

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/376751619>

Impact of the destruction of the Kakhovka reservoir on the water resources of Southern Ukraine [ukr.]/Вплив руйнування Каховського водосховища на водні ресурси Півдня України

Article · December 2023

DOI: 10.17721/1728-2721.2023.86

CITATIONS

0

READS

8

6 authors, including:



Snizhko Sergiy

National Taras Shevchenko University of Kyiv

113 PUBLICATIONS 461 CITATIONS

SEE PROFILE



Sergii Zapototskyi

National Taras Shevchenko University of Kyiv

7 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

SEE PROFILE



Olga Shevchenko

Taras Shevchenko National University of Kyiv

70 PUBLICATIONS 207 CITATIONS

SEE PROFILE



Iulii Didovets

Potsdam Institute for Climate Impact Research

31 PUBLICATIONS 299 CITATIONS

SEE PROFILE

BULLETIN

of Taras Shevchenko National University of Kyiv

ISSN 1728-2721 (Print), ISSN 2521-1935 (Online)

GEOGRAPHY

1/2(86/87)/2023

Foundation year 1958 roky

UDC 910; 911; 193

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2023.86>

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2023.87>

In this bulletin the actual problems of theory and practice of natural geography, public geography and cartography are lighted up.

For scientists, professors, PhD students and students.

RESPONSIBLE EDITOR	Zapototskyi Serhiy, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine)
EDITORIAL BOARD	Bednar Pavel, PhD (Geogr.) (Czech Republic); Gerasimenko Natalia, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Datsenko Liudmyla, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Karacsonyi David, PhD (Geogr.) (Australia); Koroma Nataliia, PhD (Geogr.) (executive editor) (Ukraine); Madleňák Tibor, PhD (natural) (Slovakia); Mezentsev Kostyantyn, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Obodovskiy Oleksandr, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Reimann Mart, PhD (Geogr.) (Estonia); Savchuk Ivan, PhD (Geogr.) (Ukraine); Samoilenko Victor, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Sarmiento João, PhD (Geogr.), Assoc. Prof. (Portugal); Smekalova Lenka, PhD (Geogr.) (Czech Republic); Snizhko Serhii, DSc (Geogr.), Prof. (Ukraine); Suwan-achariya Chinnasak, Assoc. Prof. (Thailand); Shevchenko Olga, DSc (Geogr.), Assoc. Prof. (chief editor) (Ukraine)
Address	the Faculty of Geography 2, Glushkov ave., Kyiv, 03022 ☎ (38044) 521 32 70 e-mail: geovisnyk.knu@gmail.com web: http://visnyk-geo.univ.kiev.ua
Approved by	the Academic Council of the Faculty of Geography 30.06.23 (protocol № 13)
Registered by	the Ministry of Justice of Ukraine Certificate of state registration KB № 23967-13807 ПП dated 11.05.19
Certified by	the Ministry of Education and Science of Ukraine (category B) Order № 409 dated 17.03.20
Indexing	Cross-Ref Database, Index Copernicus International, Google Scholar
Founder, publishing and printing centre	Taras Shevchenko National University of Kyiv Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University" Certificate of entry into the State Register ДК № 1103 dated 31.10.02
Address of centre	PPC "Kyiv University" 14, Taras Shevchenka blvd., Kyiv, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpc@knu.ua

CONTENTS

ISSUE 1(86)

I. THEORETICAL AND METHODOLOGICAL INVESTIGATION

SNIZHKO Sergiy, ZAPOTOTSKYI Sergii, SHEVCHENKO Olga, OLEXIENKO Inna, DIDOVETS Iulii, BRONSTERT Axel Impact of the destruction of the Kakhovka reservoir on the water resources of Southern Ukraine [ukr.].....	7
---	---

II. SOCIO-GEOGRAPHIC INVESTIGATION

KHREBTISHCHEVA Olha, GNATIUK Oleksiy Regeneration of a small monofunctional city (a case of Zhovti Vody) [engl.].....	17
ZAPOTOTSKA Victoria, HOLUB Yulia historical and geographical basis of transformations of the planning structure of Chernihiv [engl.]	26

III. GEOGRAPHY OF RECREATION AND TOURISM

SMYRNOV Ihor, LUBITSEVA Olha Cossack baroque in the sacred architecture of Kyiv's Podil: geotourist potential [ukr.].....	33
KOLLEHAIEV Mykhailo Resource aspects of sports tourism development in Ukraine in the post-war period [ukr.]	42

CONTENTS

ISSUE 2(87)

IV . NATURAL-GEOGRAPHIC INVESTIGATION

- SHEVCHENKO Olga, YATSENKO Yuliia, KRYVOBOK Diana, SNIZHKO Sergiy**
The impact of heat waves on the level of air pollution in Kyiv [engl.] 48
- GLUHOTA Vitaly, SHEVCHUK Serhii**
Investigation of water bloom in Kamyanske reservoir using gis
and remote sensing methods [ukr.]..... 56

V . CARTOGRAPHIC INVESTIGATION

- POMORTSEVA Olena, KOBZAN Sergiy, GAMAYUN Inna**
Design of military geoinformation systems. Problems and their solutions [engl.]..... 60

VI. YOUNG SCIENTISTS

- NAHORNYI Tymofiy**
Toponymic decolonizing in city of Kyiv: a spatial wayfinding approach [engl.]..... 65

I. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

UDC 556.16+556.55

DOI: 10.17721/1728-2721.2023.86.1

Сергій СНИЖКО¹, д-р геогр. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-2696-687X
Scopus ID: 57224880799
e-mail: snizhko@knu.ua

Сергій ЗАПОТОЦЬКИЙ¹, д-р геогр. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-3515-4187
Scopus ID: 57197796087
e-mail: zapototsk@knu.ua

Ольга ШЕВЧЕНКО¹, д-р геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-3915-427X
Scopus ID: 55801127100
e-mail: shevchenko_olga@knu.ua

Інна ОЛЕКСІЄНКО¹, канд. геогр. наук
ORCID ID: 0000-0003-3766-9763
e-mail: olexienkoinna@gmail.com

Юлій ДІДОВЕЦЬ², канд. геогр. наук
ORCID ID: 0000-0003-1169-6165
Scopus ID: 57193579843
e-mail: didovets@pik-potsdam.de

Аксель БРОНСТЕРТ³, д-р наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-6369-8536
Scopus ID: 7003498594
e-mail: axel.bronstert@uni-potsdam.de

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Потсдамський інститут дослідження впливу клімату (PIK), Потсдам, Німеччина

³Потсдамський університет, Потсдам, Німеччина

ВПЛИВ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА ВОДНІ РЕСУРСИ ПІВДНЯ УКРАЇНИ

Вступ. Знищення російськими окупантами греблі Каховської ГЕС призвело до випорожнення найбільшого в Україні Каховського водосховища, яке забезпечувало до 40 % водогосподарських потреб Півдня України. Метою дослідження є оцінка доступності водних ресурсів Півдня України в умовах зміни клімату та наслідків військових дій (руйнування російською армією Каховського водосховища).

Методи. Методологія розвідки базується на дослідженні водного балансу Нижнього Дніпра з урахуванням впливу зміни клімату на водні ресурси регіону на основі гідрологічного моделювання стоку та сучасних кліматичних проєкцій за двома кліматичними сценаріями.

Результати. Унаслідок виконаних досліджень отримано оцінку доступності водних ресурсів на Півдні України для відновлення водної інфраструктури після руйнування водосховища. Установлено, що після втрати водосховища величина прибуткової частини балансу, яка регулюється надходженням води із Дніпровського водосховища, не зміниться. Проте кількість води (2,8–4,2 км³ на рік), яка витрачалася на випаровування з поверхні водосховища та на фільтрацію через греблю ГЕС, буде збережена і стане доступною для використання. Ще одним джерелом поповнення доступних для використання водних ресурсів є коригування об'ємів екологічного стоку до Нижнього Дніпра в зимові місяці шляхом наближення їх значень до природних величин (до моменту побудови ГЕС).

У той самий час згідно з отриманими результатами оцінки впливу клімату на водний стік Дніпра у створі Каховської ГЕС у більшості місяців року за обома сценаріями (RCP 2.6 та RCP 8.5) спостерігатиметься зменшення стоку внаслідок зміни клімату. Кліматичний чинник може помітно погіршувати водогосподарську ситуацію в гідрологічному році середньої водності із 50 % забезпеченістю стоку – у вересні, у маловодні роки – 75 % та 95 % забезпеченості стоку – з липня до листопада. Найбільший сумарний дефіцит водних ресурсів за рахунок кліматичного й водогосподарського чинника може сформуватися у маловодні роки у вересні й досягти величини 0,8 км³.

Висновки. Виконані дослідження стосовно оцінювання доступності водних ресурсів на Півдні України після руйнування Каховського водосховища дозволили встановити, що під впливом подальшої зміни клімату й відновлення використання наявних водних ресурсів р. Дніпро можливе формування дефіциту водних ресурсів у літньо-осінній період, особливо в маловодні роки. Однак використання переваг штучного регулювання стоку Дніпра, упровадження сучасних маловодних технологій як у промисловості, так і в аграрному секторі, дозволять забезпечити потреби водного сектору Півдня України без відновлення Каховського водосховища.

Ключові слова: водні ресурси, вода як зброя, водність, вплив клімату.

Вступ

6 червня 2023 р. російські окупанти підірвали греблю Каховської ГЕС, вчинивши злочин, який підпадає під Женевську конвенцію і вважається злочином перед людяністю. На думку OSINT-дослідників InformNapalm

(The occupiers ..., 2023), за своїми екологічними й економічними наслідками руйнування Каховської ГЕС для України можна прирівняти до наслідків використання тактичної ядерної зброї 5–10 кілотонн. Руйнування греблі Каховської ГЕС призвело до випорожнення Каховського

водосховища, найбільшого в Україні, і до втрати майже 10 % її водних ресурсів.

Знищення водної інфраструктури регіону призвело до зупинки сотень малих і великих підприємств, десятки великих міст залишилися без водопостачання, потужна хвиля паводка зруйнувала населені пункти, погіршила санітарно-гігієнічні умови проживання населення, викликала екологічну катастрофу, спричинило значний потік біженців. Росіяни використовували воду як зброю для знищення України. Цю ситуацію можна назвати **екологічним геноцидом населення України**.

Результати розвідки фахівців Інституту водних проблем та меліорації НААН (*Romashchenko et al., 2018*) свідчать, що Україна нерівномірно забезпечена водними ресурсами: від 0,14 км³/рік у Херсонській обл. до 7,92 км³/рік – у Закарпатській. За даними (*Romashchenko et al., 2020*) забезпеченість місцевими водними ресурсами по окремих областях України різниться майже в 60 разів. Доступні для використання запаси поверхневих вод дуже нерівномірно розподілені по території країни. Більше половини водних ресурсів зосереджено в басейні р. Дунай, де потреба у воді не перевищує 5 %.

Кількісні характеристики водних ресурсів України, які отримані різними авторами в різний час і за різними методами розрахунку, є доволі суперечливими і в кожному окремому випадку потребують пояснення. Найактуальнішою та достовірною інформацією про водні ресурси України є дослідження В. К. Хільчевського (*Khilchevskiy, 2021*), виконане ним на основі глобальної інформаційної системи "Aquistat" (*FAO Aquastat ... , 2023*), яка належить Продовольчій та сільськогосподарській організації ООН. Згідно з цими розрахунками загальні відновні водні ресурси України становлять 175,3 км³ на рік, із яких 97 % формується за рахунок поверхневого річкового стоку і лише 3 % (5 км³) – за рахунок підземних вод.

Саме тому, що підземні води, а також води озер, боліт і льодовиків використовуються порівняно мало і всі вони в процесі кругообігу води пов'язані з водами річок, під водними ресурсами великих територій і країн розуміють лише величину середньорічного стоку річок (*Khilchevskiy et al., 2008*). Відповідно до цих розрахунків, річковий внутрішній стік з території країни становить 50,1 км³, а зовнішній, із територій сусідніх країн (Румунії, Молдови, Угорщини, Польщі, Республіки Білорусь, Російської Федерації) – 120,2 км³ на рік (36,1 км³ із Росії та Білорусії і 84,1 км³ – із Румунії (50 % стоку Дунаю через Кілійське гирло). Частина стоку з території України теж надходить до сусідніх країн (у Польщу, Словаччину, Угорщину, Румунію, Молдову).

Залежність водних ресурсів України від надходження водного стоку з території сусідніх держав, нерівномірність розподілу місцевих водних ресурсів та їхня доступність для використання через кількісні та якісні характеристики значно обмежують розвиток галузей економіки, які залежать від наявності водних ресурсів. До того ж, водній безпеці в Україні загрожують ризики, пов'язані зі зміною клімату, зокрема посухи та повені, які призводять до значних збитків для економіки (*National Report on the State ... , 2021*).

Результати дослідження клімату в Україні показують (*Pillai et al., 2021*), що з кінця 1990-х років середньорічна температура повітря була стабільно вищою, ніж у період з 1961 до 1990. Із 2007 вона перевищувала норму на 1,5 °С. Останнє десятиліття, особливо після 2015, було найтеплішим в Україні. В окремі роки підвищення середньорічної температури повітря перевищувало 2,0 °С (2,2 °С у 2007 р., 2,3 °С – у 2015, 2,7 °С – у

2019 р.). Підвищення мінімальної добової температури характерне найбільше в холодну пору року, а максимальної – влітку. Такі зміни сприяли зменшенню тривалості холодної пори року, кількості морозних днів і суворості зим. Цей фактор сильно впливає на зміну гідрологічного режиму, сезонність паводків і формує тенденцію до зниження величини паводків у часі за останні 30 років (*Snizhko et al., 2022; 2023*).

Весняні паводки на сьогодні, як правило, відбуваються раніше, ніж у минулому, і з меншою частотою, що пов'язано з більш теплими зимами, більш ранніми періодами відлиги та меншими значеннями глибини снігового покриву. З іншого боку, потепління збільшило частоту повеней восени та взимку, особливо в гірських водозбірних басейнах. Аналіз трендів показує, що протягом досліджуваного періоду (1960–2015) більшість українських річок (85,7 % гідрологічних станцій) демонструють тенденції до зменшення амплітуди паводків, а близько 40 % мають тенденції до значного зменшення. Зростання частоти та амплітуди паводків виявлено тільки на деяких гірських річках України (*Snizhko et al., 2022; 2023*).

Для часткового подолання існуючої в Україні проблеми доступності водних ресурсів було створено понад 1160 водосховищ загальним об'ємом близько 55,0 км³. Отже, 32 % водних ресурсів країни акумульовано у водосховищах для їхнього подальшого використання та транспортування в регіони з дефіцитом водних ресурсів.

Найбільша кількість водосховищ України (45,5 %) зосереджена в басейні р. Дніпра, яка від державного кордону з Республікою Білорусь до Нової Каховки перетворена на каскад водосховищ загальним об'ємом 43,71 км³ із загальною площею водного дзеркала 6888 км². З одного боку, акумуляція води у штучних водоймах дозволила створити потужний аграрно-промисловий комплекс на Півдні України, забезпечити водою Донбас і Крим. Через систему каналів і водогонів щороку перенаправляється з водосховищ Дніпра до 15 км³ води (*Romashchenko et al., 2020*). З іншого боку, перетворення Дніпра зі швидкоплинної річки на каскад водосховищ із застійним гідрологічним режимом створило багато екологічних проблем (*Khvesyuk, 2013*), вирішення яких у перспективі вимагатиме значних фінансових інвестицій.

Крім того, в умовах глобального потепління клімату створення мілководних, у переважній більшості, водосховищ призвело до значних утрат водних ресурсів через випаровування. Проведені розрахунки свідчать, що внаслідок підвищення сумарного випаровування територія України щороку втрачає на 20–25 км³ водних ресурсів більше, ніж у період 1961–1990 рр. (*Romashchenko et al., 2020*).

Найбільшим водосховищем Дніпровського каскаду було Каховське, яке утримувало 18,2 км³ води, включаючи 6,78 км³ корисного об'єму. Саме з цього водосховища в Україні відбирається до 40 % води від загальних потреб по Україні на господарське використання (*Vyshnevskiy et al., 2011*).

Мета та завдання дослідження. Метою розвідки є оцінка доступності водних ресурсів Півдня України в умовах зміни клімату та наслідків військових дій (руйнування російською армією Каховського водосховища).

Завдання дослідження:

- оцінка параметрів водного балансу Каховського водосховища в роки різної водності;
- оцінка параметрів водного балансу р. Дніпро у створі Каховської ГЕС після руйнування Каховського водосховища;

- оцінка впливу кліматичного чинника на водний стік р. Дніпро у найближчому й віддаленому майбутньому на основі гідрологічної моделі GAP-2 та різних кліматичних сценаріїв;

- оцінка доступності водних ресурсів для господарських потреб з урахуванням руйнування Каховського водосховища внаслідок військових дій, зміни клімату й забезпечення екологічного стоку Дніпра в Чорне море.

Методи

Методологія дослідження базується на зборі й аналізі інформації про водні ресурси, кліматичні ризики та вплив військової агресії Росії на водні ресурси України з відкритих джерел, включаючи вітчизняні й зарубіжні бази даних.

У розвідках використано базу даних GRDC (*Global Run off ...*, 2023) і, частково, дані Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, дані Світового банку про стан водних ресурсів (*The World Bank ...*, 2023), дані Державного кадастру України про використання водних ресурсів (*General indicators ...*, 2023), інформаційно-аналітичні дані щорічних звітів державних установ про стан і використання водних ресурсів в Україні.

Виконано авторські дослідження впливу зміни клімату на водні ресурси та зроблено оцінювання наслідків руйнування Каховського водосховища для водного господарства півдня України. Для оцінки майбутніх змін водного стоку Дніпра у створі Каховської ГЕС було використано гідрологічну модель Water GAP 2 (*Didovets et al.*, 2020). У процесі оцінювання придатності різних моделей до застосування для території України було встановлено, що найкраще для симуляції стоку підходить модель Water GAP 2, яка містить п'ять модулів водокористування (зрошення, комунальне господарство, промисловість, тваринництво, охолодження ТЕС) і додатковий модуль GWSWUSE, який дозволяє розрахувати відбір підземних і поверхневих вод. На основі проведеного аналізу для оцінки впливу зміни клімату на річковий стік було обрано Water GAP 2.

Для гідрологічного моделювання було використано кліматичні проєкції (середні добові значення температури, опадів і сонячної радіації) із проєкту "Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project" (*ISIMIP ...*,

2023), які були отримані з використанням глобальних моделей HadGEM2-ES, MIROC5, IPSL-CM5A-LR and GFDL-ESM2M, відкориговані на основі даних реаналізу EWEMBI. Використовувалось два сценарії репрезентативних траєкторій концентрацій парникових газів (RCP): "м'який" RCP 2.6, який, відповідно до Паризької угоди, передбачає зменшення викидів парникових газів і повернення до радіаційного впливу 2,6 Вт/м² до 2100 р., "жорсткий" RCP 8.5, що не враховує жодних заходів із адаптації чи пом'якшення клімату. Отже, загалом було розглянуто вісім кліматичних сценаріїв, включаючи чотири кліматичні моделі, керовані двома RCP.

Результати

Добре відомо (*Schillinger et al.*, 2020; *Gleick*, 1993), що під час активних військових дій водна інфраструктура пошкоджується та руйнується, якість води погіршується, вода часто стає недоступною. Російсько-українську війну вже вважають "екологічною катастрофою" (*Davidson et al.*, 2022), вода використовується російськими окупантами як зброя (*Shumilova et al.*, 2023).

З кожним днем війни проблеми з водою в Україні загострюються. Приміром, 6 червня 2023 р. російсько-окупаційні війська підірвали та зруйнували дамбу Каховського водосховища. Унаслідок цього рівень води у водосховищі почав знижуватися зі швидкістю 15 см на годину. Уже наступного дня, 7 червня 2023 р., у створі гідрологічного поста Нікополь (вище зруйнованої дамби) рівень води опустився до 2,2 м. Того самого дня рівень води нижче зруйнованої дамби на гідрологічному посту Херсон піднявся на 5 м над позначкою "0" водного посту (рис. 1). Максимальна втрата води з водосховища зафіксована в момент прориву дамби 6 червня і суттєво не знижувалася протягом першої половини дня 7 червня. 11 червня на Каховському водосховищі через різке зниження рівня води припинили вимірювання всі вимірювальні прилади. Обсяг Каховського водосховища 11 червня зменшився на 72 %. Утрати води досягли 14 395 км³ (*Dynamics of water level ...*, 2023), а рівень води у водосховищі в районі Нікополя знизився до 9,04 м.

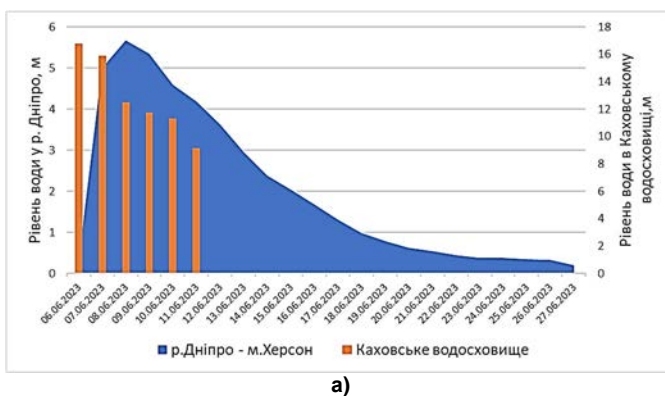


Рис. 1:

- а) зниження рівня води в Каховському водосховищі (гідрологічний пост Нікополь) і формування висоти паводкової хвилі нижче дамби Каховської ГЕС (р. Дніпро – гідрологічний пост Херсон) після руйнування дамби о 2:50 за місцевим часом (23:50 GMT) 6 червня 2023 р. Рівень води зазначено в метрах над "0" гідрологічного посту (за оперативними даними Укргідроенерго й Укргідрометцентру);
- б) підтоплення прибережних територій, житлових, промислових і господарських об'єктів у м. Херсоні (фото: Mind, 2023)

8 червня рівень води в Каховському водосховищі (гідрологічний пост Нікополь) порівняно з рівнем, що був 5 червня, знизився на 4,18 м і становив 12,59 м (абсолютна позначка згідно з Балтійською системою висот).

Об'єм водосховища за цей час зменшився майже у 2 рази (на 8,5 км³). Рівень води впав нижче критичних значень водозаборів (12,7 м). Припинилося водопостачання міст Запорізького району Запорізької області,

Енергодару (Запорізька АЕС), Нікополя, Марганця, Криворізького району Дніпропетровської області, Бериславського, Каховського районів Херсонської обл., м. Мелітополь тощо. 8 червня на гідрологічному посту р. Дніпро – м. Херсон (нижче дамби) о 3:00 хвиля паводка досягла максимального рівня з позначкою 5,68 м, після чого почався повільний спад води (рис. 1, а). На території Бериславського, Каховського, Херсонського та Скадовського районів Херсонської області відбулося підтоплення прибережних територій, житлових, промислових і господарських об'єктів у м. Херсоні та прирічкових населених пунктах (рис. 1, б).

Зона підтоплення охопила 80 населених пунктів у Херсонській і Миколаївській областях, при цьому Каховське водосховище було майже повністю випорожене. Згідно з повідомленням Херсонської обласної військової адміністрації (*The official Telegram ...*, 2023), 8 червня було підтоплено 600 квадратних кілометрів території Херсонської області, із них 32 % – правобережжя та 68 % – лівобережжя. За розрахунками Українського гідрометеорологічного інституту на основі супутникових знімків станом на 11 червня в Херсонській області було підтоплено 309 км² території (*The analysis ...*, 2023). Станом на 11 червня підтопленими залишалися 32 населених пункти (3821 будинок) на правому березі Дніпра та 14 – на окупованій росіянами території на лівому березі Дніпра.

Руйнування Каховської ГЕС має серйозні негативні наслідки не лише для водного господарства України, а й для інших галузей економіки й соціальної сфери. Адже воно використовувалося для зрошення, гідроенергетики, рибальства, водного транспорту. Середні багаторічні складові витратної частини водного балансу Каховського водосховища за 1956–2015 рр. мали такі показники: витрата через турбіни ГЕС – 82,6 %, через водоскид – 3 %, через шлюз – 0,6 %, на зрошення – 6,3 %, на водопостачання – 1 %, на фільтрацію та випаровування – відповідно 2,7 % та 3,8 %. Вода з Каховського водосховища використовувалася для водопостачання 31 польової зрошувальної системи в Дніпропетровській, Херсонській і Запорізькій областях загальною площею 584 тис. га. За інформацією Мінагрополітики України на даний момент 94 % зрошувальних систем у Херсонській області, 74 % – у Запорізькій, 30 % – у Дніпропетровській області із загальною площею близько 200 тис. га залишилися без води (*In the right-bank of ...*, 2023). Така серйозна втрата сільськогосподарських угідь може спричинити "найбільшу світову продовольчу кризу з часів Другої світової війни" (*War in Ukraine ...*, 2022).

Знищення водосховища спричинить багато економічних, екологічних і соціальних проблем у регіоні. Окрім того, що зрошення стане неможливим у Херсонській і Запорізькій областях, Криму, також припиниться робота каналу Дніпро – Кривий Ріг, а отже, і Криворізької ТЕС. Значні ризики виникають для роботи Запорізької ТЕС і Запорізької АЕС, найпотужнішої в Європі. За попередніми даними Укргідроенерго, відновлення роботи ГЕС обійдеться приблизно в 1 млрд євро.

За попередніми оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (Мінприроди), екологічна шкода, завдана екосистемам водосховища й низьзя Дніпра, оцінюється у понад 55 млрд грн. У Мінприроди 17 червня 2023 року заявили, що через теракт Росії на Каховській ГЕС такі національні парки, як "Великий Луг" і "Кам'янська Січ" поступово перетворюються на пустелю. Держекоінспекція вже підрахувала орієнтовні

збитки, які завдані цим територіям. Вони колосальні. Для національного парку "Великий Луг" понад 15 млрд грн, для парку "Кам'янська Січ" – понад 73 млрд грн. Прогнозується, що площа опустелювання збільшиться в НПП "Великий Луг" на 7 тис. га, у парку "Кам'янська Січ" – на 5,5 тис. га (*Strilets*, 2023).

Проте втрати через надходження забруднювальних речовин у Чорне море поки що не враховані. Відомо, наприклад, що внаслідок руйнування ГЕС у воду потрапило до 600 т трансформаторного масла (хлоровані біфеніли), надзвичайно токсичної та стійкої у навколишньому середовищі речовини, яка викликає тривалу в часі токсичну й канцерогенну дію на живі організми.

Також існує ризик перенесення радіонуклідів із донних відкладень Каховського водосховища, які накопичувалися там протягом кількох десятиліть після вибуху на Чорнобильській АЕС, унаслідок їхньої міграції через каскад дніпровських водосховищ (*Sanada et al.*, 2022; *Matsunaga et al.*, 2004; *Sansone et al.*, 1996).

Оцінити майбутній стан якості води Дніпра над дамбою Каховського водосховища важко, оскільки воно служило резервуаром для скидів стічних вод. Якщо скиди стічних вод не припиняться, то дніпровська вода, яка буде надходити із Дніпровського водосховища після додаткового забруднення на русловій ділянці в районі колишнього Каховського водосховища, може стати непридатною для використання і серйозною загрозою для екосистеми Нижнього Дніпра.

Для отримання відповіді щодо наявності доступних водних ресурсів, які будуть потрібні для відновлення водної інфраструктури півдня України після руйнування водосховища, було вивчено структури двох типів водних балансів Каховського водосховища: 1) розрахунковий водний баланс, розроблений Державним агентством водних ресурсів України (*Water management ...*, 2019) для років з різною водністю – середнього (50 % забезпеченості стоку) і маловодних (75 і 95 % забезпеченості); 2) фактичний баланс, побудований на основі виміряних гідрологічних параметрів стоку й показників водокористування за період 2011–2020 рр. (*Vyshnevskiy and Kutsyi*, 2022).

Витратна частина фактичного балансу така: 84 % водного стоку – це скиди через турбіни електростанції (у т. ч. для забезпечення екологічного стоку), близько 6 % – випаровування з поверхні водосховища, 5,5 % – витрати на зрошення, 3,3 % – відбір води для забезпечення населених пунктів, Запорізької АЕС та ТЕС, 2,9 % – втрати води шляхом фільтрації через греблю ГЕС.

У розрахунковому балансі сумарна складова витратних статей балансу для років різної забезпеченості водного стоку (50,75 та 95 %) виглядає таким чином (рис. 2). У рік середньої водності максимальне споживання води не перевищує 50–60 % від прибуткової частини балансу, у маловодний рік 75 % забезпеченості споживання води зростає в окремі місяці до 70–80 %, у маловодний рік 95 % забезпеченості у лютому, вересні та грудні споживання досягає 80–90 %. Слід пояснити, що у витратну частину балансу включено такі статті, як відбір води з водосховища, перекидання частини стоку за межі водогосподарської ділянки, витрати на випаровування та фільтрацію з водосховища, а також мінімальний екологічний стік, який у лютому та грудні, напередодні чергової весняної повені, є доволі значним. Тобто, за умов діючого водосховища, водних ресурсів вистачає на всі необхідні водогосподарські потреби й екологічний стік незалежно від водності гідрологічного року.

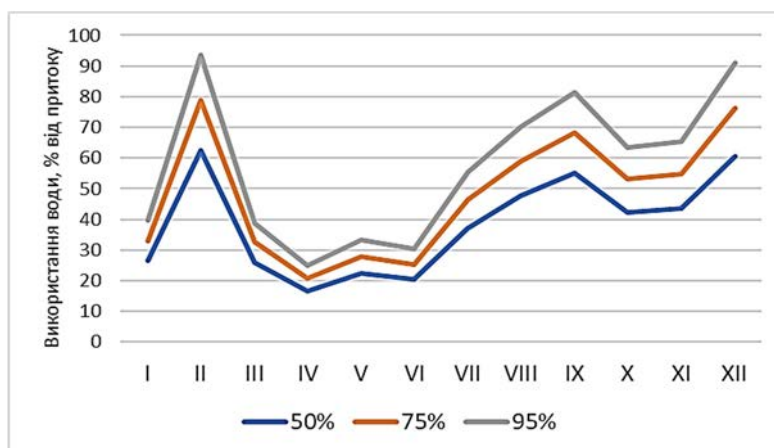


Рис. 2. Витратна частина розрахункового балансу Каховського водосховища для гідрологічних років з різною забезпеченістю водного стоку (50,75 та 95 %) у відсотках від прибуткової частини балансу

Зрозуміло, що після втрати водосховища величина прибуткової частини балансу, яка регулюється надходженням води із Дніпровського водосховища, не зміниться. Але кількість води, яка витрачалася раніше на випаровування й фільтрацію (близько 10 % від надходження щороку), буде збережена у прибутковій частині балансу та стане доступною для використання. Це становить 4,2 км³ води для середнього за водністю гідрологічного року (50 % забезпеченості), 3,4 км³ – для маловодного року із 75 % забезпеченості, 2,8 км³ – для маловодного року 95 % забезпеченості.

Цілком зрозуміло, що і величини мінімального екологічного стоку в грудні та лютому суттєво скоротяться. Розрахунки з використанням даних багаторічних гідрологічних спостережень показують, що до побудови водосховища об'єм водного стоку р. Дніпро у створі Каховської ГЕС становив у середньому за багаторічний період у грудні 2,09 км³, а в лютому – 1,81 км³. Після побудови водосховища були встановлені незалежно від водності року дещо вищі обсяги мінімального екологічного стоку

(відповідно 2,2 км³ для грудня і 2,25 км³ – для лютого). Очевидно, що після руйнування водосховища відбудеться коригування цих об'ємів і наближення їхніх значень до природних величин, що дозволить збільшити резерв водних ресурсів для господарського використання.

Якщо порівняти щомісячні розрахункові обсяги надходження води (*Water management ...*, 2019) у водосховище в роки середньої водності та у маловодні роки (50, 75 і 95 % забезпечення стоку) з її витратою на різні потреби (теж розрахункові величини, які дещо відрізняються від фактичних), не включаючи величину мінімального екологічного стоку, то виявиться, що найбільше водогосподарське навантаження на водосховище можливе в період вегетації (із травня до жовтня). У гідрологічному році із середньою водністю частка забраної води на водопостачання та зрошення досягає максимального значення в серпні – вересні та становить лише 7,74 % від надходження. У маловодні роки 75 і 95% забезпеченості стоку ця частка зростає відповідно до 9,64 і 11,46 % (рис. 3).

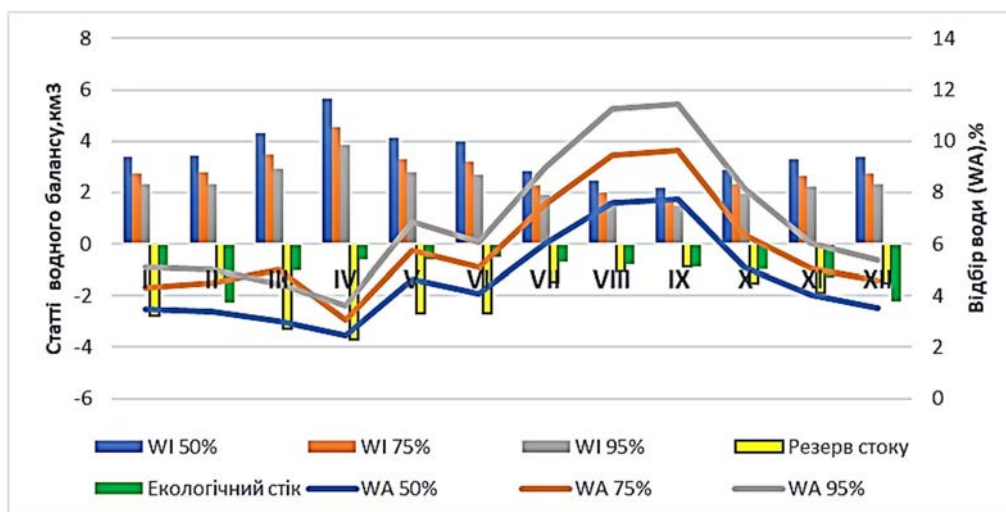


Рис. 3. Комплексний графік внутрішньорічної динаміки прибуткових (+) і витратних статей (-) водного балансу Каховського водосховища у роки з водністю різної забезпеченості: WI 50 %, WI 75 %, WI 95 % – прибуткова частина балансу в роки різної водності; WA 50%, WA 75 %, WA 95 % – відбір води на господарські потреби без урахування екологічного стоку у відсотках від прибуткової частини. Екологічний стік і резерв річкового стоку показаний у витратній частині зі знаком (-)

Ураховуючи можливе збільшення прибуткової частини балансу р. Дніпро у створі колишньої Каховської ГЕС щонайменше на 10 % унаслідок значного зменшення випаровування із площі колишнього водосховища та втрати води на фільтрацію, можна припустити, що кількість води буде достатньою для забезпечення існуючих потреб. Однак для остаточного висновку варто врахувати і роль кліматичного чинника.

Проекції водного стоку р. Дніпро у створі Каховської ГЕС, отримані нами для двох розрахункових періодів

2041–2070 рр. і 2071–2099 рр. з використанням моделі Water GAP2 для RCP 2.6 і RCP 8.5 (Didovets et al., 2020), указують на суттєву зміну внутрішньорічного розподілу водного стоку в майбутньому (рис. 4). У більшості місяців року за обома сценаріями спостерігатиметься зменшення стоку. Мінімальне зниження стоку очікується взимку та навесні: від 1 до 12 %. А відповідно RCP 2,6 у кінці століття він може навіть незначно збільшитися. Найбільше зниження стоку очікується за всіма сценаріями та в усі розрахункові часові періоди у травні – від 10,9 до 24, %.

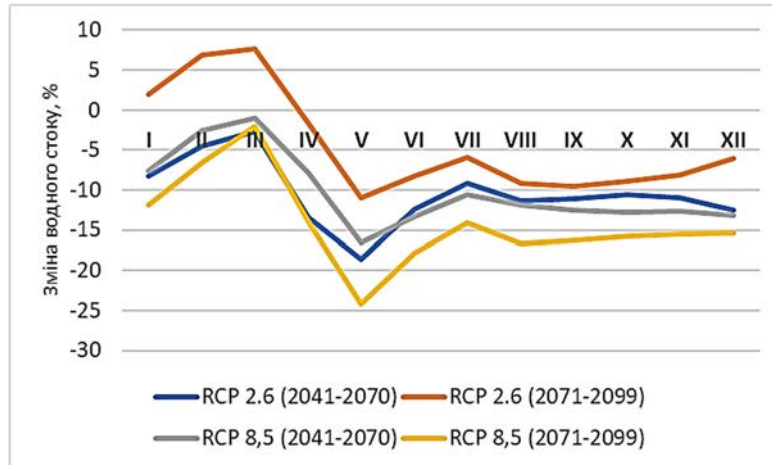


Рис. 4. Відхилення (%) проєкцій середньомісячних багаторічних витрат води р. Дніпро у створі Каховської ГЕС у двох майбутніх періодах (2041–2070 і 2071–2099) за сценаріями RCP 2.6 і RCP 8.5 від фактичних середніх місячних витрат води за багаторічний період гідрологічних спостережень

Ураховуючи отримані проєктні оцінки зміни стоку було розраховано орієнтовні можливі абсолютні втрати щомісячних об'ємів стоку р. Дніпро під впливом клімату у двох

майбутніх періодах (2041–2070 рр. і 2071–2099 рр.) за сценаріями RCP 2.6 і RCP 8.5 у середній за водністю рік (Q 50 %) та у маловодні роки (Q 75 %, Q 95 %) (рис. 5).

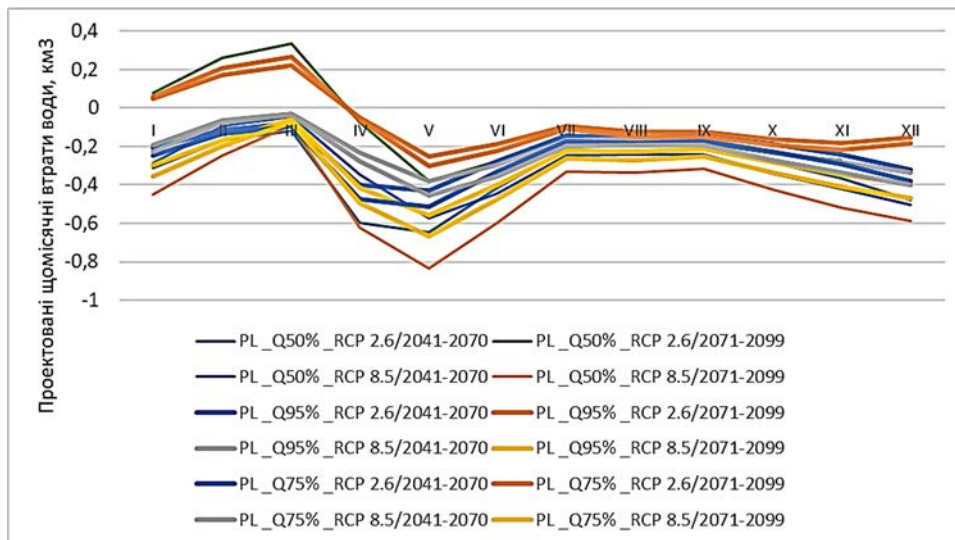


Рис. 5. Кількісна оцінка абсолютних прогнозованих місячних утрат води (PL, км³) р. Дніпро у створі Каховської ГЕС унаслідок зміни клімату відповідно до двох сценаріїв зміни концентрацій парникових газів RCP 2.6 і RCP 8.5 у період найближчої (2041–2070) та віддаленої перспективи (2071–2099)

На підставі цих розрахунків можна стверджувати, що критичного зниження стоку, яке б перевищувало 10–15 % від середньої багаторічної норми для більшості місяців року, за більшістю сценаріїв не передбачається. Лише у травні можливе зменшення об'єму стоку на 16–24 % (рис. 5), що становитиме 0,5–0,8 км³ води в інші

місяці ці втрати мінімальні й перебувають у межах 0,2–0,4 км³. Зазначимо, що травень є початком вегетаційного періоду в сільськогосподарському секторі. Потреба у воді для поливу в цьому місяці зазвичай вища, ніж у попередні. Однак порівняння можливих утрат води від зміни клімату з резервом стоку, який залишиться після

скидання необхідного мінімального екологічного стоку в Нижній Дніпро (рис. 6) засвідчує, що в травні існує доволі великий резерв стоку в р. Дніпро, який зможе нівелювати можливий вплив кліматичного чинника на водний стік.

Кліматичний чинник може помітно погіршувати водогосподарську ситуацію лише у такі місяці різних за водністю років:

- у році середньої водності 50 % забезпеченості стоку – у вересні;

- у маловодному році 75 % забезпеченості стоку – з липня до листопада;
- у маловодному році 95 % забезпеченості стоку – з липня до листопада.

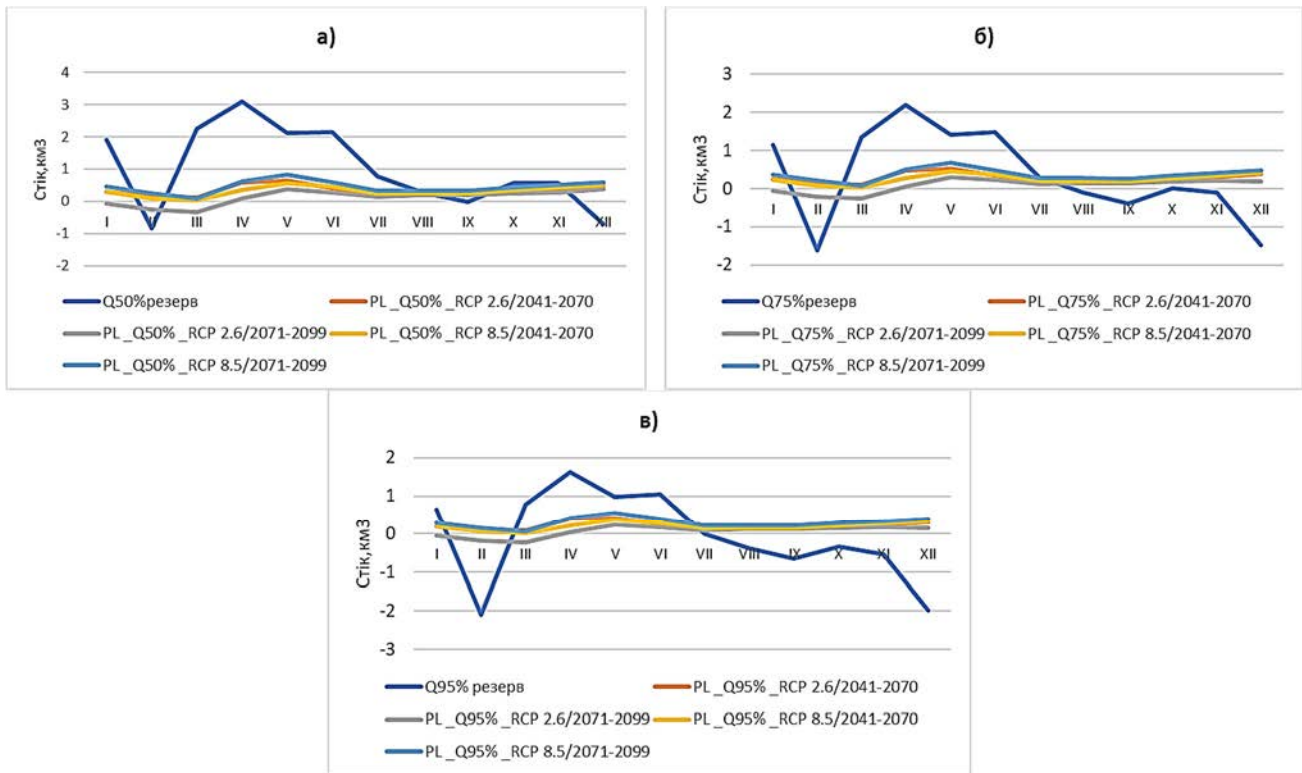


Рис. 6. Порівняння проєктованих утрат об'ємів стоку (км^3) р. Дніпро у створі Каховської ГЕС за рахунок кліматичних змін з резервом водного стоку після скидання мінімального екологічного стоку в роки середньої водності із забезпеченістю стоку Q 50 % (а) та у роки малої водності із забезпеченістю Q 75 і Q 95 %

Різка зниження резерву водного стоку в зимові місяці (грудень – лютий) пояснюється не господарським (забір води) чи кліматичними чинниками, а лише скиданням великого обсягу води на водогосподарську ділянку Нижнього Дніпра в період весняного паводка для забезпечення мінімального екологічного стоку (рис. 6). Величина мінімального екологічного стоку для кожного місяця року є сталою величиною і не змінюється залежно від водності року. Приміром, у лютому в усі роки вона становить $2,25 \text{ км}^3$, що в 4,23 рази перевищує аналогічну величину для червня ($0,52 \text{ км}^3$).

Наголосимо, що в році середньої водності можливі втрати водного стоку через вплив клімату: у серпні нівелюватимуться залишковим резервом води в руслі Дніпра. Але у вересні (згідно з усіма кліматичними сценаріями) через кліматичний чинник сформується дефіцит води обсягом $0,24\text{--}0,30 \text{ км}^3$. Ця величина не є критичною і можливо буде компенсована екологічними попусками води із Дніпровського водосховища.

У маловодні роки 75 і 95 % забезпеченості основним чинником формування дефіциту водних ресурсів буде не кліматичний, а водогосподарський. Наприклад, у маловодному році 75 % забезпеченості розрахунковий дефіцит водних ресурсів у лімітуючому літньо-осінньому періоді водокористування сформується за рахунок

господарської діяльності на рівні $0,1\text{--}0,4 \text{ км}^3$ на місяць, а за рахунок кліматичного чинника він посилиться ще на $0,2\text{--}0,4 \text{ км}^3$ на місяць. У маловодному році 95 % забезпеченості стоку дефіцит води ще збільшиться: за рахунок водогосподарського чинника на $0,3\text{--}0,65 \text{ км}^3$ на місяць, а за рахунок кліматичного – на $0,16\text{--}0,23 \text{ км}^3$ на місяць. Найбільший сумарний дефіцит водних ресурсів сформується у вересні й досягне величини $0,8 \text{ км}^3$.

Дискусія і висновки

При виконанні даних розрахунків урахувався сучасний стан використання водних ресурсів уже зруйнованого Каховського водосховища. Також було прийнято до уваги той факт, що водний стік Дніпра у створі колишньої Каховської ГЕС залишиться без змін, оскільки річка вже давно є каскадом водосховищ зі штучним регулюванням стоку. Отримані результати свідчать, що навіть за таких обставин слід очікувати формування дефіциту водних ресурсів у літньо-осінній період, який буде результатом сукупної дії господарського та кліматичного чинника. Очевидно, що вже найближчим часом уся водогосподарська структура Півдня України перебудовуватиметься і переорієнтуватиметься на інші джерела водних ресурсів. Упроваджуватимуться нові технології як у промисловості, так і в аграрному секторі, які дозволять використовувати менші об'єми води. Крім того,

перетворення водосховища з великою площею водної поверхні в річку дозволить зекономити величезні об'єми води, щонайменше до 10 % річкового стоку, які раніше витрачалися на випаровування. Також припиняться втрати води на фільтрацію через дамбу колишньої ГЕС. Усе це дає підстави сподіватися, що навіть без відновлення Каховського водосховища водних ресурсів у найближчій перспективі вистачить для всіх водокористувачів регіону. Відновлення водопостачання в регіоні є лише технічною проблемою, яку можна вирішити в короткі терміни шляхом залучення інвестицій у реконструкцію водної інфраструктури. Однак наслідки впливу на довкілля й соціальну сферу, які викликані руйнуванням водосховища, є довгостроковими за своїм характером і потребують кількох десятиліть для відновлення.

Внесок авторів: Сергій Сніжко – концептуалізація, формальний аналіз, методологія, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування; Сергій Запотоцький – концептуалізація, методологія, написання – оригінальна чернетка; Ольга Шевченко – формальний аналіз, методологія, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування; Інна Олексієнко – формальний аналіз, написання – оригінальна чернетка; Юлія Дідовець – формальний аналіз, методологія, написання – оригінальна чернетка, написання – перегляд і редагування; Аксель Бронстерт – концептуалізація, формальний аналіз, методологія, написання – оригінальна чернетка.

Джерела фінансування. Цю роботу виконано за часткової підтримки Volkswagen Stiftung (номер гранту 9C084).

Список використаних джерел

- Аналіз перебігу затоплення територій Херсонської області внаслідок руйнації гідросторуд Каховської ГЕС (09.09.2023). Національна Академія наук України. <https://www.nas.gov.ua/EN/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209>
- Вишневецький, В. І., Кудий, А. В. (2022). Багаторічні зміни водного режиму річок України. Наукова думка.
- Вишневецький, В. І., Сташук, В. А., Сакевич, А. М. (2011). *Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра*. Інтерпрес ЛТД.
- Водогосподарський баланс для суббасейну Нижнього Дніпра району басейну річки Дніпро. Державне агентство водних ресурсів України. Взято 09 червня 2023 р. з <https://dav.gov.ua/fls18/dnipro.pdf>
- Державний водний кадастр за розділом: "Водокористування". Портал відкритих даних. Взято 1 червня 2023 р. з <https://data.gov.ua/dataset/cadastre-water-use>.
- Динаміка зміни рівня води в річці Дніпро та Каховському степі. Офіційний Телеграм-канал Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Взято 7 червня 2023 р. з <https://t.me/mindovkillia>.
- На правобережній Херсонщині затопило близько 10 тисяч гектарів полів через підлив ГЕС. (07.06.2023). *Економічна правда*. <https://www.epravda.com.ua/news/2023/06/7/700892>
- Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Взято 11 червня 2023 р. з <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
- Окупанти підірвали Каховську ГЕС. Чим це загрожує і що буде далі? Взято 15 червня 2023 р. з <https://letsdoitukraine.org/2023/06/1du-kahovskahrp-2023/>
- Офіційний Телеграм-канал голови Херсонської ОДА Олександра Прокудіна. Взято 15 червня 2023 р. з <https://t.me/olexandrprokudin/614>
- Ромашенко, М. І., Гусев, Ю. В., Шатковський, А. П., Сайдак, Р. В., Яцюк, М. В., Шевченко, А. М., Матяш, Т. В. (2020). Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. *Меліорація і водне господарство*, 1, 5–22.
- Ромашенко, М., Яцюк, М., Шевчук, С., Шевченко, А., Даниленко, Ю., Матяш, Т., Сидоренко, О. (2018). Водна безпека – запорука сталого розвитку України. *Вісник аграрної науки*, 11 (788), 177–185.
- Стрілець, Р. (17 червня, 2023). *Через терористичний акт Росії на Каховській ГЕС такі нацпарки, як "Великий Луг" та "Кам'яна Січ" поступово перетворюються на пустелю*. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Новини від 17 червня, 2023. <https://mepr.gov.ua/ruslan-strilets-cherез-terorystichnyj-akt-rosiyi-na-kahovskij-ges-taki-natsparky-yak-velykyj-lug-ta-kam-yanska-sich-postupovo-peretvoruyutsya-na-pustelyu/>
- Хільчевський, В. К. (2021). Характеристика водних ресурсів України на основі даних глобальної інформаційної системи FAO *Aquastat*. *Гідрологія, гідрохімія та відрокологія*, 1 (59), 6–16.
- Хільчевський, В. К., Ободовський, О. Г., Гребінь, В. В. (2008). *Загальна гідрологія*. ВПЦ "Київський університет".
- Хвесик, М. А. (2013). Екологічні проблеми басейну річки Дніпро та шляхи їх вирішення. *Екологія і природокористування*, 17, 68–74.
- Davidson, H., Ratcliffe, R., Siddique, H. (2022, March, 19) Russia-Ukraine war: what we know on day 24 of the invasion. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2022/mar/19/russia-ukraine-war-what-we-know-on-day-24-of-the-invasion>
- Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F.F., López, M., Snizhko, S., Schmied, H.M. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>
- FAO *Aquastat*. *Global Information System on Water and Agriculture*. Взято 11 червня 2023 р. з <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>
- Gleick, P. (1993). *Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security*. *International Security*, 18 (1), 79–112.
- Global Run off Data Base*. GRDC. Взято 11 червня 2023 р. з <http://grdc.bafg.de>
- ISIMIP *The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project*. Взято 11 червня 2023 р. з <https://www.isimip.org/>
- Matsunaga, T., Nagao, S., Ueno, T., Takeda, S., Amano, H., Tkachenko Y. (2004). Association of dissolved radionuclides released by the Chernobyl accident with colloidal materials in surface water. *Applied Geochemistry*, 19, 1581–1599. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.002>
- Pillai, M., Golub, E., Lokshin M., Rakovych, O., Ha, T. P. (2021). *Ukraine – Building Climate Resilience in Agriculture and Forestry*. Washington, D.C.: World Bank Group. Взято 15 червня 2023 р. з <http://documents.worldbank.org/curated/en/893671643276478711/Ukraine-Building-Climate-Resilience-in-Agriculture-and-Forestry>
- Sanada, Y., Matsunaga, T., Yanase, N., Nagao, S., Amano, H., Takada, H., Tkachenko, Y. (2002). Accumulation and potential dissolution of Chernobyl-derived radionuclides in river bottom sediment. *Applied Radiation and Isotopes*, 56 (5), 751–760. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(01\)00274-3](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00274-3)
- Sansone, U., Belli, M., Voitsekovich, O. V., Kanivets, V. V. (1996). *¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in water and suspended particulate matter of the Dnieper River-Reservoirs System (Ukraine)*. *Science of The Total Environment*, 186, 257–271.
- Schillinger, J., Özerol, G., Güven-Griemert, G., Heldeweg, G. (2020). *Water in war: understanding the impacts of armed conflict on water resources and their management*. *WIRE's Water*, 7:e1480. <https://doi.org/10.1002/wat2.1480>
- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J.-A., Gleick, P. (2023). Impact of Russia – Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
- Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Blöschl, G. (2022). Climate change impact on seasonality of flood in the Desna river catchment, North Ukraine. In *Proceedings of the XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2022580177?crawler=true>
- Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes – an Austrian-Ukrainian comparison. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71 (No 3), 271–282. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0017>
- The World Bank Group*. World Bank Open Data. Взято 10 червня 2023 р.: <https://data.worldbank.org>
- War in Ukraine, Hunger in the World* (2022). Взято 14 червня 2023 з <https://worldmissionmagazine.com/archives/july-2022/war-ukraine-hunger-world>

References

- Davidson, H., Ratcliffe, R., Siddique, H. (2022, March, 19) Russia-Ukraine war: what we know on day 24 of the invasion. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2022/mar/19/russia-ukraine-war-what-we-know-on-day-24-of-the-invasion>
- Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., López, M., Snizhko, S., Schmied, H.M. (2020). Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100761>
- Dynamics of water level changes in the Dnipro River at Kherson gauge*. The official Telegram channel of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from: <https://t.me/mindovkillia> (17.06.2023) [in Ukrainian].
- FAO *Aquastat*. *Global Information System on Water and Agriculture*. Retrieved from: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en> (11.06.2023).
- General indicators of the use of water resources of Ukraine. Data sets* (2022). Retrieved from: <https://data.gov.ua/dataset/cadastre-water-use> (01.06.2023) [in Ukrainian].
- Gleick, P. (1993). *Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security*. *International Security*, 18 (1), 79–112.
- Global Run off Data Base*. GRDC. Retrieved from: <http://grdc.bafg.de> (11.06.2023)
- In the right-bank of Kherson region, 10,000 hectares of fields were flooded due to the explosion of the hydroelectric power plant*. Retrieved from: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/06/7/700892> (07.06.2023) (in Ukrainian).
- ISIMIP (2020). *The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project*. Retrieved from: <https://www.isimip.org/> (11.06.2023).

- Khilchevskiy, V. K. (2021). Characteristics of water resources of Ukraine based on the database of the global information system FAO Aquastat. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 1(59), 6–16 [in Ukrainian].
- Khilchevskiy, V., Obodovskyi, O., Grebin, V. (2008). *General Hydrology*. Kyiv: Kyiv University Publishing Center [in Ukrainian].
- Khvesyuk, M. (2013). Ecological problems of the Dnipro River basin and ways to solve them. *Ecology and Nature Management*, 17, 68–74 [in Ukrainian].
- Matsunaga, T., Nagao, S., Ueno, T., Takeda, S., Amano, H., Tkachenko Y. (2004). Association of dissolved radionuclides released by the Chernobyl accident with colloidal materials in surface water. *Applied Geochemistry*, 19, 1581–1599. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.002>.
- National Report on the State of the Natural Environment in Ukraine in 2021*. Ministry of environment protection and natural resources of Ukraine. Kyiv. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (11.06.2023) [in Ukrainian].
- Pillai, M., Golub, E., Lokshin M., Rakovych, O., Ha, T. P. (2021). *Ukraine – Building Climate Resilience in Agriculture and Forestry*. Washington, D.C.: World Bank Group. Retrieved from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/893671643276478711/Ukraine-Building-Climate-Resilience-in-Agriculture-and-Forestry>. (15.06.2023).
- Romashchenko, M., Yatsiuk, M., Shevchuk, S., Shevchenko, A., Danylenko, Yu., Matiash, T., Sydorenko, O. (2018). Watersafety – asthemortgage of stable development of Ukraine. *Bulletin of Agricultural Science*, 11 (788), 177–185 [in Ukrainian].
- Romashchenko, M., Husev, Yu., Shaikovskiy, A., Saidak, R., Yatsiuk, M., Shevchenko, A., Matiash, T. (2020). The impact of modern climate changes on water resources and agricultural production. *Land Reclamation and Water Management*, 1, 5–22 [in Ukrainian].
- Sanada, Y., Matsunaga, T., Yanase, N., Nagao, S., Amano, H., Takada, H., Tkachenko, Y. (2002). Accumulation and potential dissolution of Chernobyl-derived radionuclides in river bottom sediment. *Applied Radiation and Isotopes*, 56 (5), 751–760. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(01\)00274-3](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00274-3)
- Sansone, U., Belli, M., Voitsekovitch, O.V., Kanivets, V.V. (1996). ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in water and suspended particulate matter of the Dnieper River – Reservoirs System (in Ukraine). *Science of The Total Environment*, 186, 257–271.
- Schillinger, J., Özerol, G., Güven-Griemert, G., Heldeweg, G. (2020). Water in war: understanding the impacts of armed conflict on water resources and their management. *WIRE's Water*, 7:e1480. <https://doi.org/10.1002/wat2.1480>
- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J.-A., Gleick, P. (2023). Impact of Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
- Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Blöschl, G. (2022). Climate change impact on seasonality of flood in the Desna river catchment, North Ukraine. In *Proceedings of the XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"* <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.2022580177?crawler=true>
- Snizhko, S., Bertola, M., Ovcharuk, V., Shevchenko, O., Didovets, I., Blöschl, G. (2023). Climate impact on flood changes – an Austrian-Ukrainian comparison. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71 (No 3), 271–282. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0017>
- Strilets, R. (2023, June 17). *Due to Russia's terrorist attack on the Kakhovka hydroelectric power plant, national parks "Velykyi Luh" and "Kamianska Sich" are turning into desert*. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. News. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/ruslan-strilets-cherez-terorystychnyj-akt-rosiyi-nakahovskij-ges-taki-natsparky-yak-velykyj-lug-ta-kam-yanska-sich-postupovoperevoryuyutsya-na-pustelyu> [in Ukrainian].
- The analysis of the course of flooding of the territories of the Kherson region due to the destruction of the hydroelectric structures of the Kakhovskaya HPP*. Retrieved from: <https://www.nas.gov.ua/EN/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=10209> (09.09.2023) [in Ukrainian].
- The occupiers blew up the Kakhovka hydroelectric power plant. What are the consequences and what will happen next? (2023). Retrieved from: <https://letsdoitukraine.org/2023/06/ldu-kahovska-hpp-2023/> (15.06.2023) [in Ukrainian].
- The official Telegram channel of the Head of the Kherson Regional State Administration of Oleksandr Prokudin. Retrieved from: <https://t.me/oleksandrprokudin/614> (15.06.2023) [in Ukrainian].
- The World Bank Group*, 2020. World Bank Open Data. Retrieved from: <https://data.worldbank.org> (10.06.2023).
- Water management balances of the main river basins* (2019). State Agency of Water Resources of Ukraine. Published 18.08.2019. Retrieved from: <https://davr.gov.ua/fls18/dnipro.pdf> [in Ukrainian].
- Vyshnevskiy, V., Stashuk, V., Sakevych, A. (2011). *Water management complex in the Dniprobasin*. Kyiv: Interpres LTD [in Ukrainian].
- Vyshnevskiy, V., Kutsyi, A. (2022). *Long-term changes in the water regime of rivers of Ukraine*. Kyiv: Nakova dumka [in Ukrainian].
- War in Ukraine, Hunger in the World* (2022). Retrieved from: <https://worldmissionmagazine.com/archives/july-2022/war-ukraine-hunger-world> (14.06.2023)

Отримано редакцією журналу / Received: 19.06.23
 Прорецензовано / Revised: 29.06.23
 Схвалено до друку / Accepted: 30.06.23

Sergiy SNIZHKO¹, DSc (Geogr.), Prof.
 ORCID ID: 0000-0002-2696-687X
 Scopus ID: 57224880799
 e-mail: snizhko@knu.ua

Sergii ZAPOTOTSKYI¹, DSc (Geogr.), Prof.
 ORCID ID: 0000-0002-3515-4187
 Scopus ID: 57197796087
 e-mail: zapototsk@knu.ua

Olga SHEVCHENKO¹, DSc (Geogr.), Assoc. Prof.
 ORCID ID: 0000-0003-3915-427X
 Scopus ID: 55801127100
 e-mail: shevchenko_olga@knu.ua

Inna OLEXIENKO¹, PhD (Geogr.)
 ORCID ID: 0000-0003-3766-9763
 e-mail: olexienkoinna@gmail.com

Iulii DIDOVETS², PhD (Geogr.)
 ORCID ID: 0000-0003-1169-6165
 ScopusID: 57193579843
 e-mail: didovets@pik-potsdam.de

Axel BRONSTERT³, DSc, Prof.
 ORCID ID: 0000-0002-6369-8536
 Scopus ID: 7003498594
 e-mail: axel.bronstert@uni-potsdam.de

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany

³University of Potsdam, Potsdam, Germany

IMPACT OF THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR ON THE WATER RESOURCES OF SOUTHERN UKRAINE

Background. *The destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam by the Russian occupiers led to the emptying of the largest reservoir in Ukraine, the Kakhovka reservoir, which provided up to 40% of the water needs of the South of Ukraine. The purpose of the study is to assess the availability of water resources in the South of Ukraine in the context of climate change and the consequences of military actions (destruction of the Kakhovka reservoir by the Russian army).*

M e t h o d s . *The research methodology is based on a study of the water balance of the Lower Dnipro River, taking into account the impact of climate change on the region's water resources based on hydrological modeling of runoff and modern climate projections under two climate scenarios.*

R e s u l t s . *As a result of the research, an estimate of the availability of water resources in southern Ukraine for the restoration of water infrastructure after the destruction of the reservoir was obtained. It has been established that after the loss of the reservoir, the value of the incoming part of the balance, which is regulated by the inflow of water from the Dnipro reservoir, will not change. However, the amount of water (2.8-4.2 km³ per year) that was spent on evaporation from the reservoir surface and on filtration through the hydroelectric dam will be saved and will be available for use. Another source of replenishment of available water resources is the adjustment of the volume of ecological flow to the Lower Dnipro in winter months by bringing their values closer to natural values (before the construction of the HPP).*

At the same time, according to the results of the assessment of climate change impacts on the Dnipro water flow in the Kakhovka HPP, in most months of the year under both scenarios (RCP 2.6 and RCP 8.5), a decrease in flow will be observed as a result of climate change. The climatic factor can significantly worsen the water situation in a hydrological year with 50% reliability of water flow in September, and in low-water years with 75 % and 95 % reliability of water flow from July to November. The largest total deficit of water resources due to climatic and water management factors can be formed in low-water years in September and reach 0.8 km³.

C o n c l u s i o n s . *Studies conducted to assess the availability of water resources in southern Ukraine after the destruction of the Kakhovka Reservoir have shown that under the influence of further climate change and the resumption of the use of the available water resources of the Dnipro River, water shortages may occur in the summer and autumn, especially in low-water years. However, taking advantage of the artificial regulation of the Dnipro's flow and the introduction of modern low-water technologies in both industry and agriculture will allow the water sector in southern Ukraine to meet the needs of the water sector without restoring the Kakhovka reservoir.*

K e y w o r d s : *water resources, water as weapons, water availability, climate impact.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.