витрати у пункті-аналозі; k_0 — вільний член. Коефіцієнти і вільний член визначаються за методом найменших квадратів

Для оцінки достовірності подібних залежностей із застосуванням парної або множинної регресії необхідним є дотримання наступних вимог (Определение расчетных гидрологических характеристик СниП 2.01.14-83., 1983):

$$n' \geq 10; |r| \geq 0,7; \frac{|r|}{\sigma_r} \geq 2; \frac{|k_1|}{\sigma_{k_1}} \geq 2, \quad (2)$$

де n' — кількість спільних років спостережень в основному створі та у пунктах-аналогах; r — множинний або парний коефіцієнт кореляції; k_1 — коефіцієнт регресії; σ_{k_1} — середня квадратична похибка коефіцієнта регресії.

Вимоги (2) вважаються необхідними і достатніми для оцінювання зв'язків гідрологічних характеристик з 95% ймовірністю, тому вони і визначають висновок про виконання/невиконання умов відповідності *табл. 1–2*.

Стандартна квадратична похибка коефіцієнта кореляції (Гидрологические и водно-балансовые расчеты. 1987) визначалася наступним чином:

- якщо кількість членів ряду більше 50:

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}; \quad (3)$$

- якщо кількість членів ряду від 25 до 50:

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (3)$$

Похибка коефіцієнта регресії визначається за формулою:

$$\sigma_{k_1} = \frac{\sigma_Q \sqrt{1-r^2}}{\sigma_{Q_1} \sqrt{n-2}}. \quad (4)$$

Формули (1–4) прийнятні для випадків, коли ряд спостережень має достатню кількість вимірних величин. За недостатньої кількості членів ряду коефіцієнт кореляції може виявитися випадковим.

Виходячи з поточної гідрологічної ситуації в даній роботі будуть розглянуті кількісні характеристики

ки середнього річного стоку Дніпра для двох різних сценаріїв:

- приведений до наявності греблі Каховської ГЕС (без підриву) стік Дніпра за 2023 рік;
- реальний стік Дніпра у створі колишньої Каховської ГЕС за 2023 рік.

РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Як зазначалося вище, вивчення стоку Дніпра значно ускладнюється через його зарегулювання каскадом водосховищ, тому і підходи до оцінювання гідрологічного режиму також мають відрізнятися від типових схем, що існують у класичній гідрології.

Відповідно до Правил експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду (Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду, 2022), кожне з них має наступний тип регулювання стоку:

- Київське — обмежене сезонне;
- Кременчуцьке, Каховське (до підриву греблі) — річне;
- Канівське, Кам'янське, Дніпровське — тижневе та добове.

Тобто багаторічне регулювання стоку на водосховищах Дніпровського каскаду не передбачене, а площа водозбору Дніпра у нижній течії настільки значна, що за рахунок подібної інерційності можна говорити про прийнятність використання середньої річної витрати або стоку води як основної інтегральної характеристики, що описує загальні зміни водності і певною мірою нівелює регулюючий вплив водосховищ (рис. 2, 3), частково за виключенням Кременчуцького, хоча і його теж.

Оскільки Київське водосховище має обмежене сезонне регулювання, а Канівське взагалі тижневе

та добове, ми бачимо настільки тісними є середні річні залежності, наведені на рис. 2.

Відомості, які ми залучали в дану роботу стосовно витрат води за період 2021–2023 років являються оперативними даними Українського гідрометеорологічного центру, тому до багаторічних графіків (рис. 2–4) вони не додавалися, а розглядалися окремо як вихідні дані для оцінювання стоку.

Відповідно до рис. 2, 3 можна послідовно простежити як зростає регулюючий вплив водосховищ по довжині каскаду на середню річну витрату води, порівняно з природним стоком Дніпра, визначеним через суму витрат Дніпро–Неданчичі, Прип'ять–зона ЧАЕС та Десна–Літки. Але разом з цим, навіть для Каховської ГЕС зв'язок залишається достовірним ($r=0,92$), що дає можливість орієнтовно, у першому наближенні, оцінювати значення середньої річної витрати води за даними про стік Верхнього Дніпра за даними про стік у створі Дніпровської ГЕС (рис. 4).

Якщо ж розглядати середні місячні залежності, то вони починають порушуватися вже з Кременчуцького водосховища, особливо для березня і квітня, що швидше за все пов'язане з наповненням водосховищ згідно Правил експлуатації (2022). При цьому у меженні сезони взаємообумовленість стоку по довжині Дніпра певною мірою зберігається.

Приведений до наявності греблі Каховської ГЕС (без підриву) середній річний стік Дніпра за 2023 рік. Для того щоб кількісно оцінити втрати води від руйнування греблі Каховського водосховища нами обчислена умовна середня річна витрата води, яка гіпотетично спостерігалася б 2023 року якби не відбулося підриву греблі.

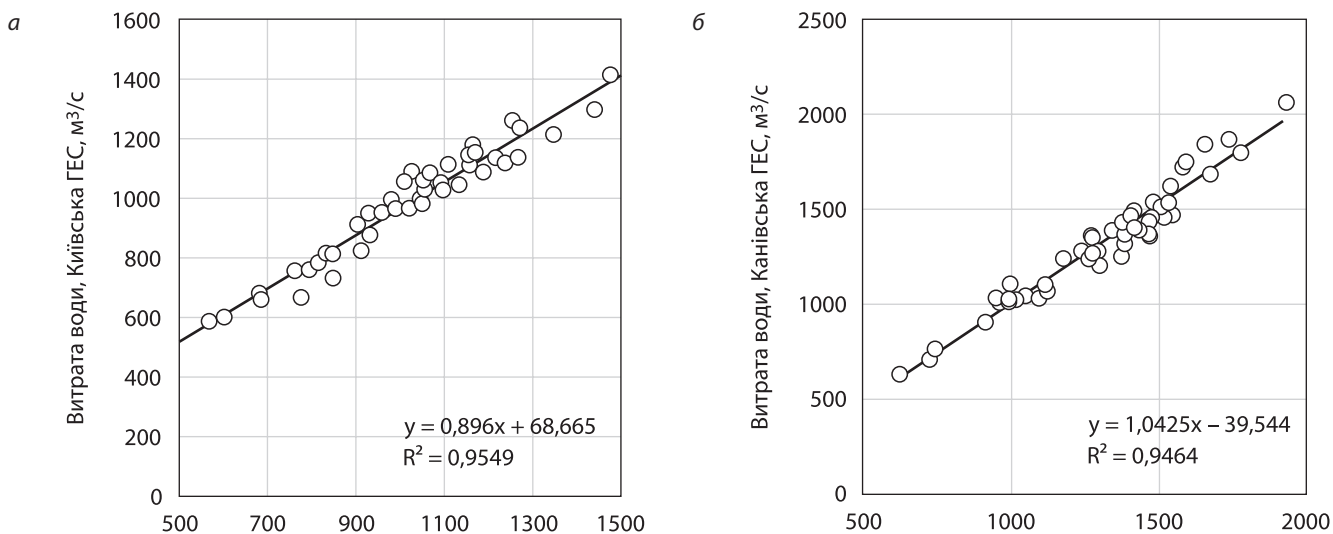


Рис. 2. Залежність середньої річної витрати води Дніпра у створі Київської ГЕС (а) та у створі Канівської ГЕС (б) від суми витрат Дніпро–Неданчичі, Прип'ять–зона ЧАЕС (а) та Десна–Літки (б) за 1973–2020 роки

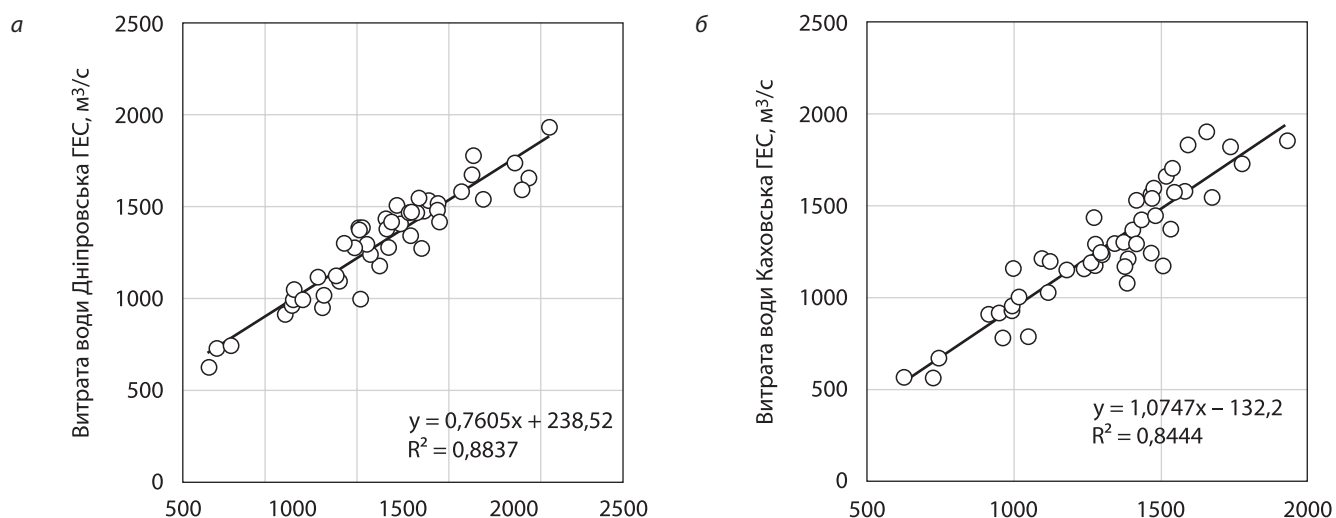


Рис. 3. Залежність середньої річної витрати води Дніпра у створі Дніпровської ГЕС (а) та Каховської ГЕС (б) від суми витрат Дніпро – Неданчичі, Прип’ять – зона відчуження та Десна – Літки за 1973–2020 роки

Оскільки існує досить тісний зв’язок ($r=0,97$) середньої річної витрати води Дніпровської і Каховської ГЕС (рис. 4) за спільний період спостережень тривалістю 65 років це дозволяє визначити орієнтовний стік 2023 року та порівняти його потім зі стоком, який сформувався за наявних умов.

За оперативними даними Українського гідрометеорологічного центру середня річна витрата води 2023 року у створі Дніпровської ГЕС становила

1760 м³/с. У табл. 1 наведені два різні підходи до визначення стоку середнього річного стоку річки Дніпро у створі Каховської ГЕС (без підриву) для того, щоб через використання спостережень на різних ділянках перевірити правильність отриманого результату.

Відповідно до базової залежності середнього річного стоку (рис. 4) Каховського і Дніпровського гідровузлів, витрата води у створі неіснуючої на

Таблиця 1. Визначення середньої річної витрати води річки Дніпро у створі Каховської ГЕС (без підриву) за 2023 рік та оцінка точності отриманих значень

Параметри	Пункти-аналоги (Q1) для визначення середнього річного стоку річки Дніпро у створі Каховської ГЕС(без підриву)	
	Дніпровська ГЕС (рис. 5, б)	Дніпро–Неданчичі , Прип’ять–зона відчуження, Десна–Літки (рис. 3, б)
Спільний період спостережень	1956–2020	1973–2020
Рівняння регресії	$Q = 0,95Q_1 - 52,4$	$Q = 1,07Q_1 - 132,2$
n'	65	48
$ r $	0,97	0,92
σ_Q	370	328
σ_{Q_1}	378	280
k_1	0,95	1,07
σ_r	0,0076	0,0227
σ_{k_1}	0,0094	0,068
$ r /\sigma_r$	127	40
$ k_1 /\sigma_{k_1}$	100	16
Виконання умов (2)	Виконуються	Виконуються
Витрата води 2023, м³/с	1620	1657
Похибка, \pm , м³/с	46 (Q ₁) / 47 (Q)	40 (Q ₁) / 47 (Q)

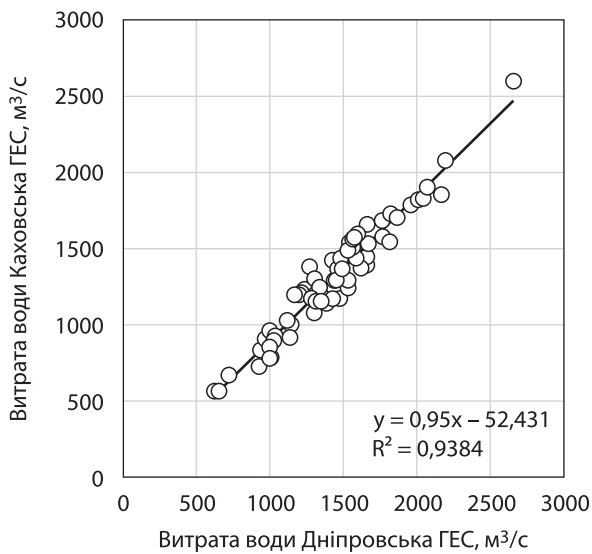


Рис. 4. Залежність середньої річної витрати води Дніпра у створах Каховської ГЕС та Дніпровської ГЕС за 1956–2020 роки

сьогодні Каховської ГЕС мала б становити 1620 м³/с. У свою чергу середня річна витрата, обчислена через сумарний стік Верхнього Дніпра становила б 1657 м³/с, різниця між ними (37 м³/с) знаходиться у межах допустимої похибки (± 47 м³/с), тому отримане нами значення середньої річної витрати води Каховської ГЕС (без підриву) можна вважати прийнятним.

Коли мова йде про наслідки підриву, критичними для природних і господарських систем є не стільки загальні річні втрати води, скільки середні

місячні і добові витрати в межах внутрішньорічного розподілу стоку. Тому подібно до рис. 4 за зв'язками середнього місячного стоку води кожного окремого місяця були відновлені умовні витрати води через греблю Каховського водосховища (рис. 5, а) за 2023 рік. Коефіцієнти кореляції місячних залежностей змінювалися від 0,78 у серпні, коли зазвичай максимально проявляється регулююча роль Каховського водосховища через спрацювання існуючих запасів, до 0,96 у травні, коли проходить попуск хвилі водопілля у нижній течії Дніпра.

Для порівняння 2023 року із середніми багаторічними значеннями наведено осереднену за спільний період спостережень схему внутрішньорічного розподілу стоку Дніпровської і Каховської ГЕС (рис. 5, б).

Загальною особливістю наведених на рис. 5 схем внутрішньорічного розподілу стоку є те, що за ними можна наочно простежити як саме Каховське водосховище затримувало воду весняного водопілля з подальшим її перерозподілом на посушливі місяці.

Майже всі існуючі методики обчислення базових параметрів гребель та утворених ними водосховищ, до яких відносяться втрати на додаткове випаровування та льодоутворення через збільшення площі водного дзеркала, фільтраційні втрати з ложа водосховища та через зміщення базисів ерозії прилеглих територій, втрати на живлення гідравлічно пов'язаних з річкою підземних вод і т.д., передбачають проведення розрахунків на стадії проектування з їх постійним уточненням під час будівництва

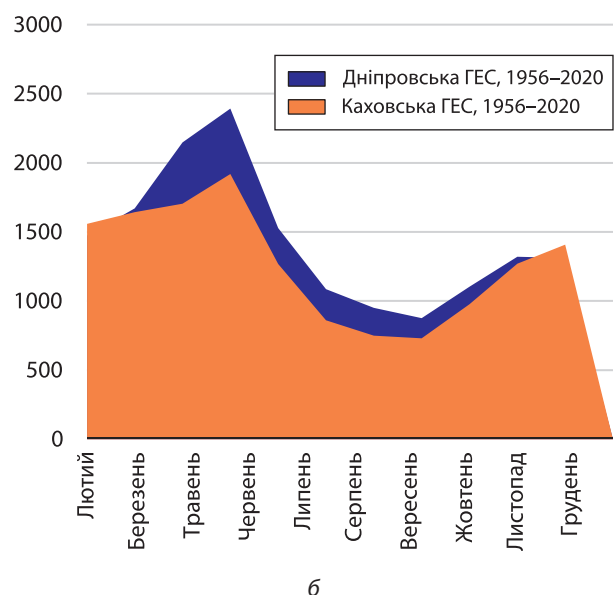
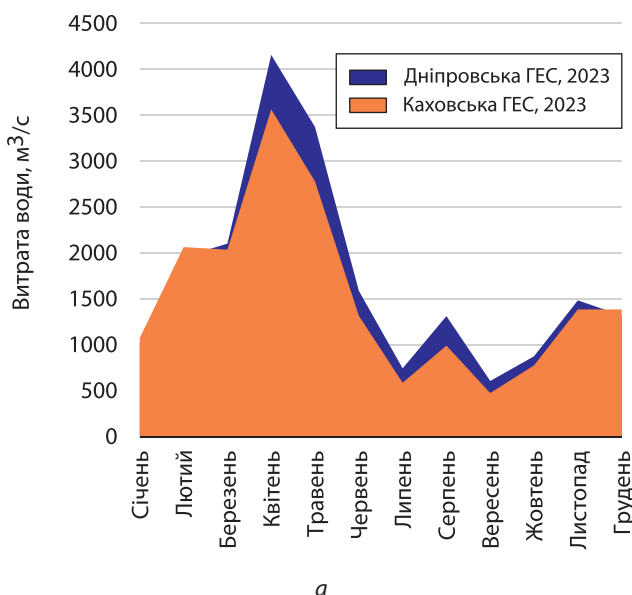


Рис. 5. Суміщені графіки реальних середніх місячних витрат води Дніпровської ГЕС і приведені витрати Каховської ГЕС 2023 року (а), а також реальних витрат Дніпровської і Каховської ГЕС (б) за період спільних спостережень 1956–2020 років

Таблиця 2. **Орієнтовні об'єми втрат і надходження води до річки Дніпро від греблі Дніпровського водосховища до греблі Каховського водосховища без підриву (відмітка НПР — 16,0 м БС) за період червень–грудень 2023 року (млн м³)**

	Місяці						
	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Скид Дніпровської ГЕС	4235	2054	3618	1622	2416	3958	3637
Сума опадів на дзеркало водосховища	56,4	96,8	106	12,4	53,8	256	95,7
Випарування з дзеркала водосховища (за формулою Іванова)	284	346	372	338	155	56,8	33,8
Фільтраційні втрати з водосховищ*	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8
Забір поверхневих вод (за даними 2021 р.)**	197	448	543	276	206	109	88
Орієнтовний об'єм води, який пройшов би через колишню Каховську ГЕС	3 780	1 326	2 778	990	2 078	4 017	3 580

* ДАВР (2020). ** ДАВР (2021).

та на початкових етапах функціонування гідровузлів.

Натомість у випадку греблі Каховської ГЕС після 6 червня 2023 року ми маємо унікальну можливість вирішувати обернену задачу, тобто оцінити сумарні природні і антропогенні втрати води із водосховища, яке зникло.

Для того щоб визначити як саме підрив греблі Каховської ГЕС змінив кількісні характеристики стоку Нижнього Дніпра нами обчислені окремі складові водогосподарського балансу, приведені до площі водного дзеркала, яка відповідала відмітці НПР — 16,0 м (табл. 2). Визначення об'ємів опадів та випарування відбувалося за результатами спостережень на метеорологічних станціях: Запоріжжя, Нікополь, Велика Олександрівка та Херсон. Випарування з водної поверхні обчислене за формулою Іванова.

Зазвичай протягом липня–вересня спостерігались максимальні показники забору води, особливо для потреб зрошувального землеробства та найбільші значення випарування з водної поверхні, а також, у цей час відмічається період літнього дефіциту опадів, що стало все більш характерним в останні роки (табл. 2).

У випадку теоретичного існування Каховського водосховища та при умові його повного наповнення (рівень НПР — 16,0 м БС) водність нижче Каховської ГЕС була б на 30–65% менше, аніж водність Дніпра біля м. Запоріжжя (фактично скид з Дніпровської ГЕС), схожа тенденція утримувалася б і протягом жовтня, але з дещо меншими абсолютними величинами, близько 16%. Проте у листопаді–грудні 2023 року було б імовірним збереження однакової вод-

ності у створах Дніпровської і Каховської ГЕС, що не в останню чергу пов'язано зі значними опадами (2–3 місячні норми), що спостерігались протягом листопада. Дощі, значне зменшення випарування з водного дзеркала у холодний період року, а також, зменшення забору води, могли досить-таки суттєво збільшити об'єм водосховища та ймовірно, що надлишковий обсяг (59 млн м³) пропускаявся б через Каховську ГЕС нижче у гирло Дніпра.

Таким чином, приведений до наявності греблі Каховської ГЕС (без підриву) середній річний стік Дніпра за 2023 рік становив 1620 м³/с, а його внутрішньорічний розподіл у загальних рисах відповідає би розподілу року підвищеної водності (рис. 5).

Наближений до реального стік Дніпра нижче греблі Дніпровської ГЕС за 2023 рік. Після підриву Каховської ГЕС, Дніпро в межах колишнього Каховського водосховища повернувся у своє старе русло, близьке до періоду перед початком його наповнення у липні 1955 року. Україна при цьому втратила близько 14,36 км³ води, що становить біля 35% його річного стоку. Перед атакою об'єм Каховського водосховища становив близько 19,86 км³. На сьогоднішній день залишкова ємність тієї частини водосховища, яка залишилася становить біля 5,5 км³.

Орієнтовні об'єми стоку води річки Дніпро у створі Каховської ГЕС (табл. 3) також оцінювалися через складові водогосподарського балансу у період з червня по грудень 2023 року, за рахунок чого їх можна порівняти з умовами гіпотетично існуючого водосховища.

Більш точні кількісні характеристики стоку на даний час визначити неможливо, оскільки на цій території продовжуються активні бойові дії. Пло-

Таблиця 3. **Орієнтовні об'єми втраті надходження води до річки Дніпро на ділянці від греблі Дніпровського водосховища до греблі Каховського водосховища після підриву за період червень–грудень 2023 року (млн м³)**

	Місяці						
	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Скид Дніпровської ГЕС	4235	2054	3618	1622	2416	3958	3637
Сума опадів на дзеркало водосховища	13,4	11,3	14	1,73	8,75	42,8	22,3
Випарування з дзеркала водосховища (за формулою Іванова)	67,4	40,6	49,2	47,2	25,2	9,49	7,85
Фільтраційні втрати з водосховищ*	10,6*	10,6*	10,6*	10,6*	10,6*	10,6*	10,6*
Забір поверхневих вод**	3,45	3,69	4,3	3,69	3,75	2,97	2,98
Орієнтовний об'єм води, який пройшов через колишню Каховську ГЕС	4167 додатково до стоку підриву 14360, разом 18527	2010	3568	1562	2385	3978	3638

* Обухів (2012) — мінімальні значення фільтраційних втрат Каховського водосховища за рік. ** ДАВР (2023).

ща водного дзеркала для кожного окремого місяця визначалася за результатами аналізу супутникових знімків на дату, максимально близьку до 15-го числа за прикладом розробленої нами карти для періоду з 09.06.2023 по 19.08.2023, наведеної на рис. 6.

На рис.6 за результатами виконання картометричного дослідження з використанням знімків території колишнього Каховського водосховища нами наводиться послідовність основних етапів його зневоднення. Карта була створена способом автоматизованого дешифрування космічних знімків, які поєднують ближній інфрачервоний, червоний і зелений діапазони (*False color composite*). Автоматизоване дешифрування полягало у використанні кількох десятків зразків ділянок, що точно відповідають або суходолу, або водній поверхні. За цими зразками програма автоматично здійснювала поділ території водосховища на полігони водної поверхні або суходолу. Після генералізації полігонів було підраховано їх сумарну площу і кількість.

Колишнє Каховське водосховище станом на 19.08.2023 складалося із понад 9 тисяч водойм загальною площею 490,3 км², площа залишкових водойм без урахування основного русла становила 352,2 км². Середня площа водойм при цьому залишалася незначною — близько 0,05 км². Багато водойм з'єднані з основним руслом тимчасовими водотоками. Площа основного русла Дніпра складала станом на 19.08.2023 біля 138,07 км² і вона продовжувала поступово, але вже більш повільно знижуватися, орієнтовно до кінця серпня.

Відповідно до табл. 3 протягом липня–жовтня відмічалась різниця у від'ємних значеннях (що можна вважати відсотком забору води на потреби економіки), тоді як значні дощі протягом листопада, зумовили збільшення водності на 20 млн м³, а протягом грудня відмічається тенденція однакової водності у створах Дніпровської і колишньої Каховської ГЕС. У багаторічному розрізі, близько 10% місячного об'єму скинутої води Дніпровською ГЕС забиравось на водогосподарські потреби (водопостачання населення, економіки, сільськогосподарські потреби тощо) та “не доходило” до створу Каховської ГЕС. Саме цей дефіцит водних ресурсів у майбутньому може мати критичне значення та спричинити кризові явища для водопостачання економіки півдня України.

Оскільки в регіоні дослідження досі тривають бойові дії, час добігання та розпластування гідрографу ми можемо оцінити виключно за методом аналогії. Для цього розглянемо результати інструментальних спостережень за рівнями і витратами води у період до початку наповнення Каховського водосховища влітку 1955 року. Гідрологічний режим Дніпра того часу тут визначався дуже подібно до сьогоденних умов, тобто стік Нижнього Дніпра переважно регламентувався роботою Дніпровської ГЕС. Тому на нашу думку, цілком прийнятним є використання у якості аналога — відомостей про рівні і витрати води 1952–1954 років. У відповідних “Гідрологічних щорічниках” опубліковані лише спостереження за витратами води на посту Берислав 1952 року.

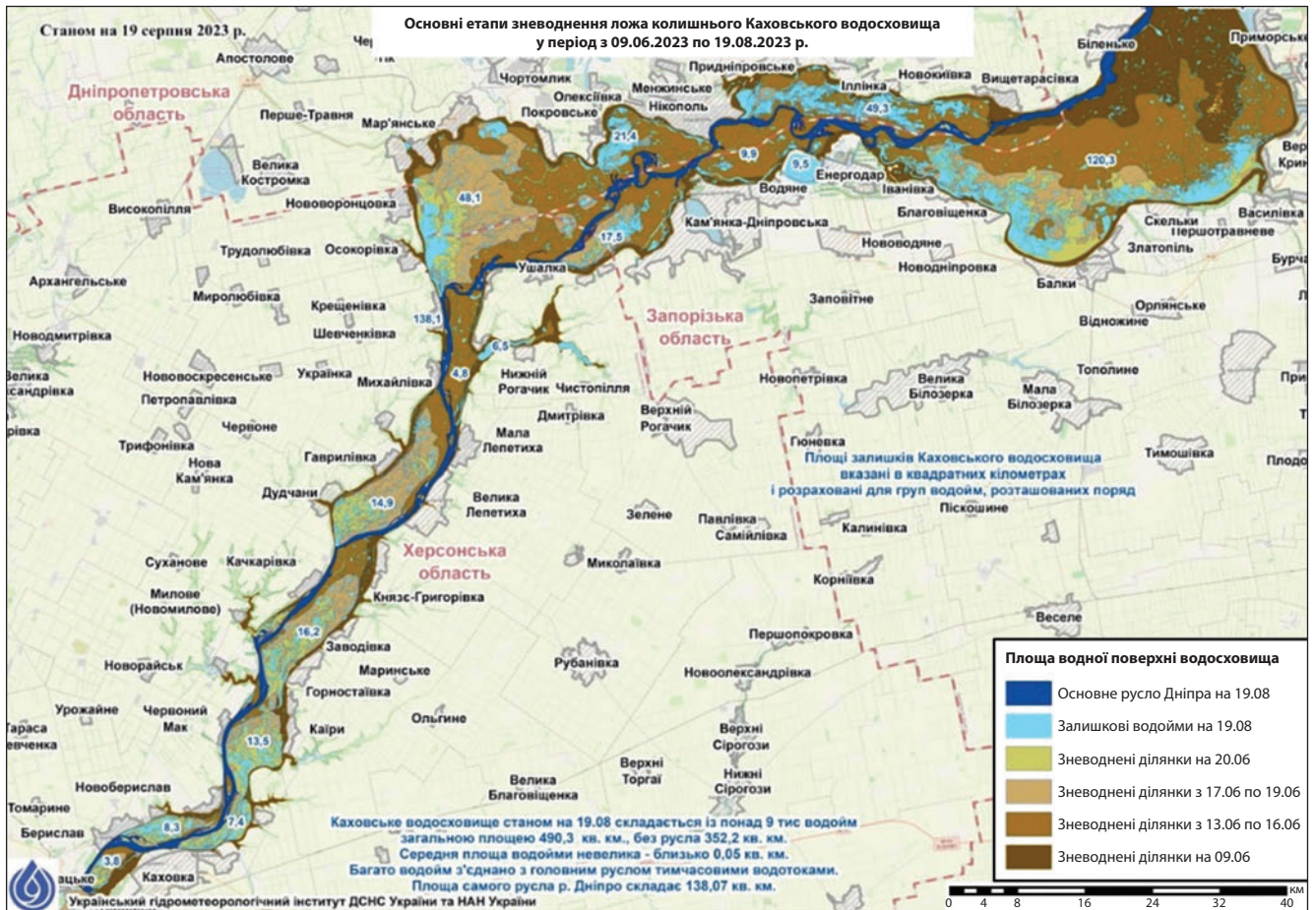


Рис. 6. Основні етапи зневоднення ложа колишнього Каховського водосховища у період з 09.06.2023 по 19.08.2023 р.

Відстань від Берислава до Каховки по водній поверхні існуючого на сьогодні русла Дніпра становить біля 10 км і ця ділянка майже повністю безприточна, тому подібне зміщення жодним чином не здатне змінити величину середньої річної витрати води Дніпра на даному відрізку русла, завдяки чому можна сказати, що визначення витрати у створі колишньої Каховської ГЕС відповідає залежності витрати води Берислав-Дніпровська ГЕС.

Для того щоб обчислити час добігання стоку на цій ділянці був проведений взаємний кореляційний аналіз (рис. 7) щоденних витрат води у відповідних створах та встановлено, що він становить $t=6$ днів. Цю характеристику варто враховувати при складанні гідрологічних прогнозів та інших розрахунків, пов'язаних із трансформацією стоку від Дніпровської ГЕС до колишньої Каховської ГЕС.

Величина витратного приведення на ділянці Дніпровська ГЕС – Каховська ГЕС за даними 1952 року становить 1,02. Звідси — наближений до реального стік у створі Каховської ГЕС 2023 року становив порядку $1795 \text{ м}^3/\text{с}$.

Отриманий таким чином середній річний стік ($1795 \text{ м}^3/\text{с}$) — це той стік, який сформувався у 2023

році та надійшов через греблю Дніпровської ГЕС, проте руйнування греблі було настільки значним, що рівень води опустився нижче мертвого об'єму (РМО) і навіть нижче рівня гранично-допустимого спрацювання (РГС). У такому випадку, щоб отримати релевантну витрату 2023 року потрібно збільшити цей стік на додаткову величину, яка залишалася "законсервованою" з попередніх років нижче рівня мертвого об'єму і була вилучена лише після підриву греблі.

За попередніми розрахунками спеціалістів Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій загальні втрати за наслідками підриву становили $14,36 \text{ км}^3$ води. На цьому етапі ми повинні визначити яка частина цієї води знаходилася нижче рівня мертвого об'єму (РМО). Для цього використаємо відомості, наведені у Правилах експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду (Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду. 2022) стосовно об'єму води між НПР та РМО, який на час існування водосховища становив $6,8 \text{ км}^3$. Також нами був обчислений об'єм води над площиною НПР на 5 червня 2023 року, який становив $1,67 \text{ км}^3$. Тоді різни-

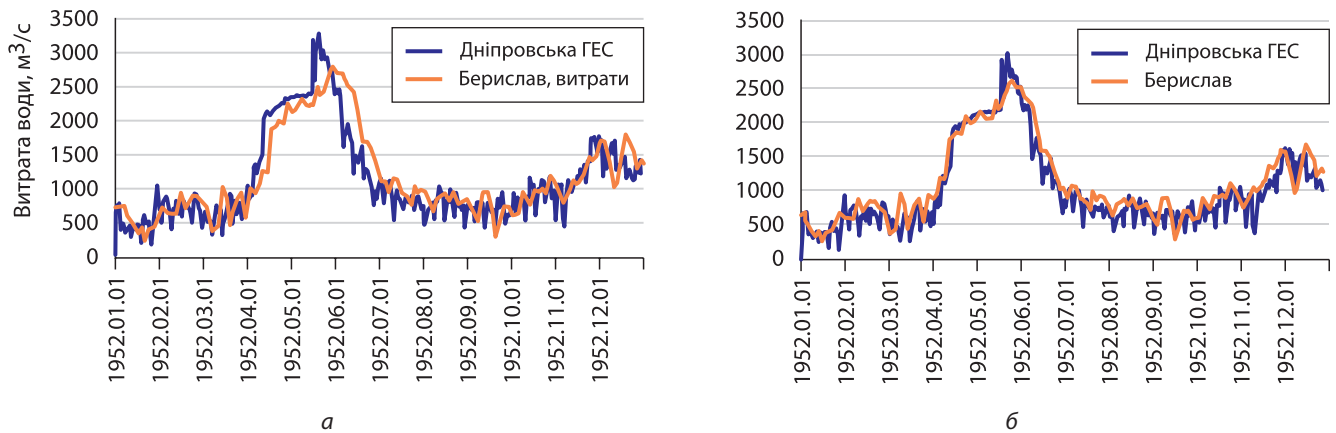


Рис. 7. Середні добові витрати води (м³/сек) Дніпро – Берислав 1952 рік (а) — календарний графік; (б) — графік з урахуванням часу добігання ($\tau = 6$ днів)

ця між загальними втратами та сумою об'ємів між НПР та РМО, а також вище НПР і буде запасом води нижче РМО. Ця різниця становить 5,89 км³, що відповідає витраті 187 м³/с. Відповідно, остаточна середня річна витрата води у створі колишньої Каховської ГЕС за 2023 рік відповідно до наших розрахунків становила 1982 м³/с. Таким чином стік у створі колишньої Каховської ГЕС у 2023 році на 9,4% складався зі стоку мертвого об'єму і все решта — стік власне 2023 року.

ВИСНОВКИ

Відповідно до наших розрахунків, середня річна витрата води у створі колишньої Каховської ГЕС за

2023 рік становила близько 1982 м³/с. За умов, якби російські окупанти не підірвали греблю, середня річна витрата 2023 року наближалася б до 1620 м³/с і різниця між цими двома величинами (за винятком різниці між втратами на випаровування із водного дзеркала та опадами на його поверхню, а також втрат на фільтрацію в ложе водосховища) використовувалася б для промислового і сільськогосподарського виробництва, водозабезпечення і водовідведення, нормального функціонування об'єктів природного заповідного фонду, туризму, водного транспорту і ще багато чого іншого. Всі ці втрати дуже важко оцінити, але фіксувати їх однозначно потрібно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гидрологические и водно-балансовые расчеты. (1987). Под ред. Н.Г. Галущенко. Київ: Вища школа.
2. ДАВР (2020). Водогосподарський баланс для Суббасейну Нижнього Дніпра району басейну річки Дніпро. Отримано з <https://davr.gov.ua/fls18/dnipro.pdf>
3. ДАВР (2023). Використання води на різні потреби. Отримано з <https://e-services.davr.gov.ua/parlor/p-report-genn-advanced/generate?type=5&year=2023>
4. Методичні вказівки до виконання робіт із дисципліни "Математичні методи в гідрометеорології". (2010). Упорядник О.І. Лук'янець. Київ: ВПЦ "Київський університет".
5. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 27.05.2022 № 210. (2022). Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду. Отримано з https://zakononline.com.ua/documents/show/508275_698017#n14.
6. Обухов Є.В. (2012) Каховському водосховищу — 55 років. *Український гідрометеорологічний журнал*, **10**, 116–125.
7. Определение расчетных гидрологических характеристик СНИП 2.01.14-83. (1983). М.: Гос. комитет СССР по делам строительства.
8. Пособие по определению основных гидрологических характеристик. (1984). Ленинград: Гидрометеоиздат.
9. Deep State Map. Отримано з <https://deepstatemap.live/?info=true#8/46.288/30.987>
10. Gleick, P. H., & Shimabuku, M. (2023). Water-related conflicts: definitions, data, and trends from the water conflict chronology. *Environmental Research Letters*, **18**(3), 034022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbb8f>
11. United Nations Environment Programme. (2023). Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach; Ukraine, 2023. Nairobi, Kenya. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43696>

REFERENCES

1. DAWR. (2020). Water balance for the Lower Dnipro Subbasin area of the Dnipro River Basin. Retrieved from <https://davr.gov.ua/fls18/dnipro.pdf>.
2. DAWR. (2023). Use of water for different needs. Retrieved from <https://e-services.davr.gov.ua/parlor/p-report-genn-advanced/generate?type=5&year=2023>.
3. Deep State Map. Отримано з <https://deepstatemap.live/?info=true#8/46.288/30.987>.

4. Determination of Calculated Hydrological Characteristics according to SNiP 2.01.14-83. (1983). Moscow: State Committee of the USSR for Construction Affairs. [in Russian].
5. Gleick, P. H., & Shimabuku, M. (2023). Water-related conflicts: definitions, data, and trends from the water conflict chronology. *Environmental Research Letters*, **18** (3), 034022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbb8f>.
6. Guidebook for Determining Key Hydrological Characteristics. (1984). Leningrad: Hydrometeoizdat. [in Russian].
7. Guidelines for performing tasks in the discipline "Mathematical Methods in Hydrometeorology". (2010). Compiled by O.I. Lukyanets. Kyiv: VPC "Kyiv University". [in Ukrainian].
8. Hydrological and Water Balance Calculations. (1987). Ed. by N.G. Halushchenko. Kyiv: VyshaShkola. [in Russian].
9. Obukhov E. V. (2012) Kakhov Reservoir — 55 years. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, **10**, 116–125. [in Ukrainian].
10. Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated May 27, 2022, No. 210. (2022). Rules for the operation of the Dnipro Cascade reservoirs. Retrieved from https://zakononline.com.ua/documents/show/508275__698017#n14.
11. United Nations Environment Programme. (2023). Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach; Ukraine, 2023. Nairobi, Kenya. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43696>.

Yuliia Chornomorets¹

ORCID: 0000-0002-9785-9019

ulia@uhmi.org.ua

Illia Perevozchikov²

i.perevozchikov@meteo.gov.ua

Andrii Oreshchenko¹

ORCID: 0000-0002-8363-6885

andrey_o@uhmi.org.ua

Liudmyla Mala²

mala.liudmyla@gmail.com

¹ Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine

² Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine

DETERMINATION OF FLOW CHARACTERISTICS OF THE LOWER DNIPRO TAKING INTO ACCOUNT THE EXPLOSION OF KAKHOVKA HPP

The full-scale invasion by the Russian Federation has significantly impacted the quantity and quality of water in the rivers located within the conflict zone. The explosion at the Kakhovka HPP was accompanied by the most catastrophic consequences for hydrological systems. Due to ongoing active military op-

erations in the region of the disaster, direct measurements of water flow there are impossible. Therefore, in this study, the average year discharge of the Dnipro River for the year 2023 was calculated using computational methods. Therefore, the paper separately examined the flow of the Dnipro River for flow without Kakhovka HPP Explosion; and the actual flow in 2023. The lag time of the flow in the section between the Dnipro HPP and the Kakhovka HPP was determined through joint daily observations of water discharge in 1952 at the Dnipro HPP and Beryslav stations. Changes in the inside-year distribution of runoff were determined by comparing the actual average monthly water discharges of the Dnipro HPP with the normalized monthly discharge values of the Kakhovka HPP for the year 2023. An automated method for decoding satellite images was also used in the study to create a map showing the main stages of the desiccation of the former Kakhovka reservoir bed. Using automated satellite image interpretation, we created a map showing the main stages of dewatering of the bed of the former Kakhovka Reservoir. The difference between our calculated real flow in 2023 and the flow brought to conditions without dam blowing is water, that the Kakhovka Reservoir failed to retain could have been used for industrial and agricultural production, water supply and sewage, the normal functioning of nature reserves, tourism, water transport, and much more. All of these losses are very difficult to assess, but they definitely need to be recorded.

Keywords: Kakhovka HPP Explosion, Dnipro River, average year discharge, height of the water surface.

