

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 622.83

Yevheniy Yakovlev, D. S. (Engineering), Principal researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> *e-mail*: yakovlevhydro@gmail.com

Oleksii Rogozhin, D. S. (Economics), Principal researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-9368> *e-mail*: olexarog@gmail.com

Dmytro Stefanyshyn, D. S. (Engineering), Senior researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> *e-mail*: d.v.stefanyshyn@gmail.com

Dmytro Kreta, PhD, Senior researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5897-0008> *e-mail*: dim.leo@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GEOECOLOGICAL AND ECONOMIC CONSEQUENCES OF CREATION, DRAINAGE AND POSSIBLE VARIANTS OF RESTORATION THE KAKHOVSKY RESERVOIR

***Abstract.** In the article, in the aspect of engineering and geological safety of structures and communications, the long-term hydrogeological consequences of the support and drainage effects at coastal areas of destroyed Kakhovskiy hydro node reservoir as a leading eco-forming component of a giant natural and man-made geosystem are considered. In particular, it included Zaporizhia NPP, the largest in Europe, and the largest irrigation systems in Ukraine. The consequences of the hydrodynamic disaster due to explosion of Kakhovskaya HPP, the dynamics and current state of drainage of the bed of its reservoir are briefly described, according to the data of GIS analysis of space images. And also – the state of hydrogeological and engineering-geological conditions in the reservoir support zone at the time of disaster and in retrospect. A calculated assessment of changes in hydrogeological conditions for the next 10-15 years has been carried out. Long-term natural and man-made threats that arose as a result of such changes in hydrogeological (geofiltration and geodynamic) conditions are named. The set of socio-economic threats that arose due to the negative consequences of Kakhovskiy reservoir existence and draining is described. It is emphasized that the restoration of hydrotechnical and water management parameters of the reservoir in the previous values (according to the conservative version) will lead to secondary geospatial water saturation of subsiding loess-loamy silty-clay floatingable rocks that have already undergone deformations due to a decrease in geotechnical stability during the initial flooding and subsequent drainage. This will start a new stage in the formation of dangerous violations of stress-deformed state of coastal slopes, of Zaporizhzhya NPP responsible structures foundation and in nearby cities and towns. A socially and ecologically favorable option for the rehabilitation of affected region is possible only on the modern European ideological and technological basis of taking into account the maximum permissible changes in the hydrological network, i.e. by means of: creating a cascade of low support channel*

reservoirs with locks and small hydroelectric power stations, reconstruction of riverside ponds and water supply systems, transfer of domestic water supply to underground sources, irrigated lands – for drip irrigation, ecological reclamation and afforestation of drained lands.

Key words: natural and man-made geosystem; Kakhovsky reservoir; catastrophic drainage; GIS analysis; hydrogeological conditions; subsiding loess-loamy floatingable rocks; geotechnical stability of structures and communications; socio-economic threats; ecological rehabilitation.

Є.О. Яковлев, О.Г. Рогожин, Д.В. Стефанишин, Д.Л. Крета

Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

ЕКОЛОГО-ГЕОЛОГІЧНІ І ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ СТВОРЕННЯ, ОСУШЕННЯ ТА МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ ВІДНОВЛЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Анотація. У статті в аспекті інженерно-геологічної безпеки споруд і комунікацій розглянуто довготривалі гідрогеологічні наслідки підпірного впливу та дренального осушення прибережних територій водосховища знищеного Каховського гідровузла як провідного екоформуючого компонента гігантської природно-техногенної геосистеми. До її складу, зокрема, входили найбільша в Європі Запорізька АЕС та найбільші в Україні зрошувальні системи. Коротко описані наслідки гідродинамічної катастрофи через підриє Каховської ГЕС, динаміка і сучасний стан осушення ложа Каховського водосховища за даними ГІС-аналізу космознімків. А також – стан гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов в зоні підпору водосховища на час катастрофи і в ретроспективі. Виконана розрахункова оцінка зміни гідрогеологічних умов на наступні 10-15 років. Названо довгострокові природно-техногенні загрози, що виникли внаслідок такої зміни гідрогеологічних (геофільтраційних та геодинамічних) умов. Описано комплекс соціально-економічних загроз, які постали через негативні наслідки існування та осушення Каховського водосховища. Наголошується, що відновлення гідротехнічних та водно-господарських параметрів водосховища у попередніх значеннях (за консервативним варіантом) призведе до вторинного геопросторового водонасичення просадкових лесово-суглинистих, пилувато-глинистих пливуноздатних порід, що вже зазнали деформацій внаслідок зниження геотехнічної стійкості при первинному затопленні та наступному осушенні. Цим розпочнеться новий етап формування небезпечних порушень напружено-деформованого стану прибережних схилів, підгрунтя відповідальних споруд Запорізької АЕС та у прилеглих містах і селищах. Соціально і екологічно сприятливий варіант реабілітації ураженого регіону можливий лише на сучасній європейській ідеологічній та технологічній основі врахування гранично припустимих змін гідрологічної мережі, тобто засобами: створення каскаду низькопідірних руслових водосховищ із шлюзами та малими ГЕС, реконструкції природних ставків і систем водоводів, переведення побутового водопостачання на підземні джерела, зрошуваних земель – на крапельне зрошення, екологічної рекультиватії та заліснення осушених територій.

Ключові слова: природно-техногенна геосистема; Каховське водосховище; катастрофічне осушення; ГІС-аналіз; гідрогеологічні умови; просадкові лесово-суглинисті пливуноздатні породи; геотехнічна стійкість споруд; соціально-економічні загрози; екологічна реабілітація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.91-116>

Вступ

Підри́в російськими агресорами Каховської ГЕС та катастрофічне осушення її водосховища призвів до того, що вже запущено багаторічний процес жорсткої трансформації екосистем, економічних комплексів та соціальних спільнот, які сформувалися і досягли відносно рівноважного стану на місці знищених водою із будівництвом цього гідровузла у першому історичному акті техногенного перетворення Нижнього Дніпра.

Відносно цього ми приєднуємося до думки В. Богдановича [1], що після Каховської катастрофи (і руйнівної Російської війни) сформується нова соціоекосистема, доволі не схожа ні на попередню, ні на давній «Великий Луг», що тут розвинеться інший ландшафтно-географічний комплекс з іншою структурою поселень і землеробства, що до цієї даності доведеться пристосовуватися, що доведеться знову освоювати уражену територію, бажано з урахуванням потреб екологічної збалансованості, що слід налаштуватися саме на це, а не тішити себе надією повернення до щасливого минулого.

Але щоб цей процес відбувався менш болісно та призвів до поліпшення екологічного і соціально-економічного середовища, він має бути не лише державно керованим, а й якомога більш оптимізованим, хоча б за цілями (критеріями) сталого розвитку територій, однією з яких є екологічна безпека життєдіяльності населення та господарської діяльності, зокрема й геологічного середовища як територіальної і геохімічної основи для будь-яких природних та соціально-економічних систем.

У суспільстві закономірно виникла і, на жаль, швидко вщухла дискусія про те, яким слід відновлювати чи взагалі не відновлювати Каховське водосховище. Аргументами за його відновлення «як було» є виключно економічні та приватно-корпоративні: забезпечення потреб агробізнесу у зрошенні для овочівництва відкритого і закритого ґрунту, садівництва, виноградарства (але чомусь не згадують про потреби зернового господарства), забезпечення потреб судноплавства, забезпечення водопостачання великих (передусім видобувних і металургійних) підприємств Дніпропетровщини (що без цього вони працюватимуть із наполовину зменшеною потужністю), відновлення електрогенерації, а також – недолуга «лякалка» про перетворення осушеної території на пустелю (і це при річних опадах ≈ 400 мм). Аргументи проти висувають здебільшого представники освітньо-наукового співтовариства не лише з екологічних і соціогуманітарних міркувань, але доволі аргументовано заперечуючи адептам «як було», що можливі й інші варіанти відновлення місцевої економіки та забезпечення водопостачання на основі інших джерел та більш сучасних технологій (зокрема аргументи О. Гелевери [2]). Для нас в цій аргументації найближчою є теза про «уникнення небезпеки руйнування греблі водосховища», яка не може не посилитися після її відновлення на геотехнічно дестабілізованих просядкових і пливуноздатних осушених ґрунтах із слабкою несучою здатністю.

Крапку у цій дискусії поспішив поставити корпоративно-контрольований Кабмін України своєю постановою від 18.07.2023 р. «про експериментальний проєкт з початку відбудови Каховської ГЕС, яку підірвали росіяни», розрахований на 2 роки, причому нею передбачається, що на першому етапі буде спроектовано всі інженерні конструкції й підготовлено необхідну базу для відновлення. Замовником робіт призначено «Укргідроенерго», яке раніше

називало мінімальний термін на відновлення Каховської ГЕС у 5-7 років [3]. Але в цій постанові не передбачене розроблення докладного техніко-економічного і екологічного обґрунтувань, з яких у всьому світі починаються будь-які, особливо великі будівельні проєкти потенційно небезпечних гідротехнічних об'єктів.

Після відновлення незалежності України відомі гідротехніки (зокрема Є.А. Бакшеєв) оприлюднили свою думку щодо недостатньої обґрунтованості створення великого водосховища у нижній течії Дніпра, відмова від якого дозволила б, серед іншого, зберегти високопродуктивні екосистеми плавнів, нерестовища та не відселяти понад 50 тис. людей [4].

Тобто сьогодні ми опинилися в ситуації «дежа вю» і повернулися в точку біфуркації, коли стартували роботи з будівництва Каховського гідровузла (але тоді хоч були проведені широкомасштабні проєктно-пошукові роботи). Сподіваємося, що цього разу здоровий глузд таки візьме гору й фахові обґрунтування різних *варіантів відновлення* Каховського гідровузла будуть зроблені й саме на їх основі буде ухвалюватися рішення про початок будівництва. Кроком у цьому напрямі ми вважаємо й цю статтю.

Її **метою** є розгляд, в аспекті інженерно-геологічної безпеки споруд і комунікацій, довготривалих гідрогеологічних наслідків осушення водосховища знищеного Каховського гідровузла з урахуванням екологічних і соціально-економічних проблем, спричинених понад 67-річним існуванням створеної ним гігантської антиекологічної природно-техногенної геосистеми.

Виклад основного матеріалу

1. Антиекологічна природно-техногенна геосистема Каховського гідровузла як спадок гігантоманії «сталінського плану перетворення природи». Перший етап формування цієї природно-техногенної геосистеми (ПТГС) розпочався в 1955 р. із введенням в експлуатацію гідровузла з ГЕС (потужністю понад 300 МВт) та наповненням Каховського водосховища, першого в Україні за площею. До складу Каховського гідровузла входять: шлюз та земельна гребля лівого берега, земляна руслова гребля, а також – бетонна водозливна гребля та будівля гідроелектростанції, нині зруйновані. Довжина напірного фронту гідровузла сягала 3650 м. Об'єм водосховища становив 18,2 км³, довжина – 230 км, ширина – 25 км, загальна площа водосховища – 2155 км², середній підпір – 16 м. Цим водосховищем була знищена унікальна високопродуктивна частково окультурена екосистема плавнів Великого Лугу нижнього Дніпра майже на всій площі, з усіма її сіножатями, пасовищами, рибними й лісовими ресурсами – вміщуючий ландшафт формування сучасного українського етносу.

Другий етап формування технічної підсистеми новоствореної геосистеми завершено в середині 1990-х рр. із пуском останнього (шостого) енергоблоку Запорізької АЕС, коли та стала найбільшою в Європі та третьою у світі за сукупною потужністю (6000 МВт). Рис. 1 наочно демонструє те, що провідною економічною функцією Каховського гідровузла було *забезпечення водопостачання*, передусім для головних традиційних галузей української економіки: чорної металургії, агропромислового комплексу, ядерної та теплової енергетики. Це, зокрема, унікальні гірсько-металургійні комплекси – Криворізький (найбільший в Україні) із Зеленодольською ТЕС, що жилилися

каналом Дніпро – Кривий Ріг, Нікопольсько-Марганецький (із потужними феросплавним та трубопрокатним комбінатами), а також – Запорізька АЕС із Енергодарською ТЕС. Найбільші зрошувальні системи південних областей України (Херсонська, Запорізька, АР Крим, з їх аномальною розораністю, підтопленням та засоленням) також живилися саме з Каховського водосховища, зокрема Північно-Кримська і Каховська, як і декілька провідних підприємств переробки сільськогосподарської сировини.



Рис. 1. Схема природно-техногенної геосистеми нижнього Дніпра «Каховська ГЕС – Каховське водосховище – Запорізька АЕС»

Всі згадані виробництва й підприємства в процесі приватизації перейшли у власність крупного капіталу і досі становлять одну з найцінніших часток його активів. Тому й український уряд лобіює відновлення Каховського гідровузла за консервативним варіантом «як було», ігноруючи довгостроковий прояв негативних еколого-техногенних та соціально-економічних наслідків функціонування ПТГС «Каховська ГЕС – Каховське водосховище – Запорізька АЕС».

У тих самих 1990-х, було досягнуто просторово-часового квазірівноважного стану в зоні підпору Каховським водосховищем поверхневого стоку нижнього Дніпра та правобережного і лівобережного

потоків підземного стоку. А також – нестійкої геодинамічної рівноваги споруди намівної дамби ставка-охолоджувача Запорізької АЕС, побудованої з пісково-мулистих заплавних ґрунтів. Причому важливо, що вже на рівні реалізації проекту Запорізької АЕС була створена потенційна загроза гідро-геодинамічної нестійкості її ставка-охолоджувача (віддамбованої та фільтраційно незахищеної частини Каховського водосховища, площа $S \approx 10 \text{ км}^2$, об'єм $V \approx 50 \text{ млн м}^3$, середня глибина $h \approx 5,0 \text{ м}$).

2. Гідродинамічна катастрофа і осушення водосховища Каховської ГЕС.

Дослідження геотехнічної надійності гідроспоруд Каховського гідровузла показали, що вони були достатньо стійкими та надійними в умовах природних впливів, в тому числі з урахуванням складних геологічних умов, зокрема можливих сейсмічних струшувань. Однак терористичний акт, який спричинив руйнування Каховської ГЕС, завдав незворотної шкоди від втрати важливого еколого-формуючого інфраструктурного об'єкта – Каховського водосховища, на основі якого ще в радянські часи сформувалося стійке соціально-екологічне середовище півдня України та розвивалася економіка трьох її областей та Криму.

Прорив греблі стався тоді, коли водосховище було переповнене (підпір понад 17 м) з формуванням хвилі прориву висотою до 5 м і швидкістю до 25 км на годину. Тому й площа та тривалість затоплення виявились більшими, ніж прогнозі оцінки (зокрема тривалість перевищила 5 діб). 6.06.2023 р. площа затоплення становила понад 430 км², 7.06.2023 р. – понад 820 км², потім воно поширилося на Кінбурнський півострів і далі, рис. 2. Загалом аварійного затоплення і підтоплення зазнали понад 80 населених пунктів в заплавах нижнього Дніпра і нижнього Інгульця, на узбережжях Бузького і Дніпровського лиманів.

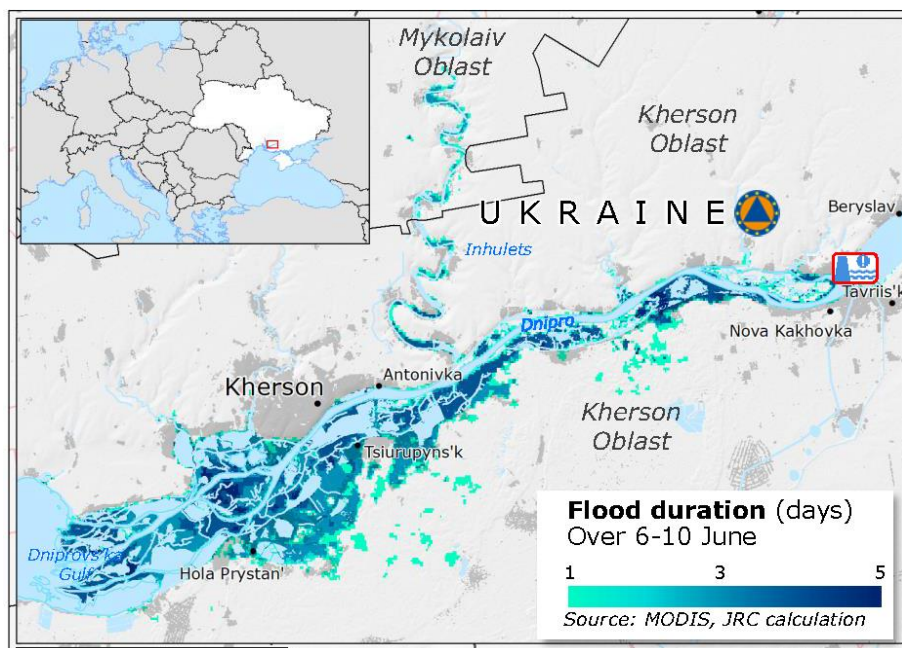


Рис. 2. Зона затоплення станом на 10.06.2023 р. (фрагмент інтернет-публікації ERCC (EU Emergency Response Coordination Centre))

Вибухове руйнування машинного залу Каховської ГЕС призвело до розвитку низки короткострокових (6-10 діб) та довгострокових переважно незворотних еколого-техногенних загроз передусім для *функціонування об'єктів інфраструктури*, зокрема критичної:

- формування розосереджених ділянок затоплення і підтоплення на площі понад 2500 км² значно урбанізованих територій до висоти малоповерхової забудови (максимальний рівень затоплення перевищує 5 м), виведення з ладу великої кількості об'єктів (систем водо-теплопостачання та водовідведення, лікувальних закладів, житлових будівель та ін.), нагальна евакуація декількох тисяч населення, ускладнена військовими діями та перманентними обстрілами;
- втрата та ускладнення джерел водопостачання для майже 10 млн людей: локальних (криниць і свердловин, затоплених забрудненими водами) та централізованих, включно з Північно-Кримським і Каховським каналами, водоводами Дніпро-Кривбас й на міста Нікополь та Марганець;
- зміна водно-екологічних умов підземних водоносних горизонтів (ускладнення умов експлуатації розвіданих родовищ питних підземних вод внаслідок регіонального зниження рівнів води; активізація перетоку забруднень з поверхні та незахищеного ґрунтового водоносного горизонту);
- активізація процесів затоплення і підтоплення покривної частини лесовопородного просядкового масиву з наступним зниженням міцності та інженерно-сейсмогеологічної стійкості підґрунтя численних житлових і промислових споруд;
- розвиток обвальних-зсувних та ерозійних процесів на осушених берегових схилах колишнього водосховища;
- розвиток процесів гідрогеофільтраційної компресії внаслідок осушення водонасичених та перезвожених лесово-суглинистих та пилувато-глинистих пливуноздатних ґрунтів з наступними небезпечними осіданнями земної поверхні.

Крім того, постали загрози: *втрати біологічних ресурсів* рибогосподарських водойм та заповідних територій; *регіональної міграції забруднень у ґрунтовий та напірні водоносні горизонти* внаслідок гідрогеофільтраційної міграції забруднень з місць масового мору риби, розкладання трупів тварин, затоплення і підтоплення звалищ промислових і побутових відходів; *погіршення ландшафтно-геохімічних умов сільськогосподарських угідь* через затоплення і підтоплення та привнесення забруднюючих речовин, органічних і неорганічних (пестицидів, поліхлорбіфенілів, важких металів, радіонуклідів тощо, депонованих у донних відкладах водосховища, а також з хімічної продукції, що зберігалася на затоплених територіях).

За оцінками Міжнародної комісії з великих гребель, лише прямі збитки від їх руйнування з утворенням хвиль прориву можуть перевищити вартість цих споруд на порядок і більше, а загальні збитки від таких аварій можуть перевищити вартість споруд на два і більше порядків. Питомий загальний збиток від аварійного вивільнення 1 м³ води з водосховища може сягати від 10 до 100 доларів США. З огляду на наведені нормативи, для випадку катастрофи на Каховському водосховищі загальні, у тому числі довгострокові, збитки можуть досягти 1,8 трлн доларів США.

Причому найбільш катастрофічні наслідки руйнування гребель відбуваються через навмисні дії з підривом конструкцій гідропоруди зсередини, а не ззовні, тобто військовими інженерами, що володіють всіма необхідними знаннями, як найкраще завдати найбільших руйнувань споруді шляхом повного використання енергії вибуху, подібно тому, як це сталося на Каховському гідровузлі. Внаслідок саме таких аварій може бути завдана найбільша шкода довкіллю, населенню, інфраструктурі, водному господарству, комунальному господарству та економіці в цілому.

Особливістю аварії на Каховському гідровузлі є те, що руйнування відбулося в межах будівлі ГЕС з миттєвим розкриттям прорану на значній довжині. Загальна довжина будівлі ГЕС з монтажним майданчиком, де сталася подія, становить 212 м, що дорівнює понад 5% від протяжності усіх гідропоруд Каховського гідровузла (близько 3800 м). Такі розміри прорану достатні для того, щоб через швидке спрацювання рівня води у водосховищі сталося гідрогеокомпресійне ушкодження й земляних гребель гідровузла, які побудовані з водонестійких та пливуноздатних місцевих ґрунтів.

Осушення Каховського водосховища до рівноважного рівня сталося протягом 3 тижнів (рис. 3). За цей час площа водного дзеркала в його межах зменшилася, згідно з нашою картометричною ГІС-оцінкою (аналіз космознімків за 15-30.06.2023 р.), до 325,8 км² (відбулося зменшення водного дзеркала на 84,9%). За даними NAVIONICS на 15.08.2023 р. глибини у нижньому б'єфі зруйнованої дамби становлять 5-6 м, а у верхньому – 11-12 м. Тобто її підпір зменшився приблизно до 6 м.

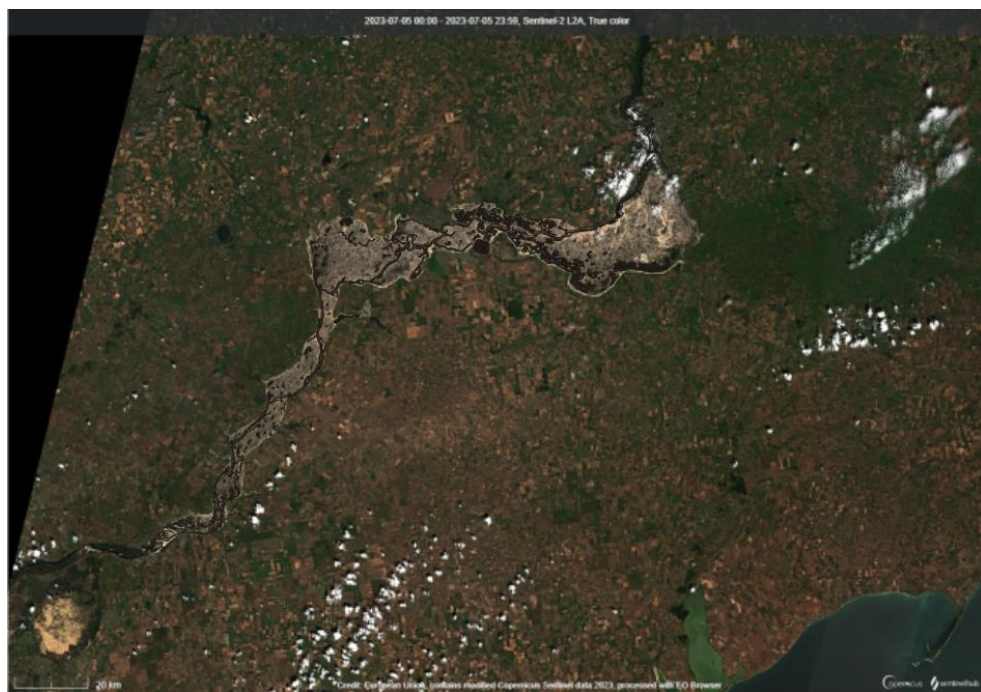


Рис. 3. Космознімок осушеного Каховського водосховища на 5.07.2023 р. у видимому діапазоні (Sentinel-2 L2A)

Усю сукупність можливих наслідків Каховської катастрофи в частині небезпечних змін стану інфраструктурних об'єктів та погіршення безпеки життєдіяльності важко передбачити без належного аналізу на основі моніторингу екологічних, технологічних та соціально-економічних параметрів ситуації, яку складно оцінити через системний характер аварії та її ланцюговий вплив на різні сфери і галузі й на економіку країни в цілому.

3. Стан гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов в зоні підпору Каховського водосховища на час катастрофи. Для вибору місця будівництва Каховського гідровузла на початку 1950-х років були виконані комплексні проєктно-пошукові роботи в пониззі Дніпра. Тоді було пробурено 30 тисяч свердловин, побудовано 120 штолень та 20 глибинних шахт, виконано значну роботу із визначення обсягу фільтраційних втрат з водосховища та розміру зони підпірного впливу на ґрунтові і артезіанські водоносні горизонти. Середні величини підпірного впливу на підвищення рівнів підземних вод на правому і лівому берегах за прогнозними оцінками сягали 35-50 км і більше (до 130 км у напрямку вододілу). Через це очікувана площа підпірного впливу Каховського водосховища на рівень підземних вод та на активізацію підтоплення земель, за умови досягнення ним узбережжя оз. Сиваш, перевищила 20000 кв. км (без врахування фільтраційних втрат в обхід споруд гідровузла, розвитку зрошувальних систем та втрат із водонесучих і водовідвідних систем). Така прогнозна оцінка значною мірою була обумовлена розташуванням шарів водопроникних порід у північному борті Причорноморського артезіанського басейну (між Дніпровською ГЕС у м. Запоріжжя та оз. Сиваш, де розташована зона висхідного розвантаження ґрунтового і напірних горизонтів), рис. 4.



Рис. 4. Схема інженерно-геологічних умов в зоні впливу Каховського гідровузла, що провокують активізацію небезпечних процесів: підтоплення, просідань, зсувоутворення, карстово-провальних форм

Тоді вперше у світовій гідробудівничій практиці за розрахунками проєктних організацій на таких породах було побудовано унікальну земляну греблю із дуже пологими відкосами й тому розосереджену на великій площі залягання потужної товщі нестійких ґрунтів-пливунів (товщина шару пливунів до 20-25 м).

Переважаючі просадкових лесових та лесово-суглинистих порід у верхній частині геологічного розрізу зони підпірного впливу Каховського водосховища обумовило довгострокову регіональну активізацію підтоплення і затоплення земель, осідання земної поверхні, розвитку карстово-суфозійних процесів. Це ускладнило інженерно-геотехнічні умови експлуатації просторово розподілених об'єктів інфраструктури: ТЕС і АЕС, нафтогазопроводів, водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж, залізниць, мостів тощо.

Такі геотехнічні умови будівництва і експлуатації інфраструктури у зоні підпірного впливу водосховища Каховської ГЕС були додатково ускладнені будівництвом системи зрошувальних каналів, що призвело в останні 50 років до стабільного розширення площ підтоплення земель (на 35000-50000 га щорічно) та до подальшого ускладнення умов експлуатації об'єктів інфраструктури (табл. 1).

Як засвідчує оновлена нами карта розвитку підтоплення в Україні на регіональному рівні, довгостроковий підпірний вплив колишнього Каховського водосховища на підвищення рівня ґрунтових і напірних підземних вод досяг узбережжя Чорного моря та оз. Сиваш [5]. Це відбулося ще на початку 1990-х рр., за цей час середня глибина залягання ґрунтових вод у цій зоні зменшилася з 10-15 м до 1,5-3 м, де досягла рівноважного рівня.

В умовах зростання негативного впливу глобальних змін клімату (потепління, збільшення кількості та нерівномірності опадів, ризику повеней), а також зарегулювання до 60-70% стоку малих і середніх річок у басейні р. Дніпро (де розміщено до 11-12 тис. ставків і водосховищ), варто очікувати активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів і при аварійному зниженні рівня Каховського водосховища, і при формуванні зони стоку в його чашу зі зниженням рівнів ґрунтових і напірних підземних вод.

Таблиця 1. Картометрична ГС-оцінка площ підтоплення та кількості населених пунктів в їх межах у зоні підпірного впливу Каховського водосховища

Адміністративні області	Площа, км ²			Кількість		
	2015	2002	різниця	2015	2002	різниця
Україна всього	161913	162949	- 1036	8639	8534	+105
Дніпровська	7683	7906	- 223	476	411	+65
Запорізька	6641	4782	+1859	324	243	+81
Миколаївська	9865	3449	+6416	458	184	+274
Херсонська	13918	6418	+7500	422	221	+201

4. Стан регіональних гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов до створення Каховського водосховища. У ландшафтному і інженерно-геологічному відношенні нижньодніпровські степи, вкриті чохлам лесових порід, поділяються на три основні області: підвищену *правобережну*

(з м. Херсон), порізану балками і долинами малих річок із просадковими лесовими породами; більш знижену *лівобережну*, пласкату з заглибленнями великих «подів» та просадковими лесами (до м. Мелітополь); знижену *лівобережно-причорноморську* (від м. Каховка до Кінбурнської коси), пласкату з «подами», вкриту алювіальними піщаними наносами давньої дельти Дніпра й непросадковими лесами.

Посушливі правобережні і лівобережні степи до створення Каховського гідровузла розділяла стрічка обводненої *нижньодніпровської і нижньоконської заплави*, затоплюваних у повінь «плавнів» (вкритих алювіальними наносами, павутинням проток, болотами, очеретами, луками та лісами): шириною від 5-7 км (між Херсоном та устям р. Базавлук) до 15 і 30 км (вище устя р. Базавлук, власне «Великий Луг»), рис. 5. У свою чергу Великий Луг поділявся (з заходу на схід) на: Базавлуцькі плавні (переважно низькі, ліси лише у вищій північній частині), Кам'янські плавні (переважно високі, лісисті), Конські плавні (переважно високі, з лісами вздовж річищ Дніпра і Конки).

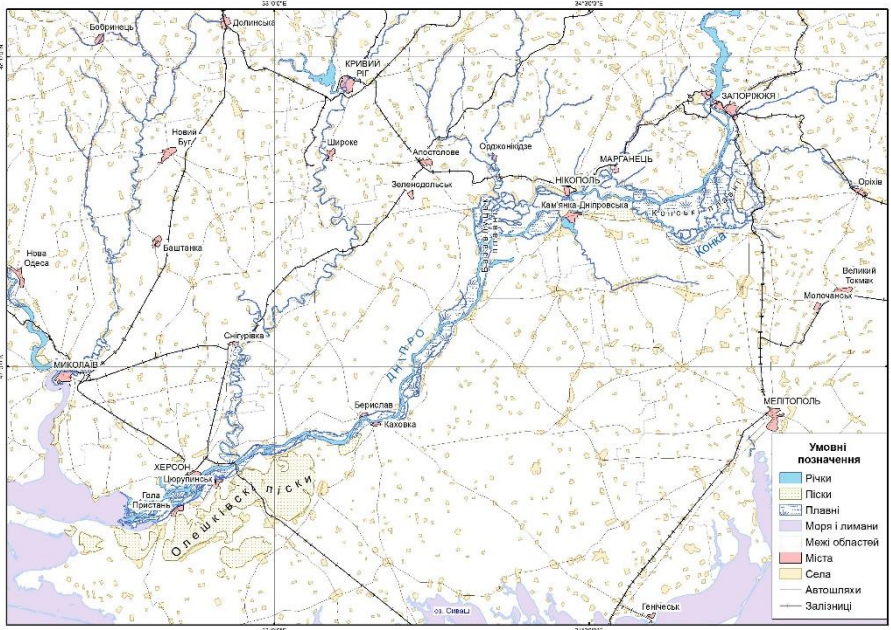


Рис. 5. Нижньодніпровські плавні на оцифрованому фрагменті «Политико-адміністративной карты Украинской ССР и Молдавской ССР», 1951 р., М 1:750000

Показово, що наприкінці XVIII ст. водопостачання у м. Херсон здійснювалося лише з трьох глибоких колодязів (до 80 м, подача води паровою машиною). Автори цього повідомлення звертають увагу на те, що «використання для водопостачання міста артезіанських вод і відсутність дрібних колодязів у цей період свідчить про відсутність суцільного дзеркала підґрунтових вод» (на правому, високому березі Нижнього Дніпра). «Перше згадування про розвиток несприятливих інженерно-геологічних процесів в м. Херсон належить до середини XIX ст. Вони пов'язані з підтопленням і заболочуванням окремих ділянок території міста і «прибережних магістралей». Ці процеси були наслідком формування депресійних форм

рельєфу в результаті осідання (лесових порід), а також з утворенням суцільного дзеркала підґрунтових вод на території міста і їхнього розвантаження покрівлею червоно-бурих суглинків, що не дивно у зв'язку з повною відсутністю каналізації у місті» [6].

У другій половині XIX ст. кількість опадів, що випадала на *правобережжі* Нижнього Дніпра (Херсонський повіт Херсонської губернії), оцінювалася не менше ніж 400 мм на рік. У північно-східній частині Херсонського повіта (сучасні Високопільський та Нововоронцовський райони) ґрунтова вода відкривалася колодязями на глибині 8,5-17,1 м. Однак у південно-західній частині цього повіту (між містами Херсон і Миколаїв) інколи всі зусилля відкрити прісну воду не глибше 57,6 м (27 сажнів) залишалися марними, оскільки на такій глибині часто з'являлися припливи солоної морської води. Спостерігалось засолення й раніше прісних ґрунтових вод у колодязях глибиною 4,3-11,7 м. Таку міграцію засолення пояснювали появою солонців в місцевостях, де раніше не було помітно їх присутності, оскільки останні можуть постійно змінювати своє розташування. Через це землі, що лежать нижче перших, отримують солонцюватість, а ті, що вище – позбавляються її (промиваються атмосферними опадами). Зазначалося, що солі належать глинистій складовій чорноземних ґрунтів, звідки вимиваються. Причому солонців найменше там, де степи порізані балками й відбувається дренаж. Безстічні «поди», куди впадають балки і приносять води, являють собою постійні солонці. Відзначалося також, що ґрунтові води і самі річки Херсонської губернії постійно зменшують водність так помітно, що на пам'яті ще живого покоління (у 1820-50-х рр.) сталися величезні зміни [7, с. 229-223]. На нашу думку, це було пов'язане не лише із стрімким землеробським освоєнням території (та вирубкою вододільних і байрачних лісів тощо), але й із тогочасними глобальними кліматичними змінами, що супроводжували закінчення «малого льодовикового періоду».

На *лівобережжі* Нижнього Дніпра (Дніпровський та Мелітопольський повіти Таврійської губернії), де поширені найбільші «поди» України, глибина колодязів тоді становила 8,5-21,3 м, інколи до 42,7 і навіть до 128 м (60 сажнів). Відзначалося, що вода в них здебільшого солонувата й гіркувата, причому чим глибший колодязь, тим вода прісніша й приємніша на смак [8]. Тобто достатньої якості прісну воду мали лише при досягненні транзитного потоку артезіанських вод Причорноморського артезіанського басейну.

Регулярні спостереження за водним режимом Дніпра були організовані з 1876 р., зокрема й на водомірних постах Нижнього Дніпра (Каховка, Херсон тощо). На час реалізації проекту Каховського гідровузла були гідрографи не більше як за 60 років. Докладні метеорологічні спостереження запроваджені ще пізніше (Гідрометслужба СРСР створена у 1929 р.). Згідно з ними середня багаторічна кількість опадів в причорноморських степах і Північному Криму оцінювалася у 250-300 мм на рік, чого загалом достатньо для землеробства, якби не велика мінливість випадіння опадів у річному та багаторічному розподілах із наявністю тривалих посух та суховіїв, чергуванням сприятливих та посушливих років (а також швидкого випаровування зі спекотних степових рівнин) [9, с. 26-28, 45-46]. Подальші спостереження встановили дещо більшу середню багаторічну кількість опадів в херсонських степах (згідно з відповідною картою) – у 300-400 мм на рік [10, с. 87].

Але власне такі умови ризикованого землеробства (з акцентом на розвиток потужного зернового господарства) були ледь не головним пропагандистським аргументом щодо запровадження «сталінського плану перетворення природи» – «великих будов комунізму» для зрошення і обводнення південних степів, зокрема й південноукраїнських [11], рис. 6.



Рис. 6. «Великі будови комунізму» в південноукраїнських степах (навчальний географічний атлас 1952 р., виділено заплановані гідровузли)

Іронія історії полягає в тому, що ці грандіозні плани побудови гідровузлів і каналів були спрощеною калькою з «передового капіталістичного досвіду» 1920-1940 рр. – великих американських гідропроєктів, зокрема в басейнах річок Колорадо і Теннесі, реалізованих для забезпечення стабільного водопостачання і енергопостачання зростаючої промисловості міст та збільшення сільськогосподарського виробництва (передусім для військових потреб під час II Світової війни). Тобто саме для виконання аналогічних завдань у триваючій світовій конфронтації створювався (на рівні вже давно морально застарілих технологій першої половини XX ст.), зокрема, і Каховський гідровузол.

Але навіть з пропагандистської навчальної карти (рис. 6) стає зрозумілим, що реалізований варіант цього гідровузла був не єдиним. Там показано, крім нього, два гідровузли на р. Конка (у плавнях та вище плавнів) та ще один на р. Молочна. У такому разі підпір Каховського гідровузла мав би бути помітно нижчим за реалізований.

Відомо, що подавалися на розгляд декілька різних варіантів проєктів створення Каховського водосховища, причому деякі з них передбачали повне або часткове збереження плавнів. Згідно з одним пропонувався *озерно-проточна система водоєм з постійним коливанням в ній рівня води*, що забезпечувало збереження озер, протоків і річечок, які тут впадали в Дніпро. Також зберігалися лісові масиви. Але для цього слід було побудувати мережу насосно-перекачувальних станцій, на експлуатацію яких знадобилася б майже вся електроенергія, яку мала виробляти майбутня Каховська ГЕС. У архівах

було знайдено карту 1931 р., підготовану як схему-додаток до одного з проєктів Каховського водосховища, розробленого «Государственным институтом по проектированию гидротехнических сооружений НКС СССР». Згідно з ним, пропонувалося валами-дамбами захистити від затоплення 50 000 га Конських плавнів, 36 000 га – Базавлуцьких і 20 000 га – Кам'янських (разом 1060 км², тобто 49,2% від реалізованої площі водосховища). Цей проєкт був відхилений через надмірні витрати електроенергії на перекачування води [12].

Але й за реалізованим проєктом практично вся згенерована у маловодні роки Каховською ГЕС електроенергія витрачалася на перекачування води в системи водопостачання і зрошення та на її відкачування з дренажних систем назад у водосховище.

Показово, що більша частина інформації щодо створення Дніпровського каскаду водосховищ у 1927-1978 рр. не була передана Україні спеціалізованими і військовими відомствами Росії, оскільки він побудований «по распоряжению руководства бывшего СССР как водный объект особо важного военно-стратегического значения, поэтому вся информация по нему глубоко засекречена» [12]. Та ж частина проєктної документації щодо створення Каховського гідровузла і ситуації до наповнення його водосховища, яка зберігалася в Україні в архіві харківського інституту «Укргідропроєкт», знищена пожежею внаслідок обстрілів російськими агресорами у 2022 р. Тому доводиться користуватися лише літературними джерелами та результатами власних розрахунків.

У [13, с. 247-248] зазначається, що після заповнення Каховського водосховища (до рівня 15 м у 1956 р.), в його береговій зоні рівень напірних підземних вод неогену (понтійські і сарматські відкладення) підвищувався зі швидкістю 0,1 м і більше на рік. Площа розвитку напірних вод збільшувалася в ширину на 1 км за рік. Такий підпірний вплив на правобережжі поширився до початку 1970-х рр. в ширину до 20-30 км, а на лівобережжі – до 40-50 км. Так, на лівобережжі у с. Чорнянка (приблизно 12 км від водосховища по трасі Північно-Кримського каналу) глибина до води в понтійських відкладеннях у свердловині спостереження зменшилася з 6 м до 0 м й досягла рівноважного рівня за 5 років (1956-1961 рр.) із виходом на денну поверхню. У с. Братолюбівка (15 км від затоки водосховища) глибина води у середньосарматських відкладеннях за три роки (1960-1963 рр.) зменшилася з 51,5 м до 49,75 м, так само, як і її мінералізація. Причому зменшення мінералізації неогенових вод на 10-70% на початок 1970-х рр. відбулося у стрічці шириною не меншій за 15 км по обидва боки водосховища.

Таким чином, після заповнення Каховського водосховища берегова зона стала областю гідрогеофільтраційного живлення та підпору і ґрунтових вод, і напірного комплексу горизонтів неогенових відкладів, що за 20 років призвело до регіонального підйому його рівнів на правобережній території на відстані до 30 км, а на лівобережній – до 60 км. Причому загальна площа підпору рівневої поверхні підземних напірних горизонтів (≈ 16000 км²) до 7 разів перевищила власне площу водосховища (2150 км²) та площу зони катастрофічного затоплення внаслідок руйнування Каховської ГЕС (до 2500 км²).

5. Розрахункова оцінка зміни гідрогеологічних умов за наступні 10-15 років. Наведені вище дані щодо просторово-часового розвитку процесів затоплення та підпірного впливу Каховського водосховища свідчать про

регіональний вплив його осушення і перетворення цієї території у регіональну дренаж для формування зони депресії напірних та ґрунтового водоносних горизонтів.

В еколого-геологічному плані зазначений процес переформування екопараметрів геологічного середовища у зоні впливу осушеного Каховського водосховища став новим етапом розвитку його ПТГС, який відзначатиметься зниженням стійкості та ослабленням екологічних функцій геологічного середовища щодо демпфування впливу природних (гідрометеорологічних, сейсмічних) і техногенних чинників впливу, особливо в межах проммайданчика Запорізької АЕС (ЗАЕС).

Головними першочерговими небезпечними інженерно-геодинамічними наслідками перетворення території осушеного Каховського водосховища у регіональну дренаж є наступні:

1) прискорене регіональне зниження рівнів у напірних водоносних горизонтах неогенового комплексу із ускладненням умов експлуатації свердловин водопостачання;

2) осушення ґрунтового водоносного горизонту у прибережних ділянках, зокрема й нижче за течією, з активізацією зсувно-ерозійних процесів на осушених ділянках схилів (Нікопольська залізниця, м. Херсон та інші);

3) розвиток процесів гідрогеофільтраційної компресії у слабопроникних просадкових лесово-суглинистих та пилувато-глинистих пливуноздатних ґрунтах (зокрема на проммайданчику Запорізької АЕС із небезпекою формування нерівномірних деформацій земної поверхні та підґрунтя її відповідальних споруд: реакторних блоків, градирень, турбогенераторних цехів, водоводів тощо).

Прогнозована середня швидкість зростання зони осушення (та збільшення глибини стояння ґрунтових вод) може бути оцінена за формулою (1):

$$V_t \approx 1,5 (a_y t)^{0,5}, \quad (1)$$

де: a_y – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів неогену у зонах з підвищеною водопроникністю, $a \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$, м²/добу;

t – час розвитку дренажючого впливу осушеного Каховського водосховища, дів.

Згідно з цією оцінкою швидкість зростання зони осушення зменшуватиметься експоненційно і після 10 років становитиме менше 6 м/добу (рис. 7).

Відповідно відбуватиметься й розширення фронту зони осушення, відстань до якого $R_t = f(T)$, оцінена за формулою (2):

$$R_t = 1,5 (a_y t)^{0,5}, \quad (2)$$

де: a_y – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів у зонах з підвищеною водопроникністю, $a \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$, м²/добу;

t – час розвитку дренажючого впливу Каховського водосховища.

Тобто основна площа зони осушення сформується за 1-2 роки (рис. 8).

Загалом за 10-15 років можливе наближення ситуації до ретро-гідрогеологічних умов (до часу заповнення Каховського водосховища), оскільки русло Нижнього Дніпра відновить свій регіональний дренажючий вплив. Але рівні ґрунтових вод у багатьох ділянках залишаться вищими за ретро-умови, оскільки залишилося багато технічних ставків зрошення, підтоплених ділянок, триває фільтрація з каналів тощо.

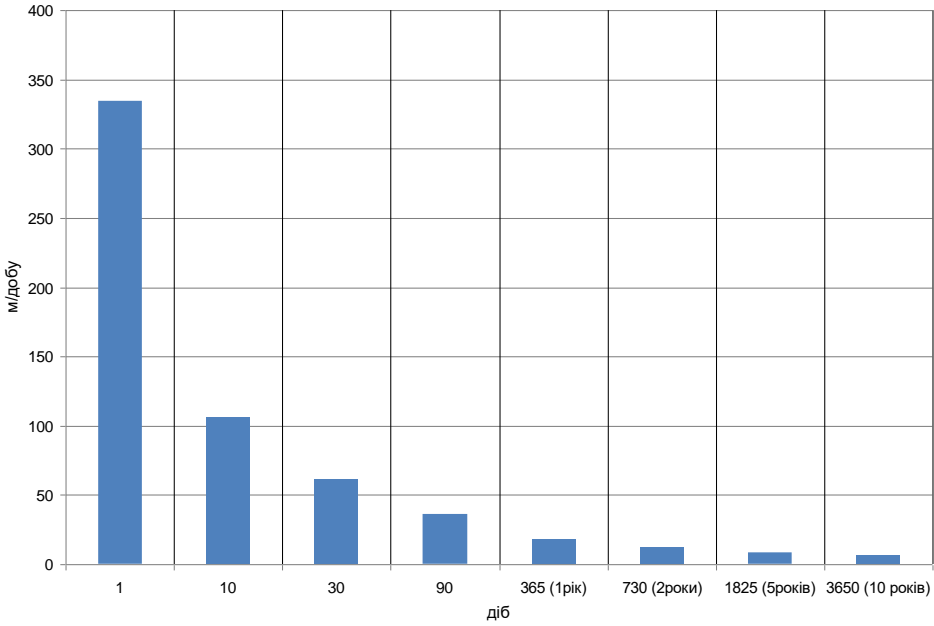


Рис. 7. Розрахункова швидкiсть руху зони осушення через зникнення Каховського водосховища, V_t , м/добу

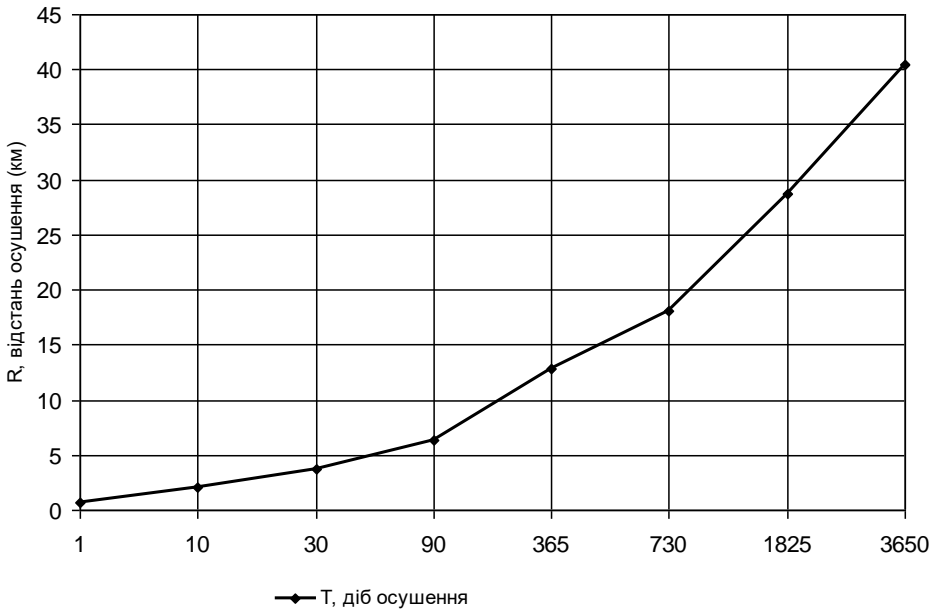


Рис. 8. Розрахункова динамiка просування фронту осушення $R_t = f(T)$ в зонi впливу колишнього Каховського водосховища

6. Довгостроковi природно-техногеннi загрози, що виникли внаслідок змiни гiдрологiчних умов. Змiна гiдрологiчних умов пiсля катастрофiчно швидкого осушення Каховського водосховища прогнозовано призведе до погiршення умов життєдiяльностi та господарювання за такими видами довгострокового негативного впливу:

- активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів (осідання, зсуви, у т.ч. на укосах дамб, зокрема ставка-охолоджувача Запорізької АЕС);
- погіршення інженерно-геотехнічних умов для забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури (зокрема, Запорізької АЕС) через зменшення сейсмічної інженерно-геологічної стійкості (до 1-2 балів за шкалою МСК-64);
- зменшення ресурсів питних підземних вод, локальне погіршення їх захищеності від поверхневого забруднення;
- вітро-пилова та водна міграція забруднених мулових мас у поверхневі та незахищені ґрунтові води, місцеві джерела водопостачання (побутові колодязі, ставки, свердловини).

Відповідно, основними реципієнтами такого негативного впливу будуть поверхневі, ґрунтові і підземні води, місцеве населення та об'єкти інфраструктури – житлові, промислові і транспортні споруди (мости, трубопроводи, канали, водоводи), зокрема й у об'єктів підвищеної небезпеки, таких як Запорізька АЕС.

У випадку Каховського водосховища особливе занепокоєння викликає розміщення в зоні його безпосереднього гідрогеодинамічного впливу проммайданчика Запорізької АЕС, в межах якого поширені чутливі до осушення та гідрогеофільтраційної компресії пливуноздатні ґрунти. Наявні дані, зокрема й періоду інженерно-геологічних вишукувань, свідчать, що ці ґрунти здатні до фільтраційного ущільнення з деформаціями підґрунтя й фундаментів розміщених на них споруд та земної поверхні.

Геомеханічні параметри відповідальних споруд Запорізької АЕС (реакторні відділення, градирні, водоводи та дамби ставка-охолоджувача та ін.) були визначені для умов усталеного режиму рівня води в Каховському водосховищі. Внаслідок порушення цього режиму неминуче страждатиме інженерна безпека інфраструктури та водокористувачі на берегах осушеного водосховища. З часом негативні наслідки проявляться на значно більшій відстані через медіатор геологічного середовища – внаслідок порушення усталеного протягом понад 65 років зв'язку між рівнями поверхневих і підземних вод та рівноважного (напружено-деформованого) геомеханічного стану нестійких водонасичених ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд (реакторних блоків, турбогенераторів тощо).

За результатами інженерних досліджень Харківського відділення інституту “Теплоелектропроект”, Київського інституту інженерних вишукувань, регіональних експедицій Мінгеології України, Інституту геологічних наук НАН України, у 1978-1987 рр. на території проммайданчика ЗАЕС було виявлено наступні критичні ускладнення інженерно-геотехнічних умов при будівництві й експлуатації Запорізької АЕС:

- наявність пухкої ґрунтово-породної зони на території проммайданчика та в середній частині греблі ставка-охолоджувача;
- розподіл нестійких у водонасиченому стані пісків від середньої крупності до пилюватих, від верху до низу греблі ставка-охолоджувача (що небезпечно в умовах перепаду рівнів Каховського водосховища);
- наявність в основі цієї греблі суглинків з домішкою рослинних залишків.

У 1993 році Харківський інститут «Енергопроект» виконав інженерно-геологічні вишукування у зв'язку з аварійним станом берегового укусу дамби ставка-охолоджувача на ділянці розміщення насосної станції-1 (НС-1). Найбільш вірогідними причинами, що викликали обрушення берегового укусу цієї дамби із деформацію бетонного покриття, були визначені:

- недостатнє ущільнення ґрунту зворотної засипки при будівельних роботах;
- зміна властивостей пісків зворотної засипки при самоущільненні (зменшення зчеплення, локальне пливунотворення, суфозія);
- вплив динамічних (вібраційних) навантажень від транспортних засобів в умовах нестійкості ґрунтів основи.

Тоді було зроблено наступний висновок: «Нестабільність гідродинамічного режиму водосховища внаслідок його аварійного осушення разом зі ставком-охолоджувачем обумовить небезпеку фільтраційної компресії підтоплених ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд АЕС (блоки, градирні, водоводи тощо), порушення режиму охолодження реакторних блоків та загрозу розплавлення робочих зон реакторів з аварійним викидом радіонуклідів у приземну атмосферу та поверхневі водойми» (якщо ті не будуть переведені у режим «холодної зупинки»).

За результатами цих досліджень було визначено, що намивні піски тіла греблі ставка-охолоджувача динамічно нестійкі. Тому будь-які динамічні і статичні навантаження впливають на стан і фізико-механічні властивості ґрунту, погіршують його геотехнічні показники.

У період 1978-2011 рр. дослідженнями вищеназаних установ встановлено зменшення потужності прошарків пухких пісків в тілі греблі ставка-охолоджувача внаслідок суфозії та фільтраційної компресії в середньому на 35-40%. У цей період (понад 30 років) інженерно-геологічні умови в тілі греблі залишалися нестабільними, тривав процес доущільнення, зберігалася можливість подальших деформацій.

Відповідно, було багаторазово підтверджено, що проммайданчик ЗАЕС перебуває під впливом таких небезпечних інженерно-геологічних процесів і геодинамічних явищ:

- поширення техногенних ґрунтів, які характеризуються підвищеним стисканням та низькою несучою здатністю, можливістю розрідження при динамічному впливі (удар, вибух, землетрус);
- ускладнення інженерно-гідрогеологічних умов внаслідок водних втрат із водонесучих комунікацій, формування техногенного теплового поля;
- прояв суфозійних процесів і пов'язаних з ними нерівномірних просідань ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд.

Аналіз дренаючого впливу аварійного осушення чаші Каховського водосховища засвідчує, що критичне погіршення інженерно-геологічних умов експлуатації об'єктів інфраструктури внаслідок зниження рівнів підземних вод у зоні його підпірного впливу обумовлене дією наступних чинників:

1) велика площа зниження рівня підземних вод (до 16000 тис. км²), що майже у 8 разів перевищує площу аварійного затоплення вздовж берегових зон р. Дніпро, де будуть відбуватися довгострокові просадки раніше підтоплених і затоплених лесових ґрунтів;

2) значний орієнтовний час зниження рівнів напірних вод (T_{zn}) у колишній зоні підпору Каховського водосховища на відстані до 25 км ($L_{п} = 25000$ м). Він становить:

$$T_{zn} = (L_{п}^2) : 2,25 a_y = [(25000)^2] : 2,25 \times (a_y) \approx 1470 \text{ діб} \approx 4 \text{ роки},$$

де: a_y – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів у зоні підпірного впливу Каховського водосховища, $a_y \approx 2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{добу}$.

Через це просторово-часовий розвиток у перезволоженому лесовопородному масиві небезпечних для споруд екзогеодинамічних процесів (осідань, зсувів, карстово-суфозійних деформацій тощо) буде мати стохастичну (невпорядковану) динаміку і довгостроковий період активізації у прибережних зонах р. Дніпро та на проммайданчику Запорізької АЕС.

І це, на жаль, не все. В умовах довгострокового підтоплення на території водно-екологічного впливу водогосподарського комплексу Каховської ГЕС та порушення водо-теплопереносу у лесопородному масиві (через системи зрошення, канали тощо) ще задовго до його руйнування відбулося суттєве погіршення інженерно-сейсмогеологічної стійкості підґрунтя та відповідальних споруд Запорізької АЕС (рис. 9), розташованих на пливуноздатних ґрунтах у зоні 6-бальних регіональних (транзитних) землетрусів (за шкалою МСК-64).

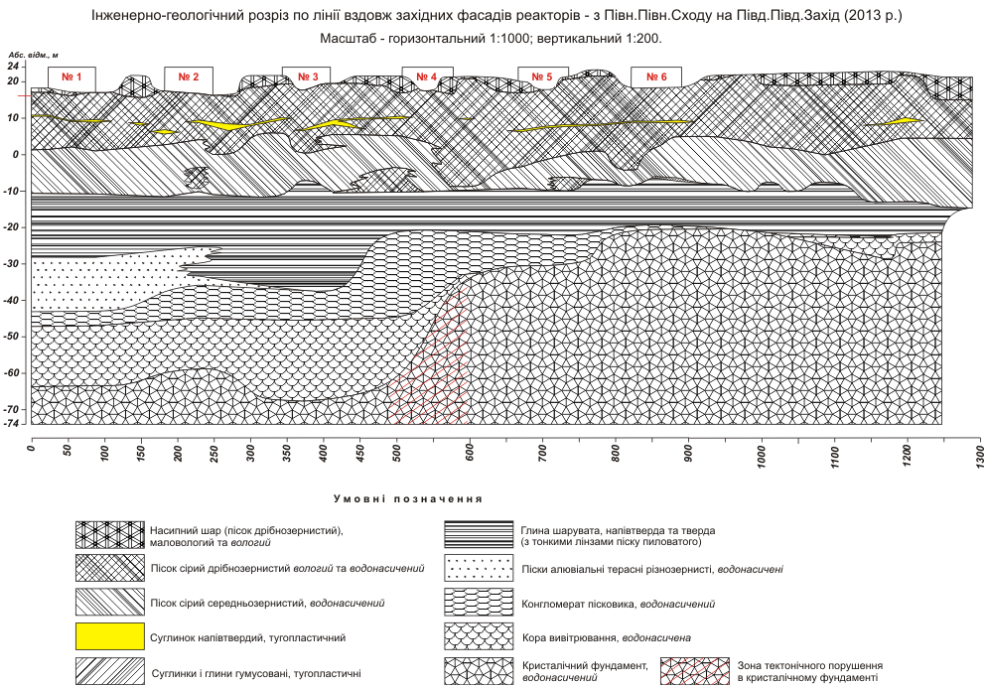


Рис. 9. Узагальнений інженерно-геологічний розріз водонасиченого підґрунтя проммайданчика Запорізької АЕС під час існування Каховського водосховища з НІРР = 16 м

Джерело: [14], Графічний Додаток 24, Лист 2.

Причому низька проникність та фільтраційна анізотропія водонасичених лесово-суглинистих порід сприяє довгостроковому збереженню підйома

порового тиску у водонасиченій зоні та накопиченню впливу афтершоків. Аналогічно тому, як це відбулося під час транзитного румунського землетрусу 1986 р. у м. Херсон, коли в зволоженому лесовому ґрунті виникло явище тиксотропії, зменшилася його пористість та відбувся різкий підйом рівня підґрунтових вод із затопленням підвальних приміщень [6].

Досвід вивчення інженерно-геодинамічного прояву транзитного землетрусу на проммайданчику ЧАЕС (зона Вранча, Румунія, 30.05.1990) дає змогу визначити орієнтовний час збереження «стрибка» порового тиску T_c від першого максимального сейсмічного поштовху у межах підґрунтя великої споруди. Він може бути розрахований за відомими залежностями (3-5) [15].

Згідно з ними час t зниження порового тиску в слабопроникних породах $P_{пор}$ з урахуванням мінімального розміру будівлі $S_{min} \approx 80$ м розраховується наступним чином:

$$t \approx \frac{S^2}{2,25a}, \quad (3)$$

де: a – рівнепробудність слабопрониклих стиснутих порід в підґрунті блоку ЧАЕС, орієнтовно:

$$a = \frac{kh}{\mu}, \quad (4)$$

де: k – коефіцієнт фільтрації слабопрониклих порід (суглинків, лесів, піщано-глинистих прошарків), $k \approx 1,0$ м/добу;

h – товщина шару ґрунтового горизонту за умови його контакту з дном фундаменту, $h \approx 20$ м;

μ – коефіцієнт водовіддачі, $\mu \approx 0,1$.

Тоді за попередніми оцінками:

$$t \approx \frac{80^2 \cdot 10^{-1}}{2,25 \cdot 1,0 \cdot 20} \approx 14 \text{ діб}. \quad (5)$$

Таким чином, повільне зменшення порового тиску може бути критичним фактором довгострокової реакції на афтершоки, в тому числі на техногенні вібрації (транспорт, будівельні роботи, вибухи), а тому й фактором зниження стійкості споруд Запорізької АЕС внаслідок додаткового розуцільнення порід підґрунтя.

7. Комплекс соціально-економічних загроз через наслідки осушення Каховського водосховища і можливий варіант їх подолання. Негативні економічні і оцінені соціальні наслідки через осушення Каховського водосховища формуватимуться за такими узагальненими позиціями: *прямі втрати* (явно завдані збитки, втрата майна, споруд, активів, втрата доходів у поточному фінансовому році), *опосередковані втрати* (витрати через ускладнення умов життєдіяльності і господарювання, наприклад енергопостачання, у поточному фінансовому році), *мультиплікатор втрат* (зокрема, не отриманий і недоотриманий дохід у наступних періодах), *додаткові видатки і капіталовкладення* (незаплановані витрати в поточному і наступних періодах) на пом'якшення і ліквідацію наслідків, компенсацію втрат. Причому останню позицію некоректно розглядати виключно як негатив, оскільки вона значною мірою є «інвестицією в майбутнє».

На нашу думку, основні очікувані негативні соціально-економічні наслідки розвиватимуться за такими видами збитку і реципієнтів впливу:

- порушення і вихід з ладу систем питно-господарського та технічного водопостачання, зав'язаних на водосховище (втрата активів, витрати на реконструкцію та капіталовкладення у введення в експлуатацію нових джерел, зокрема підземних);

- порушення енергопотоків через руйнування ГЕС та зупинку АЕС і ТЕС (втрата активів, витрати на збалансування енергопотоків, капіталовкладення у реконструкцію постачання та генерування, зокрема водоєм охолодження);

- порушення роботи промислових підприємств через обмеження водо- і енергопостачання (втрата доходів, зростання безробіття тощо);

- велике зменшення площ зрошуваних земель (втрата активів, втрата доходів, зростання безробіття, витрати і капіталовкладення у нові технології землеробства тощо);

- погіршення умов судноплавства (втрата доходів і витрати на його відновлення);

- погіршення стійкості систем і споруд критичної та іншої інфраструктури (витрати на обстеження, витрати на дослідження, капіталовкладення для компенсування загроз);

- катастрофічне погіршення умов ведення традиційної господарської діяльності в зоні впливу осушення (спеціалізованого сільського господарства, рибництва і рибальства, присадибного господарства), зокрема посилення вразливості до глобальних змін клімату (втрата доходів і активів, витрати на компенсування);

- системна (зокрема структурна) криза місцевої економіки через зменшення природно-ресурсного потенціалу: земельного, водного, транспортного тощо (втрата активів і доходів, витрати на пом'якшення, капіталовкладення у структурні зміни);

- погіршення соціальних (передусім втрата звичних робочих місць) і медичних (через зниження якості води та харчів) умов життєдіяльності місцевого населення, рекреаційних ресурсів тощо (зменшення доходів домогосподарств і заощаджень, розпродаж активів, збільшення витрат на життєзабезпечення).

Криза місцевої економіки у будь-якому разі затягнеться на роки, причому вийти з неї навряд чи вдасться на консервативній основі простого відновлення доаварійних виробництв і напрямів господарювання в умовах різкого зменшення ресурсів водопостачання, нестачі населення (робочої сили), що здебільшого мігрувало з цієї території через руйнівні бойові дії та погіршення життєвих умов. Тому очікуємо неминучої зміни галузевого складу місцевої аграрної економіки зі зменшенням площ зрошуваного землеробства (особливо зернового господарства). Натомість можуть отримати розвиток масштабні фіто- і лісомеліоративні, гідромеліоративні та гідротехнічні роботи на сучасній технологічній основі в рамках програм ландшафтної реабілітації регіону.

Потребуватиме модернізаційної реконструкції й металургійний комплекс Криворіжжя та Нікопольщини, як і більшість крупних підприємств регіону, з переходом на сучасні більш ресурсоощадливі, зокрема водоощадливі технології.

За попередньою оцінкою НБУ економічної шкоди, завданої у зоні впливу зруйнованого Каховського гідровузла, негативний вплив її на економіку

України в цілому у короткостроковому періоді буде обмеженим. У зменшення реального ВВП України в 2023 р. він становитиме 0,2%, вплив на зростання інфляції – 0,3 процентного пункту, максимальні втрати в аграрному секторі в 2023 р. очікуються у \$0,4 млрд, в 2024 р. – у \$0,7 млрд [16].

Безпосередні економічні збитки, викликані підривом Каховської ГЕС, за даними дослідження KSE Institute, становлять майже \$4 млрд. У тому числі прямий збиток від затоплення житлових будинків (їх постраждало близько 20 000) і пов'язаної з ними інфраструктури оцінюється у \$950 млн (більша частина зосереджена на лівому березі Дніпра). Промисловому сектору та іншим підприємствам було завдано прямих збитків на суму, яка, за оцінками, дорівнює \$150 млн. Очікувані втрати від негативних змін у тваринництві через припинення водопостачання з водосховища сягнуть \$200 млн на рік. Втрата іригаційних систем (на площі майже 600 000 га) скоротить обсяг експорту сільськогосподарської продукції з України у 2023 році на \$1,5 млрд. На енергетичний сектор припадає прямих \$600 млн втрат. Щорічні економічні втрати держкомпанії «Укргідроенерго» оцінюються у додаткові \$100 млн. Для створення нової ГЕС тієї ж встановленої потужності знадобиться майже \$1 млрд (за оцінками «Укргідроенерго» на консервативне відновлення Каховського гідровузла \approx \$1,8 млрд). Для усунення наслідків руйнування ГЕС Комітет із питань бюджету парламенту України в середині червня 2023 р. схвалив виділення приблизно \$40 млн на будівництво магістральних водопроводів з інших джерел. Крім усього цього, очікувана сума шкоди, заподіяної навколишньому середовищу, становить приблизно \$2 млрд, а вартість очищення Дніпра оцінюється в \$1,5 млрд [17]. Тобто загальна сума безпосередньої шкоди від руйнування Каховського гідровузла у короткостроковому періоді сягає \$5,5 млрд.

Тому зрозуміло, що без великих інвестицій в господарство постраждалого регіону його потреби не будуть належним чином задоволені. Українська економіка в умовах руйнівної війни фінансово балансується лише безумовною допомогою наших західних союзників. Але така ситуація не може тривати нескінченно, доведеться конкурувати.

Багаторічний проєкт пост-катастрофічної реанімації території (економічної, соціальної, екологічної) зони впливу колишнього Каховського гідровузла теоретично може зацікавити іноземних інвесторів своєю масштабністю. Але щоб реально залучити у нього іноземні інвестиції, доведеться створити для іноземних інвесторів вигідні та сприятливі цивілізовані умови (хоча б: забезпечити безпеку і юридичний захист капіталовкладень під державні гарантії, низькі і стабільні податкові та митні ставки, належні юридичні та регуляторні умови; мінімізувати транзакційні витрати, корупцію та придушити рейдерство).

Загалом можливі два базові (і полярні) варіанти відновлення Каховського гідровузла: консервативний «як було» з реставрацією попереднього комплексу еколого-техногенних та соціально-економічних небезпек та соціально-екологічно оптимізований на основі *системи* руслових гідровузлів й прогресивних технологій водокористування – крапельне зрошення, зменшення втрат у інженерних мережах, відновлення місцевої річкової мережі в якості природних дрен тощо.

Наша орієнтовна оцінка капіталовкладень у два полярні варіанти економічної реабілітації ураженого регіону дозволяє припустити, що за

другим варіантом вона більша у 2-3 рази (щонайменше \$2-3,6 млрд). Але й очікуваний ефект перспективного соціально-економічного розвитку регіону за другим варіантом також очікується значно більшим (у середньо- і довгостроковій перспективі) – і через залучення більшого «донорського» капіталу з більшими виробничими потужностями, зайнятістю та тривалістю проекту, і через накопичення значно більшого еколого-ресурсного потенціалу (замість його посиленого розграбування за першим варіантом).

Висновки

1. Каховське водосховище до свого осушення було базовим компонентом для формування екологічних функцій геологічного середовища у зоні впливу складної природно-техногенної геосистеми в складі Каховського гідровузла з ГЕС, його водосховищем, зрошувальними і водогосподарськими системами, Запорізькою АЕС, ТЕС (та їх геологічного середовища).

2. Відновлення гідротехнічних та водно-господарських параметрів Каховського водосховища (висоти підпору, об'єму, площі водної поверхні, систем зрошення) у попередніх значеннях за консервативним варіантом призведе до вторинного водонасичення просадкових лесово-суглинистих і пилувато-глинистих пливуноздатних порід, що зазнали деформацій при первинному затопленні та наступному осушенні. Цим розпочнеться новий етап формування небезпечних порушень напружено-деформованого стану прибережних схилів, підгрунтя відповідальних споруд Запорізької АЕС та у прилеглих містах і селищах.

3. Понад те, екологічні, гідрогеологічні та інженерно-геологічні параметри геосистеми Нижнього Дніпра обумовлені її розташуванням у зоні повільного транзиту та висхідного розвантаження вод (в Присивашші), що обумовлює активізацію підтоплення і затоплення земель, зокрема сільськогосподарських, та засолення ґрунтів при зарегулюванні поверхневого стоку і збільшенні інфільтраційного живлення при зрошенні та у забудові, особливо промислово-міській. Що й відбудеться при відновленні попередніх параметрів Каховського гідровузла. Тобто в цьому разі очікується подальше ускладнення гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов, збільшення інтенсивності засолення ґрунтів та погіршення сейсмічної й інженерно-геологічної стійкості споруд, зокрема критичної інфраструктури.

4. За таких умов сумарні супутні втрати внаслідок реалізації консервативного варіанту «як було», особливо за неоптимальними тимчасовими схемами («давай-давай»), можуть перевершити економічний ефект від реанімації доаварійної економіки у зоні підпору Каховського гідровузла вже у середньостроковій перспективі (тобто за 5 років відновлення плюс 5 років формування наслідків).

5. Соціально і екологічно сприятливий варіант економічної реабілітації ураженого регіону можливий лише на новій (сучасній) ідеологічній (європейській, а не радянській) та технологічній основі. Згідно з нею, він має відбуватися засобами, зокрема: створення каскаду низькопідпірних (4-5 м) руслових водосховищ із шлюзами та малими ГЕС, реконструкції дамб прирічних ставків, системи водоводів (у трубопроводи) і проміжних водосховищ, переведення побутового водопостачання на підземні джерела, зрошуваних земель – на крапельне зрошення (замість сьогоднішнього дощування), екологічної рекультивациі та заліснення осушених земель тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трагедія Великого Лугу. Копачі вже поїхали... Але! (18.06.2023). Електронний ресурс: <http://chas-time.com.ua/liudyna/tragediya-velikogo-lugu-kopachi-vzhe-pojikhali.html>
2. Чому не слід відновлювати Каховське водосховище. Електронний ресурс: <https://eco.rayon.in.ua/blogs/616673-chomu-ne-slid-vidnovlyuvati-kakhovske-vodoskhovishche>
3. Кабмін схвалив проєкт з відбудови Каховської ГЕС з експериментальними термінами (18.07.2023). Лія Ільченко. «Економічна правда». Електронний ресурс: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/07/18/702335/>
4. Бакшеев Е.А. Днепровские водохранилища и их народно-хозяйственный эффект. – К.: Довіра, 2008. – 159 с.
5. Рогожин О.Г., Яковлев Є.О., Крета Д.Л. Оновлена електронна карта прояву та розвитку підтоплення за причинами в Україні // Екологічна безпека та природокористування, вип. 2 (46), 2023. С. 124-137.
6. Еволюція гідрогеологічного стану під впливом урбанізації і меліорація ландшафту на території міста Херсона / В.О. Ушкаренко, В.В. Морозов, В.В. Жужа [та ін.] // Таврійський науковий вісник: зб. наук. пр. – Херсон: Айлант, 2002. – Вип. 21. – С. 112-125.
7. Материалы для географии и статистики России, собранные офицерами Генерального штаба. Херсонская губерния в 2 ч. / за ред. А. Шмидта. – СПб.: Военная типография, 1863. – 632 с.
8. Таврическая епархия / [Соч.] Гермогена, еп. Псковского и Порховского, бывшего Таврического и Симферопольского. – Псков : тип. Губ. правл., 1887. [2], IV, 520 с. Часть первая. Географическое положение Таврической губернии и общее понятие о ней: А. Северная часть Таврической губернии. Пространство ее, местность, почва земли, межевание, надел и ценность ее.
9. Гаврилов А.М., Попов И.В. Днепр идет в степь. Ленинград. Гидрометеиздат, 1951. – 63 с.
10. Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. АН УССР, Министерство высшего и среднего специального образования УССР. ГУГК, Москва, 1978. – 183 с. (Для служебного пользования, № 004045).
11. Яковлев А. Великие стройки коммунизма. Изд.-во ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». М., 1951. – 70 с.
12. Куперман Юрій. Трагедия Великого Луга (3.04.2016). Електронний ресурс: https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija_velikogo_luga.html
13. Гидрогеология СССР. Том V, Украинская ССР / Ред. Ф.А. Руденко. «Недра», М.: 1971. 614 с.
14. Геолого-геофизические и сейсмологические исследования ближней зоны и промплощадки Запорожской АЭС. Инженерно-геологические разрезы в пределах промплощадки ЗАЭС, разрез А-А. / Дополнительные исследования сейсмических и сеймотектонических условий площадки Запорожской АЭС. Создание геодинамического полигона. 000 «Фундаментстроймакс», 2013.
15. Яковлев Є.О., Рогожин О.Г. Фактори і можливі наслідки регіональних змін інженерно-геотехнічного стану лесів та лесово-суглинистих порід України / Є.О. Яковлев, О.Г. Рогожин // Екологічна безпека та природокористування. – К. – Вип. 3(27). – С. 5-23.
16. Последствия разрушения Каховской ГЭС для ВВП Украины. Електронний ресурс: https://iee.org.ua/ru/prog_info/62785/
17. \$4 млрд уже заподіяної шкоди, довгострокових витрат ще на \$2 млрд. Яка ціна руйнування греблі Каховської ГЕС. Підсумував дослідник із фінансових ринків Сімеон Дянков. Forbes. 14.07.2023. Електронний ресурс: <https://forbes.ua/money/yakatsina-ruynuvannya-grebl-i-kakhovskoi-gidroelektrostantsii-14072023-14818>

Стаття надійшла до редакції 01.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.11.2023

REFERENCES

1. The "Great Meadow" Tragedy. The diggers have already gone here ... But! Retrieved 18.06.2023 from: <http://chas-time.com.ua/liudyna/tragediya-velikogo-lugu-kopachi-vzhe-pojikhali.html>
2. Why the Kakhovsky reservoir should not be restored. Retrieved from: <https://eco.rayon.in.ua/blogs/616673-chomu-ne-slid-vidnovlyuvati-kakhovske-vodoskhovishche>
3. Ilchenko Leah. The Cabinet of Ministers approved the Kakhovskaya HPP reconstruction project with experimental terms. "Ekonomichna pravda". Retrieved 18.07.2023 from: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/07/18/702335>
4. Baksheev E.A. (2008). Dnieper reservoirs and their national economic effect. Kyiv: Dovira. 159 p. [in Ukrainian].
5. Rogozhin, O.G., Yakovlev, E.O., & Kreta, D.L. (2023). The updated electronic map of the overwetting manifestation and development by causes in Ukraine. *Environmental safety and and natural resources*, 2(46), 124-137 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.124-137>
6. Ushkarenko, V.O., Morozov, V.V., Zhuzha, V.V. [et al.] (2002). Evolution of the hydrogeological state under the influence of urbanization and landscape improvement in the territory of the city of Kherson. *Tavrii scientific bulletin*, 21, 112-125 [in Ukrainian].
7. Materials for geography and statistics of Russia, collected by officers of the General Staff. Kherson province in 2 h. (1863). A. Schmidt (Ed.). St. Petersburg. Military printing house. 632 p. [in Russian].
8. Hermogen, ep. Pskov and Porkhov, the former Tauride and Simferopol (1887). Tauride diocese. Pskov. Printing house of the provincial government. [2], IV, 520 p. Part one. Geographical position of the Tauride province and the general concept of it: A. The northern part of the Tauride province. Its space, terrain, soil of the earth, surveying, putting on and its value [in Russian].
9. Gavrillov, A.M., & Popov, I.V. (1951). The Dnieper goes to the steppe. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
10. Atlas of natural conditions and natural resources of the Ukrainian SSR (1978). Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Ukrainian SSR. GUGK. Moscow. 183 p. For official use, No. 004045 [in Russian].
11. Yakovlev, A. (1951). Great construction sites of communism. Publishing house Central Committee of the Komsomol. Moscow: "Molodaya gvardiya" [in Russian].
12. Kuperman, Yuri. The tragedy of "Great Meadow". Retrieved 3.04.2016 from: https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija_velikogo_luga.html
13. Rudenko, F. (Ed.). (1971). Hydrogeology of the USSR (Vol. V, Ukrainian SSR). Moscow: "Nedra" [in Russian].
14. Geological, geophysical and seismological studies of the near zone and industrial site of the Zaporozhye NPP (2013). Engineering-geological sections within the ZNPP industrial site, section A-A. Additional studies of seismic and seismotectonic conditions of the Zaporozhye NPP site. Creation of a geodynamic polygon. 000 "Fundamentstroymaks" [in Russian].
15. Yakovlev, E.O., & Rogozhin, O.G. (2018). Factors and possible consequences of regional changes of the engineer-geotechnical state of loess and loess-loamy rocks in Ukraine. *Environmental safety and and natural resources*, 3(27), 5-23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.3.5-23>
16. The consequences of the Kakhovskaya hydroelectric power station destruction for Ukraine's GDP. Retrieved from: https://iee.org.ua/ru/prog_info/62785/
17. \$4 billion in damage already caused, long-term costs for another \$2 billion. What is the price of destroying the Kakhovskaya HPP dam. Financial market researcher Simeon Dyankov summed it up. Forbes. Retrieved 14.07.2023 from: <https://forbes.ua/money/yakatsina-ruynuvannya-grebl-i-kakhovskoi-gidroelektrostantsii-14072023-14818>

The article was received 01.09.2023 and was accepted after revision 29.11.2023

Яковлев Євген Олександрович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

Рогожин Олексій Георгійович

доктор економічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-9368> **e-mail:** olexarog@gmail.com

Стефанишин Дмитро Володимирович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** d.v.stefanyshyn@gmail.com

Крета Дмитро Леонідович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5897-0008> **e-mail:** dim.leo@gmail.com