

Bathymetry modelling of the eastern Tendrivska Bay (Ukraine) using Sentinel-2 remote sensing data

Yurii Moskalenko

Black Sea Biosphere Reserve, NAS of Ukraine (Hohly Prystan, Ukraine)

article info

key words

Tendrivska Bay, bathymetry, remote sensing data, relief, regression analysis.

correspondence to

Yurii Moskalenko; Black Sea Biosphere Reserve, NAS of Ukraine; 1 Lermontova Street, Hohly Prystan, 75600 Ukraine; Email: strix@strix.ks.ua; orcid: 0000-0002-9121-7832

article history

Submitted: 17.04.2024. Revised: 17.06.2024. Accepted: 30.06.2024

cite as

Moskalenko, Y. 2024. Bathymetry modelling of the eastern Tendrivska Bay (Ukraine) using Sentinel-2 remote sensing data. *GEO&BIO*, 26: 145–159. [Ukrainian, with English summary]

abstract

The aim of the study was to create a bathymetric model of the eastern Tendrivska Bay based on Sentinel-2 remote sensing data. For this purpose, the method of log-transformed spectral band ratios was used. Initially, cloud-free Sentinel-2 scenes from 28 dates in 2015–2018 were selected for the study. The preliminary processing of remote sensing data included atmospheric correction using the DSF (Dark Spectrum Fitting) algorithm, clipping to the region of interest, and merging identical visible spectrum bands from two adjacent tiles that fully covered the eastern Tendrivska Bay. High-frequency noise was removed by applying a 7×7 pixel window median filter to each band. In the final stage of remote sensing data preparation, the log-transformed spectral band ratios were calculated and exported to raster files using a mask that clipped the final images to the bay boundaries. The study calculated and evaluated three types of models: BG (blue to green bands log-ratio), BR (blue to red bands log-ratio), and GR (green to red bands log-ratio). Field depth measurements from 79 sites were used to train the models through regression analysis. Model validation was performed using multiple k-fold cross-validation. The BR and GR models showed the best results for bathymetric modelling of the eastern Tendrivska Bay. In contrast, BG models were unsuitable due to their low accuracy. The final bathymetric model of the eastern Tendrivska Bay was obtained by averaging 12 individual models (7 BR and 5 GR models) that showed the best results in the regression analysis. The spatial variation of the model's vertical accuracy, assessed by the standard deviation raster, indicated that vertical accuracy was slightly lower for relatively deep areas and areas with intensive water dynamics. This is due to the greater variability in water transparency in such areas. Overall, the obtained bathymetric model is characterised by high spatial resolution and vertical accuracy, making it suitable for geomorphological studies. It will also be useful as a spatial variable for modelling the distribution of aquatic organisms and waterfowl in the bay using machine learning methods. The experience of creating a bathymetric model for the eastern Tendrivska Bay showed that this method is quite simple and accessible, allowing it to be recommended for modelling the seabed topography of other shallow water bodies.

© 2024 The Author(s); Published by the National Museum of Natural History, NAS of Ukraine on behalf of GEO&BIO. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Licence (CC BY-SA 4.0), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Батиметричне моделювання східної частини Тендрівської затоки з використанням даних дистанційного зондування Sentinel-2

Юрій Москаленко

Резюме. Метою дослідження було створення батиметричної моделі східної частини Тендрівської затоки на основі даних дистанційного зондування Sentinel-2. Для цього використали метод відношення лог-трансформованих спектральних каналів. На попередньому етапі для дослідження відібрали безхмарні сцени Sentinel-2 за 28 дат 2015–2018 рр. Попередня обробка даних дистанційного зондування включала атмосферну корекцію за алгоритмом DSF (Dark Spectrum Fitting), їх обрізання за регіоном інтересу та об'єднання ідентичних каналів видимого діапазону з двох сусідніх тайлів, які повністю охоплювали всю площу східної частини Тендрівської затоки. Високочастотний шум видалили шляхом застосування медіанного фільтра із розміром вікна 7x7 пікселів для кожного каналу. На останньому етапі підготовки даних дистанційного зондування розрахували відношення лог-трансформованих спектральних каналів та експортували їх у растрові файли із застосуванням маски, яка обрізувала кінцеві зображення по межі затоки. У дослідженні розрахували й оцінили три типи моделей: BG (відношення логарифмів синього та зеленого каналів), BR (відношення логарифмів синього та червоного каналів) та GR (відношення логарифмів зеленого та червоного каналів). Для тренування моделей, яке здійснили шляхом регресійного аналізу, використали польові дані вимірювань глибини на 79 станціях. Валідацію оцінок регресійних моделей виконали шляхом багаторазової перехресної перевірки методом k-блоків. Найкращі результати для батиметричного моделювання східної частини Тендрівської затоки у дослідженні показали моделі типів BR та GR. Навпаки, моделі типу BG виявилися непридатними для цієї мети через їх низьку точність. Кінцеву батиметричну модель східної частини Тендрівської затоки отримали шляхом усереднення 12 окремих моделей (7 моделей типу BR та 5 моделей типу GR), які показали найкращі результати в регресійному аналізі. Оцінка просторової варіації вертикальної точності моделі, яку здійснили за растром стандартного відхилення, показала, що для порівняно глибоких частин акваторії та для ділянок з інтенсивною динамікою вод вертикальна точність є дещо меншою. Це зумовлено більшою мінливістю прозорості водної товщі в таких ділянках. Загалом отримана батиметрична модель характеризується високою просторовою роздільністю та вертикальною точністю, що дозволяє використовувати її в геоморфологічних дослідженнях. Також вона буде корисною як просторова змінна для моделювання просторового поширення в затоці гідробіонтів та водоплавних птахів методами машинного навчання. Досвід побудови батиметричної моделі для східної частини Тендрівської затоки показав, що цей метод є досить простим і доступним, що дозволяє рекомендувати його для моделювання рельєфу дна інших мілководних водойм.

Ключові слова: Тендрівська затока, батиметрія, дані дистанційного зондування, рельєф, регресійний аналіз.

Адреса для зв'язку: Юрій Москаленко; Чорноморський біосферний заповідник НАН України; вул. Лермонтова 1, Гола Пристань, 75600 Україна; Email: strix@strix.ks.ua; orcid: 0000-0002-9121-7832

Вступ

Батиметричні дані з високою роздільністю допомагають вирішувати широкий спектр завдань — як суто теоретичних (наприклад, пов'язаних з геоморфологічними дослідженнями, вивченням процесів седиментації, динаміки вод тощо [Klemas 2011]), так і практичних (наприклад, пов'язаних з безпекою судноплавства, рибним промислом, менеджментом прибережних регіонів тощо [Caballero & Stumpf 2019; Caballero & Stumpf 2020]). Непересічне значення ці дані мають в екологічних дослідженнях, адже глибина водойми та рельєф дна є потужними детермінуючими абіотичними факторами. Так, разом з іншими змінними середовища батиметрія водойм може бути використана як для моделювання поширення як окремих видів гідробіонтів, так і бентосних спільнот, просторового розподілу водоплавних птахів тощо [Lavers *et al.* 2014, Reiss *et al.* 2015].

Метою роботи була побудова батиметричної моделі з високою роздільністю для східної частини Тендрівської затоки на основі даних дистанційного зондування (ДДЗ).

Простий спосіб отримання батиметричних мап мілководних водойм за ДДЗ, що отримав назву методу відношення лог-трансформованих спектральних каналів (log-transformed band ratio model), запропонував Р. Стумпф зі співавторами [Stumpf 2003; Casal 2019]. Основою їхнього підходу є закон Бугера-Ламберта-Бера, відповідно до якого, з одного боку, інтенсивність поглинання випромінювання видимого діапазону зі збільшенням товщі води зростає експоненційно і, з іншого, — випромінювання з більшою довжиною хвилі поглинається водою інтенсивніше, ніж випромінювання з меншою довжиною хвилі. З цього закону випливає лінійна залежність між глибиною водойми та відношенням логарифму інтенсивності відбитого від водойми світла одного частотного діапазону до логарифму інтенсивності відбитого світла іншого частотного діапазону, яку можна описати формулою [Stumpf 2003; Caballero & Stumpf 2020]:

$$Z = m_0 + m_1 \rho SDB \quad (1)$$

де Z — глибина (у метрах); m_0 та m_1 — відповідно, вільний член лінійної функції та кутовий коефіцієнт, а ρSDB — відносна глибина, що є безрозмірною величиною, яка обчислюється за формулою:

$$\rho SDB = \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} \quad (2)$$

де n — константа для уникнення від'ємних значень логарифму, $R_w(\lambda_i)$ — інтенсивність відбиття від водойми випромінювання з довжиною хвилі i , $R_w(\lambda_j)$ — інтенсивність відбиття від водойми випромінювання з довжиною хвилі j .

Важливою рисою цього методу є те, що в ньому відсутня необхідність враховувати альbedo дна водойми. Це зумовлено тим, що відбивна здатність дна в одній і тій же точці впливає на інтенсивність відбиття випромінювання з різною довжиною хвилі приблизно однаково, через що значення ρSDB у ділянках з різним альbedo, але з однаковою глибиною є сталою величиною [Stumpf 2003].

Таким чином, розрахувавши за формулою (2) ρSDB за ДДЗ у видимих діапазонах сонячного спектру, та маючи серію вимірювань глибини водойми на мережі станцій для калібрування моделі, шляхом регресійного аналізу можна легко встановити значення параметрів m_0 та m_1 . Підставивши їх у формулу (1), можна змоделювати батиметричну мапу водойми.

Дослідники відмічають, що на точність отримуваних цим методом батиметричних моделей негативно впливають низка природних факторів, як то каламутність водної товщі, характер хвиль, відблиски сонця та неба від водної поверхні, погодні умови тощо [Evagorou *et al.* 2019]. Оскільки зазначені фактори є мінливими у просторі і часі, для покращення точності пропонується здійснювати таке моделювання із застосуванням часових серій ДДЗ [Evagorou *et al.* 2019; Wei & Theuerkauf 2020; Caballero & Stumpf 2020].

Матеріал і методика досліджень

Досліджувана акваторія

Тендрівська затока знаходиться у північній частині Чорного моря і входить до складу заповідної зони Чорноморського біосферного заповідника НАН України (ЧБЗ). Вона належить до однієї з найскладніших за своєю будовою берегових областей Чорного моря — Дніпровсько-Каркінітської [Zenkovich 1960]. За рельєфом дна в ній виділяється дві чітко відокремлені частини — глибоководна західна (близько 30 тис. га) та мілководна східна (близько 34 тис. га) (рис. 1). Межею між ними є підводний бар «Загреба», що простягнувся від мису Білі Кучугури на північний схід до півострова Ягорлицький Кут. Східна частина Тендрівської затоки через

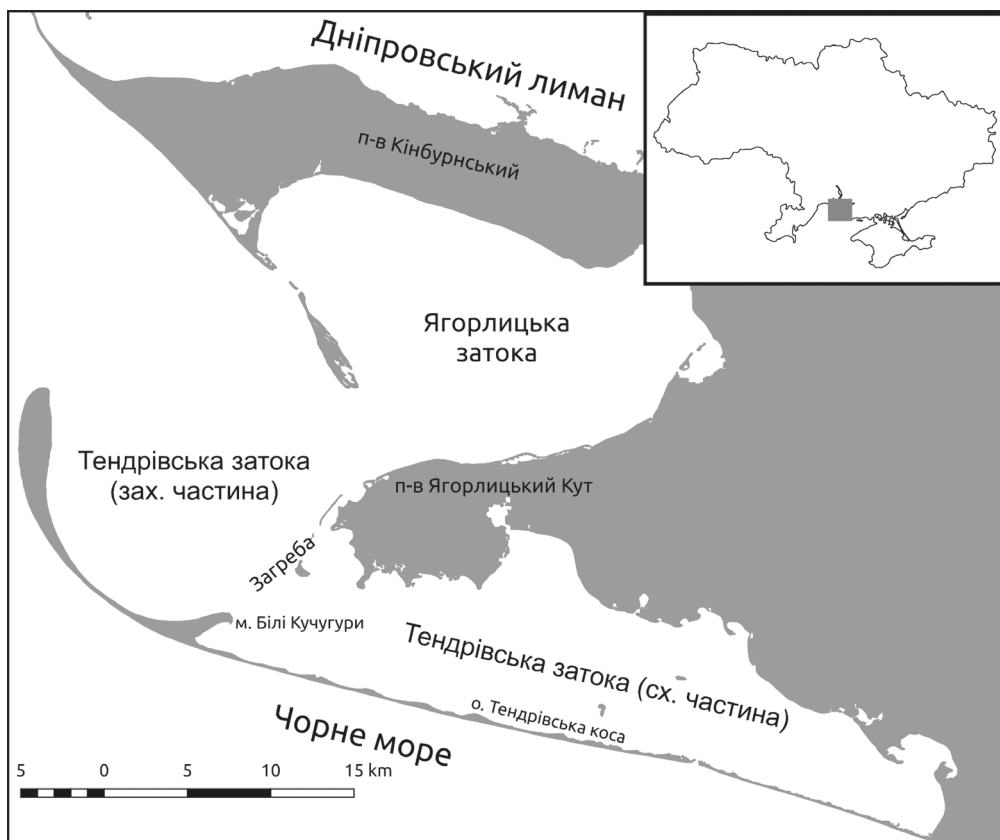


Рис. 1. Картохема району дослідження.

Fig. 1. Map of the study area.

малі глибини, відносно високу продуктивність угруповань донних організмів має велике значення для нагулу риби, гніздування, зимівлі та відпочинку під час міграцій багатьох видів птахів, що зумовило надання цим акваторіям статусу водно-болотного угіддя міжнародного значення [Rudenko & Yaremchenko 2000; Stoilovsky *et al.* 2003].

Польові дані

Для калібрування моделі використали дані польових батиметричних вимірювань, які провели фахівці Чорноморського біосферного заповідника НАН України Д. Королєсова та Д. Черняков під час досліджень макробентосу заток у рамках теми «Моніторинг стану природних комплексів Чорноморського біосферного заповідника» у 2011, 2014 та 2015–2016 рр. Глибину затоки вимірювали ручним лотом з точністю до 0.1 м на станціях регулярної опорної мережі гідробіологічного моніторингу. Всього у дослідженні використали дані вимірювань глибини на 79 станціях, з яких у 2011 р. зроблені вимірювання на 23 станціях, у 2014 р. — на 6 станціях, у 2015 р. — на 9 станціях та у 2016 р. — на 41 станції (рис. 2). Розподіл кількості польових батиметричних вимірювань за глибинами представлений на рис. 3.

Дані дистанційного зондування та їх попередня обробка

У дослідженні використали ДДЗ Sentinel-2 A/B (інструмент MSI) рівня обробки L1C [European Space Agency 2015], що вільно доступні через веб-сервіс з продуктами програми Copernicus (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Ці супутникові знімки поширюються окремими тайлами, розмір і номенклатура яких відповідають 100-кілометровій сітці системи координат UTM. Східна частина Тендрівської затоки потрапляє у два тайли — T36TUS та T36TVS.

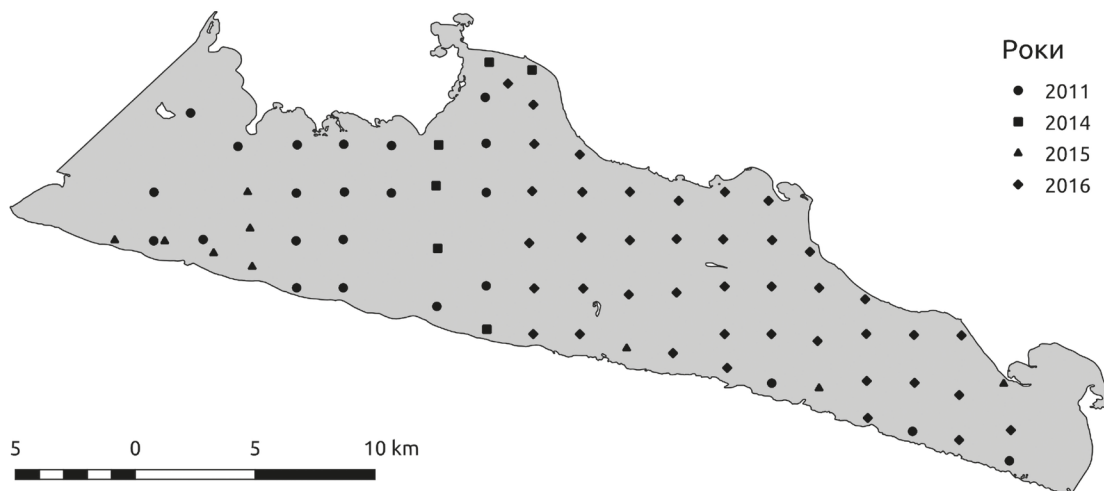


Рис. 2. Роки та місця проведення батиметричних вимірювань, використаних у дослідженні.
Fig. 2. Years and locations of bathymetric measurements used in the study.

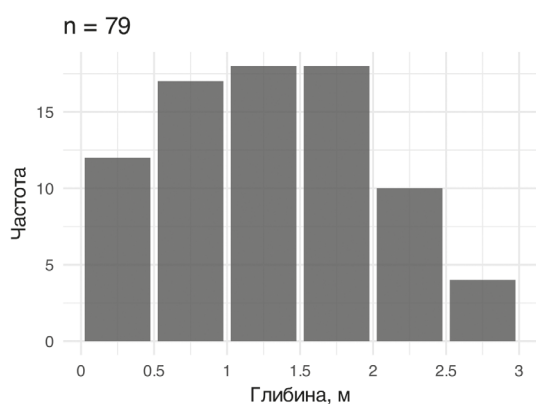


Рис. 3. Розподіл кількості польових батиметричних вимірювань за глибинами.
Fig. 3. Distribution of the number of field bathymetric measurements by depth.

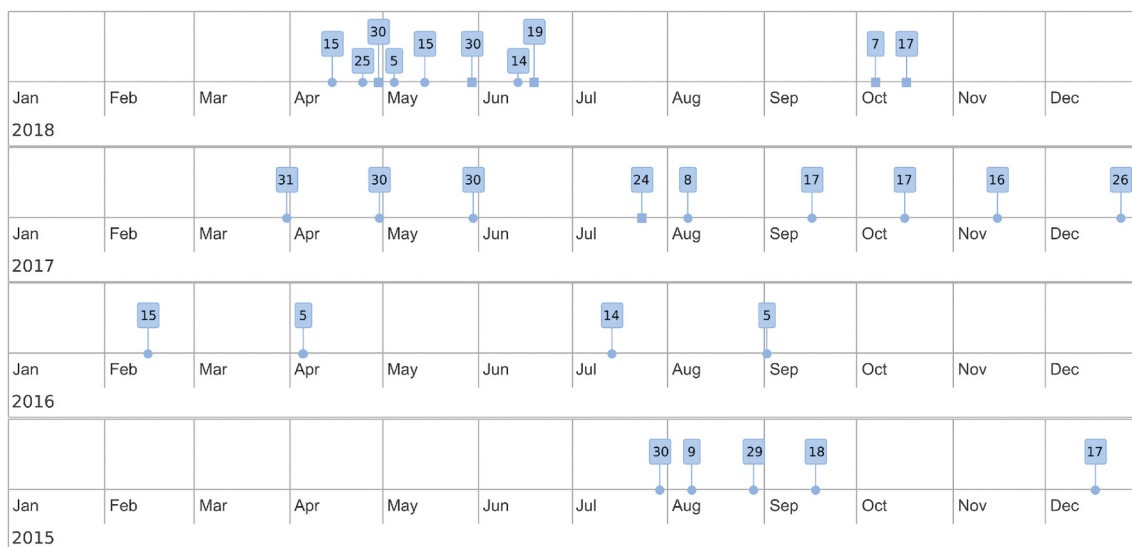


Рис. 4. Дати отримання використаних у дослідженні даних дистанційного зондування. Круглими мітками на таймлайні позначені дати отримання ДДЗ із супутника Sentinel-2А, квадратними — із супутника Sentinel-2В.

Fig. 4. Dates of remote sensing data acquisition used in the study. Circular markers on the timeline indicate dates of Sentinel-2A data acquisition, and square markers indicate dates of Sentinel-2B data acquisition.

Тож, щоб охопити аналізом всю досліджувану акваторію, для кожної обраної дати отримання ДДЗ завантажували обидва вказані тайли. Всього для аналізу обрали супутникові знімки, на яких акваторія східної частини Тендрівської затоки не перекривалася хмарами, за 28 дат 2015–2018 рр. (рис. 4).

Атмосферну корекцію ДДЗ за алгоритмом DSF (Dark Spectrum Fitting) з одночасним обрізанням за регіоном інтересу виконали утилітою ACOLITE (v20210114.0) [Vanhellemont & Ruddick 2016; Vanhellemont 2019]. Після атмосферної корекції спектральні канали 2 (490 нм; відповідає синій області видимого спектру), 3 (560 нм; зелена область спектру) та 4 (665 нм; червона область спектру) з суміжних тайлів, у межі яких потрапляє досліджувана акваторія, за окремими датами поканално об'єднали за допомогою консольної утиліти `gdal_merge`, що входить до пакету GDAL (v.2.2.2) [GDAL/OGR contributors 2017]. В результаті об'єднання отримали 84 растрових файли (по 3 спектральні канали на кожну з 28 дат), які імпортували у середовище R версії 3.6.3 [R Core Team 2020] для завершення попередньої обробки. Останньою операцією з підготовки ДДЗ до аналізу було видалення високочастотного шуму, зумовленого хвилями та відблисками сонця і неба, для чого до кожного каналу застосували медіанний фільтр із розміром вікна 7x7 пікселів [Evagorou et al. 2019] (функція `focal` з пакету `raster` для R [Hijmans 2020]). Після цього там же в середовищі R здійснили обчислення растрів відношень лог-трансформованих спектральних каналів та експортували їх у растрові файли із застосуванням маски, яка обрізувала кінцеві зображення по межі затоки.

Моделювання батиметричної мапи

Зазвичай при застосуванні методу відношення лог-трансформованих спектральних каналів користуються відношенням логарифмів синього та зеленого (модель типу BG) або синього та червоного (модель типу BR) каналів. При цьому модель типу BR краще працює на глибинах до 6–8 м, а модель типу BG — на глибинах до 20 м, що обумовлено більш швидким затуханням випромінювання червоної області спектру зі збільшенням глибини, у порівнянні із випромінюванням зеленої області спектру [Caballero & Stumpf 2019; Caballero & Stumpf 2020]. У дослідженні ми застосували обидва типи моделі (див. формули (3) та (4) для розрахунку ρSDB_{BG} та ρSDB_{BR}). Крім того, враховуючи вкрай малу глибину досліджуваної акваторії, також спробували використати відношення логарифмів зеленого та червоного каналів (модель типу GR; див. формулу (5) для розрахунку ρSDB_{GR}).

$$\rho SDB_{BG} = \frac{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{490}))}{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{560}))} \quad (3)$$

$$\rho SDB_{BR} = \frac{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{490}))}{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{665}))} \quad (4)$$

$$\rho SDB_{GR} = \frac{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{560}))}{\ln(1000 \times R_w(\lambda_{665}))} \quad (5)$$

Таким чином, в ході дослідження розрахували 84 растри відносної глибини ρSDB (по 3 типи моделей на кожну з 28 дат). У точках, що відповідають місцям польових вимірів глибини затоки, з отриманих растрів були зчитані значення ρSDB у таблицю, яка разом зі значеннями польових вимірів глибини і була використана для подальшого лінійного регресійного аналізу.

Надалі, зі всієї сукупності супутникових даних за різні дати для подальшого розрахунку батиметричних мап обрали ті сцени ДДЗ, які показали у регресійному аналізі тісніший зв'язок між змінними (оцінювали за значеннями коефіцієнта детермінації r^2) і менші значення оцінок похибки між даними польових батиметричних вимірювань та значеннями глибини, що розраховані за рівнянням лінійної регресії.

Статистична обробка даних

Статистичну обробку даних, включаючи лінійний регресійний аналіз для калібрування моделей, оцінку регресійних моделей та побудову діаграм виконали у середовищі R [R Core Team 2020].

Окрім коефіцієнта детермінації r^2 , для оцінки регресійних моделей використали кореневу середньоквадратичну помилку ($RMSE$) та середню абсолютну помилку (MAE) (див. формули (6) та (7) відповідно).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad (6)$$

де a_i — емпіричне значення глибини; p_i — значення глибини передбачене за рівнянням лінійної регресії; n — об'єм вибірки.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - a_i|}{n} \quad (7)$$

Валідацію оцінок регресійних моделей виконали шляхом багаторазової перехресної перевірки методом k-блоків [Kuhn 2021] (кратність перевірок — 10; кількість блоків k — 5).

Результати досліджень

В ході регресійного аналізу встановили, що моделі типу BG через вкрай низьку їх точність непридатні для створення батиметричної мапи східної частини Тендрівської затоки. Як видно з рис. 5, коефіцієнти детермінації r^2 в моделях цього типу занадто низькі (не перевищують 0.56), а значення кореневої середньоквадратичної ($RMSE$) та середньої абсолютної (MAE) помилок занадто великі. Навпаки, досить непогані результати показали моделі типів BR та GR. У найкращих моделях зазначених типів максимальні значення коефіцієнтів детермінації r^2 досягають 0.92, а мінімальні значення $RMSE$ та MAE — 0.21 та 0.16 відповідно. При цьому, як можна бачити за взаємним розташуванням медіан, кількість більш якісних моделей типу BR більша, ніж моделей типу GR (рис. 5).

Для подальшої роботи з моделювання рельєфу дна східної частини Тендрівської затоки обрали 12 моделей (7 моделей типу BR та 5 моделей типу GR), що показали найкращі результати. У відібраних моделях значення коефіцієнта детермінації становить не менше як 0.89, а значення $RMSE$ та MAE не більш як 0.23 і 0.19 відповідно. Результати регресійного аналізу для обраних моделей наведені у табл. 1, а діаграми розсіювання показані на рис. 6.

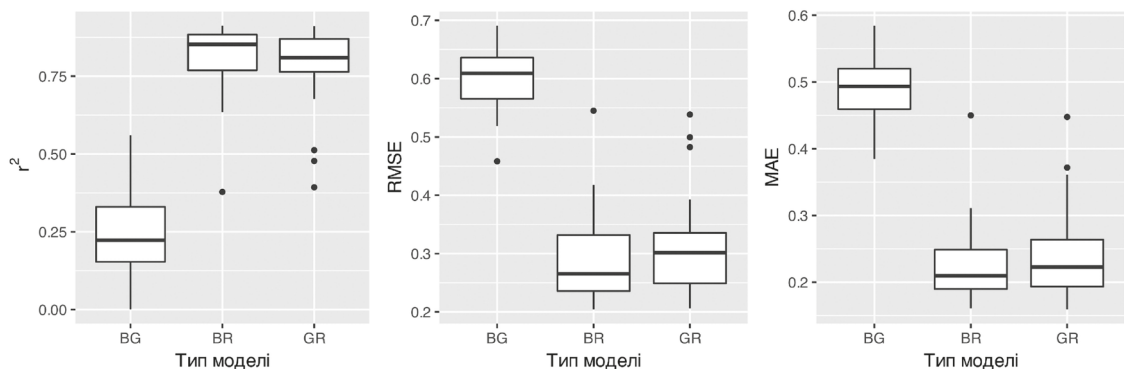


Рис. 5. Варіювання значень коефіцієнта детермінації r^2 , кореневої середньоквадратичної ($RMSE$) та середньої абсолютної (MAE) помилок для різних типів моделей.

Fig. 5. Variation of r^2 values, root mean square error ($RMSE$), and mean absolute error (MAE) for different model types.

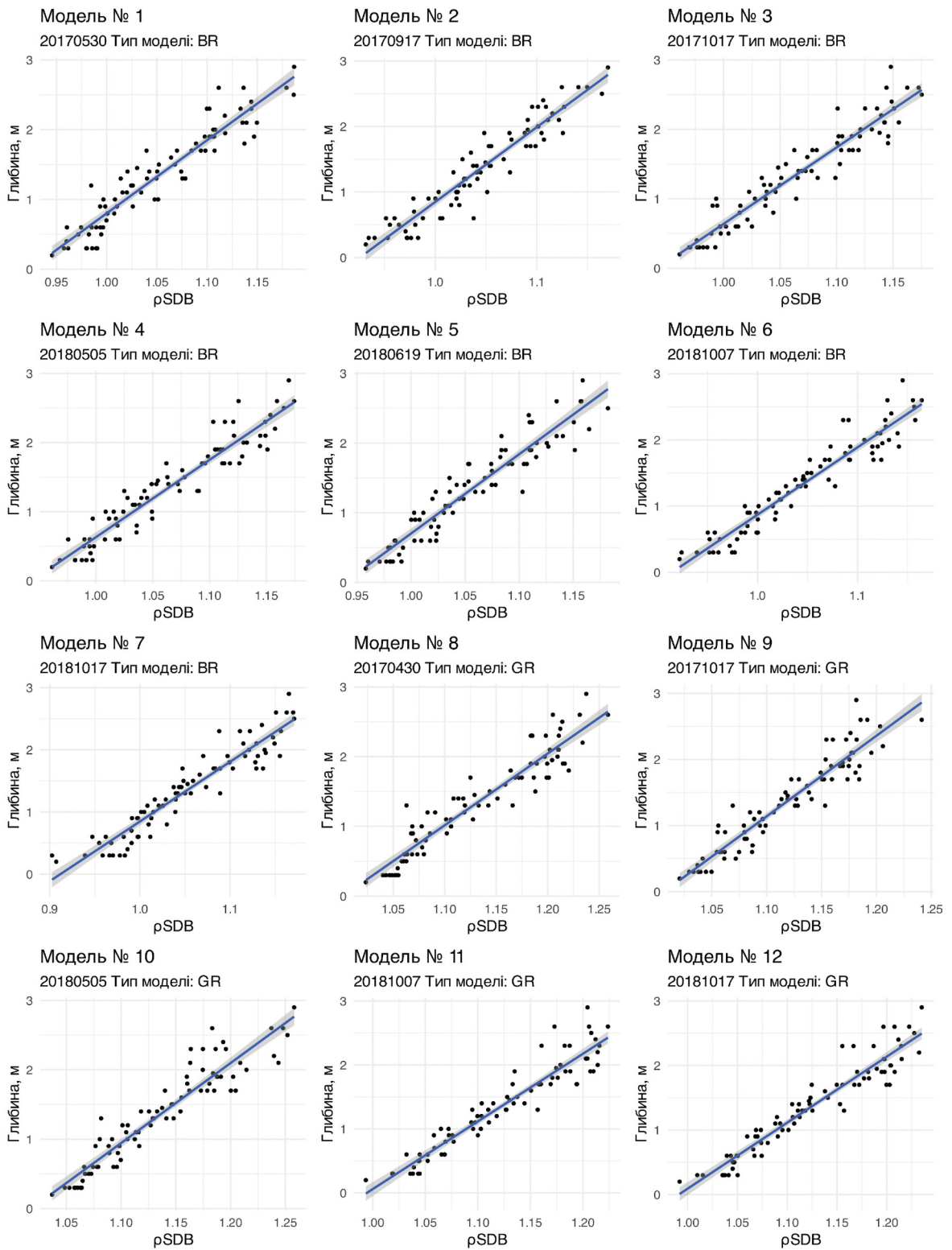


Рис. 6. Діаграми розсіювання для обраних моделей (світло-сірі області вздовж ліній регресії позначають їх 95 % довірчий інтервал).

Fig. 6. Scatter plots for the selected models (light grey shaded areas along the regression lines indicate their 95% confidence intervals).

Таблиця 1. Результати регресійного аналізу

Table 1. Results of regression analysis

Номер моделі	Дата отримання ДДЗ	Тип моделі	r^2 (SD)	RMSE (SD)	MAE (SD)	m_0	m_1	F	Ступені свободи	p-value
1	20170530	BR	0.90 (0.04)	0.23 (0.04)	0.18 (0.03)	-9.67	10.48	624.8	1 та 77	<0.0001
2	20170917	BR	0.90 (0.03)	0.22 (0.04)	0.18 (0.03)	-10.56	11.41	670.9	1 та 77	<0.0001
3	20171017	BR	0.91 (0.03)	0.21 (0.04)	0.17 (0.03)	-10.36	11.00	736.3	1 та 77	<0.0001
4	20180505	BR	0.91 (0.03)	0.22 (0.03)	0.18 (0.03)	-10.55	11.18	718.8	1 та 77	<0.0001
5	20180619	BR	0.90 (0.03)	0.23 (0.04)	0.19 (0.03)	-10.67	11.38	637.7	1 та 77	<0.0001
6	20181007	BR	0.92 (0.03)	0.21 (0.04)	0.17 (0.03)	-9.31	10.18	804.9	1 та 77	<0.0001
7	20181017	BR	0.91 (0.03)	0.23 (0.04)	0.19 (0.03)	-8.76	9.61	656.8	1 та 77	<0.0001
8	20170430	GR	0.90 (0.04)	0.23 (0.04)	0.18 (0.04)	-10.29	10.28	638.5	1 та 77	<0.0001
9	20171017	GR	0.90 (0.04)	0.23 (0.03)	0.18 (0.03)	-12.26	12.18	624.9	1 та 77	<0.0001
10	20180505	GR	0.89 (0.04)	0.23 (0.04)	0.18 (0.03)	-11.74	11.54	609.7	1 та 77	<0.0001
11	20181007	GR	0.91 (0.03)	0.22 (0.04)	0.17 (0.03)	-10.52	10.58	695.0	1 та 77	<0.0001
12	20181017	GR	0.92 (0.03)	0.21 (0.03)	0.16 (0.03)	-10.14	10.23	790.9	1 та 77	<0.0001

Примітка: наведені у таблиці значення коефіцієнтів детермінації (r^2), кореневої середньоквадратичної помилки (RMSE) та середньої абсолютної помилки (MAE), а також їх стандартні відхилення (SD) обчислені методом багаторазової k-блочної перехресної перевірки.

Note: The values of r^2 , root mean square error (RMSE), and mean absolute error (MAE) presented in the table, along with their standard deviations (SD), were calculated using the multiple k-fold cross-validation method.

На основі коефіцієнтів, які були отримані в ході регресійного аналізу, за обраними моделями розрахували 12 батиметричних мап, усередненням яких отримали кінцеву модель рельєфу дна східної частини Тендрівської затоки. Ця модель представлена на рис. 7а, а її повнорозмірна геоприв'язана версія у форматі GeoTIFF із роздільністю 10 м/піксель доступна для завантаження у репозиторії Zenodo (див. інформацію про супровідні матеріали у кінці статті). Для наочності також підготували відмивку рельєфу (рис. 7б). Крім того, розрахували растр стандартних відхилень, який дає уявлення про варіацію даних, що лягли в основу кінцевої батиметричної моделі (рис. 7с). Гістограма частотного розподілу множини значень пікселів цього растру наведена на рис. 8.

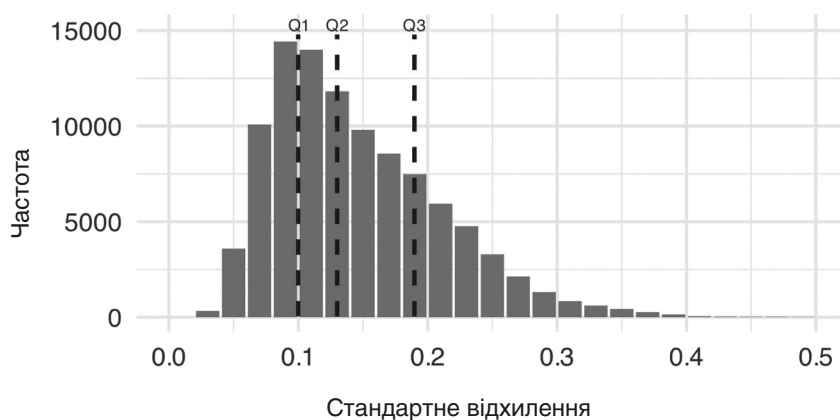


Рис. 8. Частотний розподіл значень множини пікселів растру стандартних відхилень (Q1, Q2 та Q3 — відповідно, 1-й, 2-й та 3-й квартилі).

Fig. 8. Frequency distribution of pixel values in the standard deviation raster (Q1, Q2, and Q3 represent the 1st, 2nd, and 3rd quartiles, respectively).

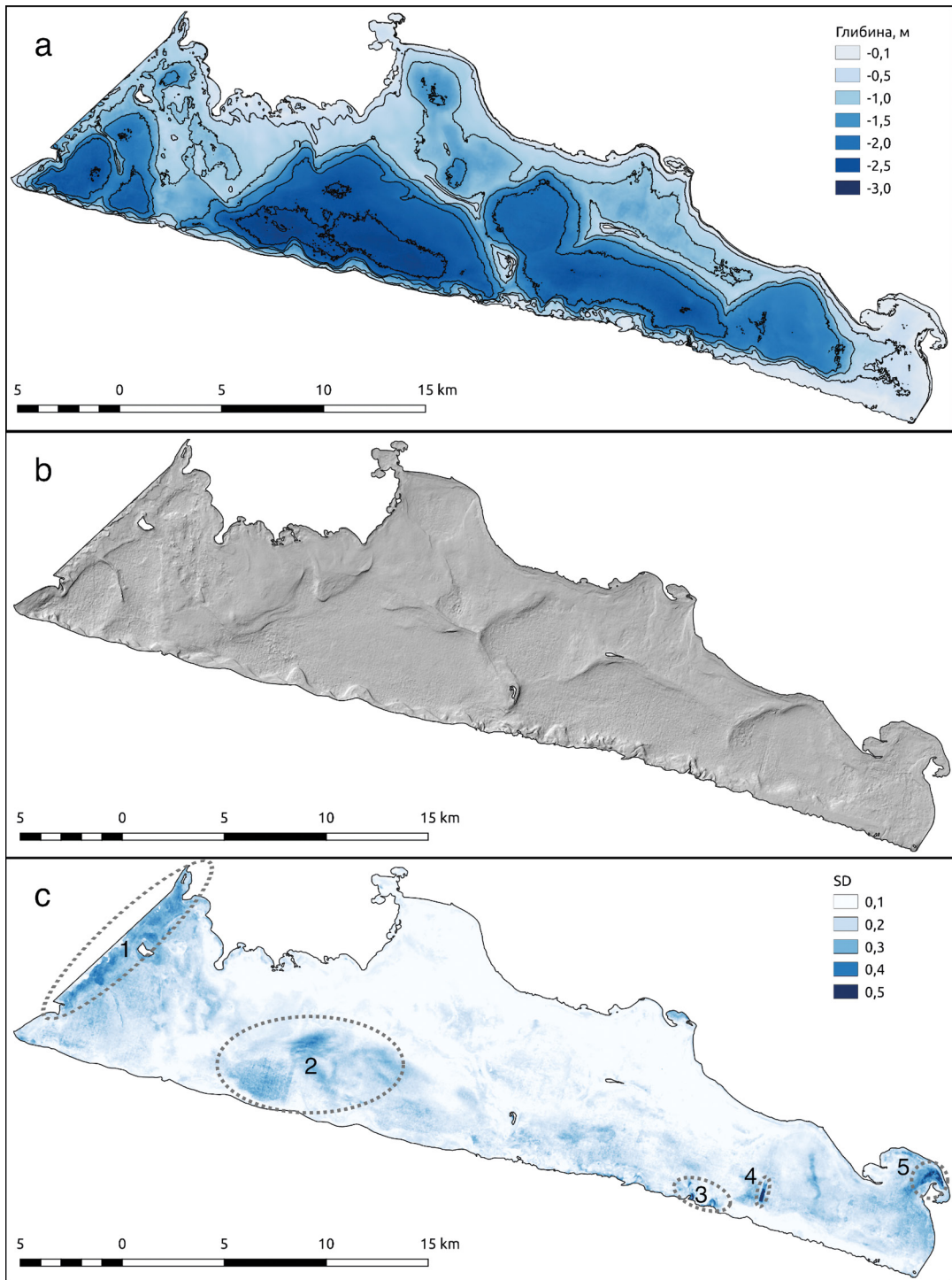


Рис. 7. Результати батиметричного моделювання східної частини Тендрівської затоки; (а) власне батиметрична модель; (б) відмивка рельєфу; (с) растр стандартних відхилень. Примітки: 1) на рис. 7а ізобати проведені через 0.5 м; 2) при генерації відмивки рельєфу коефіцієнт вертикального масштабування або z-фактор був встановлений рівним 100; 3) пронумерованими пунктирними овалами на рис. 7с позначено області з підвищеними значеннями стандартного відхилення.

Fig. 7. Results of bathymetric modelling of the eastern Tendrivska Bay; (a) bathymetric model; (b) hillshade representation; (c) standard deviation raster. Notes: 1) in Fig. 7a, contour lines are drawn at 0.5 m intervals; 2) for the hillshade representation, the vertical exaggeration or z-factor was set to 100; 3) numbered dashed ovals in Fig. 7c indicate areas with elevated standard deviation values.

Обговорення результатів дослідження

Рельєф дна є головним абіотичним фактором природної зональності, який визначає локальні особливості седиментаційних, гідрохімічних та гідрофізичних умов, як наслідок, формування біотопів для різних угруповань гідробіонтів. Східна мілководна частина Тендрівської затоки має складний розчленований рельєф дна, що спричиняє значну фрагментованість біотопів, в той же час, саме ця акваторія є найбільш важливою з точки зору здійснення гідробіологічного моніторингу у ЧБЗ. Моніторинг стану природних аквально-комплексів заснований на точкових натурних даних, які фахівці заповідника отримують на регулярній мережі станцій. Аналіз просторового розподілу та особливостей структури донних біоценозів, поширення окремих видів, розподілу біомаси, оцінка обсягів загальних запасів здійснюється на основі інтерполяції точкових даних [Korolesova 2015; 2017]. Адекватна оцінка просторового розподілу вказаних показників стану природно-аквального комплексу можлива лише за умов урахування моделі рельєфу дна з достатньою роздільністю.

Регулярний комплексний моніторинг біоти східної частини Тендрівської затоки ведеться близько півстоліття і батиметричні дослідження затоки завжди були однією із важливих його складових. Гідробіологічна зйомка на опорній мережі гідробіологічного моніторингу, серед іншого, передбачає обов'язкове вимірювання глибини затоки у місці відбору проб [Korolesova 2015; 2017].

З появою у 90-х роках можливості застосування комп'ютерної картографії у цих дослідженнях, у заповіднику вдалося істотно удосконалити техніку моделювання рельєфу дна затоки. Спочатку у системах автоматичного проектування, а пізніше у настільних геоінформаційних системах його здійснювали шляхом інтерполяції набору точкових вимірювань глибини на опорній мережі гідробіологічного моніторингу. На виході отримували батиметричні моделі на зразок представленої на рис. 9. Ця модель була згенерована у GRASS GIS [GRASS Development Team 2019] інтерполяцією модулем `v.surf.rst` даних польових вимірювань, що лягли в основу цього дослідження. В загальних рисах вона подібна до моделі, отриманої на основі ДДЗ: коефіцієнт кореляції Пірсона між растрами обох моделей становить 0.84. Однак, просторова роздільність батиметричної моделі, отриманої шляхом інтерполяції, дуже обмежена.

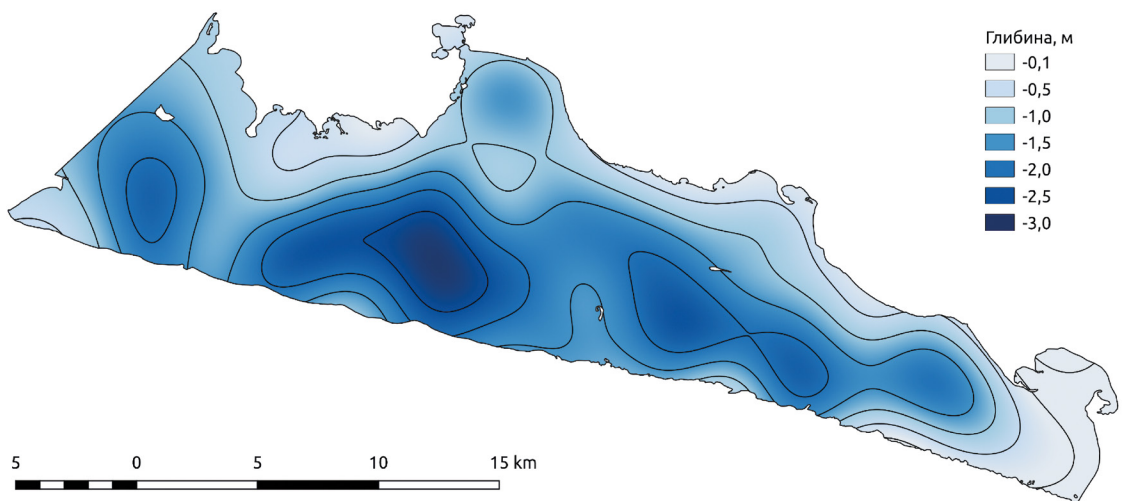


Рис. 9. Батиметрична модель східної частини Тендрівської затоки побудована шляхом інтерполяції 79 точкових польових вимірювань глибини. Примітка: ізобати на моделі проведені через 0.5 м.

Fig. 9. Bathymetric model of the eastern Tendrivska Bay constructed by interpolating 79 point field depth measurements. Note: contour lines in the model are drawn at 0.5 m intervals.

Як наслідок, вона є мало придатною, наприклад, для геоморфологічних досліджень зі скільки-небудь прийнятною деталізацією для цілей моніторингу заповідником природно-аквального комплексу затоки. Просторова роздільність інтерполяційної моделі може бути покращена лише одним способом — збільшенням щільності мережі станцій для польових вимірювань. Втім, це важко реалізувати через істотне зростання витрат, необхідних для проведення подібного дослідження. Більш сучасні методи батиметричних досліджень, як то ехолотна зйомка, чи авіаційне лідарне сканування, заповіднику теж недоступні з причини високої вартості. З огляду на це, можливість отримати модель рельєфу дна затоки з високою просторовою роздільністю за допомогою машинного навчання та ДДЗ на тому ж наборі польових даних, який зазвичай збирається в ході гідробіологічної зйомки, є вельми привабливою. Втім, тут постає проблема оцінки вертикальної точності отриманої моделі, зокрема у контексті питання чи достатня вона для тих чи інших дослідницьких цілей.

Моделю оцінили шляхом порівняння наявних емпіричних значень глибини, які були використані для тренування моделі, зі значеннями глибини з моделі. В ході порівняння, яке провели методом регресійного аналізу, встановили, що емпіричні та модельні значення між собою сильно корелюють (коефіцієнт детермінації r^2 становить 0.93,

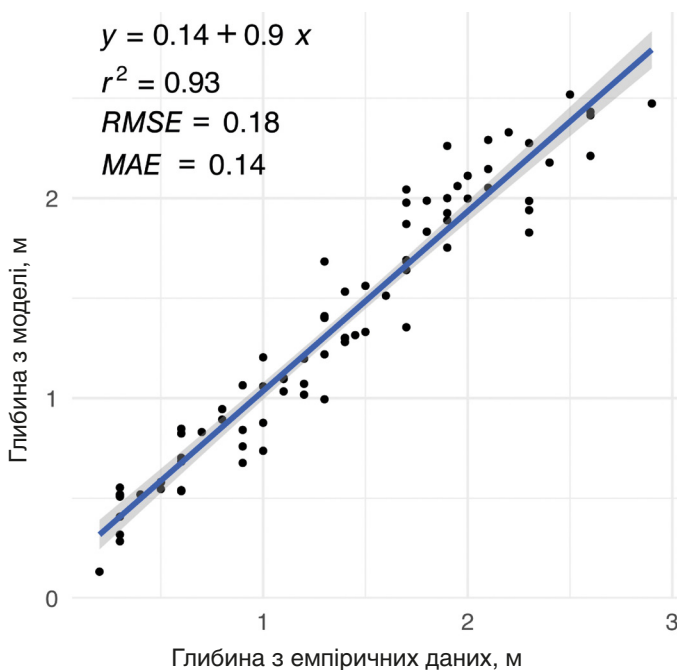


Рис. 10. Діаграма розсіювання емпіричних та модельних батиметричних даних.

Fig. 10. Scatter plot of empirical and model bathymetric data.

що відповідає коефіцієнту кореляції 0.96), а значення $RMSE$ та MAE становлять 0.18 та 0.14 відповідно (рис. 10). Цікаво, що порівнюючи значення r^2 , $RMSE$ та MAE для усередненої моделі з такими у табл. 1 для окремих моделей, доходимо висновку, що усереднена батиметрична модель дещо краще відповідає емпіричним даним, ніж будь-яка з тих 12 моделей, що лягли в її основу. Це узгоджується з літературними даними, відповідно до яких батиметричні моделі, що були отримані на основі часових серій ДДЗ, характеризуються вищою точністю, ніж моделі засновані на одиничних супутникових знімках [Evagorou *et al.* 2019; Wei & Theuerkauf 2020; Caballero & Stumpf 2020].

Окремий інтерес у контексті оцінки вертикальної точності моделі рельєфу дна затоки, становить аналіз растру стандартних відхилень, який зображений на рис. 7с. Як можна бачити, на більшій частині акваторії затоки варіація значень глибини між окремими моделями досить низька. З гістограми розподілу значень множини пікселів цього растру і локалізації квартилів (рис. 8) видно, що стандартне відхилення не перевищує 0.1, 0.13 та 0.19 м на 25, 50 та 75 % площі акваторії відповідно. При цьому, порівнюючи рис. 7а та 7с, можна бачити, що області з низькими значеннями стандартного відхилення здебільшого характерні для місць з порівняно малими глибинами. Досить висока варіабельність значень глибини між моделями приурочена до котловин, а також до областей з інтенсивною динамікою вод. Наприклад, порівняно високі значення стандартного відхилення в області 1 на рис. 7с найімовірніше зумовлені

тим, що тут частіше спостерігаються високі концентрації зависей через інтенсивну динаміку вод внаслідок впливу суміжної до цієї області глибоководної частини Тендрівської затоки. Інтенсивною динамікою вод ймовірно спричинені високі значення стандартного відхилення і у області 5. Остання знаходиться у кутовій частині затоки у зоні переходу у затоку другого порядку, де берегова лінія має складну конфігурацію. Через цю зону відбувається водообмін під час змінно-нагінних явищ, що і зумовлює тут час від часу велику концентрацію зависей.

Інтенсивна варіабельність змодельованих значень глибини між окремими моделями у області 2 визначається наявністю тут котловини і, відповідно, більшим часом седиментації зависей. Високі значення стандартного відхилення на двох ділянках малої площі впритул до промоїни на острові Тендрівська Коса у області 3 очевидно зумовлена не просторовою оптичною неоднорідністю вод, а власне частими змінами глибин у місцях водообміну між затокою і морем через промоїну. Як видно з таблиці 1, ДДЗ, за якими були розраховані 12 обраних моделей, охоплюють більш як рік. Водночас за нашими спостереженнями конфігурація промоїн на Тендрівській Косі (і, відповідно, конфігурація конусів виносу відкладів у затоці) може істотно мінятися навіть за куди менші проміжки часу (рис. 11).

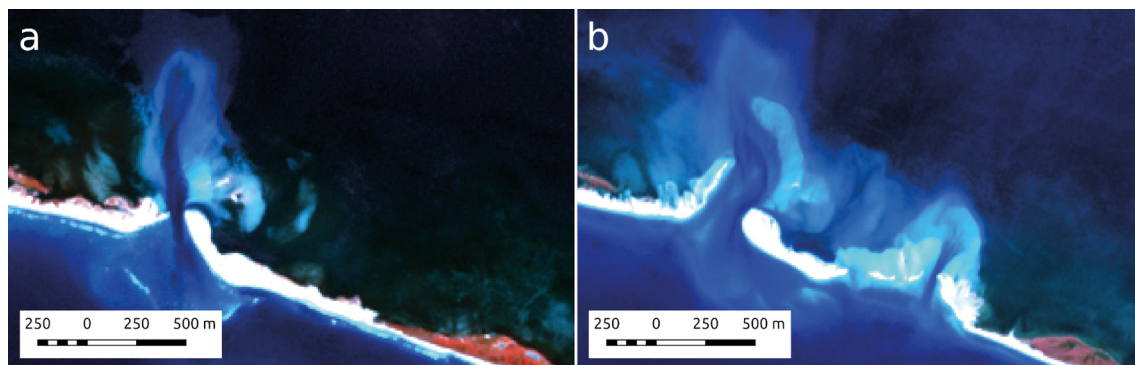


Рис. 11. Вигляд промоїн та конусів виносу на одній і тій же ділянці острова Тендрівська Коса (відповідає області 3 на рис. 7с) на супутникових знімках Sentinel-2 від 17.10.2017 р. (а) та 05.05.2018 р. (б); комбінація спектральних каналів: 8-4-2.

Fig. 11. The view of the erosion gaps and the sediment cones in the same area of Tendrivska Spit Island (corresponding to area 3 in Fig. 7c) on Sentinel-2 satellite images from 17.10.2017 (a) and 05.05.2018 (b); the combination of spectral bands: 8-4-2.

Окремо привертає до себе увагу правильною формою видовжена з північного сходу на південний захід прямокутна ділянка з високим значенням стандартного відхилення у області 4. Менш виражена подібна ділянка присутня також у області 2. Їхня правильна форма і строга взаємна паралельність натякають на те, що вони не пов'язані з якимось природним явищем у самій затоці, а є аномаліями самих ДДЗ. З літератури відомо, що це є артефакти, які виникають на сценах ДДЗ Sentinel-2 після атмосферної корекції утилітою Acolite внаслідок різниці у фізичних характеристиках окремих сусідніх датчиків на SWIR-сенсорі інструмента MSI [Vanhellemont & Ruddick 2016].

Таким чином, метод відношення лог-трансформованих спектральних каналів продемонстрував високу вертикальну точність батиметричної моделі на більшій частині акваторії Східної частини Тендрівської затоки. Дещо менша вертикальна точність виявилася характерною для порівняно глибоких частин акваторії та на ділянках з інтенсивною динамікою вод і у більшості випадків пов'язана з мінливістю прозорості водної товщі. Втім, оскільки концентрація зависей, яка власне і обумовлює прозорість водної товщі, є мінливою в часі, моделювання рельєфу дна шляхом побудови багатьох окремих батиметричних моделей на відібраних сценах часових серій ДДЗ з наступним їх усередненням дає можливість отримати кінцеву батиметричну модель прийнятної точності.

Висновки

Методом відношення лог-трансформованих спектральних каналів, який застосували до часової серії ДДЗ Sentinel-2, вдалося побудувати батиметричну модель східної частини Тендрівської затоки з високою роздільністю та високою вертикальною точністю. Ця модель може бути використана як просторова змінна для моделювання просторового поширення гідробіонтів та водоплавних птахів методами машинного навчання. Значну цінність така модель становить для розуміння геоморфологічних процесів, які відбуваються в затоці.

Хоча використаний метод і потребує чималого обсягу досить ресурсоємних обчислень, він загалом є порівняно простим і доступним, що дозволяє рекомендувати його для моделювання рельєфу дна інших мілководних водойм.

Супровідні матеріали

Повнорозмірна геоприв'язана цифрова батиметрична модель східної частини Тендрівської затоки у форматі GeoTIFF із роздільністю 10 м/піксель доступна для завантаження на репозиторії Zenodo за адресою: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12783467>. Додатково в репозиторії розміщені відмивка рельєфу дна затоки та растр стандартних відхилень у тому ж форматі і з тією ж роздільністю. Крім того, в репозиторії доступний код на мові R, що був використаний у дослідженні для основного етапу обробки ДДЗ.

Подяки

Висловлюю подяку Д. Королесовій та Д. Чернякову за люб'язно надані дані польових вимірювань глибини східної частини Тендрівської затоки. Окрема подяка Д. Королесовій за цінні доповнення, які допомогли істотно покращити зміст роботи.

Декларації

Фінансування. Дослідження виконано у рамках та коштом планових наукових тем Чорноморського біосферного заповідника НАН України «Моніторинг стану природних комплексів Чорноморського біосферного заповідника НАН України (Літопис природи) в 2016–2020 рр.» (№ ДР 0116U003374) та «Моніторинг стану природних комплексів Чорноморського біосферного заповідника НАН України (Літопис природи) в 2021–2025 рр.» (№ ДР 0121U109174).

Конфлікт інтересів. Автор не має жодних конфліктів інтересів, які могли б вплинути на зміст цієї статті.

References

- Caballero, I., R. P. Stumpf. 2019. Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **226**: 106277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- Caballero, I., R. P. Stumpf. 2020. Towards routine mapping of shallow bathymetry in environments with variable turbidity: contribution of Sentinel-2A/B satellites mission. *Remote Sensing*, **12** (3): 451. <https://doi.org/10.3390/rs12030451>
- Casal, G., X. Monteys, J. Hedley, P. Harris, C. Cahalane, [et al.]. 2019. Assessment of empirical algorithms for bathymetry extraction using Sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, **40** (8): 2855–2879. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1533660>
- European Space Agency. 2015. *Sentinel-2 User Handbook, ESA Standard Document. Issue 1, Rev 2*. Paris, France, 1–64. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Evagorou, E., C. Mettas, A. Agapiou, K. Themistocleous, D. Hadjimitsis. 2019. Bathymetric maps from multi-temporal analysis of Sentinel-2 data: the case study of Limassol, Cyprus. *Advances in Geosciences*, **45**: 397–407. <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-397-2019>
- GDAL/OGR contributors. 2017. *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library, Version 2.2.2*. Open Source Geospatial Foundation. <https://gdal.org>
- GRASS Development Team. 2019. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.8.2*. <https://grass.osgeo.org>
- Hijmans, R. J. 2020. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Klemas, V. 2011. Beach profiling and LIDAR bathymetry: an overview with case studies. *Journal of Coastal Research*, **27** (6): 1019–1028. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00017.1>

- Korolesova, D. D. 2015. Biocoenosis membrane of Chara alga as an important element of coastal ecosystems (on the example Tendrovsky and Yagorlytsky Bays of Black Sea). *Bulletin of Odesa National University. Series: Geographical and Geological Sciences*, **20** (1): 134–148. [Russian]
- Korolesova, D. D. 2017. Current state of the macrophytobenthos in Tendrivska and Yagorlycka Bays of Black Sea Biosphere Reserve. *Black Sea Botanical Journal*, **13** (4): 457–467. [Ukrainian] <https://dx.doi.org/10.14255/2308-9628/17.134/4>
- Kuhn, M. 2021. *caret: Classification and Regression Training*. <https://CRAN.R-project.org/package=caret>
- Lavers, J. L., M. G. R. Miller, M. J. Carter, G. Swann, R. H. Clarke. 2014. Predicting the spatial distribution of a seabird community to identify priority conservation areas in the Timor Sea. *Conservation Biology*, **28** (6): 1699–1709. <https://doi.org/10.1111/cobi.12324>
- R Core Team. 2020. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reiss, H., S. Birchenough, A. Borja, L. Buhl-Mortensen, J. Craeymeersch, [et al.]. 2015. Benthos distribution modelling and its relevance for marine ecosystem management. *ICES Journal of Marine Science*, **72** (2): 297–315. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu107>
- Rudenko, A. G., O. A. Yaremchenko. 2000. Tendrovsky Bay. In: Siokhin, V. (ed.). *Numbers and Distribution of Breeding Waterbirds in the Wetlands of the Azov-Black Sea Region of Ukraine*. Wetlands International-AEME, Kyiv, 127–144. [Russian]
- Stoilovsky, V., A. Korziukov, M. Zhmud, I. Rusev, M. Nesterenko, [et al.]. Ukraine. 2003. In: *Directory of Azov-Black Sea Coastal Wetlands: Revised and Updated*. Wetlands International, Kyiv, 165–229.
- Stumpf, R. P., K. Holderied, M. Sinclair. 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, **48** (1part2): 547–556. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Vanhellemont, Q. 2019. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*, **225**: 175–192. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>
- Vanhellemont, Q., K. Ruddick. 2016. Acolite for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery. In: *Proceedings of the 2016 ESA Living Planet Symposium* (Prague, 9–13 May 2016). ESA Special Publication SP-740.
- Wei, C., S. J. Theuerkauf. 2020. A Novel Multitemporal Approach for Satellite-Derived Bathymetry for Coastal Waters of Palau. *Journal of Coastal Research*, **37** (2): 336–348. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00032.1>
- Zenkovich V. P. 1960. *Morphology and Dynamics of the Soviet Coast of the Black Sea. V. II (North-Western part)*. USSR Academy of Sciences, Moscow, 1–216. [Russian]