

<https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.003>

В.О. Ємельянов, чл.-кор. НАН України,
д-р геол.-мін. наук, голов. наук. співроб., проф.
e-mail: volodyasea1990@gmail.com

ORCID 0000-0002-8972-0754

Є.І. Наседкін, канд. геол. наук, ст. дослідник
e-mail: nasedevg@ukr.net

ORCID 0000-0003-2633-9291

Т.С. Куковська, канд. геол.-мін. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: t.kukovska@gmail.com

ORCID 0000-0001-7532-8885

А.В. Мокієнко, доктор мед. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: mokienkoav56@gmail.com

ORCID 0000-0002-4491-001X

ДНУ «МорГеоЕкоЦентр НАН України»

вул. Олеся Гончара, 55 б, Київ, 01054, Україна

ВПЛИВ ВОЄННИХ ДІЙ НА МОРСЬКІ ТА ПРИБЕРЕЖНІ ГЕОЕКОСИСТЕМИ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я ТА СУМІЖНОГО ШЕЛЬФУ ЧОРНОГО МОРЯ

У статті розглянуто різноманітні аспекти впливів широкомасштабної воєнної агресії РФ на морські та прибережні геоекосистеми Північно-Західного Причорномор'я і суміжного шельфу Чорного моря. Показано, що до основних механізмів негативного впливу воєнних дій належать: руйнування енергетичної, економічної, комунальної та соціальної інфраструктури, що призвело до погіршення якості питної води через надходження токсикантів, важких металів, перхлоратів, вибухових компонентів та органічних домішок; підвищилися ризики інфекційних і санітарно-епідемічних загроз через знищення систем водопостачання й водоочищення; токсичний вплив на харчові ресурси, зокрема рибу та продукти моря, що здатні акумулювати забруднювачі; ризики для органів дихання та серцево-судинної системи, пов'язані з аерозолями вибухів і горіння; дія акустичних і психологічних стресорів, які посилюють соціально-екологічну вразливість населення.

Показано, що наслідки цих впливів мають довготривалий характер: забруднення здатне акумулюватися, в основному, у геологічному середовищі геолого-екологічних субсистем геоекосистем Північно-Західного Причорномор'я і прилеглого шельфу Чорного моря, змінювати біогеохімічні цикли та спричиняти вторинні хвилі токсичного навантаження. Водночас підвищений шумовий фон воєнних дій призводить до диспозиції та загибелі морських ссавців, зокрема дельфінів. Сукупність забруднення повітряного, водного і геологічного середовищ геоекосистем та їхніх відповідних субсис-

Цитування: Ємельянов В.О., Наседкін Є.І., Куковська Т.С., Мокієнко А.В. Вплив воєнних дій на морські та прибережні геоекосистеми Північно-Західного Причорномор'я та суміжного шельфу Чорного моря. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2025. **21**, № 2: 3—22. <https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.003>

тем, які досліджено, руйнування приморської та морської соціальної та економічної інфраструктури, в тому числі природоохоронної, формує ризику для здоров'я населення приморських територій, які значно посилюються в зонах як з високою щільністю постійного населення, так і вимушених міграційних потоків, залежністю від місцевих водних ресурсів і відсутністю необхідної інфраструктури охорони здоров'я тощо. У такий спосіб екологічні наслідки війни стають частиною ширшої моделі загроз довкіллю й здоров'ю, що потребує інтеграції медико-екологічних підходів у систему моніторингу та управління ресурсами прибережних геоекосистем.

Ключовими факторами довгострокової деградації геоекосистем Північно-Західного Причорномор'я і суміжного шельфу Чорного моря внаслідок війни можуть стати: накопичення забруднень у геологічному середовищі її геолого-екологічної субсистеми; втрата відтворювальних ділянок цінних видів біоти та деградація біотопів; зміна траєкторій твердого стоку та літодинамічні збої; ризики від затонулих суден і вибухонебезпечних предметів, що потрапили до складу морської геолого-екологічної субсистеми, та обмеженість даних, необхідних для ефективного управління ресурсами й функціонування геоекосистем.

Обґрунтовано прикладне значення отриманих результатів і надано практичні рекомендації щодо їх використання.

Ключові слова: воєнні дії, геоекосистеми, екологічний моніторинг, забруднення, затонулі судна, медико-екологічні підходи, Північно-Західне Причорномор'є, природоохоронні території, ризики, шельф Чорного моря.

Вступ

Війна — це не лише гуманітарна, політична та соціальна катастрофа, а й серйозний екологічний чинник, здатний змінити на різний за тривалістю час природне середовище як великих регіональних геоекосистем, так і їхніх відповідних середовищних субсистем. Наслідки воєнних дій на геоекологічні системи (ГЕС) позначаються в тій чи іншій мірі як на всій ГЕС в цілому, так і на її складових різних рівнів і масштабів. Під впливом війни зазнають змін функції ГЕС [1], їхні природні ресурси (харчові, мінеральні, водні, енергетичні, біологічні, культурні тощо), а також пов'язані з їх використанням екосистемні послуги. Що стосується наслідків війни для біорізноманіття, то вважаємо, що ця проблема, за низкою причин, потребує спеціального вимогливого вивчення, тому автори в цій статті лише коротко її торкнулися.

У часовому вимірі дія війни на ГЕС будь-якого походження і рівня є складним, зазвичай довготривалим і важко прогнозованим, оскільки має певні «відтерміновані» наслідки. Останнє вимагає визначення та проведення регулярних досліджень стану найважливіших показників змін у складі та функціонуванні природних ГЕС та їхніх субсистем, спеціального моніторингу тощо. З огляду на це, особливої актуальності набуває формування узгоджених методологічних підходів до прогнозування повоєнних трансформацій ГЕС, у тому числі таких, що проявляються через роки або навіть десятиліття після припинення активних бойових дій. До них належать зміни гідрологічного режиму й руслових процесів, переформатування ландшафтно-геохімічних потоків седиментаційної речовини, накопичення токсичних компонентів у ґрунтово-рослинному покриві суходолу, геолого-екологічних субсистемах ГЕС морських та інших водних басейнів з перехідними включно, деградація їхніх структур з біотичними включно, порушення трофічних й енергетичних зв'язків тощо.

Важливо підкреслити, що дія воєнних чинників не є лінійною. Вона включає як миттєві руйнівні ефекти (вибухові впливи, пожежі, руйнування інфраструктури), так і повільні, але системні зміни, зумовлені тривалим обмеженням

природокористування, порушенням екологічних бар'єрів, змінами умов міграції забруднювачів і функціонування ґрунтово-гідрологічних систем. У результаті просторово-часова структура будь-якої ГЕС набуває високої гетерогенності, що потребує інтегрованого аналізу та використання комплементарних методів спостереження — від дистанційного зондування до хімічно-аналітичних і біоіндикаційних підходів, а також тривалого моніторингу.

У загальному форматі вплив війни на природні ГЕС можна умовно поділити на утворення та накопичення в часі та просторі специфічних негативних фізичних, геохімічних, екологічних, біологічних, кліматичних та інших наслідків. Позаприродні фізичні негативні впливи або значні зміни природного середовища та його складових можуть призводити до знищення або руйнування окремих середовищних і біологічних субсистем, аквальних субсистем як їхньої складової, деградації геолого-екологічних субсистем, зокрема ґрунтів суходолу та донних відкладів тощо. Хімічне забруднення включає негативні зміни як в складі геологічного і атмосферного, так і водного середовищ відповідних субсистем ГЕС, в тому числі підземних вод. Крім того, хімічне забруднення передбачає «відкладений в часі» негативний вплив на існування та функціонування відповідних біоєкосистем та окремих популяцій біоти. Прямим наслідком хімічного забруднення слід вважати знищення суб'єктів біорізноманіття — живих організмів безпосередньо флори й фауни, оселищ і міграційних шляхів біоти, генів, видів, а також екологічних систем, складовою яких вони є.

Наслідками негативного впливу на аероекологічну субсистему ГЕС, які розглянуто, окрім безпосереднього забруднення повітряного середовища, є регіональні та локальні зміни клімату, оскільки великі пожежі або знищення рослинності можуть змінювати кліматичні, особливо, мікрокліматичні характеристики.

Окремим рядком можна позначити соціо-екологічні аспекти, такі як зростання навантаження на екосистеми регіонів, що приймають переміщене населення, втрата контролю за природоохоронною діяльністю тощо.

В аналітичному контексті оцінювання впливу війни на ГЕС передбачає розроблення науково обґрунтованих сценаріїв відновлення та природоохоронного менеджменту, які мають враховувати потенційні ризики повторної появи в обігу мобільних забруднювачів, можливі структурні перебудови ГЕС, їхніх субсистем і кордонів між ними, а також необхідність адаптації до майбутніх кліматичних й антропогенних змін. Тільки системне поєднання комплексного моніторингу, багатоаспектного аналізу та міждисциплінарних підходів здатне забезпечити наблизення до коректної оцінки ступеня порушення структури і функціонування ГЕС Північно-Західного Причорномор'я (ПЗП) і ГЕС північно-західного шельфу Чорного моря (ПЗШЧМ), їхніх середовищних, речовинних і процесуальних субсистем, сформувані пропозиції щодо ефективної стратегії їх стійкого відновлення.

Війна в Україні спричинила величезні масштаби екологічних порушень, зокрема, вона суттєво посилила антропогенний тиск на прибережні та шельфові субсистеми ГЕС ПЗП та ГЕС Чорного моря, спричинивши хімічне забруднення, фізичні порушення донних і прибережних біотопів, а також зміни у режимах природоохоронного контролю та моніторингу. Особливо вразливим виявився північно-західний сектор чорноморського шельфу, який характеризується мілководністю, складною літодинамікою та значною залежністю від стоку вели-

ких річкових систем (Дунаю, Дністра та Дніпра). Власне поєднання цих факторів визначає підвищену чутливість регіону, що досліджувався, до зовнішніх впливів, включно з воєнними.

Масштаб і комплексність впливів воєнних дій (ВВД) на геоекосистеми ПЗП та, зокрема, прилеглого шельфу Чорного моря викликали нагальну потребу у системному підході до їх оцінки та моніторингу. Незважаючи на наявні дані про забруднення природного середовища, деградацію відповідних природних субсистем та їхніх компонентів, а також руйнування техногенної інфраструктурної системи та її компонентів, на теперішній час, наразі, відсутня цілісна методологія, яка дозволяє комплексно оцінити рівень створеної ВВД небезпеки та просторові закономірності цих впливів.

Матеріали та методика

Дослідження, що покладено в основу даної статті, базується на систематичному аналізі наукових, технічних та інших оприлюднених літературних джерел за проблемою впливу війни на ГЕС Північно-Західного Причорномор'я та прилеглої частини шельфу Чорного моря.

Це дозволило авторам визначити сучасний стан вивченості проблеми. Крім того, взято до уваги результати низки досліджень, так чи інакше пов'язаних з темою даної статті, викладені у відповідних публікаціях авторів. Зібрані дані критично осмислено для виявлення ключових чинників змін, що виникли у зазначених ГЕС, їх інтенсивності та просторових закономірностей поширення. На основі узагальненої інформації були проведені теоретичні узагальнення та розроблені інтегровані методологічні підходи, що передбачають комплексну оцінку фізичних, геохімічних та екологічних характеристик ГЕС та їхніх субсистем. Запропонована методика дозволяє систематизувати інформацію, ідентифікувати критичні зони та оцінити потенційні тенденції деградації або відновлення геоекосистем.

Результати

1. Загальнонаціональні екологічні наслідки війни для Північно-Західного Причорномор'я. Повномасштабне вторгнення Росії в Україну у лютому 2022 року спричинило найбільший збройний конфлікт у Центральній Європі після Другої світової війни та призвело до масштабних екологічних наслідків. За даними українських державних установ, міжнародних організацій і незалежних дослідницьких груп, зібрано значний обсяг інформації щодо впливу цієї жорстокої агресії на довкілля, яке часто виступає «мовчазним» і, в той же час «кричущим» свідком воєнних дій з огляду на їхні наслідки.

Низка досліджень [2, 3 та ін.] підтверджують, що війна в Україні спричинила безпрецедентні масштаби екологічних руйнувань. Так, обсяги завданої екологічної шкоди за цими порушеннями станом тільки на 2023 рік оцінено (за фінансовим виміром) у 56,4 млрд доларів. До 30% території України забруднено мінами та боєприпасами, відбулося пошкодження сотень гідротехнічних споруд, зниження водної безпеки для мільйонів людей, забруднення ґрунтових вод, поверхневих вод і морських екосистем. Близько 30% природоохоронних територій країни зазнали руйнувань і деградації внаслідок обстрілів, пожеж, вирубки лісів

і неконтрольованого техногенного втручання. Додаткові загрози створило захоплення Запорізької АЕС і руйнування греблі Каховського водосховища, які мають потенціал тривалого трансграничного впливу на довкілля. Крім того, на ГЕС Північно-Західного Причорномор'я та її прибережні субсистеми і прибережну зону ГЕС Чорного моря додатково вплинули: розливи нафти, мінування, акустичні та вибухові впливи, ушкодження інфраструктури, транскордонне перенесення токсикантів із річкових басейнів тощо.

В цілому, за оцінками низки дослідників [2, 3 та ін.], наслідки російсько-української війни для морських, лиманних і прісноводних біотичних спільнот північної частини ГЕС Чорного моря є комплексними та включають:

- хімічне забруднення, спричинене дифузією полютантів із затопленої техніки, військових об'єктів, а також внаслідок влучань по цивільній інфраструктурі на узбережжі;

- фізичні зміни біотопів, включно з перерозподілом наносів, руйнуванням рослинності, змінами профілю берегової зони та акустичним впливом на їхтіофауну;

- зменшення природоохоронного контролю, згорання моніторингу, зменшення рибальського та рекреаційного навантаження, що разом створюють непрогнозовані ризики для біорізноманіття.

Основні потоки води, завислих наносів та полютантів до ПЗЧМ надходять із річкових басейнів Дунаю, Дністра, Дніпра та Південного Бугу. Проте війна суттєво змінила характер впливів цих систем.

Наприклад, Дунай зазнав непрямих змін, пов'язаних із радикальним зростанням судноплавства, днопоглиблювальними роботами та збільшенням інтенсивності портової діяльності.

В той же час Дніпро став епіцентром однієї з найбільших антропогенних катастроф — руйнування греблі Каховської гідроелектростанції (2023), що спричинило масовий винос токсичних наносів, важких металів, органічних забруднювачів та нафтопродуктів у море [4, 5, 6]. Супутникові дані зафіксували швидке поширення високотоксичних вод уздовж узбережжя Одещини, а дрібнодисперсні фракції зависі — ефективні переносники токсикантів — поширилися на значні відстані та інтегрувалися в морські трофічні ланцюги (рис. 1).

У структурі геолого-екологічних субсистем на їхньому кордоні з акваекологічними субсистемами геоєкосистем відповідно Каховського водосховища та Дніпровсько-Бузького лиману зафіксовано високі концентрації *Fe*, *Mn*, *Cu*, *Zn*, *Cr*, *Cd* та інших токсикантів [8, 9], які після руйнування греблі потрапили в зону активної реседиментації на шельфі.

До ключових наслідків також належать: формування нетипових акумулятивних тіл у зонах воєнної активності; зміни довгострокової ерозійної та наносної динаміки; трансформація біоценозів через зміни геологічних субстратів. На суходолі екологічні наслідки війни проявляються у деградації ґрунтів, забрудненні атмосфери, водних екосистем і втраті біорізноманіття [2].

Бібліометричний аналіз досліджень засвідчив, що вплив збройних конфліктів на довкілля має комплексний характер і вимагає міждисциплінарного підходу. Практично, всі автори підкреслюють зв'язок між деградацією природних систем і ризиками для громадського здоров'я, що особливо стане актуальним для України на стадії відновлення.

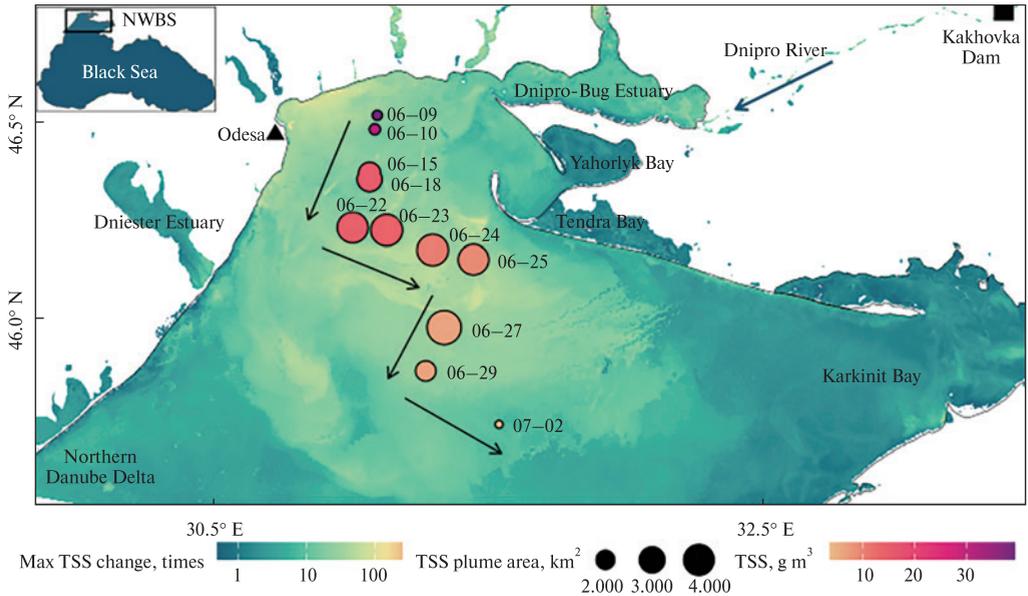


Рис. 1. Просторове переміщення шлейфу загальної концентрації завислих твердих речовин (TSS), що утворився внаслідок прориву Каховської греблі, та його вплив на водне середовище північно-західної частини Чорного моря (круг вказує на положення центру шлейфу завислих твердих речовин (TSS) після прориву дамби у період з 9 червня по 2 липня 2023 року, його розмір — на площу шлейфу TSS, а колір — середнє значення TSS у межах шлейфу) [3]

Одним із найбільш руйнівних проявів воєнних дій є використання водних ресурсів як зброї. У роботах [2, 3, 4] проаналізовано екологічні наслідки руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. На основі польових даних, супутникової інформації та моделювання встановлено, що токсичне забруднення оголених донних відкладів колишнього водосховища становить серйозну довгострокову загрозу для прісноводних, естуарних і морських екосистем, включаючи Чорне море. Автори зазначають, що подальші атаки на водну інфраструктуру можуть спричинити ще масштабніші катастрофи.

Результати новітніх досліджень підтверджують, що масштабних трансформацій та екологічних втрат зазнають і прісноводні системи України [4–6]. Хімічне забруднення у річкових басейнах відбувається як безпосередньо — через деструкцію покинутих боєприпасів, військової техніки та викиди вибухових речовин, — так і опосередковано, внаслідок ураження промислових об’єктів і водогосподарської інфраструктури. Підземні води, що забезпечують до 25 % питного водопостачання країни, також перебувають під загрозою через проникнення перхлоратів, нітратів та інших токсикантів із ґрунтів.

Станом на липень 2023 року Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України задокументувало пошкодження 724 гідротехнічних споруд, 71 водонасосної станції, 64 каналізаційних насосних станцій і 23 очисних споруд [7]. У поверхневій воді було скинуто понад 20,7 млрд м³ стічних вод, що різко посилює негативні екологічні наслідки. Руйнування греблі Каховського водосховища позбавило стабільного водопостачання близько 1,25 млн людей, включно з понад 300 тис. дітей [8].

Додатковим чинником небезпеки є затоплення шахт на окупованих територіях на сході України. За даними [9, 10], понад 49 шахт були затоплені, що створює ризик потрапляння у річкові басейни токсичних сполук, мінералізованих вод і радіоактивних ізотопів. Особливе занепокоєння викликає шахта «Юний Комунар», де у 1979 році провели підземний ядерний вибух: прогресуюче затоплення суттєво підвищує ризик радіаційного забруднення.

Водночас значні еколого-економічні наслідки фіксують у Чорному та Азовському морях. Їхні екосистеми ще до початку повномасштабної війни перебували у стані деградації через хронічне забруднення, евтрофікацію та надмірний промисловий вилов. Як зазначалося вище, воєнні дії зумовили подальше погіршення стану морського середовища, спричинивши численні розливи нафти, втрату контролю над портовою інфраструктурою, забруднення узбереж і різке скорочення промислового рибальства — до 67 % [7]. Мілководність Азовського моря та слабкий водообмін Чорного моря додатково посилюють акумуляцію полютантів у товщі води та донних відкладах, формуючи потенційні довгострокові екологічні ризики для морських геоекосистем.

Узагальнені результати літературного аналізу свідчать, що воєнні дії на території України мають системний, багатокомпонентний вплив на природні комплекси, охоплюючи атмосферу, водні ресурси, ґрунти, біоту та геоекосистеми приморських регіонів, зокрема Північно-Західного Причорномор'я та прилеглого шельфу.

2. Вплив воєнних дій на морську шельфову зону ГЕС Чорного моря. Що стосується шельфу північно-західної частини Чорного моря, то його вразливість зумовлена унікальними геоекологічними характеристиками, а саме: перехідним положенням між крупними геологічними структурами; значним розвитком мілководдя (до 50—100 м); залежністю від річкових стоків Дунаю, Дністра і Дніпра. Це зумовлює складну динаміку біотопів, активні розмивні та наносні процеси, періодичну евтрофікацію, гіпоксію та підвищену чутливість до зовнішніх впливів.

Одним із ключових компонентів, які найбільш гостро реагують на зовнішні стресори, є морські та прибережні геоекосистеми Чорного й Азовського морів. Саме вони становлять найбільшу частину природних комплексів, для яких ідентифіковано найширший спектр негативних воєнних впливів. Ці дії спричинили значне хімічне, фізичне та біологічне навантаження, яке порушило стан геоекологічної рівноваги, посилювало деградацію біорізноманіття та сформувало довгострокові ризики для здоров'я людини.

За даними [5], вплив війни на морські та прибережні геоекосистеми проявляється у кількох взаємопов'язаних напрямках. Найбільш помітними є хімічне забруднення води та донних відкладів, зумовлене потраплянням нафтопродуктів, токсичних речовин, важких металів та продуктів детонації боєприпасів. Значну роль відіграють також акустичні фактори — інтенсивний шум від вибухів, рух військових суден і використання гідролокаційних систем, що чинять істотний стресовий вплив на морських ссавців і популяції риб. Деструктивний тиск доповнюється фізичним руйнуванням середовищ існування внаслідок обстрілів, формування інженерних укріплень та пошкодження портової інфраструктури, а також масштабним мінуванням берегової зони й акваторії, яке створює одночасно і механічні, і потенційні хімічні ризики. Додатково спостерігається суттєве обмеження природоохоронного менеджменту та фактичне

Зростання акустичного навантаження є ще одним критичним наслідком військово-морських операцій. Інтенсивне застосування сонарів і маневри військових суден спричинили численні випадки викидання на берег дельфінів, що свідчить про сенсорну дезорієнтацію та ушкодження слухових органів [5]. Це порушує міграційні маршрути, знижує успішність полювання та веде до підвищеної смертності морських ссавців. Паралельно фізичне руйнування екосистем проявляється у знищенні дюн, кос, пляжів, у механічному пошкодженні донних відкладів і локальному знищенні біотопів птахів, бентосу та нерестових ділянок риби. Мінування узбережжя Одеського регіону і лиманних систем робить значні простори природних акваторій недоступними для досліджень і природоохоронних робіт, поглиблюючи деградаційні процеси.

Важливу роль у перенесенні забруднювачів відіграють річкові системи. Внаслідок наземних бойових дій у річки Дніпро, Дністер і Південний Буг потрапили важкі метали, пестициди, хімікати зі зруйнованих складів, продукти розкладу вибухівки та токсичні промислові відходи. Після руйнування греблі Каховського водосховища річка Дніпро перетворилася на канал масштабного техногенного транспортувальника значної кількості забрудників до ГЕС ПЗШЧМ [2—5].

Негативні процеси, що відбуваються у морських та прибережних геоєкосистемах, безпосередньо впливають на стан здоров'я населення. Забруднення водного середовища різноманітних аквальноїх субсистем ГЕС Чорного моря підвищує ризики поширення інфекцій, ускладнює забезпечення питними ресурсами та створює передумови для зневоднення територій, браку продуктів і недоїдання частини мешканців узбережжя і порушення санітарних умов [4, 11—15]. Деградація повітряного середовища аеральної субсистеми ГЕС ПЗП через пожежі на нафтобазах, вибухи боєприпасів і руйнування промислових об'єктів призвела до поширення токсичних аерозолів, що негативно впливають на дихальну, нервову та репродуктивну системи і, таким чином, можуть спричинити хронічні та онкологічні захворювання [16—20]. Втрата біорізноманіття та руйнування трофічних ланцюгів підвищили ризики накопичення токсинів у морських продуктах, а відповідно — харчових отруєнь, уражень печінки, нирок і нервової системи [21—24]. До цього додалися фізичні та психологічні загрози, пов'язані з вибуховими процесами, шумом, травмами та стресовими умовами життя, що можуть викликати неврологічні, слухові та психосоматичні порушення, включно з негативними наслідками для репродуктивного здоров'я [25].

Окрему групу становлять потенційні радіаційні ризики, пов'язані з можливим потраплянням у довкілля радіоактивних речовин, а також небезпека поширення ендемічних інфекцій унаслідок порушення санітарно-епідеміологічного контролю та руйнування медичної інфраструктури [26].

Узагальнюючи, слід зазначити, що війна в Україні спричинила глибоку екологічну кризу, яка тісно поєднує деградацію морських і прибережних екосистем із ризиками для здоров'я людини. Взаємодія руйнування природних середовищ, масового забруднення та антропогенної трансформації прибережної геоморфології формує комплексну систему екологічно-санітарних загроз, які зберігатимуться актуальними упродовж тривалого часу після завершення бойових дій [2].

3. Геологічні, літодинамічні та геоморфологічні зміни та процеси в геолого-екологічній субсистемі ГЕС ПЗШЧМ. У продовження загальної оцінки геоєкологічних наслідків воєнних дій для морських і прибережних систем доцільно ок-

ремо розглянути геолого-літодинамічні процеси, характерні для геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ, особливо чутливого до зовнішніх впливів. Ця чутливість зумовлена відносно невеликою потужністю (мілководністю) аквальної субсистеми цієї частини простору ГЕС Чорного моря, значною часткою пухкого осадового матеріалу у структурі її геолого-екологічної субсистеми, розвитком у межах простору ГЕС ПЗШЧМ дельтових і лагунно-лиманних субсистем нижнього рівня, а також активними вздовжбереговими потоками у структурі аквальної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ. Все це і визначає особливості регіональної морфодинаміки. Бойові дії активізували низку геологічних і літодинамічних змін і процесів, які вже віддзеркалюються у структурі різних за масштабами і рівнями прибережних і шельфових геоекосистем, впливаючи на стійкість ГЕС ПЗШЧМ в цілому.

Так, відбувається зміна інтенсивності і спрямованості літодинамічних потоків і перерозподіл структурних компонентів геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ. Інженерні укріплення, мінування та руйнування прибережної інфраструктури спричинили трансформацію природного режиму вздовж берегової міграції наносів. Серед ключових проявів зафіксовано, зокрема локальні зміни напрямку та інтенсивності переміщення піщаного матеріалу; посилення процесів розмиву й абразії на відкритих ділянках узбережжя (наприклад, Одеса — Чорноморськ — Затока); накопичення уламкового матеріалу техногенного походження, що впливає на формування штормових валів.

У районах інтенсивних мінно-вибухових робіт (Одеса — Дофінівка, Затока — Будацька коса) є ознаки зміни профілю кордонів між аква- і геолого-екологічними субсистемами на окремих ділянках пляжів і підводного схилу, що свідчить про початок локальних морфодинамічних перебудов.

Також, внаслідок вибухових впливів зростає, зокрема, кількість зважених частинок, а отже і каламутність водного середовища аквальної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ.

Війна істотно посилила седиментаційні процеси у просторі ГЕС ПЗШЧМ. Так, внаслідок збільшення надходження як річкового та абразійного, так і еолового осадового матеріалу, спостерігають зміни у структурі геологічного середовища її геолого-екологічної субсистеми. Основні з них включають: формування нових зон акумуляції у просторі геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ внаслідок масового виносу осадового матеріалу алювіального походження після руйнування греблі Каховської гідроелектростанції; розширення зон з підвищеним вмістом мулового матеріалу у просторі геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ в районах приєднання ГЕС Дністровського та Дніпровсько-Бузького лиманів до ГЕС ПЗШЧМ; накопичення у складі сучасних шарів геологічного середовища відповідної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ, зазвичай на кордоні з аквальною субсистемою, специфічних техногенних компонентів як похідних детонації вибухових предметів, в тому числі металевих фрагментів та інших корозійних складових цих об'єктів.

За попередніми оцінками, у просторі деяких придельтових ділянок ГЕС ПЗШЧМ товщина нового повоєнного осадового шару, що сформувався в просторі геолого-екологічної субсистеми на кордоні з аквальною екологічною субсистемою за роки війни, може сягати 5—10 см, що є дуже суттєвим показником для відносно короткого часу.

Підводні вибухи, затоплена техніка, міни тощо та наслідки бойових дій зумовлюють формування нових форм донного рельєфу та геоморфологічних аномалій. Так, утворюються специфічні форми донного рельєфу на кордоні між геолого-екологічною і аква-екологічною підсистемами ГЕС ПЗШЧМ, зокрема: воронки вибухів діаметром у кілька метрів; нерівномірно розподілені уламки суден, зокрема корпусів, та іншої військової техніки; локальні ущільнені ділянки; деякі зміни мікрорельєфу підводних схилів із потенційним впливом на придонні течії тощо. Такі зміни не лише становлять небезпеку для судноплавства, оскільки роблять неточними навігаційні карти, але й формують вторинні зони акумуляції токсичних частинок і збільшують об'єми накопичення тонкодисперсного матеріалу в просторі геолого-екологічної підсистеми ГЕС ПЗШЧМ.

Характерною ознакою ГЕС ПЗШЧМ є наявність у її структурі газонасичених, переважно метаном і сірководнем, мулів, сапропелів і сапропелеподібних осадів. Механічні характеристики, зокрема стійкість, цих відкладів порушена під впливом вибухових навантажень. Основні ефекти, які можуть виникати внаслідок вибухів, такі: розрив газових лінз з локальними газовими викидами; зниження механічної стабільності геологічного середовища геолого-екологічної системи, особливо в її поверхневій прикордонній з аквальною підсистемою частині, що значно збільшує ризики підводних зсувів та активізацію інших руйнівних процесів. Хоча наявність таких локальних порушень і відповідних процесів підтверджена лише одиничними прикладами, вони мають тенденцію до посилення у середньо- та довгостроковій перспективі.

Вплив війни на ключові геолого-екологічні підсистеми ГЕС ПЗШЧМ. Геолого-екологічна підсистема нижнього рівня Дністровського бару і Дністровсько-Царградської системи валів перебувають під впливом мінутання узбережжя та збільшення твердого стоку через обмеження її природної динаміки, посилення замулення та збільшення накопичення техногенного матеріалу в її просторі, що може позначитися на стані лиманної ГЕС та її підсистем нижніх рівнів у межах простору Нижнього Дністра.

Геолого-екологічна підсистема Жебриянівської бухти як напівзакрита система з низьким водообміном активно акумулює тонкодисперсні, органічно та нафтово забруднені відклади. Вибухи сприяють формуванню мікродепресій, що спричиняє концентрацію в них певного набору токсикантів.

Геолого-екологічна Тендрівсько-Ягорлицька акумулятивна підсистема ГЕС ПЗШЧМ зазнає порушення транспорту наносів, посилення абразії та зміни конфігурації піщаних тіл Тендрівської коси, зокрема на перешийках, що робить цю підсистему потенційно нестійкою.

У Каркінітській затоці, як у природно вразливій частині геолого-екологічної підсистеми ГЕС ПЗШЧМ, внаслідок воєнних дій спостерігають механічні порушення верхнього осадового шару, підвищену ресуспензію мулів, утворення нових форм техногенного мікрорельєфу, що сприяє розширенню гіпоксичних зон.

З урахуванням наявних процесів вже зараз можна визначити найбільш імовірні довгострокові тенденції розвитку геолого-екологічної підсистеми ГЕС ПЗШЧМ. Зокрема, слід передбачити в її межах перебудову морфодинаміки узбережжя у прояві посилення абразії та трансформація барів і кос, можливість формування техногенних осадових комплексів з накопиченням характерно забруднених мулів та металонасичених відкладів; зростання небезпеки активізації

Таблиця 1. Основні воєнні впливи на ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, їх прояви, геоекологічні наслідки та локальні екологічні субсистеми низьких рівнів, що найбільш потерпають від цих впливів

Категорія впливу	Прояви у просторі ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ	Геоекологічні наслідки	Геолого-екологічні субсистеми низьких рівнів, що найбільш потерпають від воєнних дій
Вибухові впливи	Ресуспензія донних відкладів, кратери, шум	Зміна мікрорельєфу, руйнування осадового шару	Каркінітська затока, Жебриянівська бухта
Хімічне забруднення	Нафта, вибухові речовини, токсиканти	Формування токсичних мулів, порушення біогеохімії	Дністровський бар, Дністровсько-Цареградська система валів, лиманні системи
Мінування	Порушення берегової циркуляції, техногенні об'єкти	Блокування міграції наносів, зміна профілю пляжів	Узбережжя Одеси, затоки Тендрівської системи
Руйнування інфраструктури	Винос уламків і будівельних матеріалів	Формування техногенних об'єктів у прибережній зоні	Порти Чорноморськ, Одеса, Очаків
Річковий стік токсичних речовин Сонари і шум	Органіка, нафтові домішки, ПАР Загибель морських ссавців, порушення поведінки	Розширення зон гіпоксії, замулення Дестабілізація пелагічних і придонних біоценозів	Річки Дніпро, Дністер, Південний Буг Відкрите узбережжя Одеської області

підводних зсувних процесів у зв'язку з руйнуванням газонасичених лінз у просторі геолого-екологічної субсистеми та послаблення механічних характеристик, зокрема, зчеплення та стійкості її геологічного середовища.

Внаслідок евтрофікації водного середовища суміжної аквальної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ, збільшення надходження органічних і дисперсних мінеральних речовин до геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми і, як наслідок, підвищеного її замулення, ймовірно значне розширення зон гіпоксії в її просторі, стало накопичення токсикантів у придонних шарах водного і геологічного середовищ, порушення прикордонної гідродинаміки і в результаті — зміна структури течій через новий мікрорельєф донної поверхні і формування довготривалих техногенних «гарячих точок» забруднення.

З урахуванням виявлених під час досліджень змін, що відбулися під впливом воєнних дій у морських і прибережних частинах геолого-екологічних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, особливої уваги потребують геологічні та літодинамічні процеси, які великою мірою визначають подальшу стійкість зазначених субсистем. З огляду на геологічний фокус роботи, ключові прояви цих процесів узагальнено в табл. 1, де систематизовано основні типи воєнних впливів, їх просторові прояви, відповідні геоекологічні наслідки та наведено назви регіональних екологічних субсистем низьких рівнів, що найбільш потерпають від війни.

Обговорення результатів

Узагальнюючи результати досліджень, викладених у багатьох оприлюднених наукових джерелах, і подальшої систематизації даних щодо впливу сучасних воєнних дій на природні ГЕС України, можна стверджувати, що їхні морські та

прибережні геолого-екологічні субсистеми, в тому числі ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, зазнали одного з найбільш масштабних і комплексних антропогенних навантажень за весь період їх сучасного розвитку та дії екологічного моніторингу стану природних систем регіону досліджень. Війна спричинила каскад фізичних, хімічних, біологічних і геологічних змін, які діють одночасно, посилюють одна одну й формують системний багатофакторний вплив на природне середовище.

За результатами проведених досліджень підтверджено, що існуючі зміни охоплюють як прикордонні частини просторів середовищних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ (забруднення контактуючих шарів повітряного, водного і геологічного середовищ, руйнування пов'язаних з ними біотопів, шумове та акустичне навантаження на їхні біологічні субсистеми і окремі організми тощо), так і суто геолого-екологічні рівні: порушення літодинамічних процесів, трансформацію геологічного середовища, формування техногенних морфоструктур, збільшення гіпоксичних зон і зміну біогеохімічних циклів у функціонуванні геолого-екологічних субсистем.

Особливу увагу було приділено ключовим ГЕС ПЗШЧМ нижнього рівня: Дністровського бару, Жебриянівської бухти, Тендровсько-Ягорлицької системи та Каркінітської затоки як найбільш чутливим та індикаторним геолого-екологічним субсистемами низьких рівнів, що найбільш потерпають від воєнних впливів.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що вплив воєнних дій на ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ має системний, багатокомпонентний і довготривалий характер і включає процеси, здатні продовжуватися роками після завершення бойових дій. Серед найбільш значущих наслідків — зміна морфодинаміки узбережжя, формування нових осадових техногенних форм, модифікація структури течій у водному середовищі суміжної аквальної субсистеми, переважна стабілізація токсичних компонентів у певних морфологічних структурах геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ та зростання екологічної вразливості лиманно-дельтових субсистем цієї ГЕС.

Для подальшої оцінки цих процесів необхідно застосувати комплексний системний міждисциплінарний підхід, що включає регулярні батиметричні зйомки, аналіз донних відкладів, моніторинг біорізноманіття та біогеохімічних змін, а також моделювання довгострокових літодинамічних сценаріїв.

Усі основні структурні характеристики складових ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ — від рельєфу та осадових комплексів до біоти, водного середовища, ресурсів і природоохоронних територій — зазнали істотних змін, масштаби яких продовжують зростати в умовах триваючих бойових дій. Виявлені тенденції свідчать, що сучасні геоекологічні процеси формуються в даному регіоні під впливом одразу кількох груп факторів: фізичних, хімічних, біологічних, техногенних та антропоціальних, що обумовлюють деградацію геоекологічних умов ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ.

Узагальнення даних оприлюднених наукових джерел, польових і дистанційних спостережень свідчать, що найбільш вразливими до впливу бойових дій є такі субсистеми нижнього рівня ГЕС ПЗШЧМ як: Дністровський бар із зоною підводної дельти р. Дністра, що підтверджує підвищена мутність водного середовища акваекологічної субсистеми, зміна напрямків та інтенсивності порушень структури геологічного середовища геолого-екологічної субсистеми, а також потенційне накопичення техногенних домішок; Жебриянівська бухта, що

перебуває у зоні активного надходження забруднених техногенних стоків і річкових вод; Тендрівсько-Ягорлицький район ПЗШЧМ, де в умовах мінування й шумового тиску спостерігається значна деградація придонних біотопів; Каркінітська затока, як природно чутлива до акумуляції забруднень і розвитку гіпоксичних явищ геоекологічна субсистема. Ці тенденції відповідають загальним закономірностям деградації прибережних геоекологічних субсистем під час воєнних дій, але для ГЕС ПЗШЧМ ситуація істотно ускладнена дією довоєнних антропогенних навантажень і процесів. Основні з них: евтрофікація, надмірний риболовний прес, інвазійні види біоти та зміна клімату. Синергія всіх факторів впливу створює сприятливий фон для прискореної втрати стійкості ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ та їхніх субсистем від різноманітних складових наслідків воєнних дій.

Характерною особливістю сучасного етапу є комбінований одночасний хімічний, акустичний і техногенний вплив, що виникає через: руйнування промислових підприємств і портової інфраструктури; затоплення військових і цивільних суден; розливи нафтопродуктів, інших хімічних речовин; широке використання морських мін і боеприпасів; інтенсивне застосування гідролокації тощо.

Наслідки цих впливів мають довготривалий характер: забруднення здатне акумулюватися у геологічному середовищі геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, змінювати біогеохімічні цикли та спричиняти вторинні хвилі токсичного навантаження. Водночас підвищений шумовий фон призводить до диспозиції та загибелі морських ссавців, що підтверджують випадки масових викидів дельфінів на узбережжя. Таким чином, хімічні, акустичні та фізичні фактори утворюють єдину систему тиску на ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, що так чи інакше впливає на їх функціонування.

Важливою складовою отриманих результатів є те, що виявлені геоекологічні зміни мають безпосередні соціально-екологічні наслідки, які виходять за межі суто природничої проблематики. Сукупність забруднення повітряного, водного і геологічного середовищ відповідних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, руйнування приморської та морської інфраструктури, зокрема природоохоронної, формує ризики для здоров'я мешканців приморських територій, які значно посилюються у зонах з високою щільністю як проживання, так і міграційних потоків, залежністю від місцевих водних ресурсів, відсутністю у зв'язку з порушенням внаслідок воєнних дій інфраструктури охорони здоров'я.

До основних механізмів негативного впливу належать: погіршення якості питної води через надходження токсикантів, важких металів, перхлоратів, вибухових компонентів та органічних домішок; підвищення ризику інфекційних і санітарно-епідемічних загроз через руйнування систем водопостачання й водочищення; токсичний вплив на харчові ресурси, зокрема рибу та продукти моря, що здатні акумулювати забруднювачі; ризики для органів дихання та серцево-судинної системи, пов'язані з аерозолями вибухів і горіння; дія шумових і психологічних стресорів, які посилюють соціально-екологічну вразливість населення. У такий спосіб екологічні наслідки війни стають частиною ширшої моделі загроз довікллю й здоров'ю, що потребує інтеграції медико-екологічних підходів у систему моніторингу та управління ресурсами ГЕС ПЗП та ПЗШЧМ.

Окремою проблемою, що виникла внаслідок воєнних дій, є руйнування природоохоронних територій та прогалини у екологічному моніторингу. Війна призвела до втрати доступу українських природоохоронних органів й ор-

ганізацій до значної частини акваторії Азово-Чорноморського басейну з морськими природоохоронними та природо-заповідними територіями включно. Також було зруйновано більшість ключових ділянок унікального біорізноманіття (в тому числі: острів Зміїний, Філофорне поле Зернова, дельта Дніпра, Ягорлицька затока тощо). Фактично припинено функціонування системного моніторингу стану морських геоєкосистем різних рівнів і масштабів. Як наслідок: неможливість оперативного і коректного оцінювання екологічних ризиків внаслідок розриву у моніторингових даних, що стався в результаті воєнних дій, накопичення невизначеності («акумуляції невідомості») щодо фактичного стану природних систем та їхніх ресурсів, що є одним з найбільш критичних викликів для відновлення морських середовищ ПЗШЧМ у повоєнний період.

Яскравим прикладом впливу воєнних дій на природну екосистему є сучасний стан Бузького лиману, який став модельною системою для демонстрації синергетичного впливу воєнних дій і пов'язаних з ними факторів на лиманні екосистеми. ГЕС Бузького лиману та її субсистеми одночасно зазнали впливів: масштабних розливів токсичних речовин, серед яких залишки та продукти переробки бокситів, аміачна селітра, нафтопродукти, полімеризована соняшникова олія тощо; постійного надходження техногенного сміття, в тому числі будівельних відходів; руйнування промислових об'єктів і припортової інфраструктури; порушення функціонування систем водопостачання й водовідведення, що призвело до зміни гідрологічного режиму водного середовища акваекологічної субсистеми ГЕС лиману. Отже, стан ГЕС Бузького лиману демонструє, що екологічні наслідки війни формують каскадні й кумулятивні процеси, для яких характерна тривала післядія. Розрахунковий час відновлення в подібних геоєкосистемах може вимірюватися десятиліттями, а це підґрунтя для системних прогалин і майбутніх ризиків.

Поточний аналіз свідчить, що ключовими факторами довгострокової деградації ГЕС ПЗШЧМ можуть стати: накопичення забруднень у геологічному середовищі її геолого-екологічної субсистеми; втрата відтворювальних ділянок цінних видів біоти та деградація біотопів; зміна траєкторій твердого стоку та літодинамічні збої; ризики від затонулих суден та нерозірваних боєприпасів як складових зазначеної субсистеми та обмеженість даних для управління ресурсами ГЕС ПЗШЧМ.

Отже, вплив війни на морські геоєкосистеми не є лише обмеженим у часі — він формує нову парадигму екологічного стану регіону, що потребує мультидисциплінарних досліджень і довгострокових програм відновлення.

Прикладне значення результатів і практичні рекомендації щодо їх використання.

Отримані результати мають важливе прикладне значення для формування у повоєнний час системи управління станом і ресурсами ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ та планування їх відновлення. Виявлені процеси деградації середовищних, речовинних, біотичних, ресурсних і функціональних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, зміни у літодинаміці, швидкості накопиченні токсикантів і погіршення стану біоти свідчать про потребу у комплексних заходах, що поєднують управління ризиками, відновлення природних систем і модернізацію моніторингової інфраструктури.

У перспективі необхідними стануть: розгортання комплексної системи моніторингу екологічного стану ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ та їхніх субсистем нижніх рівнів; обов'язкове відновлення роботи стаціонарних моніторингових постів у

ключових зонах ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ та на певних ділянках Дніпровсько-Дунайського узбережжя, Дністровського бару, Жебриянівської бухти, Каркінітської затоки, Тендрівсько-Ягорлицької системи.

Післявоєнне відновлення потребуватиме даних регулярних аналізів стану геологічного та водного середовищ відповідних екологічних субсистем, вмісту у їхній структурі важких металів, нафтопродуктів, вибухових речовин і продуктів детонації. Необхідним буде подальший розвиток супутникових та інших дистанційних засобів моніторингу, наприклад, каламутності водного середовища, площ гіпоксичних зон і змін берегової лінії. Стануть ще актуальнішими: створення інтегрованої бази даних для об'єднання в інформаційну екологічну систему геологічних, гідрохімічних, гідрофізичних, гідрометеорологічних і біологічних спостережень; картування небезпечних ділянок і техногенних об'єктів, інвентаризація підводних культурних археологічних артефактів, в тому числі затонулих суден, військової техніки, локальних зон підвищеного забруднення та «гарячих точок» накопичення особливо небезпечних токсикантів, мікрорельєфів вибухового походження для оцінки ризиків судноплавства й осадової нестабільності тощо.

На часі стане відновлення природоохоронних територій, певних біотопів і екосистем, наприклад, деградованих ділянок Тендрівсько-Ягорлицької системи, Дністровського та інших лиманів Одесько-Херсонського узбережжя, реабілітація піщаних барів і кос із порушеною морфодинамікою, відновлення унікальних біоценозів (філофори, зообентосу) у зонах найсильнішого антропогенного впливу. Необхідна розробка засобів і технологій для: зменшення акустичного навантаження на морських ссавців, їх охорони та реабілітації постраждалих популяцій, створення безшумних або низькошумних зон у районах їх масової присутності і/чи розпліднення; регулювання використання гідролокації у прибережних водах після завершення бойових дій.

На часі стануть і потребуватимуть модернізації: управління річковим стоком і запобігання вторинному забрудненню природних середовищ; системи контролю за концентраціями токсикантів у виносах річок Дністер, Дніпро, Південний Буг тощо; засоби і методи оцінювання дельтової перебудови та формування нових акумулятивних тіл внаслідок руйнування Каховської гідросистеми, регулювання стоку з територій техногенного впливу (портів, промзон, місць руйнувань тощо); системне управління та планування відновлення прибережних зон як суходольних, так і морських геоекосистем, оцінка і прогнозування стійкості їх кордонів, в тому числі під впливом абразійних процесів; розробка інженерних рішень для пляжів, барів і кос, які зазнали змін у літодинамічній рівновазі; оновлення карт ризику для інфраструктури та рекреаційних територій.

Підвищення санітарної та соціально-екологічної безпеки населення. Зважаючи на виявлені у результаті досліджень значні забруднення води, повітря та геологічного середовища екологічних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ, їх реальний вплив на зростання потенційних ризиків для здоров'я людини, необхідні: різного рівня програми контролю якості води в прибережних населених пунктах — як питної, так і морської, особливо, в зонах масової рекреації населення; оцінка забрудненості морепродуктів і ризиків харчового ланцюга аж до людини; інформаційні системи попередження населення про екологічні та санітарні загрози; організація регулярного медико-екологічного нагляду у регіонах, що зазнали найбільшого воєнного впливу.

Практичні рекомендації щодо використання результатів досліджень стосуються і спрямовані на стратегічне планування післявоєнного ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ відповідно до оновленої Морської екологічної стратегії України. Що стосується оперативних дій, то отримані результати та їхні актуалізовані варіанти можуть бути використані та стати основою у діяльності низки природоохоронних установ (НПП «Тузлівські лимани», НПП «Білобережжя Святослава» тощо); у проектуванні систем екологічного моніторингу та прогнозування геоекологічних ризиків; у прикладних дослідженнях та оцінках процесів осадоутворення, гідродинаміки та морфодинаміки берегів; для картування розташування небезпечних об'єктів і техногенно порушених ділянок, що необхідно для забезпечення безпеки робіт з розмінування та відновлення інфраструктури; під час формування програм розвитку національної, регіональної та місцевої систем екобіомедичної безпеки і охорони здоров'я населення, відвідувачів прибережних міст України та споживачів різноманітних ресурсів і екопослуг ГЕС ПЗП та ПЗШЧМ.

Висновки

1. Війна спричинила глибоку трансформацію ГЕС ПЗП та ПЗШЧМ та їхніх природних середовищних субсистем. Основні зміни стосуються деградації геологічного середовища, порушення літодинамічних процесів, руйнування природних біотопів і формування техногенних осадових комплексів.

2. Підтверджено, що зміни внаслідок воєнних чинників охоплюють як прикордонні частини просторів середовищних субсистем ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ (забруднення контактуючих шарів повітряного, водного і геологічного середовищ, руйнування пов'язаних з ними біотопів, шумове та акустичне навантаження на їхні біологічні субсистеми і окремі організми тощо), так і суто геолого-екологічні рівні: порушення літодинамічних процесів, трансформацію геологічного середовища, формування техногенних морфоструктур, збільшення гіпоксичних зон і зміну біогеохімічних циклів у функціонуванні геолого-екологічних субсистем.

3. Комплексне поєднання хімічних, акустичних і механічних впливів формує кумулятивний ефект, який призводить до тривалого збереження забруднення у геологічному середовищі відповідної екологічної субсистеми і потенційної вторинної мобілізації та міграції токсикантів до середовищ інших екологічних субсистем.

4. ГЕС охоронюваних територій і зон високої екологічної чутливості різного рівня, включно з ГЕС лиманів, дельт, особливо великих річок, барів і мілководь, зазнали значних порушень, які, зокрема, призвели до втрати важливих оселищ для біоти, зниження біорізноманіття та значно ускладнили або зробили неможливим проведення системного моніторингу. Ці ГЕС потребуватимуть обов'язкового повоєнного відновлення.

5. Приклад ГЕС Бузького лиману показує, що локальні геоекосистеми зазнають одночасно декількох видів впливів, які формують складні екологічні кризи зі складно прогнозованими наслідками, оскільки деградаційні процеси в ГЕС мають каскадний характер і можуть тривати десятиліттями.

6. У ГЕС ПЗШЧМ фіксують довгострокові тенденції, що свідчать про можливе погіршення її структури та структури її субсистем, включно з поширенням в їхніх геологічному й водному середовищах гіпоксичних зон, змінами седимен-

таційних процесів, блокуванням нормальної міграції наносів і загрозою для рибогосподарських циклів.

7. Вплив воєнних дій на ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ також має тривалий соціально-екологічний вимір: накопичення токсикантів у геологічному середовищі геолого-екологічної субсистеми ГЕС ПЗШЧМ та забруднення водного середовища її аквальної субсистеми створюють потенційні ризики для здоров'я населення, яке користується різноманітними морськими та прибережними ресурсами, від харчових (риба, молюски, водорості) і просторових до культурних і рекреаційних, а також впливає на санітарну безпеку портових і рекреаційних зон.

8. Відсутність регулярного моніторингу та руйнування науково-дослідної інфраструктури суттєво ускладнюють оцінку масштабу впливу воєнних дій, заподіяної шкоди та планування необхідних відновлювальних заходів. Це підкреслює критичну необхідність розроблення комплексних систем моніторингу, оцінки ризиків і картування небезпечних об'єктів у просторі ГЕС ПЗШЧМ.

9. Отримані результати підтверджують необхідність синергії цільових геологічних, гідрогеологічних, гідрометеорологічних, біологічних, медико-гігієнічних і соціо-економічних досліджень для формування цілісного бачення стану та перспектив функціонування і розвитку Північно-Західного Причорномор'я з прилеглим північно-західним шельфом Чорного моря як складної геоекобіосоціоекономічної системи, що є ключовим фактором для подальшого планування українською державою відновлювальних, природоохоронних і безпекових заходів.

10. Оскільки воєнні дії по відбиттю жорстокої агресії РФ проти України тривають, їхній вплив на ГЕС ПЗП і ПЗШЧМ прогнозовано буде збільшуватись, що потребуватиме продовження відповідних різнопланових і міждисциплінарних наукових досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ємельянов В.О. Функції морських геоекосистем: поняття, систематика та загальний підхід до вивчення. *Геологічний журнал*. 2002. № 3. С. 62—72.
2. Kvach, Y., Stepien, C.A., Minicheva, G.G. et al. Biodiversity effects of the Russia—Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. *Ecol Process*. 2025. 14 (22) <https://doi.org/10.1186/s13717-025-00577-1>
3. Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y. et al. The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Commun Earth Environ*. 2025. 6 (185). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z>
4. Shumilova, O., Sukhodolov, A. and Osadcha, N. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387 (6739). P. 1181—1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
5. Ukraine conflict environmental briefing: The coastal and marine environment. CEOBS. Опубліковано: 1 лютого 2023. URL: <https://ceobs.org/ukraine-conflict-environmental-briefing-the-coastal-and-marine-environment/>
6. Nasiedkin, Ye., Havryliuk, R., Balinsky, V., Fedorenko, L. Geoecological aspects of assessing the consequences of Kakhovka reservoir destruction. *Mineral Resources of Ukraine*. 2025. № 3. P. 66—70. <https://doi.org/10.31996/mru.2025.3.66-70>
7. Leal Filho, W, Eustachio, J.H.P.P., Fedoruk, M., Lisovska, T. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Front. Sustain. Resour. Manag*. 2024. 3:1423444. doi: 10.3389/fsrma.2024.1423444

8. Ліннік П.М. Видоутворення цинку, свинцю та кадмію у водоймах Дніпра. *Озера та водосховища: Управління дослідженнями*. 2000. № 5. С. 261 — 270.
9. Ліннік П.М., Зубенко І.Б. Роль донних відкладень у вторинному забрудненні водного середовища сполуками важких металів. *Lakes Reservoirs Res. Manag.* 2000. № 5. С. 11—21.
10. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A. et al. Impact of the Russia—Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nat Sustain.* 2023. № 6. P. 578—586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
11. Khorram-Manesh, A., Goniewicz, K., Burkle, F.M. Social and healthcare impacts of the Russian-Led Hybrid War in Ukraine — a conflict with unique global consequences. *Disast. Med. Publ. Health Prepared.* 2023. № 17:e432. <https://doi.org/10.1017/dmp.2023.91>
12. Ntui, A.I. War on Nature: How the Russian Invasion of Ukraine is Devastating the Environment. 2023. <https://doi.org/10.17613/n1gm-wm29>
13. Rashid, A., Schutte, B.J., Ulery, A., Deyholos, M.K., Sanogo, S., Lehnhoff, E.A., et al. Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy.* 2023. № 13:6. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
14. Topluoglu, S., Taylan-Ozkan, A., Alp, E. Impact of wars and natural disasters on emerging and re-emerging infectious diseases. *Front. Publ. Health.* 2023. № 11:1215929. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1215929>
15. Spiegel, P.B., Kovtoniuk, P., Lewtak, K. The war in Ukraine 1 year on: the need to strategies for the long-term health of Ukrainians. *Lancet.* 2023. № 401. P. 622—625. <https://doi.org/10.1016/S0140-673600383-5>
16. Hook, K., Marcantonio, R. Environmental dimensions of conflict and paralyzed responses: the ongoing case of Ukraine and future implications for urban warfare. *Small Wars/Insurgen.* 2023. № 34. P. 1400—1428. <https://doi.org/10.1080/09592318.2022.2035098>
17. Warsame, A.A., Abdi, A.H., Amir, A.Y., Azman-Saini, W.N.W. Towards sustainable environment in Somalia: the role of conflicts, urbanization, and globalization on environmental degradation and emissions. *J. Clean. Product.* 2023. № 406:136856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136856>
18. Sharma, Am.K., Sharma, M., Sharma, Ar. K., Sharma, M., Sharma, M. Mapping the impact of environmental pollutants on human health and environment: a systematic review and meta-analysis. *J. Geochem. Explor.* 2023. № 255:107325. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107325>
19. Shetty, S.S., Sonkusare, S., Naik, P.B., Kumari, N., Madhyastha, H. Environmental pollutants and their effects on human health. *Heliyon.* 2023. № 9:e19496. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19496>
20. Lawrence, R.A., Schaefer, C. Industrial chemicals and environmental contaminants. *Drugs During Pregnancy and Lactation (Academic Press)*. 2015. P. 847—861.
21. Johns, T., and Eyzaguirre, P.B. Linking biodiversity, diet and health in policy and practice. *Proc. Nutr. Soc.* 2006. № 65. P. 182—189. <https://doi.org/10.1079/PNS2006494>
22. Makkı, K., Deehan, E.C., Walter, J., Backhed, F. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease. *Cell Host Microbe.* 2018. № 23. P. 705—715. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2018.05.012>
23. Vandana, P.M., Mahto, U., Das, S. Chapter 2 — mechanism of toxicity and adverse health effects of environmental pollutants. *Microbial Biodegradation and Bioremediation, 2nd Edn, eds. S. Das and H. R. Dash.* Amsterdam: Elsevier, 2022. P. 33—53.
24. Myers, P.J., Wilmington, D.J., Gallun, F.J., Henry, J.A., Fausti, S.A. Hearing impairment and traumatic brain injury among soldiers: special considerations for the audiologist. *Semin. Hear.* 2009. № 30. P. 5—27. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1111103>
25. Hobfoll, S.E., Spielberger, C.D., Breznitz, S., Figley, C., Folkman, S., Lepper-Green, B., et al. War-related stress: addressing the stress of war and other traumatic events. *Am. Psychol.* 1991. № 46. P. 848—855. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.46.8.848>
26. Hyams, K.C., Murphy, F.M., Wessely, S. Responding to chemical, biological, or nuclear terrorism: the indirect and long-term health effects may present the greatest challenge. *J. Health Polit.* 2002. Pol. Law 27. P. 273—292. <https://doi.org/10.1215/03616878-27-2-273>

Стаття надійшла 10.12.2025

V.O. Iemelianov, NAS Corresp. Member, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof., Chief Researcher
e-mail: volodyasea1990@gmail.com

ORCID 0000-0002-8972-0754

Ye.I. Nasedkin, PhD (Geol.), Senior Researcher

e-mail: nasedevg@ukr.net

ORCID 0000-0003-2633-9291

T.S. Kukovska, PhD (Geol. & Mineral.), Senior Research Scientist

e-mail: t.kukovska@gmail.com

ORCID 0000-0001-7532-8885

A.V. Mokienko, Dr. Sci. (Med.), Senior Researcher

e-mail: mokienkoav56@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4491-001X

SSI MariGeoEcoCenter NAS Ukraine

55 b, st. Oles Honchar, Kyiv, 01054, Ukraine

EFFECTS OF MILITARY ACTIONS ON MARINE AND COASTAL GEOECOSYSTEMS OF THE NORTH-WESTERN BLACK SEA REGION AND THE ADJACENT BLACK SEA SHELF

The article examines various aspects of the effects of large-scale military aggression by the Russian Federation on marine and coastal geoecosystems of the Northwestern Black Sea region and the adjacent Black Sea shelf. The main mechanisms of negative military impacts include the destruction of energy, economic, municipal, and social infrastructure, in particular the deterioration of drinking water quality due to the input of toxicants, heavy metals, perchlorates, explosive compounds, and organic contaminants; an increased risk of infectious and sanitary-epidemiological threats caused by the disruption of water supply and water treatment systems; toxic impacts on food resources, including fish and seafood capable of bioaccumulating pollutants; risks to the respiratory and cardiovascular systems associated with aerosols generated by explosions and combustion processes; and the effects of acoustic and psychological stressors that enhance the socio-environmental vulnerability of the population.

The consequences of these impacts are shown to be long-term in their nature. Contaminants tend to accumulate primarily within the geological environment of the geological-ecological subsystems of the geoecosystems of the Northwestern Black Sea region and the adjacent shelf, altering biogeochemical cycles and generating secondary waves of toxic loading. Elevated noise levels associated with military activities lead to the displacement and mortality of marine mammals, particularly dolphins. The combined contamination of the atmospheric, aquatic, and geological environments of the geoecosystems and their respective subsystems, together with the destruction of coastal and marine social, economic, and environmental protection infrastructure, creates significant risks to the health of coastal populations. These risks are markedly intensified in areas characterized by high permanent population density, forced migration flows, dependence on local water resources, and insufficient healthcare infrastructure.

Key factors of long-term degradation of the geoecosystems of the Northwestern Black Sea region and the adjacent Black Sea shelf as a result of the war may include the accumulation of contaminants in the geological environment of the geological-ecological subsystem; the loss of reproduction and spawning areas of valuable biotic species and the degradation of habitats; changes in solid sediment transport pathways and lithodynamic disturbances; risks associated with sunken vessels and munitions that have become incorporated into the marine geological-ecological subsystem; and the limited availability of data required for effective monitoring, resource management, and sustainable functioning of geoecosystems.

The applied significance of the obtained results is substantiated, and practical recommendations for their implementation in environmental monitoring and coastal geoecosystem management are provided.

Keywords: Black Sea shelf, geoeological monitoring, geological-ecological subsystem, lithodynamic disturbances, marine geoecosystems, sediment contamination, sunken vessels and munitions.