



ГЕОЛОГІЯ І КОРИСНІ КОПАЛИНИ СВІТОВОГО ОКЕАНУ том 21 • 2(76) • 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ • ЗАСНОВАНО У ВЕРЕСНІ 2005 р. • ВИХОДИТЬ 2 РАЗИ НА РІК • КИЇВ

ЗМІСТ

Війна і геоекосистеми

ЄМЕЛЬЯНОВ В.О., НАСЄДКІН 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 3

Тектоносфера

ГОРДІЄНКО В.В. Розподіл питомої пружної енергоємності та в'язкості в тектоносфері України 23

Седиментогенез

ЄМЕЛЬЯНОВ В.О., ІВАНЧЕНКО В.В., ЛОМАКІН І.Е., БЕЛПЦЬКА М.В., ІВАНЧЕНКО А.В., БЕРЬОЗКІНА Л.В. Дисперсне золото в алювії, делювії та прибережних морських відкладах півдня України та перспективи його видобування 44

Геологія регіонів

НЕСТЕРОВСЬКИЙ В.А., ВОЛКОНСЬКИЙ О.О. Літологія ямпільських пісковиків Подільського басейну України 56

Методи досліджень

МЕЛЬНИЧЕНКО Т.А. Застосування даних дистанційного зондування та нормалізованого індексу каламутності (NDTI) для визначення геоморфології затоплених берегів 68



GEOLOGY AND MINERAL RESOURCES OF WORLD OCEAN vol. 21 • 2(76) • 2025

SCIENTIFIC JOURNAL • FOUNDED IN 2005 • PUBLISH 2 TIMES /YEAR • KYIV

CONTENT

War and Geoecosystems

IEMELIANOV V.O., NASIEDKIN YE.I., KUKOVSKA T.S., MOKIENKO A.V. Effects of military actions on marine and coastal geoecosystems of the Northwestern Black Sea and the adjacent shelf 3

Tectonosphere

GORDIENKO V.V. Distribution of specific elastic energy capacity and viscosity in the tectonosphere of Ukraine 23

Sedimentogenesis

IEMELIANOV V.O., IVANCHENKO V.V., LOMAKIN I.E., BELITSKA M.V., IVANCHENKO A.V., BERIOZKINA L.V. Dispersed gold in alluvia, diluvia and coastal marine sediments of Southern Ukraine and prospects for its extraction 44

Geology of regions

NESTEROVSKYI V.A., VOLKONSKYI O.O. Lithology of Yampil Sandstones of the Podil Basin of Ukraine 56

Research methods

MELNYCHENKO T.A. Application of remote sensing data and Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) to determine the geomorphology of flooded coasts 68

<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 біоекосистем 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.

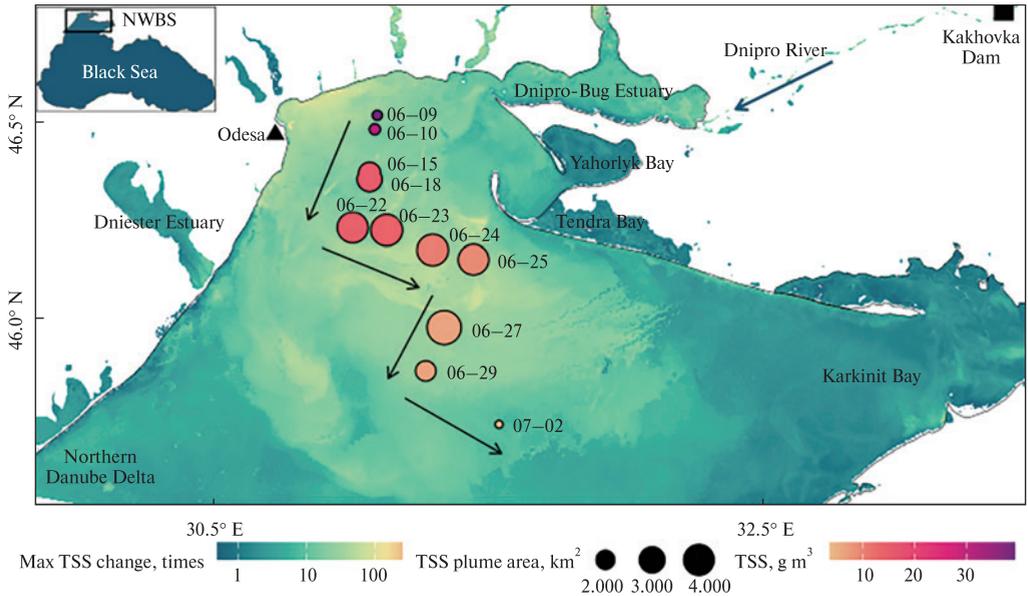


Рис. 1. Просторове переміщення шлейфу загальної концентрації завислих твердих речовин (TSS), що утворився внаслідок прориву Каховської греблі, та його вплив на водне середовище північно-західної частини Чорного моря (круг вказує на положення центру шлейфу завислих твердих речовин (TSS) після прориву 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, посилило 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 аквальної 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 екобіомедицинової 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.

<https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.023>

В.В. Гордієнко, докт. геол.-мін. наук, проф., гол. наук. співроб.

e-mail: gordienkovadim39@gmail.com

Scopus author Id = 7102473958

ORCID 0000-0001-9430-7801

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

просп. Палладіна, 32, Київ, 03680, Україна

РОЗПОДІЛ ПИТОМОЇ ПРУЖНОЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ТА В'ЯЗКОСТІ В ТЕКТОНОСФЕРІ УКРАЇНИ

Наведено виклад процесу побудови та опис результатів розподілу у тектоносфері України питомої потенційної пружної енергії (W) та динамічної в'язкості (η). Ці характеристики дають інформацію про накопичення напруги при зсувних деформаціях та реакції на прикладені напруги різної природи. Відповідні розрахунки стали можливими після створення за участю автора тривимірних моделей температури, швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль та густини у корі та верхній мантії України на глибинах 25 км — 400 км. Така задача була розв'язана вперше. Методичною основою визначення всіх перелічених параметрів є схема глибинних процесів у тектоносфері, що враховує, перш за все, результати тепломасоперенесення при сучасній активізації. Вони накладаються на моделі платформи (крім території Східно-Європейської платформи до неї зараховано і Донбас), альпійської геосинкліналі Карпат та герцинсько-кімерійської геосинкліналі Скіфської плити. Вихідні дані були доповнені для розрахунку W інформацією про міцність речовини тектоносфери в залежності від температури. Було розглянуто умови утворення розривів та виникнення землетрусів. Достатній вплив чинить підняття блоків кори та підкорової мантії за рахунок перегріву. На межах блоків з різними швидкостями підйому та сповзання мас порід під нахилом виникають сейсмогенні переміщення. Це помітно і на платформних територіях із сучасною активізацією, наприклад, у Дніпровсько-Донецькій западині. Для визначення η використано експериментальні та розрахункові результати, що дали змогу врахувати склад порід, розмір кристалів, температуру, загальний тиск, розплав та флюїди, швидкості деформацій, вібрації тощо. Це дозволило сформулювати фоновий розподіл в'язкості у тектоносфері неактивізованої платформи. Враховуючи аномальні температури вдалося визначити відхилення від фону на різних глибинах під активними регіонами. Досить складною виявилася побудова розподілу параметра за допомогою ізолій. Загалом, слід визнати, що отримана картина відображає, перш за все, реальний стан справ у вивченні в'язкості порід тектоносфери. Вона цілком може помітно змінитися у майбутньому.

Ключові слова: *питома потенційна пружна енергія, сучасна активізація, сейсмічність, динамічна в'язкість порід.*

Цитування: Гордієнко В.В. Розподіл питомої пружної енергоємності та в'язкості в тектоносфері України. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2025. **21**, № 2: 23—43. <https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.023>

Вступ

Статтю написано за результатами четвертого та п'ятого етапів досліджень, метою яких була побудова єдиної моделі глибинних процесів у тектоносфері України та відповідного розподілу фізичних властивостей порід кори та верхньої мантії Землі. Три попередні етапи були присвячені моделям розподілу температур (T), швидкостей сейсмічних поздовжніх хвиль (V_p) та густини порід (σ) [8, 43, 44]. Останні два параметри дали змогу перейти до вивчення властивості середовища, що безпосередньо характеризує його наближення до руху та деформації. Один із варіантів визначення такої властивості наведено у роботі С.В. Крилова зі співавтором [15]. Вони запропонували метод дослідження умов, за яких накопичується енергія, що зрештою викликає порушення суцільності середовища. Метод полягає у визначенні потенціальної пружної енергії блоків. Запропонована формула $W = \tau^2/2G = \tau^2/2\sigma V_s^2$, де τ — це міцність на зсув (розривна напружка зсуву), представляє інтерес сама по собі як характеристика сейсмогенної структури, G — модуль зсуву, σ — густина, V_s — швидкість сейсмічних S -хвиль. Параметр W («потенційна пружна енергія, що накопичується в одиниці середовища в результаті його зсувної деформації до точки розриву») [15, с. 57], здається, не відображає всю складність процесу зростання сейсмогенних напружень. Вона не підходить для порівняння зі справжніми джерелами стресу та її не можна використати для визначення часу, коли зберігається кінцева кількість енергії, оскільки релаксація не враховується. У будь-якому випадку, оцінки пружної енергії можуть викликати інтерес як екстремальні значення фактичного вмісту енергії. Наведена оцінка W може відповідати дійсності в умовах дуже швидкого формування її аномалій — за час менший за період релаксації. Такі ситуації розповсюджені у зонах сучасної активізації (далі — СА), тому будуть описані у цій статті під час побудови моделей тектоносфери України.

Врахування в'язкості (як правило, динамічної в'язкості — η) є необхідним при аналізі процесу тепломасоперенесення у тектоносфері. Автор близько 50 років випробовував багато різних методик оцінювання цього параметра [6—8 та ін.] і використав опубліковані дані, а також елементи геологічної теорії. Останнім часом з'явилося багато нових експериментальних і розрахункових результатів, що дозволяють враховувати вплив на в'язкість складу гірських порід, розмірів зерен, температури T , тиску P , диференціальних напружень, розплавів і рідин, швидкості деформування, вібрацій тощо. Багато вже відомих даних тепер можуть бути переоцінені. Має сенс додатково уточнити попередні оцінки в'язкості, які фактично обмежувалися дифузійною складовою, тобто розрахунок орієнтувався на максимальне значення η .

Всі наступні міркування припускають правильність висловленого у роботі [33] уявлення про надпластичні деформації, основа яких — зернограничне ковзання у поєднанні з дифузною акомодациєю. Звичайно, не можна повністю виключати вплив внутрішньозернових дислокацій. Така конструкція змушує звернутися, насамперед, до експериментальних даних. Такими вважають відомості з двох джерел: 1) результати оцінювання в'язкості середовища за інформацією про підйом поверхні після припинення льодовикового навантаження або великого землетрусу; 2) результати лабораторних експериментів у доступному інтервалі швидкостей деформації (і відповідних диференціальних напруг). При викорис-

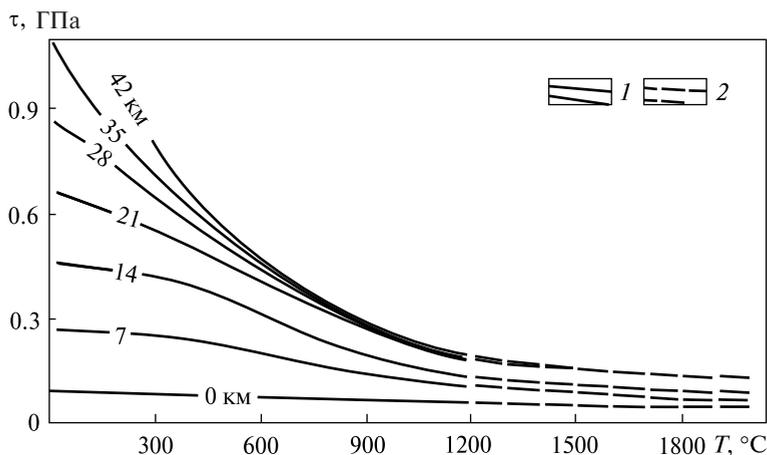


Рис. 1. Залежність міцності на зсув гірських порід від тиску (глибини) та температури: 1 — експериментальні дані, 2 — результати екстраполяції

танні останніх екстраполяцію параметрів в область геологічно реальних проводили за звичайними виразами для в'язкості [28 та ін.]. Рівняння, що використовують в даний час, «...моделюють реологічні властивості мантійного субстрату, який при низьких напругах характеризується дифузійною повзучістю, а при високих — дислокаційною.» [28, с. 42]. «Хоча розуміти реологію мантії дуже важливо, для побудови якісно правильної картини течії в мантії немає особливої необхідності розрізняти реологічні рівняння за $n = 1$ і $n = 3$... Однак ... більш суттєва залежність коефіцієнта в'язкості від температури та тиску, а не та чи інша можлива залежність від напруги» [28, с. 536].

За роботами, які аналізують багато сторін проблеми [24, 28, 34 та ін.], можна намітити послідовність врахування чинників, які впливають на результат визначення η . Мається на увазі не ієрархічна структура, а підхід, що передбачає спочатку закріплення параметрів середовища, варіації яких мало ймовірні або мало вивчені, потім — перехід до тих, вплив яких вивчено краще та по-різному позначається у різних інтервалах глибин. Як результат передбачається отримати модель розподілу в'язкості верхньої мантії неактивної докембрійської платформи, намітити значення параметрів для кори та перехідної зони до нижньої мантії, а також спосіб врахування в величині η на різних глибинах верхньої мантії впливів зміни умов при підготовці і в ході активного процесу тепломасоперенесення.

З наведеного очевидна необхідність розглянути параметри W та η послідовно у наступних двох частинах статті.

1. Питома потенційна пружна енергія

Використана інформація та результати розрахунків

Звичайно, всі вже розраховані розподіли параметрів кори та верхньої мантії (T , V_p та σ) були застосовані для визначення W . Додаток складав τ та V_s , а також G і в'язкість (і розрахований з її допомогою період релаксації напруги).

Даних про міцність гірських порід на зсув в залежності від тиску (глибини) та температури небагато, особливо для ультраосновних та основних порід. Тому

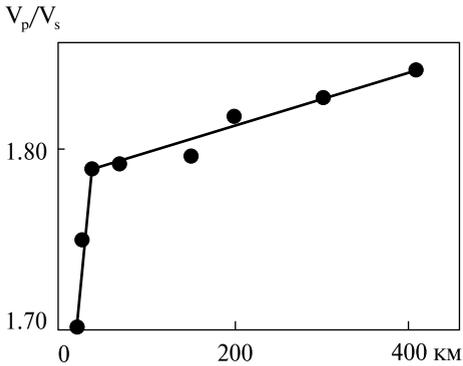


Рис. 2. Розподіл V_p/V_s у корі та верхній мантії

густини та швидкості пружних хвиль.

Величина V_p/V_s за даними ГСЗ в Україні у межах кори помітно змінюється, глибина 25 км на цьому фоні виявляється відносно стабільнішою, середній рівень становить приблизно $1,75 \pm 0,02$. Для глибин верхньої мантії є досить багато різних даних із регіонів з різними сучасними ендегенними режимами [49, 56 та ін.] (рис.2).

Наведених даних разом зі встановленими раніше достатньо для розрахунку значень W на всіх глибинах на території України. Як і на попередніх етапах досліджень, характеристика кори обмежена моделлю для 25 км. Результати розрахунків наведено на рис. 3 та 4.

Узгодженість елементів, використаних при розрахунку W на глибині 25 км, виявилася недостатньою. Інформація про швидкість та густину залучена з даних ГСЗ, точність яких суттєво обмежила щільність мережі відповідних ізоліній. Дані про T (для розрахунку $\tau = f(T)$) отримано з теплової моделі. Рисунок ізотерм суттєво складніший, ніж ізоліній швидкостей та густин. Тому для результативного параметра використовували саме останні (V та σ), а температуру в районах розташування ізоліній брали за середню. Це не веде до суттєвого зростання похибки розрахунку. Але, звісно, загальна картина виявилася мозаїчною, без інформації про перехідні зони, що відображала б зміну глибинних температур. Лише фрагментарно простежується перегрів порівняно з неактивною платформою під Карпатами, Скіфською плитою та зоною СА на Східно-Європейській платформі (далі — СЄП).

Зміна загальної картини розподілу W до глибини 50 км обумовлена не принципово іншою ситуацією з переходом до мантії, а перш за все використанням узгодженого за щільністю сітки спостережень для всіх використаних параметрів розрахунку. Значно збільшується детальність розподілу питомої пружної енергоємності, скорочується її абсолютна величина. За межами найбільш «холодного» регіону — західного схилу Українського щита — вона стає менше 1 Дж/см³. На більших глибинах ця тенденція зберігається (рис. 3 та 4). Це, звичайно, частково є результатом впливу зростання швидкості сейсмічних хвиль. Але, насамперед, на порядок швидше зі зростанням температури скорочується (і стабілізується на низькому рівні) τ^2 . Речовина верхньої мантії стає дедалі пластичнішою, менш пружною.

для характеристики загальної картини були використані усі знайдені автором дані, в тому числі і осереднені для різних діапазонів PT -умов, а також відомості про міцність на стиснення (вона вважалася в 5 разів більшою, ніж на зсув) [1, 15, 23, 24, 27, 29 та ін.]. Вони досить повно узгоджуються між собою (рис. 1).

З наведеної інформації зрозуміло, що вплив тиску на значення міцності обмежений, вплив температури спостерігається у більшому діапазоні, але на рівні верхньої мантії варіації τ досить значні. Більшу вагу зберігають зміни з глибиною

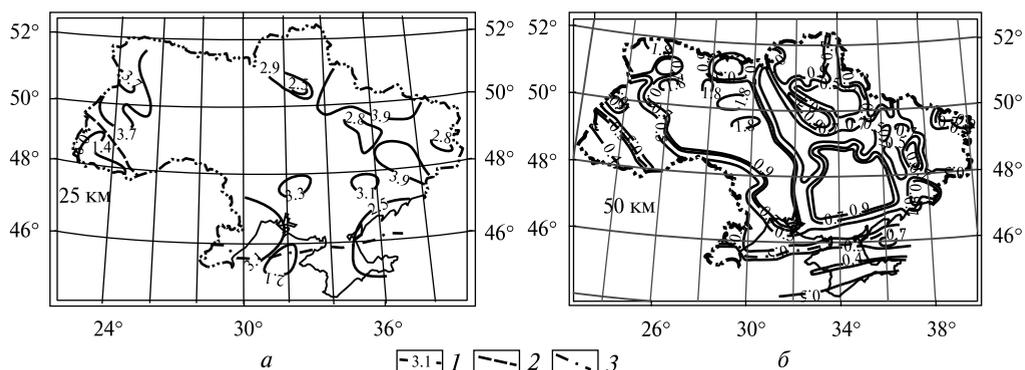


Рис. 3. Розподіл питомої пружної енергоємності (Дж/см³) на глибинах 25 км (а) та 50 км (б) для території України: 1 — ізолінії W ; 2 — межа Карпатської альпійської геосинкліналі; 3 — межа герцинсько-кімерійської геосинкліналі Скіфської плити

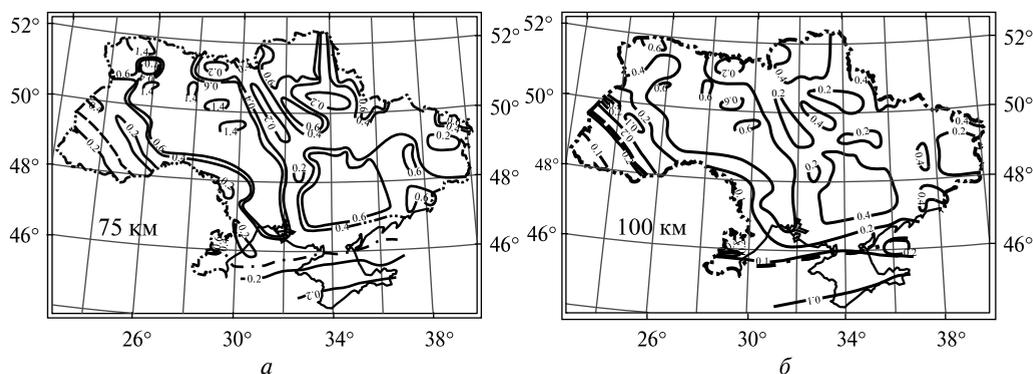


Рис. 4. Розподіл питомої пружної енергоємності (Дж/см³) на глибинах 75 км (а) та 100 км (б) для території України. Умовні позначення див. на рис. 3.

На глибині понад 300 км відбувається зміна відносного нагріву надр тектонічних регіонів України. Максимальні температури (та мінімальні W) спостережено під неактивізованими частинами СЄП, де ще не спрацював механізм тепломасоперенесення на підкорову глибину. Але розгляд варіацій W на глибинах 150—400 км не має сенсу. Вони становлять на глибинах 150—400 км від $0,25 \pm 0,05$ до $0,10 \pm 0,01$ Дж/см³. Тобто речовина мантії на цих глибинах (цих тисках і температурах) не накопичує напружень. І наявні на менших глибинах помітні величини W розраховані з великими похибками. Можна оцінити їх порядок, але не точні значення. Зокрема, з цієї причини використано ізолінії зі змінним перерізом (рис. 3 та 4).

Питома пружна енергоємність і сейсмічність

Визначальним для аналізу умов накопичення енергії, що використовується землетрусами, є час релаксації напружень (t) у пружно-в'язкому середовищі. Зазвичай він встановлюється як $t = \eta/G$, де η — динамічна в'язкість порід. За низьких

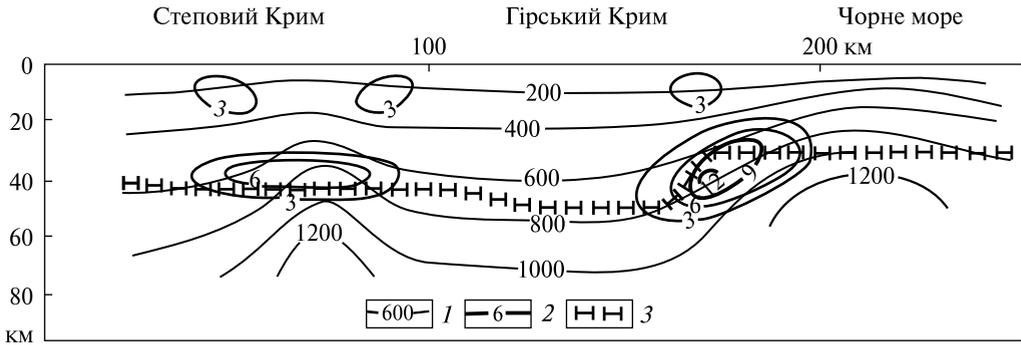


Рис. 5. Розподіл температури (1) та напруги у МПа (2) у земній корі півдня України через 100000 років після початку сучасної активізації [7]; 3 — границя Мохо

температур в'язкість порід тектоносфери може сягати 10^{22} Па \times с. За властивостями порід на глибинах кори та мантії розрахована величина $G = 2\sigma V_s^2$. Вона становить близько 10^{11} Па. За результатами лабораторних вимірів для типових кристалічних порід верхньої частини кори [27 та ін.] отримуємо приблизно таку саму величину G . Звісно, це значення характеризує зовсім інший діапазон швидкостей деформації, ніж використаний щодо в'язкості порід. Автору невідомі дані щодо залежності G від швидкості деформації. У тектонофізичних розрахунках використовують значення близько 10^{10} Па [4], тобто радикальної зміни величини модуля не передбачено. Тому не виключено, що час релаксації (навіть при мінімальному G) для певних значень η в мантії становить 10^2 — 10^5 років. Величини t дуже незначні, особливо у блоках кори та мантії з T вище за солідус.

Енергетичні класи землетрусів України [17, 26 та ін.] дають змогу (перш за все — у Карпатах, де їх найбільше) встановити типову енергію струсів як $10^{9\pm 4}$ Дж. Для порівняння нижче використано спрощені обчислення сейсмічного моменту (M_0), які визначають (як і енергетичний клас) за магнітудою: $K = 1,6M + 4,6$; $\lg M_0 = 12 + M$.

Аналізуючи розподіл землетрусів за географічними координатами та глибиною можна у районах найбільшого скупчення оцінити розмір одиничного вогнища у кілька одиниць чи десятків км. Тобто визначеної вище концентрації енергії вистачає для підтримання із залишком сейсмічності впродовж усього періоду релаксації напруги. Маються на увазі не тільки потреби енергії на сейсмічні хвилі. Її достатньо і для переміщення фрагментів середовища у джерелі землетрусу, що їм відповідає M_0 . Але це не пояснює необхідного для руху речовини перевищення міцності.

Досить нескладно оцінити виникаючі термонапруження за період релаксації, наприклад, у межах Скіфської плити та контакту з Чорноморською западиною, маючи на увазі зміну корових T з початку сучасної активізації (рис. 5).

Виниклі напруги становлять 1—10 МПа. На глибині 25 км за температури 500—800 °С міцність порід складає 0,3—0,5 ГПа (див. рис. 1). Тобто за рахунок термонапруг перевищення міцності порід нереальне. Але нагрівання (включаючи часткове плавлення) активізованої зони в цілому веде до суттєвого підняття сучасної поверхні (рис. 6) (на відміну від поверхні початку процесу, скажімо, Складчастих Карпат, що нині знаходиться на глибині біля 2 км).

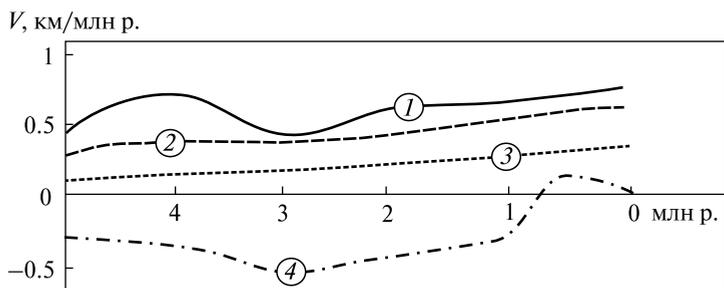


Рис. 6. Зміна швидкості підняття поверхні Східних Карпат [13]: 1 — Складчасті Карпати; 2 — Передкарпатський прогин; 3, 4 — Закарпатський прогин (3 — Солотвинська западина, 4 — Мукачівська западина)

Сумарне підняття за період релаксації становить сотні метрів. Природно, такий рух супроводжується порушенням суцільності середовища, виникненням або активізацією розломів, землетрусам.

Горизонтальний рух речовини в активізованому блоці тектоносфери аргументувати складніше. Здається, що це явище схоже на «розвалювання» верхньої частини піднятого блоку, що супроводжується складчастістю. Виникнення складчастості в геосинклінальному трозі Карпат при сповзанні осадової товщі під нахилом по фундаменту вивчав В.Г. Гутерман за допомогою фізичного моделювання [12]. Було витримано умови, подібні до реального середовища, причому використано величину в'язкості порід осадового шару (на порядок більше від тієї, яка в даній моделі мала б відповідати йому, згідно з М.В. Гзовським [4]). Динамічну в'язкість флішу прийнято рівною 10^{17} Па·с, тобто. складчастість могла охопити і частину порід фундаменту. Визначальним для процесу, що дає картину змінання, подібну до спостереженої, виявилось поширення «хвилі підняття» фундаменту осадового басейну [18], яка створювала б кути нахилу близько 5° . Очевидно, що поблизу меж частин Карпат, показаних на рис. 6, в період сучасної активізації можуть виникати нахили поверхні фундаменту, подібні до описаних. Тобто така природа виникнення зсувів осадової товщі та складчастості здається реальною і за геологічними даними.

Аналіз потужностей синхронних осадів дав змогу констатувати дві особливості переміщень блоків кори Східних Карпат, докладно описаних у геологічній літературі [5 та ін.]. Вони ускладнюють рух речовини осадового шару поперек простягання структури. Перша полягає в тому, що фундамент Румунських Східних Карпат регулярно виявлявся на кілька кілометрів вище. Кути нахилу близькі до прийнятих при моделюванні, що створювало умови для сповзання і змінання з вергентністю, діагональною щодо простягання трога.

Друга полягає в регулярному відставанні занурення північно-східної частини трога в Українських Східних Карпатах від південно-західної. Можливо, це пов'язано з несинхронністю підняття двох останніх квантів тектонічної дії [42] у зоні Складчастих Карпат та відповідно до початку перебудови кори зони під впливом вторгнень мантийних виплавок. Кути нахилу фундаменту, що виникають при цьому, були дещо менші за використані при фізичному моделюванні, але цілком зіставні з ними. Таким чином, створювалися умови для сповзання та

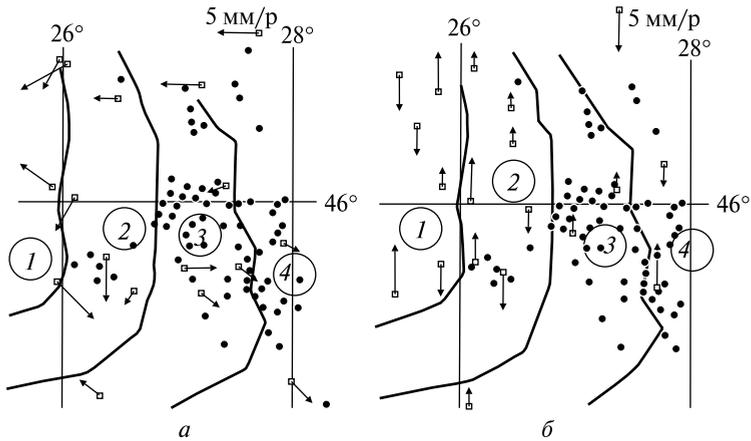


Рис. 7. Швидкості горизонтальних (а) та вертикальних (б) рухів поверхні у південній частині Карпатського регіону за даними GPS-мережі [46]: 1 — Трансільванська западина; 2 — Складчасті Карпати; 3 — Передкарпатський прогин; 4 — Східно-Європейська платформа; точки — епіцентри корових землетрусів

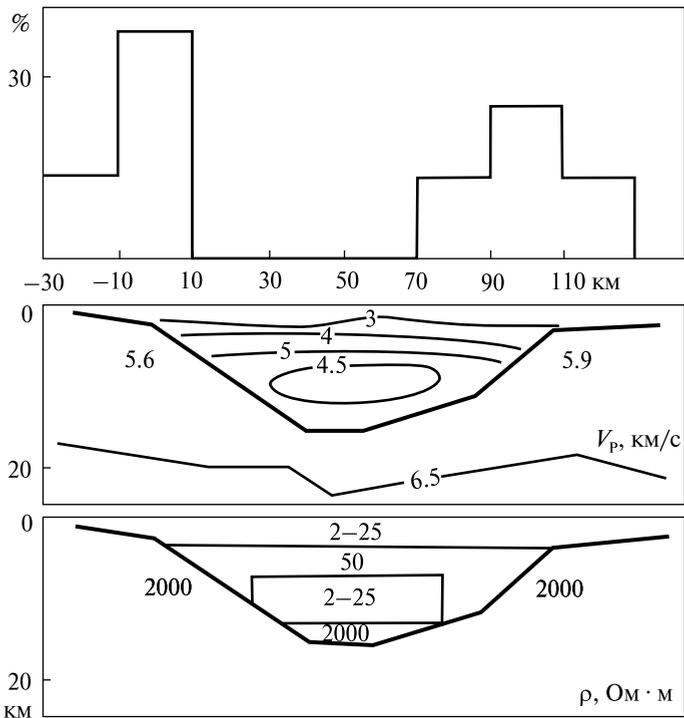
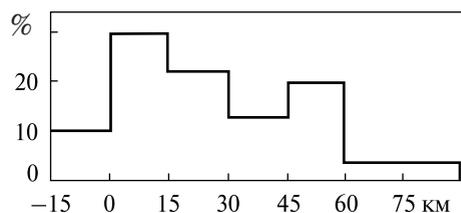


Рис. 8. Співставлення геофізичних моделей кори ДДЗ з епіцентрами землетрусів: у верхній частині — гістограма розподілу кількості епіцентрів землетрусів у ДДЗ; нульовий пікет профілю — у районі південно-західного крайового розлому; у середній частині — генералізований швидкісний розріз частини западини [19, 20]; у нижній частині рисунка — середня модель розподілу питомого електричного опору порід осадового шару та фундаменту ДДЗ [10]

Рис. 9. Гістограма розподілу кількості епіцентрів землетрусів уздовж профілю, що січе Передкарпатський прогин



зминання з вергентністю впоперек трога. На його північно-східному кордоні виникає «скупчення» та насув на форланд.

«Додатковий» етап складчастості (що розпочався 10—5 млн р. тому і триває зараз) пов'язаний з молодію активізацією регіону. Вона охопила зону Внутрішніх Карпат. Зминання зазнали і моласи Внутрішньої зони Передкарпатського прогину, що накопичилися на краю форланду на попередньому етапі при розмиві «області скупчення» околиці трога.

Досить складна картина переміщень відображається і в результатах вимірів у GPS-мережі у Румунських Складчастих Карпатах та прилеглих територіях [46]. Звичайно, ці дані не можна переносити на тривалий у геологічному сенсі період, але не виключена певна відповідність сучасній активізації (рис. 7).

Головна частина землетрусів сконцентрована у Передкарпатському прогині та Складчастих Карпатах на глибині 10 ± 5 км. Це може бути результатом окремого механізму їх утворення, який обумовлений діа- та катагенезом занурених первинно-осадових порід [42 та ін.]. Ці події доповнюють пов'язані з описаними вище процесами.

У зоні СА Східно-Європейської платформи в межах України (включно з Дніпровсько-Донецькою западиною і Донбасом) зв'язок сейсмічності з параметрами середовища принципово не відрізняється від встановленого у регіонах Тетіса. Прогрів кори, що виникає при активізації, не створює руйнівної напруги.

Безпосередньо мережа сучасних розломів на платформі з'являється як наслідок переміщень матеріалу верхньої кори над об'єктами з густиною, що змінилася в ході СА. Ці порушення обмежують блоки розмірами 60 км і 120 км [3]. Вони точно збігаються із розмірами квантів тектонічної дії [42 та ін.]. В їхніх надрах формуються лінзи флюїдизації над інтервалами глибин у нижній та середній корі з частковим плавленням. Природно припустити, що за відповідних умов (наявності вуглецю на шляху підйому водню) такі блоки включають родовища вуглеводнів. У найбільш повному вигляді процес можна спостерігати у розподілі фізичних властивостей порід і сейсмічності Дніпровсько-Донецької западини (далі — ДДЗ). Для більш повної характеристики розміщення епіцентрів землетрусів крім українських даних було залучено і відомості, отримані сейсмостанціями сусідніх регіонів Росії [16, 25 та ін.]. На рис. 8 представлена відповідна інформація. Вона стосується ділянки ДДЗ між меридіанами $33\text{—}37^\circ$ сх. довготи [26].

Очевидна наявність у нижній частині осадового шару об'єкта зі зниженою швидкістю сейсмічних хвиль та електричних опорів. Тіло зниженого опору фрагментоване і включає, зокрема, елементи зі значеннями параметра до 50—150 Ом \times м. Об'єкт загалом повинен мати і помітну аномальну густину. Оцінка становить близько $0,15$ г/см³, величина підйомної сили — 15 МПа, на порядок

менша за міцність порід. У підкоровій мантії розташовується потужніший шар часткового плавлення, ніж у корі. Сумарне підняття поверхні в центральних частинах зон СА на платформі становить 100 ± 50 м [3]. На межі квантів тектонічної дії це може призвести до порушень чи оновлень стародавніх розломів.

У ще одному районі, де могли б проявитися розглянуті явища, Передкарпатському прогині (завширшки близько 50 км), ситуація менш сприятлива для їхньої переконливої діагностики. На розподілі глибинних температур позначається контакт із геосинклінальною Карпат (до неї можна віднести внутрішню частину передового прогину), недостатньо велика потужність осадового шару, помітно різняться розташування порушень, пов'язаних з СА, та з попередньою історією. Можна умовно виділити пов'язаний із прогином переривчастий електропровідний об'єкт на глибині 10 км із сумарною поздовжньою провідністю 500 — 5000 См. Аномалія швидкості не діагностується. Розподіл епіцентрів землетрусів уздовж поперечного профілю через прогин показано на рис. 9.

2. Динамічна в'язкість

Використані дані

Наведемо деякі практично загально визнані властивості порід тектоносфери, які застосовані у розрахунках. Для верхньої частини кори є досить обґрунтовані дані про в'язкість первинно-осадових порід залежно від ступеня катагенезу. Для кристалічних порід він вважається стабільно високим (див. нижче). Для нижньої частини кори треба визначити вплив появи рідини. Вміст води в породах нижньої кори і верхньої мантії встановлено різними методами і зазвичай оцінюється в 0,05—0,2 % [14 та ін.]. Вплив цього природного зволоження на в'язкість не є радикальним, але цілком помітним. Результати, отримані для сухих порід, потребують корекції. Це стосується і нижньокорових та мантійних утворень. «Діапазон в'язкостей нижньокорових порід, отриманий за геодезичними дослідженнями в районах знятого навантаження (10^{19-20} Па \times с), може бути узгоджений з перевагою плагіоклаз-піроксенових порід в умовах присутності води.

Екстраполяція лабораторних даних показує, що сухі породи без розплаву мають в'язкість понад 10^{20} Па \times с при швидкості деформації, що дорівнює приблизно 10^{-12} с⁻¹, за винятком нагрітих вище 900 °С. Мікровміст води порядку 0,05—0,1 % — достатній для зниження в'язкості, але не забезпечує помітного плавлення габро. Значно нижча в'язкість (10^{16-17} Па \times с) отримана в моделях тонких каналів у нижній корі, породи яких містять кварц, флюїдопроникні, частково розплавлені, але вони не можуть бути вивчені геодезичними дослідженнями» [34, с. 556]. Зазначимо, що в нижній корі поширені не габро, а основні грануліти (значна частина з них — гранатові), саме вони за температури T близько 900 °С ще не плавляться [30].

Розміри зерен порід відіграють істотну роль у формуванні η . За даними про структуру ксенолітів, що виносяться з нижньої континентальної кори або верхньої мантії, можна сказати, що розміри зерен в їхньому складі варіюють у широких межах [23, 59, 60]. З іншого боку, обґрунтована думка про поширення великих кристалів тільки в зонах над осередками магми, що становлять у мантії не більше 10 % [10 та ін.]. Згодом такі утворення розпадаються на менші. Ці еволюції не пов'язані з диференціальними напруженнями. Оскільки при переміщеннях

порід основну роль відіграють параметри речовини в ослаблених зонах типу мілонітів тощо, йдеться про набагато менші розміри: 0,005—0,3 мм, в окремих випадках — кілька міліметрів. Розміри зерен використовують при розрахунку напружень порід низів кори за співвідношенням для плагіоклазу та піроксену [59], верхів мантиї — для піроксену та олівіну [60]. Швидше за все, отримані таким чином результати мають бути близькими: за комплексом геолого-геофізичних даних у низах континентальної кори ультраосновних порід є до 30 % [9 та ін.]. В експериментах не перевищено температуру плавлення фаяліту, тобто вплив осередків магми на результат виключено. Розглядаються наслідки перекристалізації (за щільністю дислокацій) зі зміною стресу при всебічних тисках і температурах, які приблизно відповідають умовам поблизу кордону Мохо в активізованому районі. Отримано оцінку типових напружень — $10 \div 50$ МПа [35, 37, 47 та ін.]. Зазначимо, що вона досить близька до оцінок напруги, які фіксують при землетрусах, незалежно від глибин вогнищ, сейсмічних моментів і зсувів: $1 \div 10$ МПа [31 та ін.]. Відмінність у один порядок навряд чи варто розцінювати як певне свідчення про належність груп даних до різних процесів. Допуски кожної оцінки у першій групі напруг часто сягають кількох десятків МПа.

Кореляцію швидкості деформації (\mathcal{E} , с^{-1}) та диференціальних напруг розглянуто для мантийних порід [32, 33, 36, 63 та ін.]. Її можна приблизно охарактеризувати лінійною функцією: $\lg \mathcal{E} = \lg \mathcal{E}_0 + 3 \lg (w - 1)$, де $\lg \mathcal{E}_0 = 0,01T - 27$, що відповідає прийнятому механізму дислокацій (тобто повзучість визначається не тільки дифузією). Для порід нижньої частини кори при температурах 800—900 °С в'язкість у зв'язку зі швидкістю деформації в діапазоні $10^{-15} \times \text{с}^{-1} \div 10^{-10} \times \text{с}^{-1}$ змінюється від 5×10^{20} Па \times с до 5×10^{17} Па \times с. У мантийних породах в'язкість за тих самих умов (тиску, що відповідає глибині 30—35 км) приблизно на порядок вища. Вплив температури значний: її збільшення на 100 °С відповідає скороченню η на пів порядку (рис. 10). У роботі [33] на основі незалежних даних встановлено величину 0,6 на 100 °С.

Експериментальні точки на рис. 10 отримано при порівнянні літературних відомостей про в'язкість, встановлену в мантиї різних регіонів, із тепловими моделями [8 та ін.]. Вплив тиску вивчено гірше, ніж температури, переважно доводиться орієнтуватися на результати розрахунків [32, 33, 57, 58 та ін.]. Експериментальні дані їм не суперечать, але й не уточнюють їх, оскільки зосереджені у невеликому діапазоні параметрів. Середнє зростання \lg в'язкості з тиском становить приблизно півтора порядку на 100 км в діапазоні глибин 50—450 км.

Концентрація магми, яка може зберігатися в тектоносфері без сегрегації, утворення рухливих скупчень і спливу, оцінюється авторами по-різному [51, 52, 54 та ін.]: від 0,2 до 5 %. Можливо, відмінності пов'язані з урахуванням чи неврахуванням стресу (що на порядки змінює проникність середовища) та впливу флюїдів на в'язкість. Зрозуміло лише, що малоймовірно скільки-небудь тривале існування в тектоносфері об'єктів з великою (найпершою) концентрацією розплаву. З глибини близько 200—250 км густина розплаву перевищує густину твердої породи того ж складу, але ж його концентрація для різних складів і глибин може виявитися різною.

При низьких концентраціях води в розплаві зв'язок його в'язкості з температурою може бути у спрощеному вигляді представлений як: $\lg \eta = 15 + 0,013(1000 - T)$ [21, 45]. Вважаючи температуру розплаву близькою до солідуса

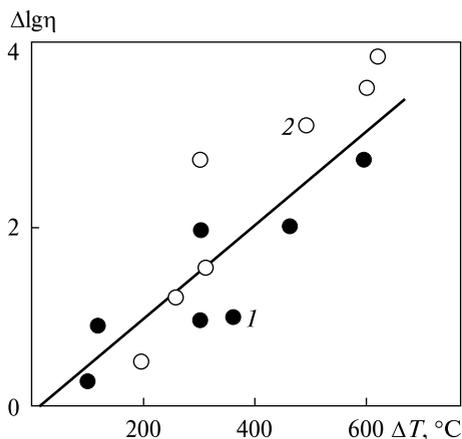


Рис. 10. Зв'язок $\Delta \lg \eta$ з перепадом температури в мантії: 1 — експериментальні дані; 2 — розрахункові дані

[8 та ін.], визначимо максимальне значення η на різній глибині в астеносфері як: $\lg \eta = 14,4 + 0,013 (0,0037H^2 - 3,914H)$, де H — глибина (в км) від 50 км до 450 км. В'язкість розплаву, розрахована таким чином, скорочується до нижньої частини верхньої мантії до 10—20 Па × с. Вплив тиску вивчено дуже слабо. На глибині близько 70 км зростання становить близько порядку. Але зі збільшенням темпера-

тури цей ефект може скорочуватись [21]. Вимірювання в'язкості реальних лав у місці витoku (при температурах 1000—1100 °С) дає величини 103—105 Па × с, помітно відмінними від наведених вище. Втім, частина вивчених лавових потоків містила значну кількість флюїду.

З появою розплаву радикально змінюється ефективна в'язкість середовища [21, 22, 48 та ін.]. Для невеликих концентрацій розплаву ступінь його впливу вивчено недостатньо, але для 5 % можна використовувати формулу Роско [21]: $\eta_c = \eta_p / C_p^{2,5}$, де C — концентрація, індекси «с» і «р» — суміш і рідина відповідно.

Використовуючи наведені вище величини в'язкості розплаву, отримуємо навіть у верхній частині мантійного розрізу значення на багато порядків нижчі реальних. Наприклад, у роботі [61] під Гаваями на глибинах 70—100 км експериментально виявлено шар із вмістом магми 6,6 % (тобто формула Роско застосована) при температурі близько 1550 °С із в'язкістю $3,5 \times 10^{19}$ Па × с. Розрахункова величина — 10^{12-13} Па × с.

Порівнюючи показники ступеня у формулах Роско і Гатчека (остання — для 10 % і більше) можна припустити, що зі зменшенням концентрації розплаву показник ступеня досягає щонайменше 5 (експериментальні дані зі зрозумілих причин у цьому діапазоні відсутні). З іншого боку, оцінки в'язкості флішу, проведені за швидкістю його деформацій, становлять 10^{17} Па × с при наявності в породах перших відсотків води з η 0,001 Па × с [39 та ін.]. З цього випливає показник ступеня у формулі розрахунку в'язкості суміші на рівні 10.

Мабуть, у такій ситуації слід зупинитися на нечисленних емпіричних даних. Наприклад, у роботі [38] встановлено, що при невеликій кількості розплаву ($\leq 3\%$), що утворює плівки на межах зерен, в'язкість зменшується в 10 разів. Згідно [55] при переході від астеносфери до мантії в'язкість зростає на 1,5 порядки. Ця величина видається дещо більш ймовірною.

Процедура моделювання

Результати визначення в'язкості порід мантії на глибині приблизно 50 км у різних регіонах були перераховані для температури 500 °С (рис. 11) та використані як найбільш ймовірні для верхньої точки розрахункової кривої в'язкості порід верхньої мантії під неактивізованою докембрійською платформою. Частина цих даних вже згадували вище, до них додано відомості з робіт [33, 50, 53, 62 та ін.].

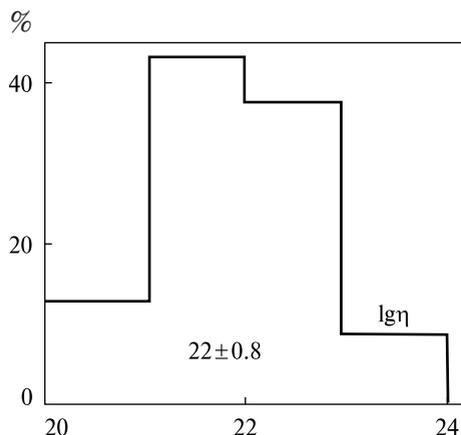


Рис. 11. Гістограма розподілу значень динамічної в'язкості ($\lg \eta$) порід мантії на глибині 50 км при температурі 500 °С

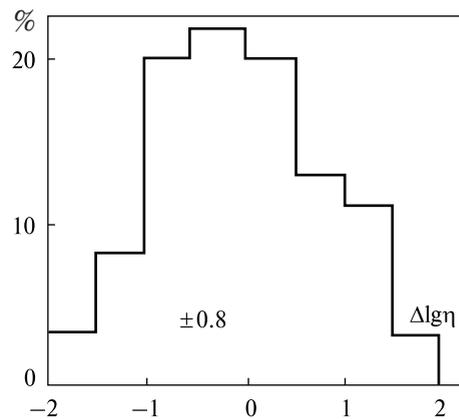


Рис. 12. Гістограма відмінностей між експериментальними та розрахунковими значеннями динамічної в'язкості ($\lg \eta$)

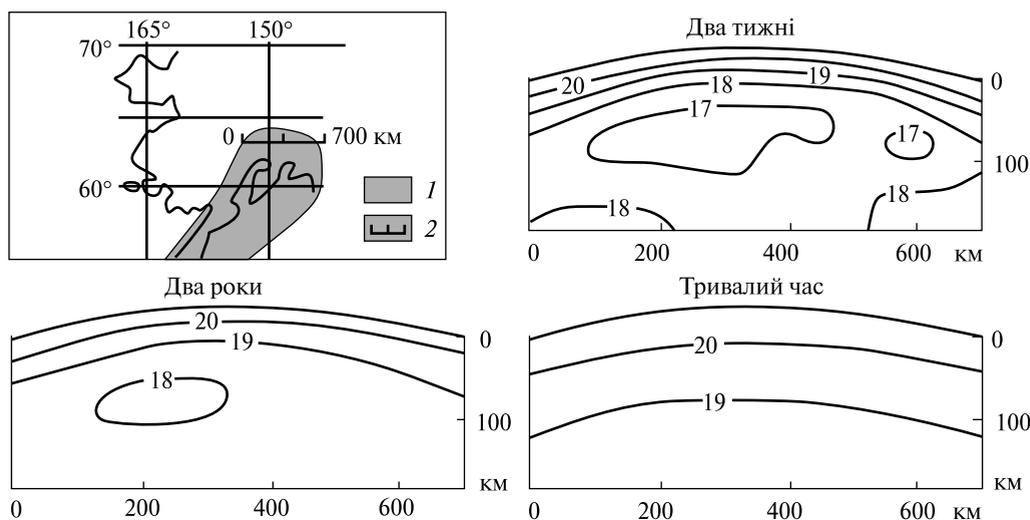


Рис. 13. Розподіл динамічної в'язкості ($\lg \eta$) у корі та верхній мантії на півдні Аляски в залежності від часу, що минув після землетрусу 2002 р; на врізці: 1 – район сейсмічності, 2 – епіцентр землетрусу та профіль, вздовж якого побудовані розрізи [34, 40]

Таблиця 1. Розподіл температури порід, температури солідуса T_{sol} та динамічної в'язкості $\lg \eta$ за глибиною під неактивізованою платформою

Глибина, км	T , °С	T_{sol} , °С	$\lg \eta$	Глибина, км	T , °С	T_{sol} , °С	$\lg \eta$
25	330	600	22,0	150	1220	1510	20,3
50	520	1200	22,0	200	1460	1650	20,0
75	730	1290	21,4	300	1820	1850	19,9
100	940	1370	20,8	400	2000	1980	19,0

Таблиця 2. Результати визначень динамічної в'язкості ($\lg \eta$) верхньої мантії під Ісландією різними авторами у 1991–2011 рр.

Автори	$\lg \eta$
Sigmundsson, 1991	16,5
Sigmundsson et al., 1992	16,3–17,3 18,0–19,5
Blessi et al., 2008	19,5
Le Breton et al., 2010	19,3
Sjoberg et al., 2004	16,5–17,0 17,5
Fleming et al., 2007	17,0–17,5 18,0
Pagli et al., 2007	16,5–17,0 18,5–19,0
Arnadottir et al., 2009	18,0
Kaban et al., 2002	17,5–18,5
Kumar et al., 2005	20,0
Barnhoorn et al., 2011-1	18,5–19,0
Barnhoorn et al., 2011-2	17,5–18,0 18,0–18,5

Приблизно таку ж величину отримано за умов платформної кори на глибині 25 км. Винятком є західний фрагмент Українського щита з аномально низькими глибинними температурами (опис далі). Порівняння розрахункових та експериментальних величин $\lg \eta$ (рис. 10 та ін. дані) виявляє ту ж середню величину відмінностей, що показана на рис. 11 (рис. 12).

Відповідно похибка становить близько 0,5–0,6 $\lg \eta$, достовірні ізолінії можна провести лише через 2 $\lg \eta$. З використанням наведеної вище інформації було розраховано в'язкості порід у тектоносфері неактивізованої платформи (табл. 1), які потім використано при розрахунку в'язкості під регіонами з іншими ендегенними режимами з урахуванням аномальних температур і часткового плавлення [43]. Необхідно оцінити вплив на в'язкість ще одного фактора, здатного створити значні перешкоди у спостережених даних, збільшити їхню похибку. Йдеться про сейсмічність. Приклад її прояву показано на рис. 13.

Очевидно, що невдовзі після землетрусу відбувається значне зниження в'язкості — на 2,0–2,5 порядки, яке утримує помітний рівень протягом перших років. Це, звісно, не геологічний масштаб часу, але на Алясці та у інших активних районах землетруси відбуваються часто, нехай вони і не настільки інтенсивні. У південній смузі регіону (рис. 13, врізка) за 50 років сталося 75 землетрусів магнітудою 5 і вище. Гіпоцентри розташовувалися на глибинах 1–128 км. Три з них були особливо інтенсивними, з магнітудами 9,3; 7,1 та 7,9.

Для з'ясування реальної дії сейсмічності на розкид вибірки експериментальних визначень в'язкості було обрано мантію під Ісландією, де за 20 років відбулася безліч землетрусів [33]. Різні автори за допомогою різних методик побудували 17 варіантів моделей в'язкості (табл. 2, бібліографія — [33]). Середнє значення $\lg \eta$ становить $18 \pm 0,8$, тобто розкид не збільшується проти переважно несейсмічних регіонів. Розрахункова величина для глибин моделі [33] близька до спостереженої та становить близько 17,5. Однак немає сумнівів, що наявні знання про мінливість в'язкості порід тектоносфери все ще неповні і в пропонований нескладний розрахунок з часом можуть бути внесені серйозні корективи.

Результати

Розподіл обчислених величин в'язкості порід тектоносфери на глибинах 25–100 км та 300–400 км показано на рис. 14 і 15. У межах кори (25 км) крок ізоліній

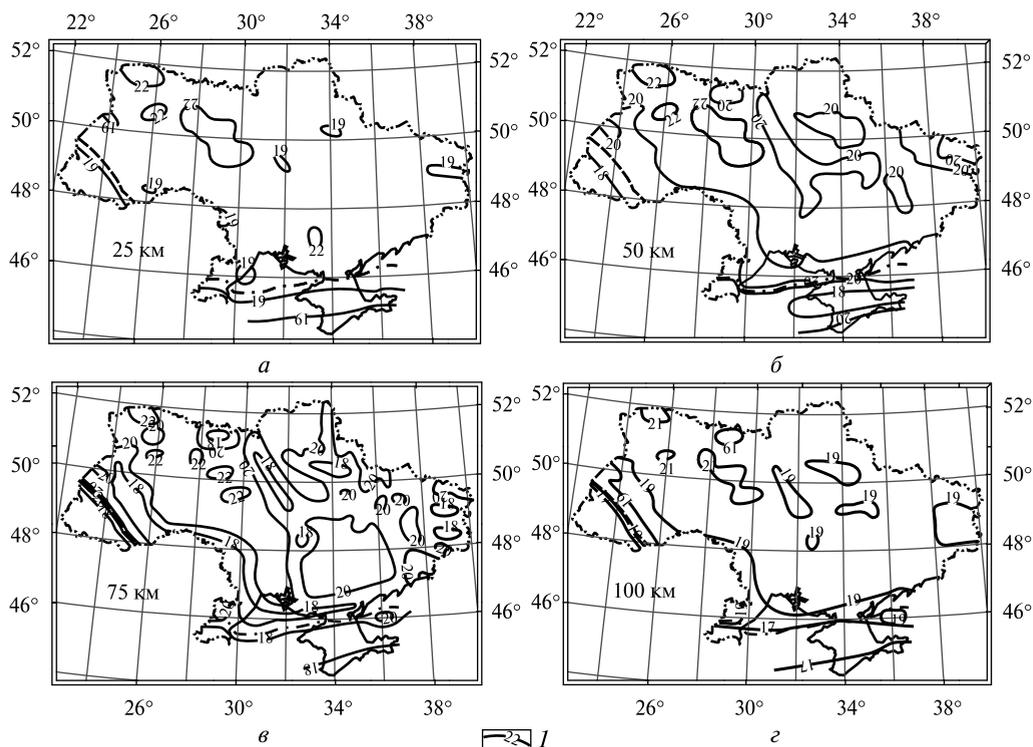


Рис. 14. Розподіл $\lg \eta$ на глибинах 25 км (а), 50 км (б), 75 км (в) та 100 км (з) у межах України: 1 — ізолінії $\lg \eta$. Інші умовні позначення див. на рис. 3

виявився нестандартним через практичний збіг перепаду температури від мінімальної до такої, що скорочує в'язкість на 1,5 порядки та солідуса з аналогічним скороченням. Додаткова зміна до 17 порядку всередині частково розплавлених зон не досягає цієї глибини. Такий же результат ($0,7-1,3 \cdot 10^{19}$ Па \times с) отримано в тому ж інтервалі глибин кори під активованими блоками Феноскандії.

У підкорівій мантії (50 км) максимальна в'язкість (як і глибше) досягається у нагрітому нижче від фону блоці Східно-Європейської платформи на заході та в центрі Українського щита поза зонами сучасної активізації. У самих зонах СА температура зростає на 400 °С, але не перевищує солідуса. В'язкість скорочується до 10^{20} Па \times с, а в активізованих альпідах та кимеридах досягається плавлення, скорочуючи в'язкість до 10^{18} Па \times с у внутрішніх районах обох геосинкліналей.

Ті самі порядки величин в'язкості у відповідних регіонах України зберігаються на глибині 75 км. Зміни стосуються активізованих фрагментів платформи, де температурні аномалії вищі ніж на глибині 50 км. Тут в окремих районах досягається солідус і в'язкість падає до рівня, що нижче лише в Карпатах та на Скіфській плиті.

На глибині 100 км вплив температури, що збільшується, на в'язкість помітно перевищує вплив зростання тиску. На території України проходять три ізолінії $\lg \eta$, причому вони знижені на одиницю у порівнянні з глибиною 75 км. Хоча зон часткового плавлення на активізованій платформі мало, проявляється підшва перегрітого шару, утвореного підняттям глибинної речовини у процесі СА.

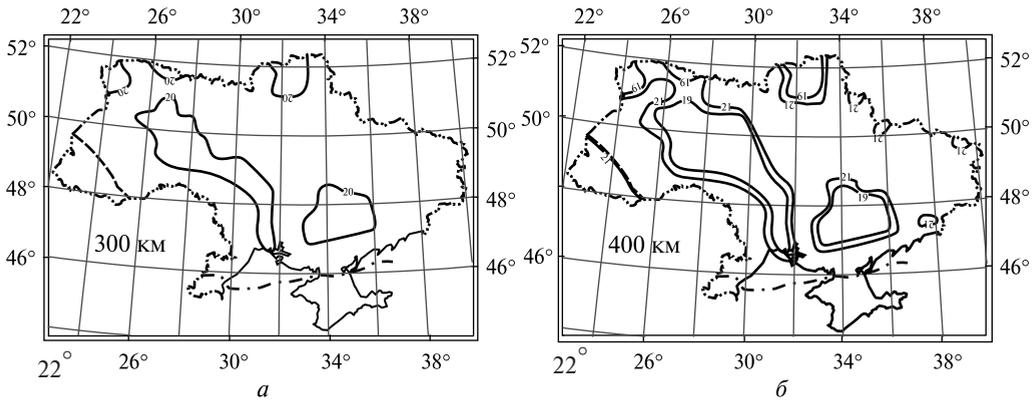


Рис. 15. Розподіл в'язкості ($\lg \eta$) на глибинах 300 км (а) та 400 км (б) у межах України. Умовні позначення див. на рис. 14

На глибинах 150 км—300 км диференціація в'язкості в межах території України різко скорочується. Розрахункові значення не дають змоги провести дві ізолінії з кроком $2 \lg \eta$ на кожній із глибин. У всіх випадках проведено ізолінію 20. На 150 км ізолінії обмежують зони зниженої в'язкості в Карпатах і на Скіфській плиті. На глибині 200 км виділяється лише регіон Карпат. В обох випадках йдеться про сліди тепломасоперенесення з нижньої частини тектоносфери у верхню. На глибині 300 км ситуація вже зворотна: як зони з відносно низькою в'язкістю (позитивною аномалією температури) виділяються неактивізовані платформні.

На глибині 400 км останній ефект проявляє себе повною мірою. Тут з'являються великі області часткового плавлення, які були відсутні на попередніх зрізах. Зазначені вище платформні регіони при значній площі оконтурюють дві ізолінії, що вказує на помітний перегрів та зниження в'язкості. Саме в цих регіонах збереглася енергія, придатна для активізації, яка ще не розпочалася. Сусідні блоки пройшли поліморфне ущільнення.

Розвиток Релей-Тейлорівської нестійкості безперечний, настає момент, коли підйомна сила полегшеного на 8 % ($0,3 \text{ г/см}^3$) блоку перевищує міцність порід і починається рух, що супроводжується сейсмічністю. Теплове розущільнення в стартових умовах такого роду не відіграє помітної ролі. У цій ситуації цілком можна очікувати вібраційного зниження в'язкості на порядок на початковому відрізку шляху астеноліту — до $10^{18} \text{ Па} \times \text{с}$. Розміри об'єктів зниженої в'язкості, що формуються сейсмічністю, мають у плані розміри в діапазоні 130 км—250 км, товщину — близько 60 км, тобто узгоджуються з обсягами квантів тектонічної дії — КТД [8]. Таких відомостей мало, тому збіг може виявитися і випадковим, але все ж таки можна припустити, що сейсмічність — одна з причин формування квантів і саме такими будуть розміри тіл, що включаються в рух. У цьому випадку їхня середня аномальна густина становитиме близько $0,15 \text{ г/см}^3$. Видається досить ймовірним, що КТД досягають мінімального рівня після попадання астенолітів на глибини менше 200 км, де проявляється підйомна сила розплаву.

Оцінимо швидкість підйому одиничного кванта за формулою Стокса: $v = \frac{2\Delta\sigma \times g \times r^2}{9\eta}$, де $\Delta\sigma$ — аномалія густина, g — прискорення сили тяжіння, r — напіврозмір об'єкта, що рухається.

Швидкість підйому одиничного кванта становитиме близько 1 м/рік (без урахування впливу сейсмічності на в'язкість). Під час переміщення в середовище над середньою в регіоні глибиною покрівлі зони поліморфного переходу величина розушільнення скоротиться в 15 разів, але в'язкість скоротиться майже на порядок, а під час подальшого руху густинний контраст зростатиме до $0,06 \text{ г/см}^3$ у покрівлі астеносфери. Таким чином, час переміщення до глибин, на яких знак перепаду густини між рідиною і твердою речовиною мантиї змінюється, займе сотні тис. років. Очевидно, що підйом не призведе до помітного охолодження (крім адіабатичного). Температури в інтервалі глибин зупинки астеноліту, що піднімається (і астеноліту, що опускається йому на зміну), можуть бути визначені досить точно [22 та ін.].

Висновки

Дослідження, проведені на четвертому та п'ятому етапах побудови геофізичних моделей тектоносфери території України, досягли поставленої мети. Вперше побудовано 3D-модель розподілу питомої пружної енергоємності та в'язкості до глибини 400 км.

На жаль, немає відомостей про досліджуваний параметр W , встановлений будь-яким незалежним чином. Метод контролю результатів, який використовується для інших моделей, недосяжний. Розпочата у статті спроба непрямого контролю вочевидь не може бути повною. Це лише дає змогу узгодити модель із деякими фактами на якісному рівні.

Розрахунки виявили дуже різку зміну значення параметра з глибиною: вже починаючи з підкорової частини верхньої мантиї W виявляється майже на порядок нижче, ніж у корі. Частково це пов'язано з поширенням новітньої активізації та зони часткового плавлення. Але низькі значення питомої пружної енергії поширені і глибше, аж до основи верхньої мантиї. Разом зі скороченням періоду релаксації напруги при підвищенні температури з глибиною ця обставина практично позбавляє речовину верхньої мантиї можливості руху за рахунок власних енергетичних запасів. Винятком є зміни обсягу під впливом нагрівання радіогенним теплом та охолодження кондуктивним та конвективним (адвективним) тепломасопереносом. Тим не менше, використання отриманих даних у дослідженнях геодинаміки та сейсмічності може бути корисним при розв'язанні низки суміжних завдань.

Наведена в статті інформація свідчить про актуальність вивчення в'язкості речовини тектоносфери для геодинамічних досліджень і, одночасно, про все ще недостатню вивченість зв'язку цього параметра з іншими властивостями середовища та природними явищами, про значні невизначеності у використаних методах розрахунку фонових та аномальних його величин. Застосований підхід виявляє деяку можливість контролю розрахункових результатів за експериментальними, хоча й з дуже значними похибками. Цілком ймовірно, що отримані оцінки можуть бути згодом переглянуті. Але вже можливі певні висновки про характер глибинних процесів у тектоносфері.

Стосовно можливості швидкого адвективного переміщення речовини варто додати, що результати такого процесу проявляються в аномаліях швидкості сейсмічних хвиль і густини на глибинах верхньої тектоносфери активних

регіонів. Для них показано узгодження без підбору з експериментальними даними. Природно вважати, що буде реалізовано саме це геологічно миттєве адвективне підняття, а не повільну замкнуту теплову конвекцію, для якої швидкість: $v^2 = a \times g \times \beta \times \sigma \times \Delta T \times \Delta H / 9\eta$, де a — температуропровідність, β — коефіцієнт теплового розширення, ΔH — потужність конвектуючого шару, менша на 2 порядки (близько 1 см/рік). До такого ж результату призводить і чисельне моделювання процесу [41]. Подібна швидкість менша навіть за «встановлену» тектонікою плит.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аренс Т. Состояние минералов мантии. Верхняя мантия. Москва: Мир, 1975. с. 81—103.
2. Вербицкий С.Т. Пронишин. Р.С., Пронишин В.И. и др. Сейсмичность Карпат в 2019 году. *Ученые записки КФУ им. В.И. Вернадского*. 2020. 4. С. 86—143.
3. Верховцев В. Новітні вертикальні рухи земної кори території України, їх взаємовідношення з лінійними та кільцевими структурами. Енергетика Землі, її геолого- екологічні прояви, науково-практичне використання. Київ: КДУ, 2006. С. 129—137.
4. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. Москва: Наука, 1975. С. 536 с.
5. Глушко В.В. Западные и Восточные Карпаты. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Молодые платформы и альпийские складчатые пояса. Киев: Наук. думка, 1994. С. 24—94.
6. Гордиенко В.В. Тепловые аномалии геосинклиналей. Киев: Наук. думка, 1975. 142 с.
7. Гордиенко В.В. Глубинные процессы в тектоносфере Земли. Киев: ИГФ НАНУ, 1998. 85 с.
8. Гордиенко В.В. Процессы в тектоносфере Земли. (Адвекционно-полиморфная гипотеза). Saarbrücken: LAP, 2012. 256 с.
9. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін пресс, 2005. 210 с.
10. Гордиенко В.В., Усенко О.В. О геолого-геофизических критериях глубин магматических очагов в верхней мантии. *Геофиз. журнал*. 2007. 4. С. 31—38.
11. Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В. и др. Днепровско-Донецкая впадина (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін пресс, 2006. 142 с.
12. Гутерман В.Г. Механизмы тектоногенеза. Киев: Наук. думка, 1987. 172 с.
13. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. Ред. В.І. Старостенко. Київ: Наук. думка, 2005. 256 с.
14. Коваленко В.И., Наумов В.Б., Гирнис А.В. и др. Оценка средних содержаний H₂O, Cl, F, S в деплетированной мантии на основе составов расплавленных включений и закалочных стекол срединно-океанических хребтов. *Геохимия*. 2006. 3. С. 243—266.
15. Крылов С.В., Дучков А.Д. Глубинное деформационно-прочностное районирование земной коры. *Геология и геофизика*. 1996. 9. С. 56—65.
16. Надежка Л.И., Генштафт Ю.С., Салтыковский А.Я. и др. Некоторые глубинные неоднородности литосферы и современная сейсмичность Воронежского кристаллического массива. Мат. XIV конф. «Связь поверхностных структур коры с глубинными». Апатиты: КФ РАН, 2008. С. 70—73.
17. Назаревич Л.С. Характеристики сейсмічності і сеймотектонічного процесу в зонах Карпатського регіону. Дис. ...канд. геол. наук. Київ: ІГФ. 2006. 220 с.
18. Обуэн Ж. Геосинклинали. Москва: Мир, 1967. 304 с.
19. Павленкова Н.И. Особенности различных подходов к интерпретации данных непрерывного профилирования. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур на территории СССР, Москва: Наука, 1980. С. 29—40.
20. Павленкова Н.И., Баранова Е.П. Днепровско-Донецкая впадина. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур на территории СССР. Москва: Наука, 1980. С. 82—86.
21. Периков Э.С. Вязкость магматических расплавов. Москва: Наука, 1984. 160 с.
22. Перчук Л.Л. Геотермобарометрия и перемещение кристаллических пород в коре и верхней мантии Земли. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. 7. С. 64—72.

23. Петрофизика. Ред. Н.Б. Дортман. Москва: Недра, 1992. 391 с.
24. Полухин П.И. Физические основы пластической деформации. М.: Наука, 1982. 584 с.
25. Савко А.Д., Надёжка Л.И., Шевырёв Л.Т. Новые данные о флюидной и сейсмической активности Воронежской антеклизы. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. Москва: ГЕОС, 2008. С. 439—441.
26. Сафронов О.Н. Сейсмические условия и сейсмическая опасность платформенной части Украины. Дис. ...канд. геол. наук. Симферополь. 135 с.
27. Справочник физических констант горных пород. Ред. С. Кларк. Москва: Мир, 1969. 478 с.
28. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. Т. 2. Москва: Мир, 1985. 730 с.
29. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. Ред. М. П. Волярович. Москва: Недра, 1988. 255 с.
30. Юханян А.К., Геншафт Ю.С. Экспериментальное изучение плавления ксенолитов из лав Гегамского нагорья в условиях базальтового слоя земной коры. *Изв. АН АрмССР*. 1985. № 1. С. 39—44.
31. Яновская Т.Б. Основы сейсмологии. СПб.: ВВМ, 2006. 288 с.
32. Ashby, M., Verall, R. Micromechanisms of flow and fracture and their relevance to the rheology of the upper mantle *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1977. Vol. 288A. P. 59—95.
33. Barnhoorn, A., van der Wal, W., Drurya, M. Upper mantle viscosity and lithospheric thickness under *Iceland Journal of Geodynamics*. 2011. Vol. 52 (3—4). P. 260—270. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.01.002>
34. Bürgmann, R., Dresen, G. Rheology of the Lower Crust and Upper Mantle: Evidence from Rock Mechanics, Geodesy and Field Observations. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2008. Vol. 36. P. 531—567. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124326>
35. Chen, S., Hiraga, K., Kohlstedt, D. Water weakening of clinopyroxene in the dislocation creep regime. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111: B08203. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB003885>
36. Chen, X., Lin, C., Shi, L. Rheology of the lower crust beneath the northern part of North China: Inferences from lower crustal xenoliths from Hannuoba basalts, Hebei Province, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*. 2007. Vol. 50 (8). P. 1128—1141.
37. Dimanov, A., Dresen, G. Rheology of synthetic anorthite-diopside aggregates: implications for ductile shear zones. *J. Geophys. Res.* 2005. Vol. 110: B07203. <https://doi.org/10.1029/2004JB003431>
38. Dimanov, A., Wirth, R., Dresen, G. The effect of melt distribution on the rheology of plagioclase rocks. *Tectonophysics*. 2000. Vol. 328. P. 307—327.
39. Encyclopedia of Geology. Ed.: Selley, R., Cocks, L., Plimer, I. *Elsevier Academic Press.*, 2005 Vol. I—V.
40. Freed, A., Bürgmann, R., Calais, E., et al. Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology. *J. Geophys. Res.* 2006 111: B08203. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB003894>
41. Gerya, T.V., Yuen, D.A. Robust Characteristics Method for Modeling Multiphase Visco-Elasto-Plastic Thermo-Mechanical Problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2007. Vol. 163. P. 83—105.
42. Gordienko, V. About geological theory. *Geofizicheskiy Zhurnal*. 2022. № 2. P. 68—92. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256266>
43. Gordienko, V.V., Gordienko, I.V. Temperature distribution in the crust and upper mantle of Ukraine. *Geodynamics*. 2023. № 1. P. 47—56. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.047>
44. Gordienko, V.V., Gordienko, L.Ya. The P-velocity models of continental tectonosphere (territory of Ukraine). *NCGT Journal*. 2024. № 2. P. 172—187.
45. Hack, A., Thompson, A. Density and Viscosity of Hydrous Magmas and Related Fluids and their Role in Subduction Zone Processes. *Journal of Petrology*. 2011. Vol. 52, Iss. 7—8. P. 1333—1362. <https://doi.org/10.1093/ptrology/egq048>
46. Heidbach, O., Ledermann, P., Kurfè, D. et al. Attached or not attached: slab dynamics beneath Vrancea, Romania. *Papers International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation*. Bucharest. 2007. P. 3—20.

47. Hirth, G, Kohlstedt, D. Rheology of the upper mantle and the mantle wedge: A view from the experimentalists. Inside the Subduction Factory. *Am. Geophys. Soc.*, Washington, DC. 2003. Vol. 138. P. 83—105. <https://doi.org/10.1029/138GM06>
48. Husson, D., Edwards, P., Johnson, S. et al. Crustal structure of the Peru-Chili trench: 80—120S Latitude. *The geophysics of Pacific Ocean basin and its margin.* 1976. Vol. 19. P. 71—85. <https://doi.org/10.1029/GM019p0071>
49. Irifune, T. An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the construction of the mantle. *Phys. Earth and Pl. Inter.* 1987. Vol. 45, P. 324—336. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90040-9)
50. Kenner, S., Segall, P. Lower crustal structure in northern California: implications from strain-rate variations following the 1906 San Francisco earthquake. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. P. 2011—2023. <https://doi.org/10.1029/2001JB000189>
51. Levin, V., Kim, W., Menke, W. Seismic velocities in shallow crust of western New England and northern New York. *Bull. Seis. Soc. Of Am.* 1996. Vol. 85, № 1. P. 207—219.
52. Peltonen, P., Kinnunen, K., Huhma, H. Petrology of two diamondiferous eclogite xenoliths from the Laqtojoki kimberlite pipe, eastern Finland. *Lithos.* 2002. Vol. 63, iss. 3—4. P. 151—164. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00119-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00119-6)
53. Sacek, V., Ussami, N. Upper mantle viscosity and dynamic subsidence of curved continental margins. *Nature Communications* 4. 2013. Article number: 2036. <https://doi.org/10.1038/ncomms3036>
54. Schmeling, H. Partial melting and melt segregation in a convecting mantle. *Physics and Chemistry of Partially Molten Rocks.* Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2000. P. 1—25. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4016-4_5
55. Scoppola, B., Boccaletti, D. Bevis M. et al. The Westward Drift of the Lithosphere: A rotational drag? *Geological Society of America Bulletin.* 2006, January/February. P. 199—209.
56. Sobolev, S., Zeyen, H., Stoll, G. et al. Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of French Massif Central. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996. Vol. 139 Iss. 1—2. P. 147—163. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(95\)00238-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(95)00238-8)
57. Syono, Y., Manghnani, M. Rheological Structure of a Subduction Zone: Application of High P-T Viscous and Anelastic Properties of Mantle Rocks. Tokyo: TERRAPUB, 1992. <https://doi.org/10.1029/GM067p0263>
58. Tackley, P., Ammann, M., Brodholt, J. et al. Mantle Dynamics in Super-Earths: Post-Perovskite Rheology and Self-Regulation of Viscosity. *Icarus.* 2013. V. 225, Iss. 1. P. 50—61. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.03.013>
59. Twiss R. Theory and applicability, of a recrystallized grain size paleopiezometer. *Pure Appl. Geophys.* 1977. Vol. 115. P. 227—244. <https://doi.org/10.1007/BF01637105>
60. Van der Wal, D., Chopra, P., Drury, M. et al. Relationships between dynamically recrystallized grain size and deformation conditions in experimentally deformed olivine rocks. *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20. P. 1479—1482.
61. Wang, K. Elastic and viscoelastic models of crustal deformation in subduction earthquake cycles. *The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults*, New York: Columbia Univ. Press, 2007. P. 540—575. <https://doi.org/10.7312/dixo13866-017>
62. Watson, S., McKenzie, D. Melt Generation by Plumes: A Study of Hawaiian Volcanism. *Journal of Petrology.* 1990. Vol. 32, iss. 3. P. 501—537. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.3.501>
63. Wilks, K.R., Carter, N.L. Rheology of some continental lower crustal rocks. *Tectonophysics.* 1990. 182. P. 57—77.

V.V. Gordienko, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof., Chief Researcher
e-mail: gordienkovadim39@gmail.com
ORCID 0000-0001-9430-7801
Scopus author Id = 7102473958
S.I. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine
32, Palladin ave., Kyiv, 03142, Ukraine

DISTRIBUTION OF SPECIFIC ELASTIC ENERGY CAPACITY AND VISCOSITY IN THE TECTONOSPHERE OF UKRAINE

The paper presents a description of the process and the results of constructing the distribution of specific potential elastic energy (W) and dynamic viscosity (η) in the tectonosphere of Ukraine. These characteristics of the medium provide information on the accumulation of stress arising during shear deformations and characterize the medium (the crust and upper mantle of the Earth) from the side of its reaction to applied stresses of different nature. The corresponding calculations became possible after creating three-dimensional models of temperature, velocity of longitudinal seismic waves, and density in Ukraine's crust and upper mantle at depths of 25–400 km with the author's participation in previous works. Such a problem was solved for the first time. The methodological basis for determining all the listed parameters is a scheme of deep processes in the tectonosphere, considering, first of all, the results of heat and mass transfer during recent activation. They are superimposed on platform models (in addition to the territory of the East European platform, Donbass is also in it), the Alpine geosyncline of the Carpathians, and the Hercynian-Cimmerian geosyncline of the Scythian plate. The unfinished process of recent activation cannot be accurately described by the geological theory used by the author. Its optimal version was established before the start of the work by gravitational and thermal modeling along many DSS profiles around the northern hemisphere. For the calculation of W , the initial data were supplemented with information on the strength of the tectonosphere substance depending on temperature. The conditions for the formation of ruptures and earthquakes were considered. Temperature anomalies do not create the necessary stresses to exceed strength. The uplift of crustal blocks and subcrustal mantle due to overheating has sufficient impact. Seismogenic movements occur at the boundaries of blocks with different rates of rise and slide of rock masses at an angle. This is also noticeable in platform territories with recent activation, such as the Dnieper-Donets Basin. To determine η , we used experimental and computational results that allowed us to consider rock composition, crystal size, temperature, total pressure, melt and fluids, strain rates, vibrations, etc. This made it possible to form a background viscosity distribution in the tectonosphere of the inactivated platform. Considering the anomalous temperatures, it was possible to determine deviations from the background at different depths under the active regions. It was rather difficult to compare the results with experimental data and determine the actual calculation errors and the procedure for constructing the parameter distribution using isolines. In general, admittedly, the obtained picture reflects, primarily, the actual situation in the study of the viscosity of tectonosphere rocks. It may well change significantly in the future.

Keywords: specific potential elastic energy, recent activation, seismicity, dynamic viscosity of rocks; the effect of temperature, pressure, and the appearance of melting.

<https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.044>

В.О. Ємельянов¹, чл.-кор. НАН України, д-р геол.-мін. наук,

проф., головн. наук. співроб.

e-mail: volodyasea1990@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8972-0754

В.В. Іванченко¹, канд. геол.-мін. наук, доцент, зав. відділом

e-mail: wivanchenko@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4889-8975

І.Е. Ломакін¹, д-р геол. наук, головн. наук. співроб.

e-mail: igorlomakin@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2745-2579

М.В. Беліцька¹, канд. геол. наук, старш. наук. співроб.

e-mail: belitska.mv@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3823-8738

А.В. Іванченко², аспірант

e-mail: avi3751@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7989-7380

Л.В. Берьозкіна¹, мол. наук. співроб.

e-mail: lkurazyeyeva@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7444-6860

¹ ДНУ «МорГеоЕкоЦентр НАН України»

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

² Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна

ДИСПЕРСНЕ ЗОЛОТО В АЛЮВІЇ, ДЕЛЮВІЇ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ МОРСЬКИХ ВІДКЛАДАХ ПІВДНЯ УКРАЇНИ І ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВИДОБУВАННЯ

У статті розглянуто особливості поширення, морфології та мінеральних асоціацій дисперсного золота в сучасних прибережно-морських, дельтових та алювіальних відкладах Півдня України. Проаналізовано результати комплексних досліджень відкладів річкових долин та шельфових зон, а також технологічні підходи до видобування лускуватого і дисперсного золота. Обґрунтовано перспективність розвідки таких покладів і впровадження інноваційних методів їхнього освоєння.

Ключові слова: південь України, морські відклади, алювії, золото, оксиди заліза, сульфід, комплексна переробка.

Цитування: Ємельянов В.О., Іванченко В.В., Ломакін І.Е., Беліцька М.В., Іванченко А.В., Берьозкіна Л.В. Дисперсне золото в алювії, делювії та прибережних морських відкладах півдня України та перспективи його видобування. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2025. **21**, № 2: 44–55. <https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.044>

Вступ

У сучасних умовах зростаючої потреби у благородних металах актуальним є вивчення нетрадиційних джерел видобутку золота. Особливий інтерес викликає дисперсне золото (ДЗ) розміром до 0,1 мм, присутнє в сучасних алювіальних відкладах річок і морських шельфів. Південь України, зокрема дельта Дунаю, Нижнє Дніпро, узбережжя Чорного та Азовського морів є перспективними районами для пошуку таких форм золота [12, 17]. Його джерелами є розташовані на території України родовища, рудопрояви, а також магматичні, метаморфічні та осадові комплекси з незначним, але постійним вмістом золота, у тому числі тонкого і дисперсного [12, 27].

Метою дослідження є встановлення умов формування, морфологічних і геохімічних характеристик тонкого й дисперсного золота в морських, алювіальних і дельтових осадах півдня України, а також аналіз технологічних підходів для його виявлення та потенційного промислового освоєння із застосуванням безреагентних методів збагачення і комплексної переробки.

Об'єкти дослідження: сучасні алювіальні, дельтові та шельфові відклади півдня України, зокрема у басейнах дельти Дунаю, Дніпра та прибережних районах Чорного й Азовського морів, які містять тонке й дисперсне золото.

Методи дослідження: використано комплекс польових методів: ручне шнекове буріння, опробування донних осадів з аквалангом, відмив і розділення «сірого шліха» у бромформі та у магнітних полях, оптичну й растрову електронну мікроскопію (РЕМ), мікрозондовий аналіз (МЗА). Застосовано експериментальні методи збагачення, що базуються на запатентованих авторами безреагентних технологіях і дозволяють визначати ДЗ навіть при низьких концентраціях [6, 8, 10].

Завдання дослідження:

- узагальнити геолого-геоморфологічні умови формування сучасних золотвмісних відкладів півдня України;
- охарактеризувати особливості складу й типоморфізм ДЗ;
- проаналізувати ефективність сучасних методів виявлення, пробопідготовки та збагачення ДЗ;
- оцінити ефективність безреагентних технологій вилучення ДЗ у вихровому повітряно-мінеральному потоці;
- визначити перспективні райони для промислової розробки ДЗ.

Упродовж останніх десятиліть українські науковці здійснили низку ґрунтовних досліджень з питань генезису, морфології, геохімії та методів вилучення ДЗ. Важливу роль відіграли ґрунтовні роботи академіка Є.Ф. Шнюкова, присвячені пошукам ДЗ в Азово-Чорноморському басейні [23, 26]. Доведено, що у цьому регіоні утворення ДЗ можливе не лише теригенним, а й аутигенним шляхом, у тому числі біогенним [20]. Поводження ДЗ у природних процесах осадової диференціації речовини в умовах морського і річкового розсипоутворення детально вивчав В.Т. Кардаш [11]. У роботі Є.Ф. Шнюкова й В.В. Іванченка [24] вперше повідомлено про присутність самородного золота у брекчіях грязьових вулканів Азово-Чорноморської провінції. Подальші дослідження В.В. Іванченка, М.В. Беліцької, М.О. Маслакова, І.В. Гаврилюка та інших авторів [2—5, 7—9, 17—19, 22] підтвердили наукову і прикладну значущість тематики та вказали на можливість ефективного промислового освоєння покладів ДЗ.

Геолого-геоморфологічні умови південних регіонів України визначають особливості розвитку річкових дельт, алювіальних терас, морських і лиманних систем, де акумулюються сучасні осади. Вони формуються за участю численних джерел — ерозійних продуктів Українського щита та його обрамлення, техногенних наночастинок, а також біогенних компонентів. Ці фактори створюють умови для локалізації ДЗ у пелітових та алевритових фракціях донних відкладів [1, 2, 16].

Вміст золота в сучасних відкладах півдня України

За результатами аналізу проб з алювіальних, дельтових і прибережно-морських відкладів басейнів дельти Дунаю, Дніпра та малих річок Причорномор'я вміст золота варіює від 0,05 до 1,25 г/т, у поодиноких збагачених ділянках — до 3,1 г/т. (табл. 1).

За даними М.О. Маслакова, у понад 40 % досліджених проб осадових порід Подніпров'я виявлено ДЗ. Вміст золота у сучасних алювіальних відкладах коливається від 0,01 до 0,62 г/т, середнє значення становить 0,21 г/т. Для дельтових відкладів Дніпра вміст золота змінюється у межах 0,05—0,62 г/т, тоді як у прибережно-морських відкладах північно-західного узбережжя Чорного моря він становить 0,07—0,85 г/т [19].

Мінералогія рудопроявів золота

За результатами шліхового аналізу, мікроскопічних та електронно-мікроскопічних досліджень ДЗ асоціює з оксидами заліза (магнетитом, гематитом, гетитом), сульфідами заліза (піритом, арсенопіритом, марказитом), цирконом, апатитом і групою глинистих мінералів. У нижніх (приплотикових) ділянках річкового алювію часточки золота супроводжують дрібні ідіоморфні кристали аутигенного піриту октаедричного і пентагон-додекаедричного габітусу. В середній частині розрізу, на проміжних плотиках із золотом зустрічаються мікроскопічні сфероліти марказиту. У верхніх, інтенсивно аерованих ділянках розрізу його супроводжують гетит, гідрогетит та інші гідрооксиди заліза.

Крім алотигенних, аутигенних мінеральних асоціацій, у верхній частині розрізу трапляються техногенні компоненти осаду: мідь, бронза, латунь, радіотехнічні сплави олова та свинцю, мікропластик тощо (рис. 1).

Гранулометрія тонкого золота

Дисперсне і тонке золото має розмір 5—50 мкм, що ускладнює його механічне вилучення з осаду. Тонке золото буває як у вигляді окремих ізольованих зерен, так і в зростках з сульфідами (піритом, арсенопіритом), кварцом і гідроксидами заліза. Переважають зерна діаметром менш ніж 100 мкм (рис. 2).

Таблиця 1. Вміст золота (Au) у різних типах відкладів [4, 18]

Типи відкладів	Діапазон вмісту Au, г/т	Середнє значення, г/т
Алювіальні	0,08—1,25	0,42
Дельтові	0,05—0,62	0,21
Прибережно-морські	0,07—0,85	0,35

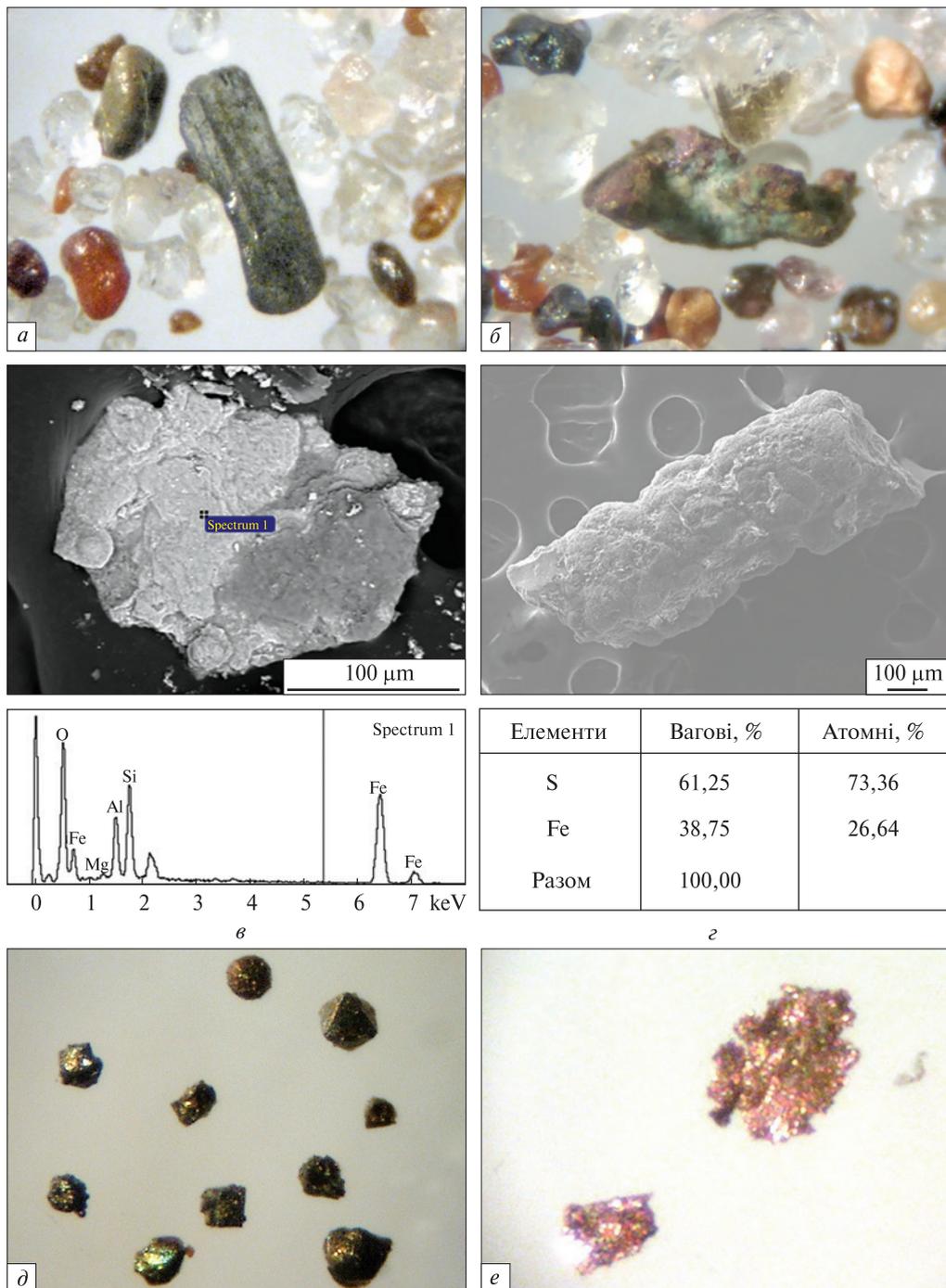


Рис. 1. Мінерали-супутники дисперсного золота у сучасних донних відкладах Півдня України: *а* — циркон (бурого кольору), рутил (червоного кольору), андалузит (у центрі), лейкоксен (сірого кольору), кварц (без забарвлення); *б* — мідь в «мішечку» з оксидів і карбонатів міді; *в* — лімоніт; *г* — натічні форми марказиту; *д* — ідіоморфні кристали піриту; *е* — самородна мідь (*а, б, д, е* — у полі зору бінокулярного мікроскопа; *в, г* — РЕМ, МЗА; збільшення: *а, б* — 100×; *д, е* — 120×)

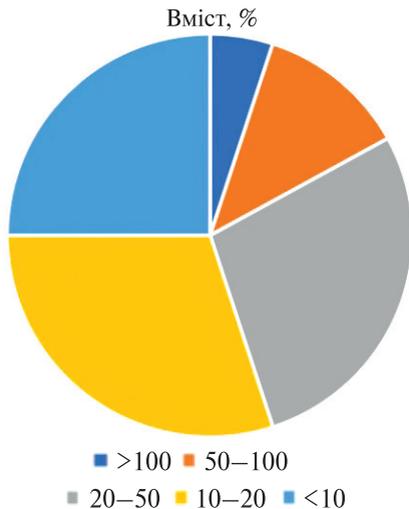


Рис. 2. Розподіл золотин за класами крупності

Морфологічно золото надзвичайно різноманітне. Переважають пластинчасті, ниткоподібні, ізометричні, дископодібні та дендритоподібні форми (рис. 3) [17].

Поверхня золотин нерівна, з великою кількістю мікротріщин і виступів. Скульптура поверхні є своєрідним відбитком субстрату, на якому відбувалася кристалізація металу, з відбитками інтенсивно вивітрених гідратованих силікатів або гідроксидів. Багато золотин мають мікропористу структуру з пустотами до 50 %. Така мікроскопічна шорсткість і порожнистість

зумовлює підвищену рухливість золотин у водному потоці та сприяє їх взаємодії з тонкодисперсними частинками глинистих мінералів, що ускладнює вилучення золота гравітаційними методами. Виявлені також зростки золота з органічною речовиною та глинистими мінералами [18].

Мікроструктурний аналіз показав, що значна частина дрібних золотин має тонкопластинчасту форму з товщиною до 10 мкм та чіткими рівними контурами. Пластинки складені натічними агрегатами, напливами та коломорфними утвореннями, що вказує на їх кристалізацію з колоїдних розчинів. Осадження металу відбулося у кілька етапів, імовірно з протилежних боків мікротріщин (рис. 4). Більшість досліджених зразків мають неоднорідну структуру з наявністю пор і поверхневих нашарувань (рис. 5) [17, 24].

При товщині 10–20 мкм, ширина і довжина виявлених пластинок золота може досягати 100–150 мкм і більше, що значно перевищує розмір основної маси часточок донного мулу в пригирлових ділянках річок південної України. Це важливо для розуміння поведінки ДЗ в процесах седиментогенезу, бо підтверджує висновок [11] про можливість переміщення золотин до верхніх ділянок розрізу донних відкладів. Також наведені дані є вирішальними при виборі технологій видобутку ДЗ.

Самородне золото має низьку твердість і високу пластичність. Тому в річкових відкладах воно зазнає значних механічних змін. У пригирлових ділянках морфологія золотин спрощується. Серед них збільшується кількість обкатаних, ізометричних і видовжених золотинок [13–15, 21]. Це сприяє осадовій диференціації та формуванню розсипів золота.

Хімічний склад золотин

Мікрозондові дослідження показали, що золото в досліджених відкладах переважно високопробне (Au 850–980 ‰). Вміст срібла становить 2 %–12 %, міді — до 0,5 %, домішки Sb, As, Fe на рівні десятих долей відсотка. Середній хімічний склад золота такий: Au — 88,5 %; Ag — 9,7 %; Cu — 0,4 %; Fe — 0,3 %; Sb — 0,1 %; As — 0,05 % [4, 17, 19].

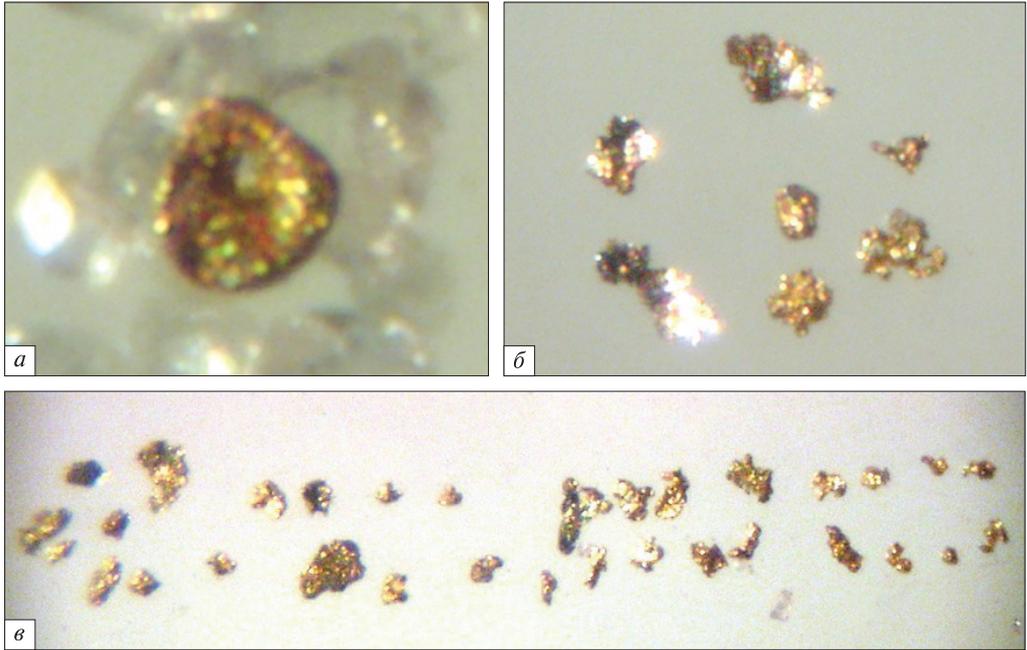


Рис. 3. Морфологія тонкого золота, виділеного з алювію придельтових ділянок річки Дніпро (бінокулярний мікроскоп, збільшення: а – 300×; б, в – 250×) [17]

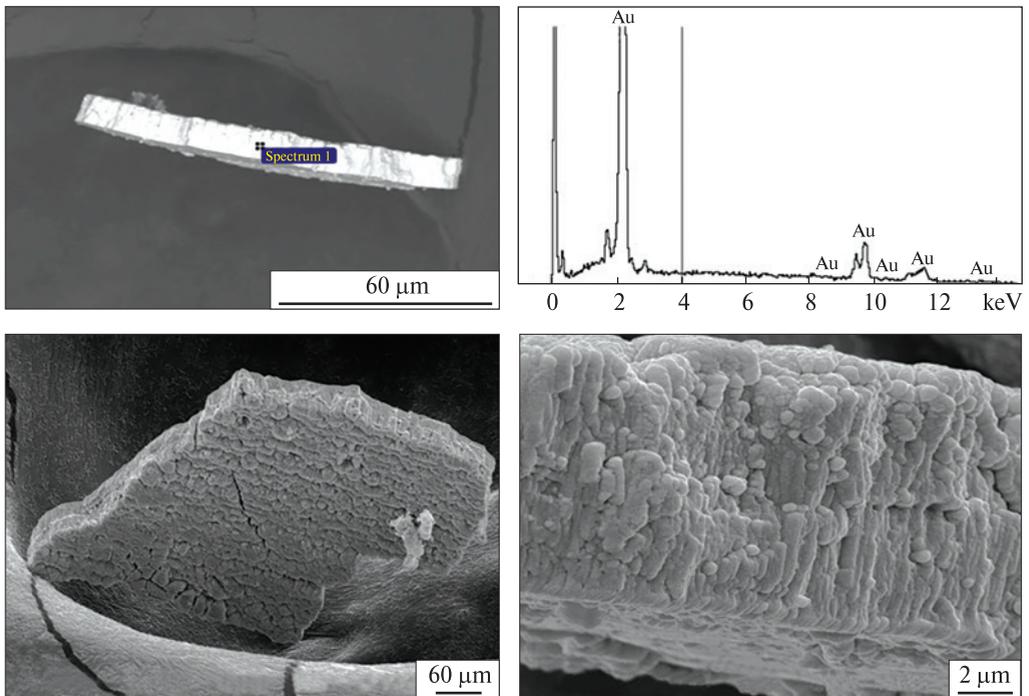


Рис. 4. Пластинка, утворена натічними агрегатами золота у донному мулі дельти р. Дунай поблизу м. Вилкове (РЕМ, МЗА) [18]

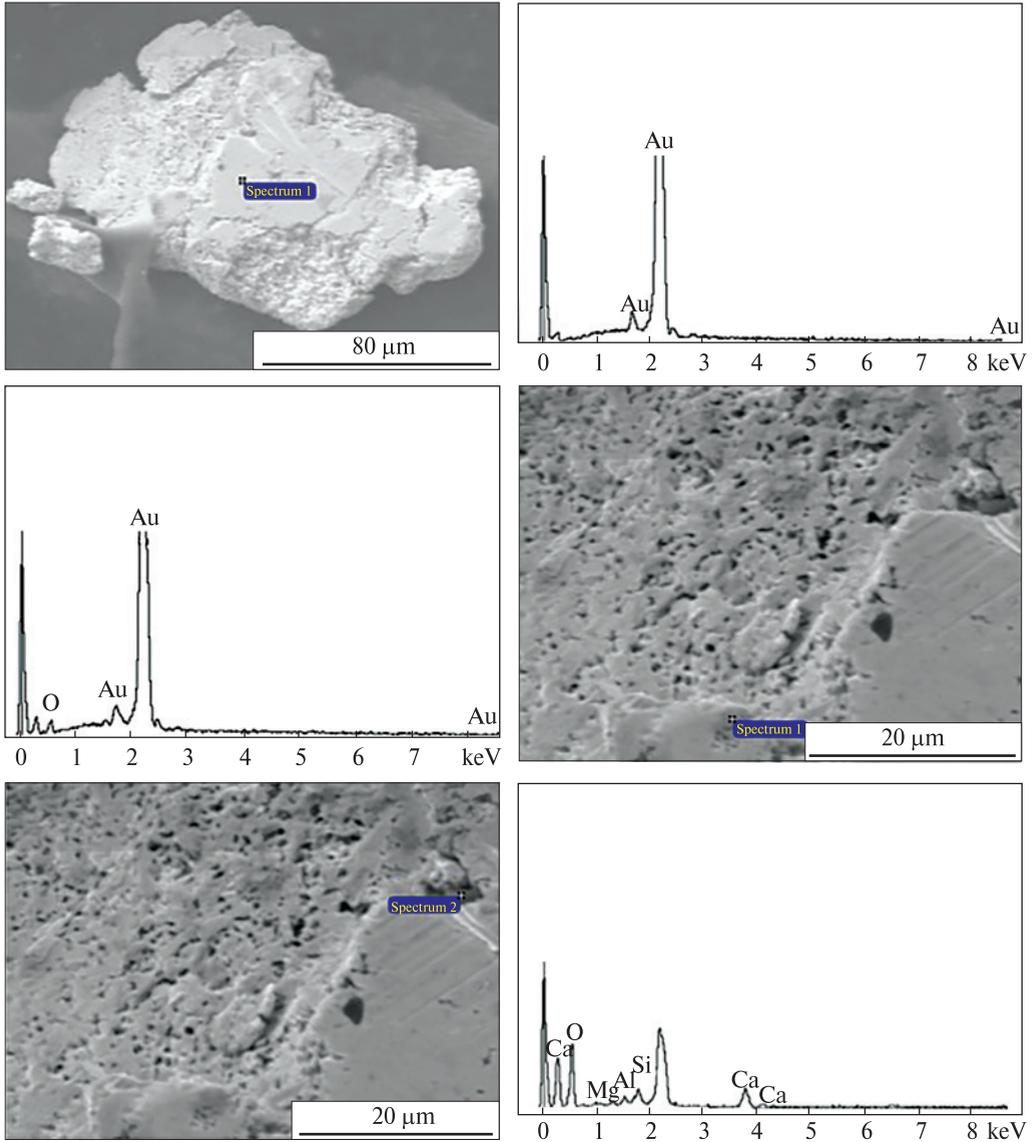


Рис. 5. Внутрішня будова виділених зразків дисперсного золота з алювію пониззя Дніпра, з численними мікропустотами, частково заповненими глинистим алюмосилікатним матеріалом донного осаду (РЕМ, МЗА)

Таблиця 2. Ефективність вилучення золота різними методами

Метод збагачення	Вилучення, %
Струминно-гравітаційний сепаратор	32
Концентраційний стіл	45
Ультразвукова обробка + гравітаційне збагачення	78
Сепарація у вихровому повітряно-мінеральному потоці	до 90

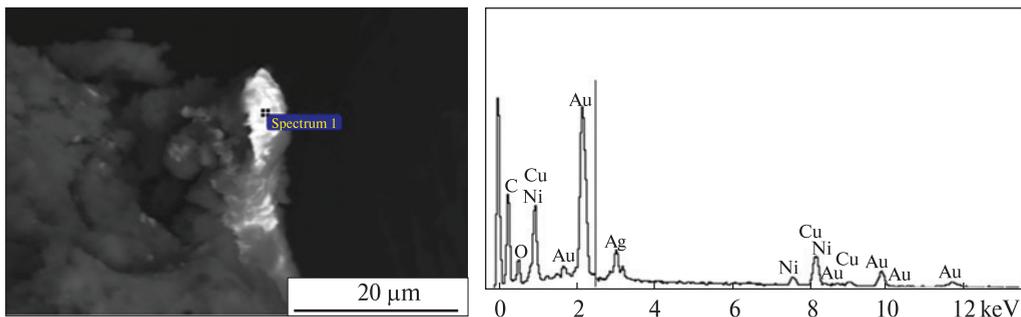


Рис. 6. Мікроскопічна часточка золота з домішками міді, срібла та нікелю із сопкової брекчії грязьового вулкана «Южморгео» (Чорне море) [25]

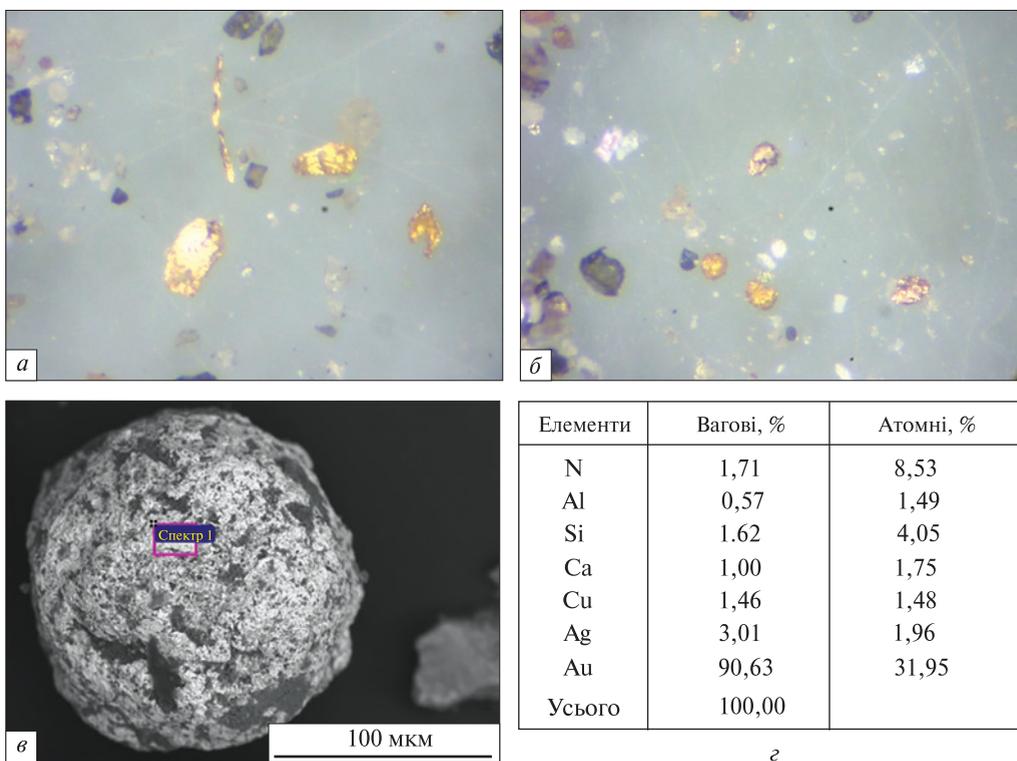


Рис. 7. Штучна трансформація морфології дисперсного золота з техногенного золотовмісного пилу та шламів Індії: а — лускуваті та волокнисті вкраплення золота у вихідному матеріалі; б, в — цілеспрямовано змінені первинні форми дисперсного золота у вихровому повітряно-мінеральному потоці до кулястої форми часточки золота (а, б — у полі зору бінокулярного мікроскопа, збільшення 140×; в — РЕМ, МЗА)

Характерною особливістю самородного ДЗ з грязьових вулканів Чорного моря є наявність ізоморфних домішків нікелю (рис. 6). Це свідчить про глибинні (надмантіїні) джерела надходження самородних (у тому числі благородних) металів до сучасних донних відкладів Азово-Чорноморського басейну [24].

Результати технологічних випробувань

Застосування традиційних гравітаційних методів дозволяє вилучити лише 30—45 % ДЗ. Тому автори запропонували нові технології, що базуються на безреагентному виділенні металевої фази із глинистої або оксидної маси у вихровому повітряно-мінеральному потоці [8, 9]. Вони дозволяють підвищити вилучення металу до 85—90 % (табл. 2).

У вихровому повітряно-мінеральному потоці («штучному торнаді»), яке створюють в обмеженому об'ємі робочої камери технологічного обладнання, мінеральні часточки зіштовхуються між собою та з рухомими і нерухомими елементами конструкції обладнання. Золото, срібло, мідь та інші пластичні метали вимушено змінюють свою форму від пластинчастої, волокнистої, дендрито-подібної тощо до кулястої [22]. Це призводить до різкого зниження парусності та рухливості їхніх зерен як у повітряному, так і водному потоці. Повітряний потік є більш технологічним. Він забезпечує утворення сухих відходів у вигляді кварцового піску, карбонатів, глини тощо, затребуваних на ринку мінеральної сировини. Тому за даною технологією збагачення корисних копалин трансформується в їх комплексну переробку.

Приклад комплексної переробки золотовмісних промислових відходів Індії, наведено на рис. 7. За агрегатним станом сировини, розмірами та морфологією золотин, вони подібні до сучасних осадів і теригенних осадових порід півдня України. У вихровому повітряно-мінеральному потоці пластинки, нитки та часточки золота не-правильної форми (рис. 7, а) штучно змінюють до округлої форми (рис. 7, б). Золотинкам розміром більше 100 мкм в результаті пластичної деформації надана майже ідеальна форма кулі (рис. 7, в).

Така технологія дозволяє значно підвищити вихід дорогоцінних металів при застосуванні гравітаційних і комбінованих методів збагачення, особливо для часточок розміром <50 мкм, які зазвичай важко вилучити через малі розміри, пластинчасту форму та складний рельєф поверхні. Автори рекомендують Технологію до застосування на всіх етапах пошуково-розвідувальних робіт. Особливо ефективною вона може стати на етапі вилучення ДЗ з материнської породи чи осаду (розсипу).

На північно-західному узбережжі Чорного моря (район Затоки, Придунав'я) визначені перспективні для застосування згаданої технології ділянки концентрації ДЗ у прибережно-морських і шельфових відкладах [18, 20, 23]. Подібні об'єкти придатні для малотоннажної розробки з використанням мобільних екологічно безпечних установок. Штучна зміна морфологічних особливостей золотин буде мати вирішальне значення для видобутку ДЗ.

Висновки

1. Сучасні алювіальні, дельтові та прибережно-морські відклади на півдні України містять лускувате ДЗ, пов'язане з алеврито-глинистими фракціями осаду. Розміри золотин, як правило, не перевищують 0,1 мм. Часточки неправильної форми, ізометричні виділення тяжіють до приплотикових ділянок розрізу, де вони асоціюють з мікрокристаломі октаедричного та пентагондодекаедричного піриту. В проміжних плотиках дисперсне золото супроводжують мікросфероліти

аутигенного марказиту. В замулених ділянках верхньої частини розрізу знаходять досить великі за розмірами часточки лускуватого пластинчатого золота в асоціації з гідроксидами заліза. Наведене відображає складний характер розсіпоутворення за участю процесів теригенного транспортування, початкових стадій діагенезу та морфо-седиментаційної диференціації речовини.

2. Різні за розміром і морфологією часточки золота в процесах седиментогенезу (природного і штучного, наприклад, на концентраційному столі) поведуться як різні мінерали. Крупні і середні за розміром ізометричні золотинки накопичуються у приплотикових ділянках донних осадів і осадових порід; дрібні та мікроскопічні лускуваті, пластинчасті, ниткоподібні — концентруються у верхніх замулених осадах покрівлі пласта.

3. Виявлення, дослідження лускуватого та дисперсного золота потребує застосування сучасних чутливих аналітичних методів та комплексного підходу до відбору й підготовки проб. Автори рекомендують до використання методу [5].

4. Використання технології комплексної переробки сировини у вихровому повітряно-мінеральному потоці може підвищити ефективність пошукових робіт і видобутку тонкого й дисперсного золота в промислових масштабах на перспективних ділянках півдня України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беліцька М.В., Іванченко В.В. Літологія і особливості сепарації полімінерального алювію, на прикладі річок України. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Геологія. Географія. Екологія*. 2015. Вип. 43. С. 27—32.
2. Іванченко В.В. Морфологічні ознаки мінеральних індивідів і агрегатів як чинник седиментаційної диференціації речовини. *Матеріали конф. до 50-річчя ІГМР ім. М.П. Семченка*. Київ, 2019. Т. 1. С. 159—160.
3. Іванченко В.В. Розробка поліметалічних родовищ України без використання води та хімічних реагентів. II Міжнародний форум «GREEN MIND». Київ, 15—17 жовтня 2013 р. С. 75—78.
4. Іванченко В.В., Беліцька М.В., Гаврилюк І.В. Літологія та можливості комплексного використання сучасного алювію Дніпра. *Вісник Дніпропетровського університету*. 2015. Т. 23 (1). С. 56—64.
5. Іванченко В.В., Берьозкіна Л.В., Стеценко В.В., Ковальчук Л.М. Актуальні завдання шліхового аналізу сучасних донних осадів. *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2021. Вип. 2 (93). С. 24—31.
6. Іванченко В.В., Ковальчук Л.М., Берьозкіна Л.В., Смірнов О.Я. Особливості мінерального складу сучасних донних осадів у дельті річки Дунай. *Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. «Євтеховські читання»*. Кривий Ріг, 7 квітня 2023. С. 113—120.
7. Іванченко В.В., Чугунов Ю.Д. Про можливість освоєння Бобріківського золото-поліметалічного родовища без утворення токсичних відходів. Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології. *Матеріали Нац. форуму*. Луганськ, 24—25 жовтня 2013 р. С. 99—102.
8. Іванченко В.В., Чугунов Ю.Д. Спосіб добування самородних металів з природних і техногенних руд. Патент України на корисну модель № 130756 U. 26.12.2018. Бюл. № 24.
9. Іванченко В.В., Чугунов Ю.Д., Беліцька М.В. Спосіб збагачення м'яких руд. Патент України на корисну модель № 107551. 10.06.2016. Бюл. № 11.
10. Іванченко В.В., Чугунов Ю.Д., Шнюков Є.Ф. Спосіб очищення пляжних пісків: пат. на винахід № 113369 C2. 10.01.2017. Бюл. № 1.
11. Кардаш В.Т. Условия формирования и перспективы обнаружения россыпных месторождений пылевидного золота в Украине. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*.

2008. № 2. С. 22—32.
12. Ковальчук М.С. Мінералогія розсипного золота України. *Записки Українського мінералогічного товариства*. 2011. Т. 8 (127). С. 126—129.
 13. Ковальчук М.С. Трансформація морфології золота в процесі алювіального седиментогенезу (на прикладі Карпатського регіону). *Сучасні проблеми літології*. Львів, 2000. С. 37—38.
 14. Ковальчук М.С., Крошко Ю.В. Мінералогія розсипного золота з нижньокрейдяного алювію центральної частини Українського щита. *Записки Українського мінералогічного товариства*. 2011, том 8. С. 130—132.
 15. Латыш И.К. Атлас морфологии структур и ассоциаций самородного золота Украины. Киев: Наук. думка, 1984. 295 с.
 16. Лисенко В.І., Кутній В.А., Шнюкова Є.Є. Золото-срібляна та сульфідна мінералізація в породах Гераклейського плато (Крим). *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2008. № 2. С. 68—86.
 17. Маслаков Н.А., Іванченко В.В., Беліцька М.В., Гаврилюк І.В., Османов Е.М. Особливості дрібного і дисперсного золота з осадових порід нижнього Придніпров'я. *Геологія і корисні копалини світового океану*. 2016. № 2. С. 48—56.
 18. Маслаков М.О., Іванченко В.В., Ільїна А.С. Тонке та дисперсне золоте зруденіння на північно-західному узбережжі Чорного моря. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2017. № 4 (50). С. 79—87. <https://doi.org/10.15407/gpimo2017.04.079>
 19. Соколов Е.В., Нігматуліна Е.Н., Іванченко В.В., Юшин А.А. Золото в грязевих вулканах Керченського півострова як показник глибинності грязевулканічних флюїдів. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2013. № 4. С. 79—89.
 20. Федорончук Н.А., Сучков И.А. Тонкое терригенное и аутигенное золото в морских отложениях. *Збірник наукових праць ІГН НАНУ*. 2012. Вип. 5. С. 219—226.
 21. Фигура Л.А. Изменение морфологии россыпного золота из алювиальных отложений рек Чивчинского района Украинских Карпат. *Тектоника, минеральные ресурсы*. Киев, 2005. Т. 2. С. 161—164.
 22. Чугунов Ю.Д., Іванченко В.В. Спосіб видобування металофази з природних і техногенних руд. Патент України на винахід № 105092 С2. 10.04.2014. Бюл. № 7.
 23. Шнюков Е.Ф. Поиски месторождений мелкого и тонкого золота в Азово-Черноморском регионе — важная геологическая проблема XXI века. Геологические проблемы Черного моря. Киев. 2001. С. 11—22.
 24. Шнюков Е.Ф., Іванченко В.В. Самородні мінерали в сопковій брекчії грязьових вулканів Азово-Черноморської провінції, розвинених на нижньокрейдових відкладах. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2015. № 2. С. 81—92.
 25. Шнюков Е.Ф., Іванченко В.В., Пермяков В.В. Акцессорная минерализация сопочной брекчии грязевых вулканов Черного моря. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2014. № 1. С. 45—68.
 26. Шнюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П. и др. Геология Азовского моря. К.: Наук. думка, 1974. 247 с.
 27. Berezovsky, A., Pieczonka, J., Piestrzynski, A. Silver-gold and polymetallic mineralization in the banded iron formations deposit in Kryvyi Rih, *Precambrian Research*. V. 363, 1 September 2021; <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106326>

Стаття надійшла 18.11.2025

*V.O. Iemelianov*¹, NAS Corresp. Member, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof., Chief Researcher
e-mail: volodyasea1990@gmail.com
ORCID 0000-0002-8972-0754

*V.V. Ivanchenko*¹, PhD (Geol. & Mineral.), Docent, Head of Dept.
e-mail: vvivanchenko@ukr.net
ORCID 0000-0003-4889-8975

*I.E. Lomakin*¹, Dr. Sci. (Geol.), Chief Researcher
e-mail: igorlomakin@gmail.com
ORCID 0000-0003-2745-2579

*M.V. Belitska*¹, PhD (Geology), Senior Researcher
e-mail: belitska.mv@gmail.com
ORCID 0000-0003-3823-8738

*A.V. Ivanchenko*², PhD Student
e-mail: avi3751@ukr.net
ORCID 0000-0001-7989-7380

*L.V. Beriozka*¹, Junior Researcher
e-mail: lkurazyeyeva@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7444-6860

¹ SSI MariGeoEcoCenter NAS Ukraine
55 b, st. Oles Honchar, Kyiv, 01054, Ukraine

² Kryvyi Rih National University
11, Vitaly Matusevich str, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

DISPERSED GOLD IN ALLUVIA, DILUVIA AND COASTAL MARINE SEDIMENTS OF SOUTHERN UKRAINE AND PROSPECTS FOR ITS EXTRACTION

The article considers the features of the distribution, morphology and mineral associations of dispersed gold in modern coastal-marine, deltaic and alluvial deposits of Southern Ukraine. The results of comprehensive studies of river valley and shelf zone deposits are analyzed, as well as technological approaches to the extraction of flaky and dispersed gold. The prospects of exploration of such deposits and the introduction of innovative methods for their development are substantiated.

Keywords: Southern Ukraine, marine deposits, alluvium, gold, iron oxides, sulfides, complex processing.

<https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.056>

В.А. Нестеровський^{1, 2}, д-р геол. наук, проф., зав. відділом

ORCID 0000-0002-7065-8962

e-mail: v.nesterovski@ukr.net

О.О. Волконський¹, аспірант

ORCID 0009-0001-2406-5453

e-mail: a0673475249@gmail.com

¹ ДНУ «МорГеоЕкоЦентр НАН України»

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

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ННІ «Інститут геології» КНУ імені Тараса Шевченка

вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

ЛІТОЛОГІЯ ЯМПІЛЬСЬКИХ ПІСКОВИКІВ ПОДІЛЬСЬКОГО БАСЕЙНУ УКРАЇНИ

У статті представлено результати літолого-мінералогічних досліджень та аналіз структурно-текстурних особливостей ямпільських пісковиків Подільського басейну України. У розрізі пісковиків виділено двочленну будову: плитняк, що залягає у верхній частині ямпільських верств та блочний камінь, який знаходиться нижче плитняку. Загальна потужність ямпільських верств у найбільш повних розрізах становить 30–35 м. У загальному об'ємі розрізу ямпільських верств для території дослідження частка плитняку складає близько 8–11 %. В блочних пісковиках основними мінералами є кварц (65–82 %) та польові шпати (15–40 %); другорядними (3–6 %) — темні та світлі слюди, пірит, флюорит, галеніт, сфалерит, марказит; акцесорими (1–1,5 %) — турмалін, альмандин, сфен, циркон, монацит. За текстурними особливостями в них виділено: масивно-однорідні, смугасті, плямисті і пейзажні різновиди. Основними вадами блочних пісковиків є їх підвищена пористість і водопоглинання.

Ключові слова: Поділля, едіакарій, ямпільські пісковики, мінеральний склад.

Вступ

Едіакарський період як самостійний стратиграфічний підрозділ, офіційно затверджено Міжнародним стратиграфічним комітетом у 2004 р. Він корелює з вендом Міжнародної стратиграфічної шкали (МСШ). Вендський період було виділено радянським стратиграфом Борисом Соколовим у 1952 р., і до недавнього часу його використовували для стратифікації відкладів верхнього протерозою Європейської платформи. У порівнянні з МСШ, до венду частково входить криогеновий період і весь об'єм едіакарського. У сучасному трактуванні едіакар-

Цитування: Нестеровський В.А., Волконський О.О. Літологія ямпільських пісковиків Подільського басейну України. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2025. 21, № 2: 56–67. <https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.55>

гену у Донецькій області (Красногорівське, Різниківське) та в бучацьких відкладах палеогену Баницького родовища Сумської області, а будівельні та будівельно-бутові сорти пісковиків видобували на території Луганської області (Марусинське, Вальянівське, Коноплянівське та ін.). Родовища декоративних червоно-бурих, рожево-зеленкувато-бурих пісковиків відомі у відкладах девону Тернопільської, Хмельницької (близько 50 локацій) та кайнозою Івано-Франківської і Закарпатської областей. Незначні поклади пісковиків виявлені у Гірському Криму.

Ямпільські пісковики є важливою складовою осадового розрізу Подільського басейну, який охоплює значну частину південно-західної України. Територія їхнього неглибокого залягання утворює смугу завширшки 12—30 км уздовж долини Дністра протяжністю близько 90 км та площею понад 230 км². Ці пісковики є важливим стратиграфічним репером, що відображає палеогеографічні особливості регіону на початкових етапах морського теригенного осадконакопичення у пізньому протерозої.

Попередні наукові дослідження розрізу едіакарію, зокрема ямпільських верств, здебільшого стосувалися стратиграфічного і палеонтологічного аспектів, метою яких були пошуки залишків біологічного життя та встановлення послідовності формування відкладів. Вивчення літолого-мінералогічних особливостей носило несистемний, локальний характер, а в публікаціях відображено переважно у схематичному вигляді. З огляду на сучасні умови та потенційну цінність цих відкладів як мінеральної сировини з широким спектром споживчих якостей, їхнє повноцінне дослідження є вкрай важливим.

Аналіз попередніх досліджень та постановка завдань

У літературі перші роботи про пісковики Поділля з'явилися наприкінці XIX століття. Проте, з історико-культурної спадщини Ямпільщини відомо, що їх почали розробляти у другій половині XVII століття. В археологічних артефактах встановлено багато предметів, вироблених з ямпільського пісковіку. До них належать споруди оборонного характеру (спостережні вежі, укріплення, фортеці), будинки для житла, торгові та складські приміщення, дорожні покриття, портова інфраструктура.

На території Могилів-Подільського та Ямпільського районів збереглися місця давніх поховань, зокрема козаків часів Богдана Хмельницького, героїв визвольної війни 1648—1654 рр., поляків, євреїв XVII — XIX століття. У цих похованнях знайдено хрести та елементи огорожі могил з пісковіку, добутого неподалік і обробленого місцевими майстрами.

Наприкінці XVII ст. Ямпіль був важливим форпостом на кордоні та значним центром обробки каменю. На Дністрі працював річковий порт, через який відбувалася жвава торгівля камінням і виробами з нього з Бендерами, Аккерманом, країнами Чорноморського басейну, що відображено в місцевих архітектурних та культурних пам'ятках [5].

Відклади венду (едіакарію) Поділля, у складі яких виділені ямпільські пісковики, до початку 1960-х років вважалися «німими». Лише на початку 1970-х років у них були встановлені сліди та відбитки примітивної безскелетної багатоклітинної фауни. Саме ця подія привернула до них науковий інтерес палеонтологів з усього світу.

Сучасні уявлення про особливості утворення едіакарських відкладів Поділля сформувався на основі значного фактичного матеріалу, зібраного під час геологічної зйомки цієї території різного масштабу, виконання тематичних стратиграфічних досліджень та пошуково-оцінювальних робіт на корисні копалини. Основні положення щодо геологічної історії цього вікового інтервалу були опубліковані у 2-му томі «Стратиграфія УРСР. Рифей-Венд» [7]. Ця монографія й до теперішнього часу не втратила своєї актуальності та наукової ваги. Її особливою цінністю є опис порід у природних локаціях та наведена порівняльна характеристика розрізу едіакарських відкладів на численних ділянках Придністров'я [7].

Окремі питання речовинного складу та генезису ямпільських пісковиків висвітлено в роботах [1, 2, 3, 6].

Важливий внесок у розуміння геологічної історії Подільського Придністров'я зроблено завдяки спільним дослідженням колективу вчених Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Дніпровської політехніки та Університету Пуатьє (Франція). У 2019 р. ними опубліковано роботу [9], присвячену визначенню абсолютного віку окремих горизонтів едіакарських відкладів, що дало змогу уточнити віковий діапазон розвитку біоти едіакарського типу та окреслити важливі етапи розвитку Подільського басейну седиментації. Серед останніх публікацій цього ж колективу варто відзначити роботу, що узагальнює результати українсько-французьких досліджень, проведених у період 2019—2023 рр., та присвячена еволюції Подільського басейну від докембрію до силуру [8].

Метою нашої роботи є уточнення масштабів поширення ямпільських пісковиків у регіональному плані, визначення їхнього мінерального складу, структурно-текстурних особливостей і важливих параметрів, що визначають практичну цінність цієї сировини.

Фактичний матеріал, методика та методи досліджень.

Фактичний матеріал для досліджень було зібрано в межах виконання бюджетної наукової теми «Ресурси морських осадових комплексів едіакарію (венду) Подільського басейну України та перспективи їх освоєння для післявоєнної відбудови». Дослідження включали польові роботи та лабораторні дослідження.

Польові роботи проводились протягом двох сезонів (2024—2025 рр.) на території Чернівецької, Хмельницької та Вінницької областей — уздовж долини Дністра та його лівих приток на ділянці від м. Новодністровська (північний-захід) до с. Франківки Ямпільського району (південний-схід) (рис. 2).

Було обстежено корінні відслонення ямпільських верств та розрізи, розкриті кар'єрами. Основну увагу приділено умовам залягання, особливостям фаціального складу, зміні потужності та наявності логістичної інфраструктури. Із найбільш інформативних точок відібрано зразки для лабораторних досліджень. Загалом обстежено близько 100 локацій та відібрано понад 200 зразків.

У лабораторних умовах виділено літологічні групи для виготовлення шліфів, проведення гранулометричного аналізу, визначення структурно-текстурних, фізичних та декоративних властивостей.

Для дослідження порід в шліфах використовувався поляризаційний мікроскоп *Micros Austria MC 300*. Окремі фракції та мінерали досліджувалися під біно-

Рис. 3. Плитняк із ямпільських пісковиків едіакарію (Франківський кар'єр)



цих порід можна спостерігати в долині Дністра та його лівих приток нижче м. Ямполь. Найкращі відслонення ямпільських верств доступні для вивчення у гірничих виробках, що розташовані в берегах долини р. Русави.

У найбільш повних розрізах території дослідження потужність ямпільських верств досягає 30—35 м. У більшості розкритих точок вони мають чітко виражену двочленну будову. Зверху залягає шар тонкоплитчастих різнозернистих пісковиків, у різній мірі окислених гідрооксидами заліза (плитняк), а в нижній частині поширені більш-менш масивні рівномірно зернисті білі, жовтуваті, плямисті, смугасті пісковики (блочний камінь). На різних ділянках території співвідношення товщини плитняка і блочного каменю неоднакове.

Плитняк являє собою тонкошарувату алеврит-псамітову породу, яка достатньо легко розколюється на плитку різної конфігурації і товщини за допомогою ручного інструменту. Шаруватість і здатність до розколювання зумовлена наявністю тонких мікроскопічних прошарків глинистого-слюдистого матеріалу. Поверхня нашарувань хвиляста, нерівномірна. Потужність відкладів плитняка зазвичай не перевищує 1,6—1,8 м (Бандишівський кар'єр). Деякі відслонення мають мінімальну товщину плитняка — кілька сантиметрів. Майже вся товща плитняка, що залягає ближче до поверхні, зазнає впливу гіпергенних процесів, передусім окиснення залізовмісних мінералів, що проявляється у зміні забарвлення. Тут поширені ділянки порід буро-жовтого, помаранчево-жовтого, іржаво-жовтого кольору. На ділянках розрізу, які не зазнали цього впливу, колір плитняка сірий або сіро-зелений (рис. 3). У загальному об'ємі розрізу ямпільських верств для території дослідження частка плитняка складає близько 8—11 %.

Важливою особливістю плитняка є наявність численних відбитків примітивної багатоклітинної безскелетної фауни і флори едіакарського типу, розташованих на контакті пелітових та алеврит-псамітових прошарків. В окремих розрізах нараховується десятки таких прошарків, на кожному з яких можуть зустрічатися відбитки (рис. 4). Тобто вони не приурочені до одного горизонту за абсолютною відміткою чи мінеральним складом, а, очевидно, залежать від ритмів накопичення осадків.

Нижче зони плитняка на всіх точках спостереження залягають більш-менш однорідні масивні, середньозцементовані піщані породи світло-білого, біло-сірого, попелясто-сірого, палево-жовтого кольорів з різним текстурним малюнком — блочний камінь. Проте в основній масі породи на більшості родовищ і проявів розбиті тріщинами субвертикального і горизонтального орієнтування, що, по суті, визначає параметри їх товарної блочності (рис. 5). Вертикальні тріщини в багатьох випадках відкриті, мають ширину від 0,5 до 10 см, а в окремих розрізах заповнені пухким матеріалом. Часто на стінках у відкритих тріщинах можна спостерігати утворення натічних агрегатів карбонатних та сульфатних мінералів.

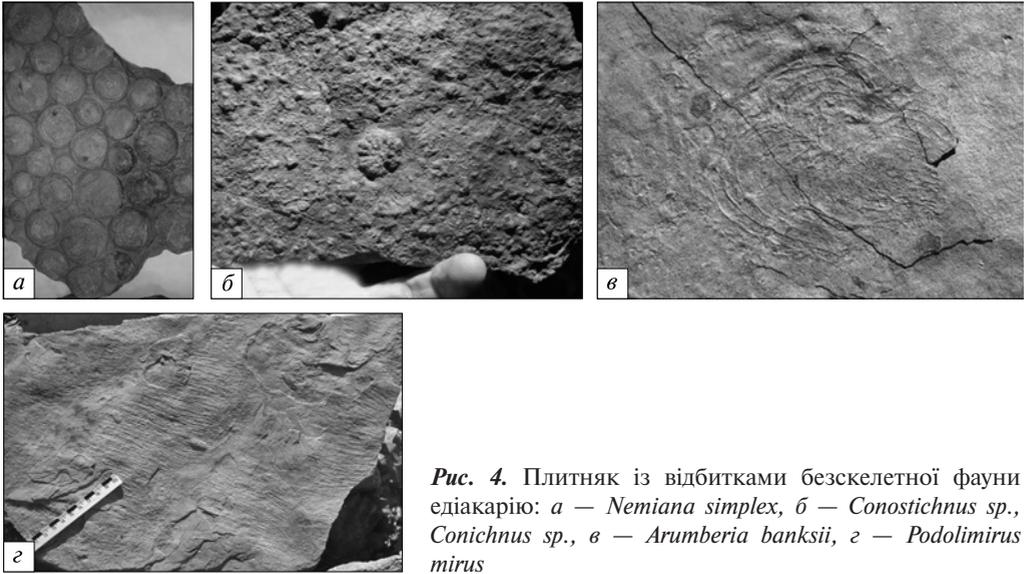


Рис. 4. Плитняк із відбитками безскелетної фауни едіакарію: а — *Nemiana simplex*, б — *Conostichnus* sp., *Conichnus* sp., в — *Arumberia banksii*, г — *Podolimirus mirus*

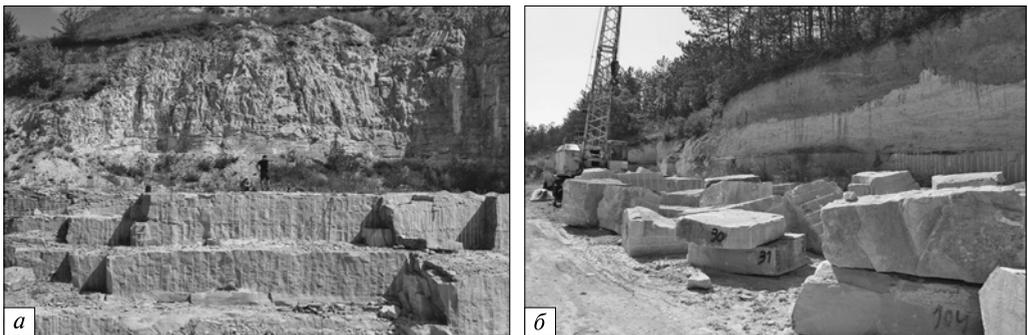


Рис. 5. Блочний камінь із ямпільських пісковиків едіакарію родовищ Червоний берег-1 та Червоний берег-2: а — фрагмент розрізу блочного пісковика з родовища Червоний берег-1 (зверху на пісковиках залягають відклади крейдяної системи і кватеру); б — блочна продукція пісковика з родовища Червоний берег-2

Структура пісковиків основної маси блочного різновиду — середньо- та дрібнозерниста, в окремих прошарках — до крупнозернистої. Текстура — однорідна, масивна, плямиста, шарувата. За мінеральним складом породи належать до польвошпат-кварцових з опал-каолінітовим цементом. Середній вміст визначених мінералів у шліфах становить: кварц — 65—82 %; польові шпати — 15—40 %; другорядні (3—6 %) — темні та світлі слюди, пірит, флюорит, галеніт, сфалерит, марказит. Серед акцесорних мінералів виявлено турмалін, альмандин, сфен, циркон, монацит; їх сумарна частка не перевищує 1—1,5 %. Вторинні мінерали представлені гідрооксидами заліза і марганцю, каолінітом, опалом, дикітом, кальцитом, сидеритом. Загальний вигляд типового плитняка та блочного пісковика з родовищ басейну р. Русави у штуфі та шліфах наведено на рис. 6, 7.

Кварц у основній масі блочного пісковика напівобкатаний, кутастий, переважно сірого кольору, прозорий або напівпрозорий. Окремі зерна мають сліди корозійного впливу та пелітизації. Частими є включення точкових сфероїдних

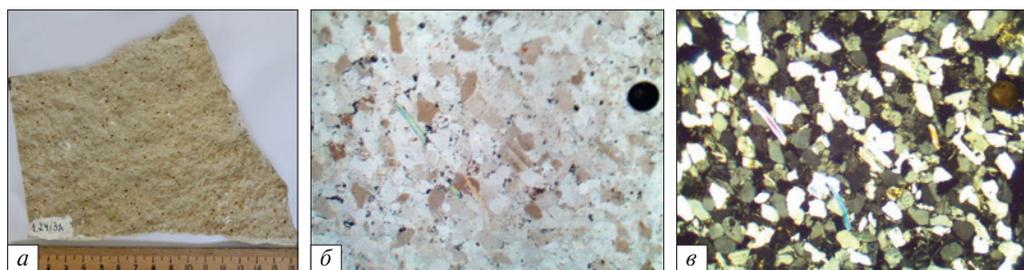


Рис. 6. Загальний вигляд та зображення в шліфах типового плитняку з ямпільських верств: *a* — зразок плитняку з родовища Червоний берег-1; *б* — фото шліфа без аналізатора; *в* — те саме з аналізатором

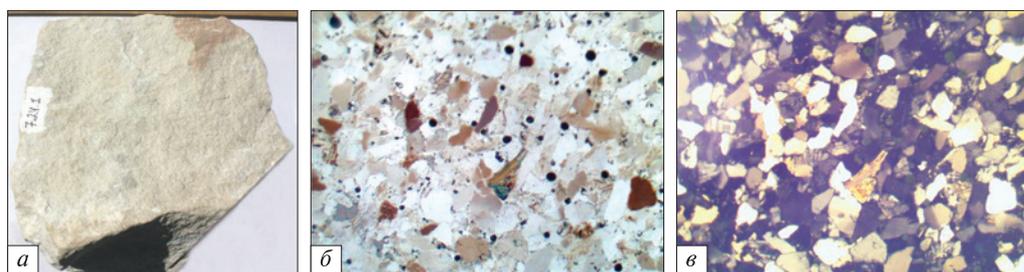


Рис. 7. Загальний вигляд та зображення в шліфах блочного каменю з ямпільських верств: *a* — зразок блочного каменю з родовища Пороги; *б* — фото шліфа без аналізатора; *в* — те саме з аналізатором

ізоτροпних агрегатів чорного або коричневого кольору, попередньо ідентифіковані як гідратовані сульфіді заліза.

Польовий шпат представлений зернами калійового польового шпату (КПШ) і плагіоклазу. Більшість з них має прямокутну форму, проте значною мірою змінена процесами каолінізації. У шліфах з польових шпатів діагностовано ортоклаз, мікроклін, олігоклаз і андезин. У КПШ поширені зерна з пертитовим та мірмекітовим характером зростків. Каолінітизовані ділянки та пелітизація суттєво зменшують прозорість і блиск породи, надаючи їй білого, крейдоподібного вигляду.

Серед слюнистих мінералів у пісковиках встановлено присутність біотиту та мусковіту. Біотит часто розірваний та змінений вторинними процесами, особливо на крайових ділянках лускуватих агрегатів. На змінених фрагментах розвиваються гідроксиди заліза жовто-бурого кольору. Це спричиняє зміну загального фону забарвлення породи на більш неоднорідно жовтий чи навіть помаранчевий в місцях їх значної концентрації. Лускуваті зерна мусковіту частково пелітизовані, через що на цих ділянках вони втрачають інтенсивність інтерференційного забарвлення.

Флюорит присутній в пісковиках як у вигляді окремих зерен, так і в цементі. Його помітна концентрація характерна для нижньої частини розрізу ямпільських верств та зони контакту пісковиків із кристалічними породами. На ділянках поширення флюориту часто спостерігається підвищена тріщинуватість у вигляді дрібної сітки, частина якої може бути заповнена самим мінералом. У цементі він тонкозернистий, агрегатний, змішаний з глинистими компонентами, в порожнинах — мікрокристалічний.

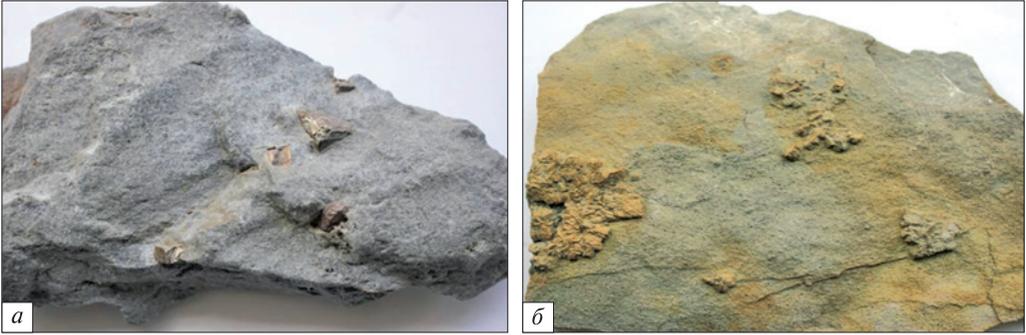


Рис. 8. Форми піриту в ямпільських пісковиках едіакарію Поділля: *a* — кристали; *б* — розетки агрегатів

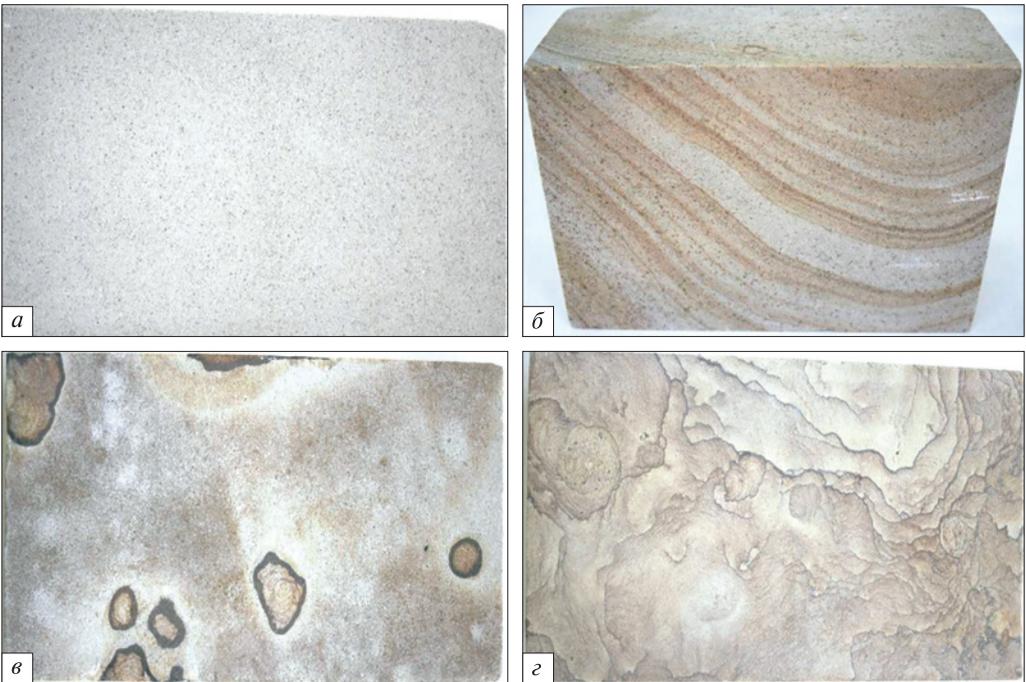


Рис. 9. Текстурні різновиди ямпільських пісковиків басейну р. Русави: *a* — масивно-однорідний; *б* — смугастий; *в* — плямистий; *г* — пейзажний

Сульфідні рудні мінерали — пірит, галеніт, сфалерит і марказит — зустрічаються спорадично. Найбільш поширеним є пірит, зокрема псевдоморфози піриту по марказиту. Ці два мінерали більш розвинені на ділянках розрізу з наявністю відбитків едіакарської біоти та в нижній частині розрізу ямпільських верств, що контактують із кристалічними породами. Переважаючою формою сульфідів заліза є сферичні агрегати різного розміру (від мікроскопічних до 2—3 см), індивідуальні кристали гексаедричного габітусу та їх зростки (рис. 8). Навколо виділень сульфідів заліза в пісковиках спостерігаються ореоли гідрооксидів заліза, що впливає на загальну колористичну картину зразків.

Особливий інтерес в ямпільських пісковиках становлять конкреції, спорадично розсіяні в масі породи, які мають сидерит-гетит-гідрогетитовий? склад.

Контакт конкрецій із матричними породами різкій, з чіткими первинними контурами, що не співпадають із загальною шаруватістю. Навколо них помітні ореоли вторинних мінералів групи гідроксидів заліза. Внутрішня будова, хімічний склад і генезис конкрецій будуть розглянуто в окремій публікації.

Виділення галеніту і сфалериту приурочені здебільшого до мікротріщин і ділянок нижньої частини розрізу. Ці мінерали достатньо добре фіксуються в полірованих зразках завдяки характерній відбивній здатності.

Акцесорні мінерали (альмандин, турмалін, сфен, циркон, монацит) не проявляються суттєвої закономірності розподілу в товщі ямпільських пісковиків. Проте спостерігається певне збільшення включень альмандину в розрізах, що безпосередньо контактують з породами фундаменту. Зерна альмандину змінені, тріщинуваті, добре обкатані, забарвлені в буро-червоний колір. У шліфах альмандин добре діагностується за позитивним рельєфом і поведінкою в поляризованому світлі. Розподіл в об'ємі розрізу ямпільських пісковиків турмаліну, сфену, циркону та монациту встановити важко, оскільки їх зерна мікроскопічні і не завжди потрапляють у зріз шліфів.

Серед вторинних мінералів у ямпільських пісковиках важливу роль відіграють опал і каолінит, які в породі виконують роль цементу: контурного, контурно-контактного, рідше порового і дуже рідко базального типів. Останній характерний для різнозернистих і грубозернистих прошарків. У невеликих кількостях, особливо в зонах контакту з породами крейди та поблизу вертикальних тріщин, у цементі пісковиків зустрічається кальцит.

Середні значення хімічного складу ямпільських пісковиків з родовищ басейну р. Русава наведено в таблиці [4].

Серед блочного пісковіку ямпільських верств за текстурними особливостями можна виділити декілька різновидів: масивно-однорідний, смугастий, плямистий, пейзажний (рис. 9).

Масивно-однорідні пісковіки забарвлені в світло-білі, палево-жовті, світло-сірі кольори, мають приблизно однакову розмірність пороодоутворювальних компонентів.

Смугасті пісковіки характеризуються помітною шаруватістю, яка проявляється в чергуванні смуг різного кольору та товщини. У більшості випадків смугастість зумовлена присутністю у розрізі шарів, насичених гідроксидами заліза. Переважає горизонтальна смугастість, але в окремих блоках, залежно від напрямку зрізу, вона може набувати іншого вигляду.

Плямисті пісковіки мають нерівномірне забарвлення в об'ємі, яке візуально сприймається у вигляді плям різної насиченості кольору.

Пейзажний різновид — є комбінацією плямистого і смугастого, що разом створюють текстурний малюнок складних конфігурацій, які нагадують природні пейзажі.

Співвідношення об'ємів виділених текстурних груп на окремих родовищах ямпільських пісковиків є різним, проте більш однорідною є частина розрізу, що розташована в нижніх ділянках товщі.

Хімічний склад ямпільського пісковіку

Компонент	Вміст, %
SiO ₂	71,30—86,30
TiO ₂	0,15—0,40
Al ₂ O ₃	5,06—12,60
Fe ₂ O ₃	0,20—0,45
FeO	0,07—0,24
CaO	0,56—11,10
MgO	0,35
Na ₂ O	1,17—3,02
K ₂ O	1,96—3,47
SO ₃	0,01—0,20
В. п. п.	0,56—8,82

Для блочних пісковиків також були визначені фізико-механічні властивості: водопоглинання при атмосферному тиску, щільність, об'ємна маса, справжня пористість. Результати цих досліджень показали, що значення водопоглинання серед виділених текстурних різновидів коливаються в межах між 6,27—8,81 % і в середньому становить близько 8 %. Щільність пісковиків складає 2,6—2,7 г/см³; об'ємна маса — 2,1—2,5 г/см³; справжня пористість — 11—25 %.

Висновки

1. Отримані результати досліджень щодо геологічної позиції, мінерального складу, структури та текстури ямпільських пісковиків, наявності специфічних відбитків безскелетної фауни свідчать, що головне тіло ямпільських верств було сформовано за рахунок уламкового матеріалу з кори вивітрювання Українського щита, а шляхи переносу були недалекими.

2. Відкладення теригенного матеріалу відбувалося в умовах неглибокого прибережно-морського середовища зі слабкою гідродинамікою, на що вказують особливості сортування та ступінь обкатування головних породоутворювальних мінералів — кварцу та польових шпатів.

3. Цементация уламкового матеріалу, ймовірно, відбувалася після його осадження за рахунок вторинних процесів, пов'язаних з гідролізом польових шпатів та утворенням каолініту та опалу.

4. Бентосна та придонна безскелетна фауна після відмирання і часткового захоронення у відновному середовищі сприяла утворенню аутигенних мінералів — піриту та марказиту, які після окиснення гіпергенними процесами були заміщені оксидами та гідрооксидами заліза, що і зумовило сучасний вигляд ямпільських пісковиків.

5. Флюоритова і частково сульфідна мінералізація пісковиків пов'язана з проникненням гідротермальних розчинів по тріщинах у зонах їх контакту з кристалічними породами та має епігенетичний характер.

6. Нові U-Pb датування цирконів із двох бентонітових шарів могилівської та яришівської формацій Подільського басейну обмежують локальну присутність едікарської біоти інтервалом $556,78 \pm 0,18$ млн років та $555,4 \pm 2,9$ млн р. і, відповідно, визначають час формування відкладів ямпільських пісковиків.

7. Подальші дослідження будуть скеровані на розробку пропозицій щодо шляхів удосконалення видобутку і ефективного використання родовищ ямпільських пісковиків.

Автори вдячні за технічну допомогу при підготовці матеріалів до статті ст.н.с. Михайлу Деяку, н.с. Андрію Тарновецькому та магістру геології Ігорю Сергієнку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Веліканов В.Я. Український гіпострататип вендської системи. *Геологічний журнал*. 2011. № 1. С. 42—49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2011.1.139324>
2. Жовинський Е.Я., Крюченко Н.О., Жук О.А., Вишневський О.А., Кухар М.В., Швайка І.Д., Дмитренко К.Е. Геохімічна спеціалізація рудопроявів флюориту Середнього Придністров'я. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2019. № 1. С. 18—28. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001071733>

- Лунев Л.М., Чеботарьов І.І., Міллер В.П. Пісковики Поділля: склад, структура, генезис. *Геологічний журнал*. 1975. № 4. С. 28—36.
- Нестеровський В.А., Деревська К.І., Руденко К.В., Спиця Р.О. Інвентаризація кар'єрів з видобутку ямпільських пісковиків у межах Могилів-Подільського Придністров'я. Мат-ли VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування» Україна, м. Львів, 9 — 12 жовтня 2023. С. 115—121.
- Нестеровський В.А., Волконський О.О., Деяк М.А. Історія і культура використання ямпільських пісковиків. Зб. мат-лів XIII міжнародної науково-практичної конференції «Коштовне та декоративне каміння: Актуальні питання гемологічної експертизи, геології, видобутку, обробки і використання», м. Київ, 07 — 08 листопада 2024 р. С. 33—36.
- Сокур Т.М. Геохімічні індекатори літогенеза порід ямпільських верств верхнього венду Подільського Придністров'я. Зб. праць Всеукраїнської конференції «Від мінералогії і геогнозії до геохімії, петрології, геології та геофізики: фундаментальні і прикладні тренди XXI століття» (MinGeoIntegration XXI), Київ, 27 — 29 вересня 2023 р. С. 47—51.
- Стратиграфія УРСР. Т. II: Рифей-Венд. Відп. ред. О.В. Крашеніннікова. Київ: Наук. думка, 1971. 276 с.
- Chupryna, A., Aubineau, J., Bankole, O., Chi Fru, E., Konhauser, K., Nesterovsky, V., Martyshyn, A., Soldatenko, Y., Becker-Kerber, B., Sans-Jofre, P., Chraiki, I., Abdelfadel, F., Fontaine, C., Lafortest, C., Meunier, A., Albani, El A. Strong interplays between eustasy, nitrogen dynamics, and biodiversification between the Ediacaran and Silurian interval. *Comptes Rendus. Géoscience — Sciences de la Planète*. 2025, Vol. 357. P. 201—223. <https://doi.org/10.5802/crgeos.296>
- Soldatenko, Y., Albani, A. El, Ruzina, M., Fontaine, C., Nesterovsky, V., Paquette, J-L., Meunier, A., Ovtcharova, M. Precise U-Pb age constrains on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine. *Nature Scientific Reports*. 2019. 9. 1675. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38448-9>

Стаття надійшла 20.10.2025

V.A. Nesterovsky^{1, 2}, Dr. Sci. (Geol.), Professor, Head of Dept.

e-mail: v.nesterovski@ukr.net

ORCID 0000-0002-7065-8962

O.O. Volkonskyi¹, PhD Student

e-mail: a0673475249@gmail.com

ORCID 0009-0001-2406-5453

¹ SSI MariGeoEcoCenter NAS Ukraine

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

² Taras Shevchenko University of Kyiv

90, Vasylykivska Str, Kyiv, Ukraine, 03022

LITHOLOGY OF YAMPIL SANDSTONES OF THE PODIL BASIN OF UKRAINE

The article presents the results of lithological and mineralogical studies and the analysis of structural and textural features of the Yampil Sandstones of the Podil Basin of Ukraine. In the section of the sandstones, a two-member structure is distinguished - limestone, which occurs in the upper part of the Yampil beds and block stone, which is located below the limestone. The total thickness of the Yampil beds in the most complete sections is 30—35 m. In the total volume of the section of the Yampil layers for the study area, the share of limestone is approximately 8 — 11 %. In block sandstones, the main minerals are quartz (65—82 %); feldspars (15—40 %); secondary (3—6%) and include dark and light micas, pyrite, fluorite, galena, sphalerite, marcasite; accessory (1—1.5 %) include tourmaline, almandine, sphene, zircon, monazite. According to textural features, they are divided into: massive-homogeneous, banded, spotted, and landscape varieties. The main disadvantages of blocky sandstones are their relatively high porosity and water absorption.

Keywords: Podillia, Ediacaran, Yampil sandstones, mineral composition.

<https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.068>

T.A. Melnychenko, PhD (Geol.), Senior Researcher

e-mail: meltanua777@gmail.com

ORCID 0000-0002-6597-4274

SSI MariGeoEcoCenter NAS Ukraine

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

APPLICATION OF REMOTE SENSING DATA AND NORMALIZED DIFFERENCE TURBIDITY INDEX (NDTI) TO DETERMINE THE GEOMORPHOLOGY OF FLOODED COASTS

This publication is devoted to studying the geomorphological features of the seafloor on the northwestern Black Sea shelf (within the Dnipro Estuary) utilizing remote sensing data processing methodologies. Based on a range of geological evidence, the present-day morphology of the northwestern Black Sea shelf represents a continuation of the late Pleistocene subaerial coastal plain, which was incised by fluvial valleys and subsequently modified and partially leveled by a multi-phase marine transgression that persists to the present day. In coastal regions, seafloor geomorphology is primarily defined by inundated terraces and relict shorelines, which are of significant interest to geologists, ecologists, and archaeologists alike. When direct access to water bodies is restricted, remote sensing provides the most effective means of studying inundated shorelines. This study utilizes satellite observations from the Sentinel-2 mission, applying spectral band combinations based on the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) derived index for assessing water turbidity and transparency. By applying specialized image-processing techniques to satellite data, we reconstructed the position of the former coastline within the Dnipro Estuary, now submerged. The results were validated against bathymetric maps. This approach can be recommended for investigations of seafloor geomorphology, coastal geoecological processes, and enhancing the accuracy of locating ancient settlements.

Keywords: coast, remote sensing, multispectral data, northwestern Black Sea shelf, water surface, Normalized Difference Turbidity Index (NDTI).

Introduction

The geomorphological study of the seabed and coastal areas on the northwestern shelf of the Black Sea has employed several complementary methods. These include lithostratigraphic analysis, which uses data on the composition of rocks from seabed drilling followed by mapping [1]; mineralogical analysis of coastal-zone minerals [5]; paleontological investigation of fossilized remains of terrestrial and marine flora and fauna [4, 6]; and archaeological methods involving hydroacoustic surveys of seabed topography and

Цитування: Мельниченко Т.А. Застосування даних дистанційного зондування та нормалізованого індексу каламутності (NDTI) для визначення геоморфології затоплених берегів. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2025. **21**, № 2: 68–76. <https://doi.org/10.15407/gpimo2025.02.068>

underwater artifacts [2]. However, these approaches demand direct access to the study area. Because access to much of the Ukrainian sector of the Black Sea shelf is restricted, an alternative method is required—one that enables observation without physical presence. In this context, remote sensing provides an effective means of monitoring changes in the water surface and seabed from a distance.

This study investigates the geomorphology of the coastal area of the estuary by identifying submerged coastlines and terraces at the current stage of the Black Sea's geological development. To solve this problem, it was necessary to determine the data and the method of its processing. To study changes in water surfaces, researchers use multispectral remote sensing data and apply formulas of various water-normalized indices: These include the Normalized Difference Water Index (NDWI) [10], the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), the Normalized Difference Moisture Index (NDMI), the Water Ratio Index (WRI), the Automated Water Extraction Index (AWEI) [11, 18], and the Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) [13]. To study water surfaces using SAR radar data, VH polarization or the VH-to-VV ratio is used [17].

The object of this study is the Dniro Estuary on the northwestern shelf of the Black Sea (Fig. 1), with a focus on identifying shorelines submerged at depths of 2–3 meters.

Archaeologists have recorded approximately one hundred archaeological settlements within the northwestern Black Sea shelf and its coastal areas [2]. The sea transgression process observed in recent centuries has led to significant flooding of the coastline. The coastal structures built as protective fortifications along the shore ended up underwater. Over time, these structures turn into sandy material that partially erodes and then completely disappears, leaving no trace of the flooded coastline. The presence and accumulation of this material enable researchers to identify historical sites using hydroacoustic and other methods. The presence of sandy material at shallow depths of up to two to three meters, provided the water is relatively clear and the weather is favorable, allows identification of past coastlines underwater using processed optical data from satellite images. Therefore, multispectral data from the European Space Agency's Sentinel-2 mission was used, as it is available for download in the public domain.



Fig. 1. Overview map of depths on the northwestern Black Sea shelf showing changes based on data from [3]. The study area is highlighted in orange

Data and Research Methodology

To analyze changes in water bodies, researchers employ optical and radar satellite datasets, freely available from missions such as Sentinel-1 [12, 19], Sentinel-2 [7, 20], Landsat [8, 15], MODIS [9, 16], among others.

Multispectral data from the Sentinel-2 mission offer several advantages, most notably a spatial resolution of 10–20 m. In comparison, Landsat missions 1–5 and 7 provide a resolution of 30 m, while MODIS offers resolutions of 250, 500, and 1.000 m. In terms of temporal coverage, Landsat revisits every 16 days, MODIS every 1–2 days, and Sentinel-2 every 5 days, reduced to 2–3 days at mid-latitudes due to wide overlap. With respect to swath width, MODIS provides the largest coverage (2.330 km), followed by Sentinel-2 (290 km) and Landsat (185 km). Considering these parameters, Sentinel-2 imagery represents the most suitable dataset for monitoring individual water bodies, combining high spatial resolution with optimal temporal frequency and sufficient coverage.

A key limitation of optical satellite data is the dependence on weather conditions, as cloud, snow, or ice cover can substantially reduce surface visibility. To mitigate this constraint, only images with 0% cloud cover were selected for analysis.

Identifying submerged coastlines expressed in seafloor geomorphology requires consideration of the relative transparency of the water column as observed in satellite imagery. Seasonal and periodic increases in turbidity, primarily driven by vegetation growth and algal blooms, are particularly pronounced in shallow waters and can obscure detection. To minimize this effect, monitoring should be conducted during off-season periods, when plant-induced turbidity is absent.

The principal criterion for selecting imagery to accurately detect changes in the water surface is the choice of a monitoring period with atmospheric conditions comparable to summer but preceding planktonic and other vegetative blooms. For the north-western sector of the Black Sea, including the Dnipro Estuary, the optimal observation window occurs in late spring (April–May) to early summer (June), depending on inter-annual variability.

Another challenge is the precise delineation of boundaries between aquatic and terrestrial environments, which is often affected by pixel blurring. This issue is typically addressed for specific study areas through additional stages of spatial data processing. In the present study, however, this factor is not critical, as the analysis is confined to a single water body.

The subsequent stage of the study involved selecting appropriate spectral band combinations and applying a formula for calculating the normalized difference index.

While indices such as NDWI are commonly applied to study the water surface, the present research focused on seafloor geomorphology. This required the use of an index with parameters sensitive to underwater changes under conditions of partial transparency. The most suitable choice is the NDTI, which is calculated using pixel values from the green (Green) and red (Red) spectral bands. NDTI quantifies water transparency-turbidity on a scale from -1 (high transparency) to $+1$ (high turbidity). Unlike indices associated with suspended sediment concentration, NDTI does not directly measure solid matter content and is therefore often applied in combination with other datasets to support comprehensive assessments of water quality.

Overall, the research methodology can be described as comprising several sequential stages:



Fig. 2. Map of the Dnipro Estuary derived from a Sentinel-2 true-color image. The numbered sections indicate coastal areas with archaeological settlements [2, 14]: 1 — Cape Bublikova; 2 — Stanislav, Zolotyi Mys settlement, and Hlyboka Prystan; 3 — Beikush settlement

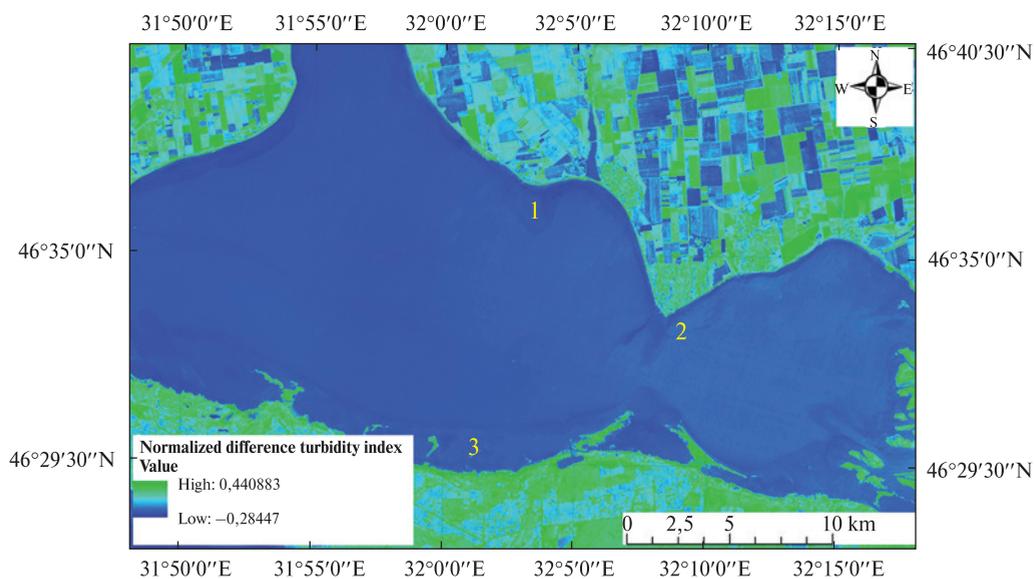
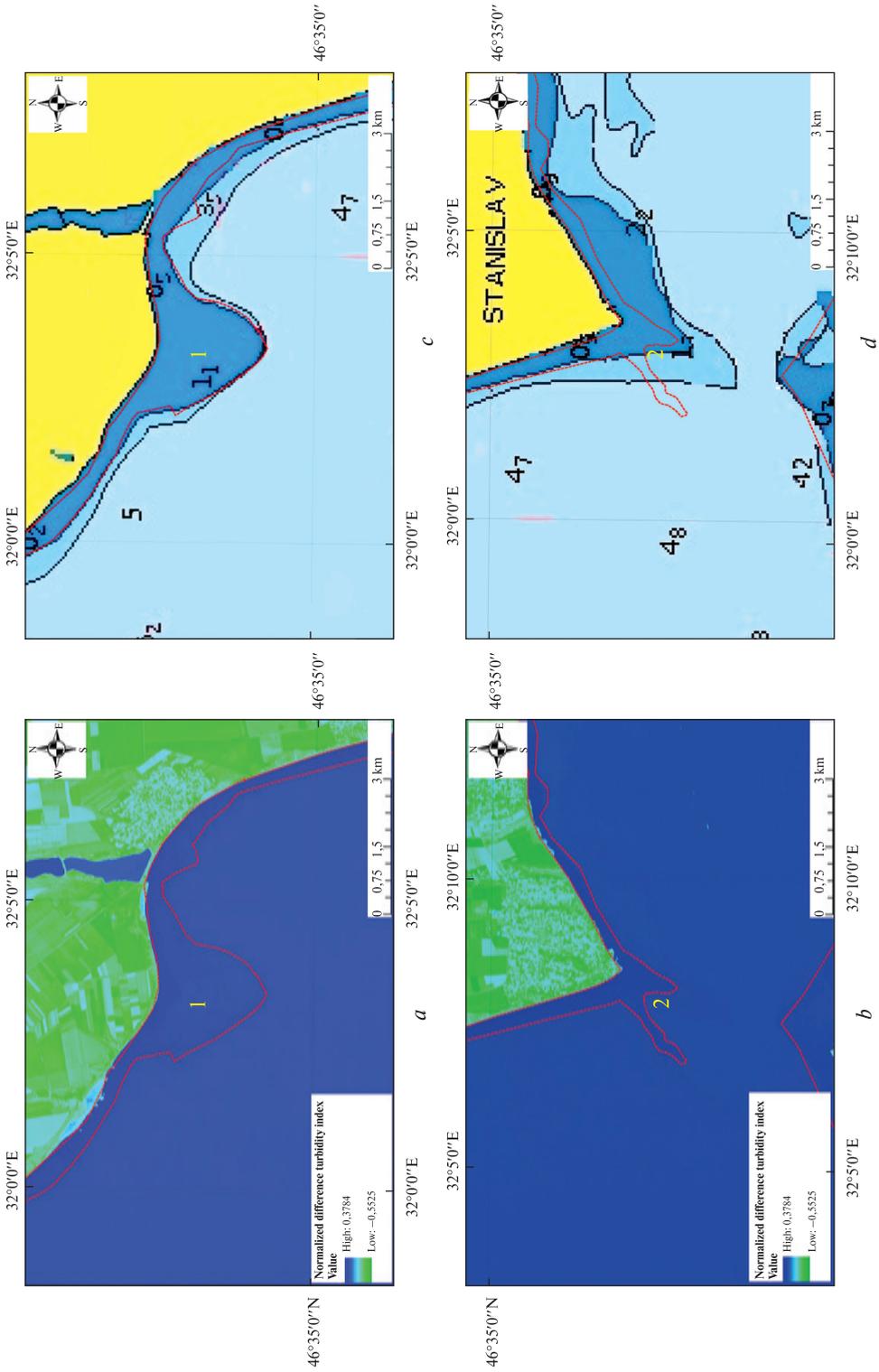


Fig. 3. NDTI map of the Dnipro Estuary derived from Sentinel-2 data (survey date: 9 April 2020). Numbered sections indicate coastal areas containing archaeological settlements (see legend in Fig. 2)

1. Selection of Earth observation data. This stage involves choosing imagery acquired under optimal weather conditions, with 0 % cloud cover and sufficient water column transparency (minimal surface disturbances, vegetation, or other interferences). Ensuring overall image quality is also a key consideration.

2. Acquisition of data from the Copernicus Data Portal: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>.



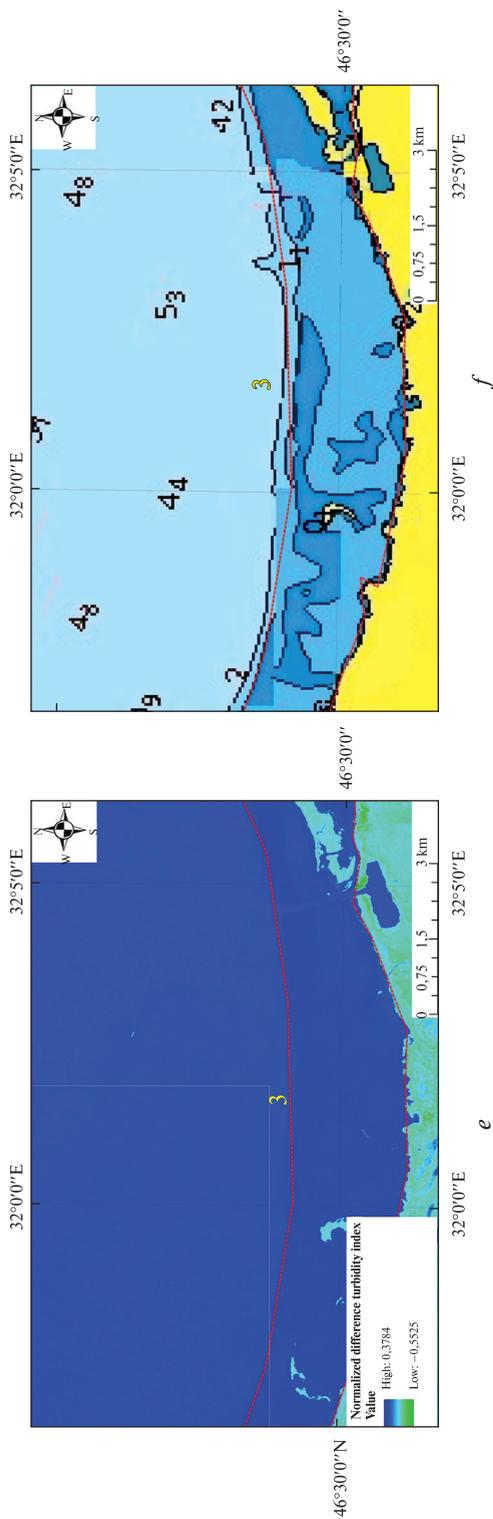


Fig. 4. NDTI-derived maps showing the submerged coastline near identified archaeological settlements within the Dniro Estuary, constructed using Sentinel-2 data acquired on 9 April 2020 (*a, c, e*), and depth maps showing the identified submerged coastline (*b, d, f*): *a, b* — near Cape Bublikova (*D*); *c, d* — near Stanislav village and Zoloty Mys settlement (*2*); *e, f* — near Beikush settlement (*3*)

3. Processing of the acquired data using the open-source GIS platform SNAP (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>). Georeference the data and generate raster images using water index formulas. Subsequently, classify the object types and, if required, perform post-classification refinement and vectorization.

4. Mapping, compilation, and design of the resulting maps.

5. Analysis of the processed data and interpretation of the results.

The northwestern Black Sea coast hosts approximately 200 archaeological sites, with remains located along the shores of water bodies or submerged underwater. Archaeological studies have identified more than ten ancient settlements and fortified sites dating from the 5th century BCE to the 3rd century CE within the coastal areas of the Dniro Estuary. Notable examples include the hillfort settlements of Zoloty Mys (1st — 3rd century CE) and Hlyboka Prystan (corresponding to the peak period of the Olbia state), as well as the Tyagin fortress (14th — 16th century CE), situated approximately 60 km upstream of the Dniro Estuary [2]. However, some settlements that were in the coastal zone in the past are now underwater. Accurate identification of such objects is necessary to study them. To continue the research, Sentinel-2 satellite images from the last three years were monitored, and the optimal image, Product S2B_MSI1CL, from April 9, 2020, was selected. The map in the visible range (Fig. 2) shows traces of the flooded coastline or terraces of the Dnieper Estuary in pixel contrast. The numbers indicate sections of the coastline with archaeological settlements, according to data [2].

Cape Bublikova (Fig. 3, mark 1) is considered the probable location of the Temple of Demetra. The Beikush settlement (Fig. 3, mark 3) lies at the confluence of the Berezan and Beikush estuaries, approximately 8 km west of Ochakiv. According to [2], the area also contains the ancient settlements of Geroyske-1 (3rd — 4th century BCE) and Geroyske-2 (1st — 3rd century CE).

Results and Their Discussion

Analyzing Sentinel-2 data from recent years, we selected an image from April 9, 2020 (product S2B_MSI1CL) and constructed an NDTI raster using the formula:

$$NDTI = (B_{RED} - B_{GREEN}) / (B_{RED} + B_{GREEN}),$$

where B_{RED} — red spectral band, B_{GREEN} — green spectral band.

As a result, a map of the Dnieper Estuary of the northwestern shelf of the Black Sea was constructed using the NDTI formula with the red and green spectral ranges (Fig. 3). Flooded shores were identified by pixel contrast.

As a result, paleoshorelines within the Dnieper Estuary on the northwestern shelf of the Black Sea were identified using the NDTI. This complements the information obtained in previous stages of the study using water indices.

According to preliminary studies, the NDWI and MNDWI models, as well as the NDTI map, identified a coastline in pixel contrast. The processed images show a sharp change in pixels, which is explained by changes in the depth and transparency of the surface layer of water. These changes are recorded as the past coastline.

In the next stage of the study, a detailed analysis was performed on three areas of the Dnieper Estuary, and the identified flooded coastline was plotted. To verify the results, a comparative analysis was performed by plotting the identified flooded coastline on a depth map (Fig. 4, a–f).

The submerged coastline identified using NDTI was overlaid on a detailed bathymetric map (see Fig. 4). The resulting delineation closely follows the isobaths, with pronounced depth transitions at 2–3 m, demonstrating the effectiveness of multispectral data and the water turbidity/transparency index for investigating shallow coastal areas. Adhering to specific criteria for satellite image processing enables this method to be applied remotely, representing a clear advantage over traditional field-based approaches under these conditions.

The presented method can be applied by meeting certain criteria for the sequence of processing space images. This is an absolute advantage over other methods in these conditions because it eliminates the need to be directly at the research site.

Concluding Remarks

The primary objective of this study was to identify an optimal method for detecting submerged shorelines without the need for direct on-site access, using the Dnipro Estuary on the northwestern Black Sea shelf as a case study. Multispectral remote sensing data were employed to achieve this goal. While optical data is subject to limitations — including weather conditions, seasonal variations in water clarity and surface characteristics, and challenges in distinguishing underwater features — these constraints were addressed through the development of a specific algorithm for the application and processing of remote sensing imagery, as presented in this study.

Using multispectral Sentinel-2 imagery, we identified the submerged coastline of the Dnipro Estuary, including areas corresponding to known archaeological settlements and potential locations of additional flooded sites. The coastline was delineated based on pixel contrast at depths of 2–3 m, employing the NDTI to assess water transparency and turbidity.

This method is recommended for investigating seafloor geomorphology at shallow depths (up to 3 m) under conditions of moderate water transparency, as well as for mapping water bodies, coastal zones, and continental shelf areas. It is also suitable for studying sites with submerged archaeological remains — primarily composed of sandy material — and for monitoring environmental aspects of the marine environment, such as increases in seafloor sediment accumulation observable in satellite imagery.

REFERENCES

1. Іноземцев Ю.І., Ступіна Л.В., Тюленєва Н.В., Паришев О.О., Маслаков М.О., Сидоренко В. Б., Рибак О.М., Мельниченко Т.А., Паславська О.В. Палеогеографія Північно-Західного шельфу Чорного моря в Голоцені. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки*. 2014. № 19 (1). С. 43–52.
2. Ємельянов В., Ієвлев М., Чубенко О., Головатий В. Антична і середньовічна спадщина Північного Причорномор'я. Видатні об'єкти і популярні маршрути прибережного та підводного історико-археологічного туризму від пониззя Дунаю до пониззя Дніпра. *Академперіодика*, Київ. 2024. 146 с. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.516.146>
3. Мапа глибин озер, водосховищ і річок (електронний ресурс): <https://ua.fishermar.org/depth-map/>
4. Сучков І.О., Федерончук О.В., Чепіжко О.В. Палеогеоморфологія і історія формування Північно-Західного шельфу Чорного моря. *Вісник Одеського національного університету*. 2001. № 6 (9). 89–93.

5. Шнюков Є.Ф., Іноземцев Ю.І., Паришев О.О., Маслаков М.О., Рибак О.М., Красножи-на З.В. Глинисті мінерали донних відкладів Азово-Чорноморського басейну. *Геол. і кор. ко-палини Світового океану*. 2022. № 18 (2). С. 19—29. <https://doi.org/10.15407/gpimo2022.02.019>
6. Янко В.В., Кондарюк Т.О., Кадурін С.В. Історія геологічного розвитку Північно-західно-го шельфу Чорного моря в пізньому неоплейстоцені-голоцені. *Збірник наукових праць ІГН НАН України*. 2019. № 12. С.135—148. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185756>
7. Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., Li, X. Water bodies mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*. 2016. № 8 (4), P. 354—372. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
8. Enea, A., Urzica, A., Breaban, I. G. Remote sensing, GIS and HEC-RAS techniques, applied for flood extent validation, based on Landsat imagery, Lidar and hydrological data. Case study: Baseu River, Romania. *Journal of Environmental Protection and Ecology*. 2018. №19 (3). P. 1091—1101.
9. Feng, L., Hub, C., Chen, X., Song, Q. Influence of the Three Gorges Dam on total suspended matters in the Yangtze Estuary and its adjacent coastal waters: Observations from MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2014. № 140. P. 779—788. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.002>
10. Gao, B.C. NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. № 58 (3). P. 257—266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
11. Girma, W., Awokea, A.G., Hailub, H., Melessec A.M. Evaluation of water extraction indices for spatial mapping of surface water bodies using Sentinel-2: GIS and remote sensing approaches: the case of Ethiopia. *H₂ Open Journal*. № 8 (5). P. 402—421. <https://doi.org/doi:10.2166/h2oj.2025.002>
12. Haifeng, T., Wang, L., Mingquan, W., Ni, H., Guodong, L., Xiang, L., Zheng, N. Dynamic Monitoring of the Largest Freshwater Lake in China Using a New Water Index Derived from High Spatiotemporal Resolution Sentinel-1A Data. *Remote Sensing*. 2017. № 9 (521). P. 1—18. <https://doi.org/10.3390/rs9060521>
13. Hou, X., Feng, L., Duan, H., Chen, X., Sunc, D., Shi, K. Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China. *Remote Sensing of Environment*. 2017. № 190. P. 107—121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.006>
14. Iemelianov, V., Melnychenko, T., Ievlev, M., Golovaty, V. Identification of paleocoasts on the Northwestern Black Sea Shelf using Sentinel-2 satellite data and water indices. 18th International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». European Association of Geoscientists & Engineers. Kyiv, 2025. 1—5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510059>
15. Kwang, C., Osei Jnr, E.M., Amoah, A.S. Comparing of Landsat 8 and Sentinel 2A using Water Extraction Indexes over Volta River. *Journal of Geography and Geology*. 2018. №10 (1). P. 1—7. <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v10n1p1>
16. Melnichenko, T. Estimation of activity the methane seepage from the Black Sea floor using MODIS images and geosciences data. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. № 26 (1). P.135—142. <https://doi.org/10.15421/111814>
17. Melnychenko, T., Solovey, T. Mapping Water Bodies and Wetlands from Multispectral and SAR Data for the Cross-Border River Basins of the Polish—Ukrainian Border. *Water*. 2024. № 16 (3). P. 1—28. <https://doi.org/10.3390/w16030407>
18. Mustafa, M.T., Hassoon, K.I., Hussain, H.M., Modher, H. Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI AND AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and Gis techniques. *International Journal of Research. GRANTHAALAYAH*, 2017. № 5, P. 117—128.
19. Shen, G., Fu, W., Guo, H., Liao, J. Water body mapping using long time series Sentinel-1 SAR data in Poyang Lake. *Water*. 2022. № 14 (12). P. 1—26. <https://doi.org/10.3390/w14121902>
20. Tavares, M.H., Guimãraes, D., Roussillon, J., Baute, V., Cucherousset, J., Boulêtreau, S., Martinez, J.-M. A Framework to Retrieve Water Quality Parameters in Small, Optically Diverse

Freshwater Ecosystems Using Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing*. 2025. № 17 (15). P. 2729–2755. <https://doi.org/10.3390/rs17152729>

Стаття надійшла 02.10.2025

Т.А. Мельниченко, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: meltanua777@gmail.com

ORCID 0000-0002-6597-4274

ДНУ «МорГеоЕкоЦентр НАН України»

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

ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА НОРМАЛІЗОВАНОГО ІНДЕКСУ КАЛАМУТНОСТІ (NDTI) ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМОРФОЛОГІЇ ЗАТОПЛЕНИХ БЕРЕГІВ

Публікація присвячена дослідженню геоморфології дна прибережної зони на ділянці північно-західного шельфу Чорного моря (в межах Дніпровського лиману) за допомогою методу обробки даних дистанційного зондування Землі. Сучасний рельєф північно-західного шельфу Чорного моря, за різними даними, успадкований від пізньоплейстоценового субаерального рельєфу приморської рівнини, розчленованої річковими долинами, і у подальшому згладжено в ході багатоступінчастої трансгресії моря, яка продовжується і в наш час. В прибережних зонах геоморфологія дна представлена затопленими терасами або берегами минулих часів, які вивчають вчені-геологи, екологи, археологи. В умовах обмеженого доступу до водного об'єкту, оптимальним методом дослідження затоплених берегів є застосування даних космічних технологій. В представленій статті використані супутникові дані місії Sentinel-2 з комбінаціями спектральних діапазонів за формулою індексу каламутності/прозорості води (NDTI). Використовуючи певну технологію обробки космічних знімків, вдалося визначити розташування берегової лінії минулих часів в межах Дніпровського лиману, яка в наш час знаходиться під водою. Верифікацію отриманих результатів було виконано за допомогою карти глибин. Визначену методику можна рекомендувати для вивчення: геоморфології дна, геоecологічних процесів прибережних зон, для уточнення пошуку місць давніх поселень.

Ключові слова: берег, дистанційне зондування Землі, мультиспектральні дані, північно-західний шельф Чорного моря, індекс каламутності/прозорості води NDTI.

Інформація для авторів

1. Журнал публікує оригінальні наукові, оглядові, критичні і дискусійні статті, а також короткі повідомлення з морської та загальної геології та геогеології, океанографії та осадового рудоутворення.
2. Статті публікуються українською або англійською мовою. Анотація до статті обсягом не менше 1800 знаків подається двома мовами.
3. До статті додаються: п'ять-шість ключових слів; відомості про авторів (ПІБ, ORCID або Researcher ID, назви і адреси організацій, де вони працюють, контактні електронні адреси та телефони). Вказати бажаний контактний e-mail для оперативного зв'язку.
4. Статті обсягом до 20 стор. (включаючи рисунки, таблиці та список літератури) приймаються в електронному вигляді в форматі *DOC* (формат A4, всі береги — 2 см; текстовий редактор Microsoft Word, шрифт Times New Roman Cyrilic, 11 пт, інтервал між рядками тексту — 1,5).
5. Рисунки і фотографії додатково треба надати в електронному варіанті у вигляді окремих файлів форматів *TIFF*, *JPG*, *GIF*, *EPS* (растр 300 dpi) і *CDR* (версії не вище 11).
6. При наборі тексту статті просимо в десяткових дробах використовувати кому, а не крапку; назви таблиць, а також стовпців і рядків у них друкувати з великої літери; посилання на рисунки і таблиці в тексті наводити в круглих дужках (рис. 1; табл. 1).
7. Список літератури складається і нумерується в алфавітному порядку (спочатку подаються роботи, опубліковані кирилицею, після них — латиницею); номери бібліографічних посилань у тексті статті подаються у квадратних дужках.

Приклади оформлення бібліографічних посилань у списку літератури:

Книги: Дроздовська А.А. Хімічна еволюція океану і атмосфери в геологічній історії Землі. Київ: Наук. думка, 1990. 205 с.

Автореферати дисертацій: Рибак Е.Н. Літолого-геохімічні особливості утворення чорноморських перлів: автореф. дис. ... канд. геол.-мін. наук. Київ, 1987. 16 с.

Статті в збірниках і журналах: Ковалевський С.А. Геологічні риси лінементів 38-го меридіана в районі Чорного моря. *Доп. АН СРСР*. 1960. **130**, № 6. С. 1306—1309.

Тези доповідей: Дадашев Ф.Г., Мамедова П.А. Закономірності кількісного розподілу грязьових вулканів в нафтогазоносних областях. *Геодинаміка і нафтогазоносні системи Чорноморсько-Каспійського регіону*: Матеріали III міжнар. конф. (17—21 верес. 2001 р.). Сімферополь, 2001. С. 56.

Електронні ресурси віддаленого доступу: Шаталов М.М. Уран надр України: геохімія урану та історія створення мінерально-сировинної бази. *Вісник НАН України*. 2015. С. 50—59. <https://doi.org/10.15407/vsn2015.10.050>.

До відома передплатників

Журнал розповсюджується через ДНУ «Центр проблем морської геології, геогеології та осадового рудоутворення НАН України»

тел. +38 (067) 5517800; +38 (067) 0968196829; e-mail: omgor.nanu@gmail.com

З питань отримання номерів журналу, що вже вийшли друком, звертайтеся до Редакції за телефонами:

+38 (067) 5517800

+38 (073) 5193303

e-mail: o.liubarets.menr@gmail.com

Машинобудівний пров., 28, Київ, 02000, Україна