

UDK 004.42; 528.8; 551.46

Oleksiy Shundel, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher, Head of the Group of Geophysical Research Methods and Data Collection

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

Serhii Fedoseienkov, PhD (Geol.), Senior Researcher, Deputy Director for Scientific and Technical Work

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

Svitlana Nevierova, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

Nataliia Speranska, Leading Engineer

e-mail: natsp_78@ukr.net

State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATED GENERATION OF GEOSPATIAL *GEOTIFF* DATA OF HYDROACOUSTIC ECHOGRAMS FOR THE MODULE OF THE OCEANOGRAPHIC DATA BANK OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE

Abstract. *This article presents the development of software designed for the automated generation of geospatial data from hydroacoustic echograms obtained via side-scan sonar (SSS). SSS is a key tool for mapping the underwater environment, allowing for high-resolution echograms of the bottom and coastal zone. The combination of SSS data with satellite navigation (GPS) creates conditions for an accurate geospatial representation of underwater features, which is critical for oceanographic research, engineering work and environmental monitoring. Software processing of "raw" (initial) SSS data requires several stages: separation of port and starboard channels, reading GPS tags, smoothing the ship's track and converting echogram pixels into a georeferenced raster. The primary objective is to create a tool that facilitates efficient processing and visualization of SSS data, enabling the georeferencing of results in the GeoTIFF format. The developed software implements algorithms for preliminary signal processing, noise filtering, coordinate transformation, and the automatic creation of echogram mosaics. The practical application of this tool is demonstrated through a case study of surveying a section of the Dnipro River channel, resulting in high-quality geospatial images of the riverbed. The outcomes indicate the effectiveness of the proposed approach for integrating hydroacoustic data into geographic information systems (GIS), thereby opening new opportunities for monitoring aquatic ecosystems and supporting scientific research in the field of oceanography.*

Keywords: *hydroacoustics, side-scan sonar, echogram, GeoTIFF, geospatial data, automated processing, geographic information systems, aquatic ecosystem monitoring, oceanographic data, software.*

О.І. Шундель, С.Г. Федосєєнков, С.І. Невєрова, Н.А. Сперанська

Державна наукова установа “Центр проблем морської геології, геоєкології та осадового рудоутворення НАН України”, м. Київ, Україна

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ GEOTIFF-ДАНИХ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ЕХОГРАМ ДЛЯ МОДУЛЯ БАНКУ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ДАНИХ НАН УКРАЇНИ

Анотація. У статті представлено розробку програмного забезпечення для автоматизованого формування геопросторових даних з гідроакустичних ехограм, отриманих за допомогою гідролокатора бокового огляду (ГБО). ГБО є ключовим інструментом для картографії підводного середовища, що дозволяє отримувати високороздільні ехограми дна та берегової зони. Поєднання даних ГБО із супутниковою навігацією (GPS) створює умови для точного геопросторового представлення підводних особливостей, що є критично важливими для океанографічних досліджень, інженерних робіт та екологічного моніторингу. Програмна обробка «сирих» (вихідних) даних ГБО вимагає кількох етапів: виділення каналів лівого та правого борту, зчитування GPS-тегів, згладжування суднового треку та перетворення пікселів ехограми у растр із геоприв'язкою. Метою дослідження є створення інструменту, що забезпечує ефективну обробку та візуалізацію даних ГБО з подальшою геоприв'язкою результатів у форматі GeoTIFF. Розроблене програмне забезпечення реалізує алгоритми попередньої обробки сигналів, фільтрації шумів, трансформації координат та автоматичного формування мозаїк ехограм. Практичне застосування інструменту продемонстровано на прикладі обстеження ділянки русла річки Дніпро, де отримано високоякісні геопросторові зображення дна. Результати свідчать про ефективність запропонованого підходу для інтеграції гідроакустичних даних у геоінформаційні системи, що відкриває нові можливості для моніторингу водних екосистем та підтримки наукових досліджень у галузі океанографії.

Ключові слова: гідроакустика, гідролокатор бокового огляду, ехограма, GeoTIFF, геопросторові дані, автоматизована обробка, геоінформаційні системи, моніторинг водних екосистем, океанографічні дані, програмне забезпечення.

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.76-86](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.76-86)

Вступ

Гідроакустичні системи бокового огляду (ГБО) є ключовим інструментом для картографії підводного середовища, що дозволяє отримувати високороздільні ехограми дна та берегової зони. Поєднання даних ГБО із супутниковою навігацією (GPS) створює умови для точного геопросторового представлення підводних особливостей, що є критично важливими для океанографічних досліджень, інженерних робіт та екологічного моніторингу [1-5].

Програмна обробка «сирих» (вихідних) даних ГБО вимагає кількох етапів: виділення каналів лівого та правого борту, зчитування GPS-тегів, згладжування суднового треку та перетворення пікселів ехограми у растр із геоприв'язкою. Традиційні підходи часто передбачають ручні кроки та розрізнені скрипти, що знижує ефективність та уніфікацію даних.

У зв'язку з цим постає завдання розробити єдиний застосунок, який дозволить автоматизувати конвертацію гідроакустичних та *GPS*-даних у стандартизований геопросторовий формат *GeoTIFF* [6-8]. Це сприятиме оперативному оновленню Банку океанографічних даних НАН України та полегшить інтеграцію результатів вимірювань у *GIS*-клієнти, такі як *QGIS* чи *ArcGIS* [9-11]. Технічні деталі розробленого рішення та ключові алгоритми описані у наступних розділах роботи.

Основною метою цієї роботи є розробка *MATLAB*-застосунку *mapGBO* для автоматизованого формування геопросторових *GeoTIFF*-даних гідроакустичних ехограм із урахуванням таких завдань:

- Розробити алгоритм синхронізації та коректного зчитування «сирих» (вихідних) даних бокового огляду ГБО та *GPS* для забезпечення точності просторового розташування сигналу.
- Реалізувати методи згладжування траєкторії судна (рухоме середнє) та фільтрації вібраційних шумів для підвищення якості геоприв'язки.
- Створити процедуру побудови координатної сітки (*LatGrid*, *LonGrid*) та присвоєння пікселям ехограми відповідних географічних координат.
- Забезпечити експорт оброблених даних у стандартизований растровий формат *GeoTIFF* із вбудованою палітрою кольорів для сумісності з *GIS*-системами (*QGIS*, *ArcGIS*).
- Розробити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс вибору вхідних файлів (*.dat) та налаштувань роботи модуля.

Досягнення цих завдань сприятиме підвищенню оперативності та стандартизації обробки гідроакустичних даних у рамках інформаційного модуля Банку океанографічних даних НАН України.

Результати дослідження

Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення *mapGBO*, реалізоване у середовищі *MATLAB*, побудовано як монолітний, але логічно поділений скрипт, що виконує повний цикл обробки гідроакустичних та *GPS*-даних. Архітектура рішення орієнтована на поетапну обробку інформації з послідовним проходженням через основні функціональні блоки, що забезпечують зчитування, аналіз, просторову обробку та візуалізацію даних.

Роботу програми починає блок ініціалізації, в якому користувач задає режим роботи через набір спеціальних прапорців. Зокрема, змінна *flag_MC6* дозволяє враховувати специфіку форматів даних, що залежать від типу модуля сполучення (MC6 або MC7), тоді як *flag_LB* і *flag_RB* активують обробку лівого або правого борту гідролокатора відповідно. Крім того, передбачена можливість згладжування траєкторії (*flag_filt*) та інверсії борту (*flag_flip*) у разі потреби. На цьому етапі також програма завантажує палітру кольорів для подальшої візуалізації ехограм за допомогою спеціальної функції *LoadPalette()*.

Наступним кроком є інтерфейс завантаження вхідних даних, де за допомогою інтерактивного вікна *uigetfile* користувач вибирає один або кілька *.dat-файлів. Після цього прогрес-бар *waitbar* інформує користувача про перебіг обробки. Впродовж послідовного зчитування файлу програма виконує пошук спеціального маркера "Event", що відмічає початок структурованої частини даних. До цього моменту програма пропускає службову частину заголовка.

Далі програмне забезпечення виконує зчитування метаданих: розміру вибірки, кількості відліків, діапазону сканування і на основі цих параметрів формує структуру очікуваних даних. Після цього скрипт обробляє сам сигнал, здійснюючи індексацію окремих блоків – каналів лівого і правого борту (*indLeftBort*, *indRightBort*) та координат *GPS* (*indGPS*). Індексація дозволяє організувати синхронізацію даних між ехограмою та навігаційною інформацією, що є критично важливою для точної геопросторової прив'язки.

GPS-дані перетворюють з внутрішнього формату у координати в градусах, після чого програма виконує згладжування маршруту та інтерполяцію треку між координатами. На основі цього скрипт будує сітку з рівномірним кроком по широті та довготі, в яку вставляє значення ехограм. Після отримання кожним пікселем своїх координат програма формує підсумкову карту, яку експортує у формат *GeoTIFF* [2, 7] з відповідною кольоровою палітрою.

Таким чином, архітектура програми реалізує повний ланцюг обробки – від відкриття «сирого» файлу до отримання готового геопросторового растрового зображення. Всі етапи побудовані у вигляді логічно послідовних блоків і реалізовані у вигляді єдиного *MATLAB*-скрипта, що дозволяє легко адаптувати або розширити функціональність рішення у майбутньому.

Алгоритм зчитування та первинної обробки даних

Обробку гідроакустичних даних розпочинає процес зчитування структурованих бінарних файлів формату **.dat*, які містять записи сигналів бокового огляду та супутніх *GPS*-координат. Файл містить послідовність різних типів блоків даних: службових, навігаційних, а також сигналів з лівого та правого борту. Для коректної обробки необхідно правильно виявити та інтерпретувати ці блоки, дотримуючись послідовності операцій, закладеної у формат.

Першим етапом є визначення точки входу до корисних даних шляхом пошуку у файлі сигнатури *'Event'*, яка є маркером початку блоку з основними структурованими записами. Усі байти до цієї позиції програма ігнорує як службову інформацію. Після виявлення сигнатури скрипт зчитує набір заголовків, які містять ключові параметри для розуміння формату вибірки.

Одним з перших параметрів є розмір одного вимірювання сигналу у бітах – його програма зчитує як ціле число та приводить до значення у байтах діленням на 8:

$$N_s = \frac{DS}{8},$$

де *DS* – кількість бітів для одного фрагмента сигналу.

Далі визначають кількість відліків у кожній реалізації сигналу. Цей параметр може відрізнятися залежно від типу використаного модуля запису, наприклад, для модулів *MC6* характерне додаткове службове поле, яке необхідно компенсувати:

$$N_r = \begin{cases} N_{Vyborok} - 64, & \text{якщо використовується модуль } MC6 \\ N_{Vyborok}, & \text{для } MC7 \text{ або інших модулів} \end{cases}.$$

Наступним етапом є зчитування глибини охоплення сигналу або його діапазону, яку визначають у метрах із врахуванням масштабного коефіцієнта:

$$D = \frac{Diap \cdot 1.5}{2} [\text{м}],$$

де $Diap$ – значення, отримане з заголовка блоку даних.

Після отримання базових параметрів вибірки програма виконує повторний обхід файлу з метою індексації початкових позицій даних для кожного типу сигналу. Для кожного блоку маємо перевірку його типу – і якщо він відповідає блоку з лівого або правого борту ГБО, або блоку з GPS -координатами – відповідний байтовий індекс додає до списку: $indLeftBort$, $indRightBort$ або $indGPS$. Ці індекси підлягають збереженню у пам'яті для подальшої синхронізації сигналу з координатами.

Нарешті, дані GPS перетворюють з цілочисельного формату у десяткові градуси. Для кожного блоку GPS зчитують значення широти ($Shir$) та довготи ($Dovg$), що представлені у сотих частках кутової хвилини. Їх перетворення у десяткову систему координат виконують за формулою:

$$\varphi_i = \frac{Shir_i}{60000}, \quad \lambda_i = \frac{Dovg_i}{60000}.$$

Це дозволяє отримати координати, сумісні зі стандартними системами географічного позиціонування ($WGS-84$), та використовувати їх для геоприв'язки сигналів.

Таким чином, на виході з цього етапу ми маємо: координати треку руху судна, параметри структури сигналу та позиції у файлі, що відповідають кожному блоку з даними. Ці відомості використовують на наступному етапі – геопросторовому проектуванні ехограм.

Геоприв'язка ехограм

Після зчитування сигналів гідролокатора бокового огляду та супутникових координат із GPS , програма виконує ключову операцію – просторове проектування ехограми на поверхню Землі. Цей процес дозволяє кожному пікселю ехограми приписати точну географічну координату, що забезпечує можливість подальшого аналізу та інтеграції в геоінформаційні системи.

Перед початком геоприв'язки координати GPS проходять попереднє згладжування для усунення випадкових вібрацій та коливань траєкторії судна. Згладжування виконано за допомогою методу ковзного середнього з фіксованим вікном ширини $2k+1$, де $k = 7$. В результаті програма обчислює усереднені значення координат у точках маршруту:

$$\tilde{\varphi}_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \varphi_j, \quad \tilde{\lambda}_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \lambda_j,$$

де φ_i , λ_i – широта і довгота в i -й точці треку.

Застосування цього фільтра значно покращує плавність траєкторії й дозволяє уникнути спотворень при побудові інтерпольованої сітки координат.

Між кожною парою *GPS*-точок виконано лінійну інтерполяцію координат для побудови проміжних позицій пікселів ехограми. Це реалізовано через функцію *track2*, яка генерує задану кількість рівномірно розподілених точок на сферичній поверхні між початковою і кінцевою позицією. Таким чином, маємо сформовану повну траєкторію, що покриває усю довжину галсу, із просторово узгодженими точками.

Після побудови траєкторії програма формує регулярну координатну сітку, в межах якої буде зберігатися ехограма. Сітку створено на основі мінімального та максимального значення широти і довготи з відповідними кроками дискретизації $\Delta\varphi$ і $\Delta\lambda$, які зазвичай відповідають просторовому розділенню даних (наприклад, 0.0002 градуси):

$$\begin{aligned} LatGrid &= \min(\tilde{\varphi}) : \Delta\varphi : \max(\tilde{\varphi}), \\ LonGrid &= \min(\tilde{\lambda}) : \Delta\lambda : \max(\tilde{\lambda}). \end{aligned}$$

Кожному пікселю ехограми, що має координати (φ, λ) , програма знаходить відповідні індекси у координатній сітці за принципом мінімального відхилення:

$$\begin{aligned} i &= \arg \min |LatGrid - \varphi|, \\ j &= \arg \min |LonGrid - \lambda|. \end{aligned}$$

Амплітудне значення сигналу, пов'язане з цим пікселем, програма записує у відповідну комірку матриці *MAP*, яка відображає повне геопросторове представлення гідроакустичних даних у вигляді двовимірного растрового зображення:

$$MAP(i, j) = Z,$$

де Z – інтенсивність сигналу в даній точці.

В результаті цієї процедури отримаємо сформовану геореферовану матрицю ехограми, яка готова до візуалізації та експорту у форматі *GeoTIFF* [2, 7]. Візуальне розташування ехограм у географічному просторі дозволяє проводити точний аналіз рельєфу дна, ідентифікацію підводних об'єктів та інтеграцію з іншими джерелами просторових даних.

Формат *GeoTIFF* та геореференс

Після формування матриці значень ехограми з географічною прив'язкою наступним етапом є експорт цієї інформації у стандартизований формат зберігання – *GeoTIFF*. Цей формат є різновидом *TIFF*-файлів, що містять метадані про географічне положення кожного пікселя, включаючи проекцію, межі координат та просторову роздільну здатність. *GeoTIFF* – є одним із базових форматів для роботи у сучасних геоінформаційних системах (ГІС, *GIS*), таких як *ArcGIS*, *QGIS*, *Global Mapper* та ін. [10].

Створену матрицю *MAP*, яка відображає амплітуду сигналу для кожної координати, скрипт зберігає разом із геопросторовою інформацією шляхом створення геореференсної структури за допомогою функції *georasterref*. Цей об'єкт визначає прив'язку пікселів растрового зображення до географічної широти та довготи, а також межі покриття зображення. Таким чином, кожен піксель зображення чітко видно на місцевості.

Для збереження зображення застосовано функцію *geotiffwrite*, яка приймає матрицю значень, геореференс та палітру кольорів.

Функція перетворює числові значення у 8-бітне зображення (*uint8*), накладає відповідну кольорову шкалу (яку за замовчуванням завантажено з файлу палітри **.npal*) і створює на виході файл з розширенням **.tif*. Такий файл є повністю сумісним з більшістю програмних пакетів ГІС і може використовуватись для подальшого аналізу, побудови профілів глибини, тривимірної візуалізації або об'єднання з іншими шарами просторових даних.

GeoTIFF-файли підлягають автоматичному зберіганню у підкаталозі *GeoTiff*, який створює програма в директорії, де розміщено вхідні **.dat* файли, що дозволяє зберігати результати обробки в організованому вигляді і спрощує їх подальше використання в інформаційних системах.

Таким чином, завершальним етапом обробки є генерація геоприв'язаного зображення ехограми у форматі *GeoTIFF*, що робить результат сумісним із сучасною цифровою картографією та відкриває можливості для інтеграції у великі просторові бази даних, зокрема – у Банк океанографічних даних НАН України. Формат *GeoTIFF* [2, 7] забезпечує збереження амплітудних характеристик сигналу, а також повну просторову інтеграцію отриманих даних із географічними координатами, що дозволяє безпосередньо аналізувати результати гідроакустичного зондування в середовищах *GIS* та інтегрувати їх з іншими типами геопросторової інформації.

Приклад практичного застосування

Ефективність розробленого *MATLAB*-застосунку була доведена на реальних польових даних, зібраних під час панорамної гідролокаційної зйомки дна ділянки Дніпра в межах руслового зниження поблизу острова Білий, південніше о. Хортиця.

Використано «сирі» (вихідні) записи гідролокатора бокового огляду, який працював у двоканальному режимі (лівий та правий борти) із супутнім записом *GPS*-трека. Вихідна ехограма є джерелом інформації про підводне середовище й містить усі характерні гідроакустичні характеристики: зону акустичної тіні, глибину води, геометрію траєкторії, деталізовані структури рельєфу дна, акустичну відбивну здатність поверхні.

На рис. 1 представлено ехограму, збудовану до просторової обробки, з використанням бронзової палітри відтінків, що дозволяє чітко візуалізувати зміни інтенсивності зворотного акустичного сигналу. Також на ехограмі чітко спостерігаються зміни рельєфу дна, а завдяки високій роздільній здатності виявляються окремі аномальні об'єкти (природного та штучного походження), наприклад ніс затонулої баржі.

За допомогою створеного *MATLAB*-застосунку проведено обробку гідроакустичних даних вихідної ехограми з рис. 1.

На першому етапі за допомогою інструменту *mapGBO* виконано автоматичне зчитування структури файлу, визначення параметрів сигналу, ідентифікацію блоків ехограм та прив'язку до координат.

Після застосування фільтрації траєкторії і згладжування було побудовано рівномірну координатну сітку та сформовано повну ехограму, зібрану з усіх фрагментів галсу.

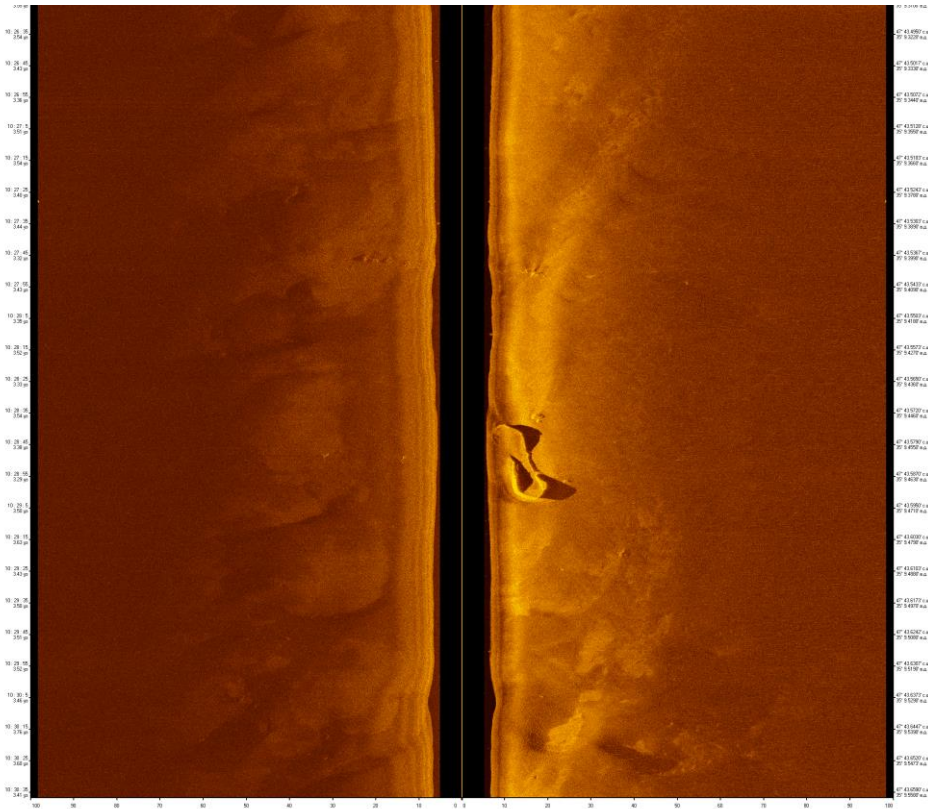


Рис. 1. Вихідна ехограма з детальною структурою рельєфу дна річки Дніпро

На рис. 2 представлено результат експорту ехограми у форматі *GeoTIFF* з накладенням на супутникову карту, на якому видно чітке розташування структури дна, а також особливості берегової лінії, що дозволяє легко зіставити ехограму з реальними географічними об'єктами.

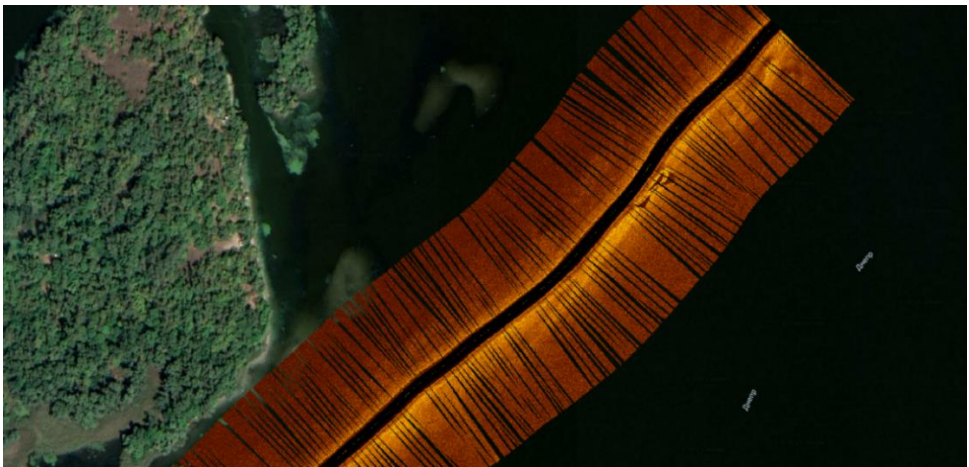


Рис. 2. Мозаїка зображення дна, згенерована з даних гідролокатора бокового огляду, накладена на супутникову підкладку (*GeoTIFF*)

Така геоприв'язка має ключове значення для екологічного аналізу, виявлення змін у морфології дна та побудови тематичних шарів у *GIS*-середовищі.

Цей приклад демонструє не лише технічну ефективність застосунку, а й його практичну придатність для вирішення широкого спектру прикладних задач – від картографії дна до обстеження підводних інженерних споруд, зокрема у важкодоступних районах внутрішніх водойм.

Отримані результати у форматі *GeoTIFF* були успішно імпортовані у середовище *QGIS* без додаткового редагування, що підтверджує повну сумісність формату вихідних файлів із сучасними геоінформаційними платформами.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У межах цієї роботи було реалізовано інструмент автоматизованої обробки даних гідролокатора бокового огляду, що дозволяє значно пришвидшити та спростити побудову геопросторових продуктів для подальшого аналізу. Особливу увагу приділено попередній фільтрації, класифікації та трансформації даних у зручні для візуалізації формати, зокрема *GeoTIFF*. Запропоноване рішення забезпечує сумісність із популярними геоінформаційними системами [12, 13], що відкриває широкі можливості інтеграції результатів у різні типи досліджень – від екологічного моніторингу до пошуково-рятувальних операцій.

Практичне застосування інструментарію продемонструвало його ефективність у реальних умовах на прикладі обстеження ділянки русла Дніпра. Висока якість результатів та їх геопросторова точність свідчать про потенціал впровадження запропонованого підходу у широку практику підводного моніторингу, зокрема в умовах обмежених ресурсів та потреби у швидкому прийнятті рішень.

У перспективі подальших досліджень заплановано розширення функціоналу програми з урахуванням додаткових форматів вхідних даних, автоматизованого виявлення аномальних об'єктів та інтеграції з хмарними ГІС-платформами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щипцов, А.А., Шнюков, Е.Ф., Коболев, В.П., & Лебедь, А.Г. (1996). Комплексные экспедиционные исследования 4-го рейса НИС «Киев». *Геофиз. журн.*, 18 (4), 83–84.
2. *GeoTIFF standard: OGC publications*. Open Geospatial Consortium. (27 січня 2025). <https://www.ogc.org/standards/geotiff/>
3. Hydroacoustic Data Processing – Echoview. Echoview. <https://echoview.com/>
4. Savenko, O. (15 січня 2020). Research and Conservation of Marine Mammals and Birds of the Black Sea. Oksana Savenko, Ukraine. <https://community.esri.com/t5/conservation-gis/oksana-savenko-ukraine/ba-p/893121>
5. Трофимчук, О.М., Триснюк, В.М., Анпілова, Є.С., Бутенко, О.С., Вишняков, В.Ю., Загородня, С.А., Клименко, В.І., Ключко, Т.О., Красовська, І.Г., Крета, Д.Л., Миронцов, М.Л., Охарев, В.О., & Попова, М.А. (2022). *Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування*. Івано-Франківськ: Супрун В.П. <https://itgip.org/geoinformation-research-of-aquatic-ecosystems-of-ukraine-monitoring-and-forecasting/>

6. Godlewska, M., & Ye, S. (2023). Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters. *Water*, 15(9), 1674. <https://doi.org/10.3390/w15091674>
7. *OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard*. (14 липня 2023). OGC Public Document Repository – Open Geospatial Consortium. <https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html>
8. Mapping Ukraine's ecologically important areas – CEOBS. (жовтень 2023). *CEOBS*. <https://ceobs.org/mapping-ukraines-ecologically-important-areas/>
9. *Ukraine Data Hub*. Ukraine Data Hub. <https://ukraine-data-hub-t-rex.hub.arcgis.com/>
10. *Ukrainian open initiative of creating tools for spatial planning in the QGIS environment QGIS Web Site*. Spatial without Compromise QGIS Web Site. https://qgis.org/project/case-studies/ukrainian_spt/
11. Jacek Łubczonek & Witold Kazimierski, Grzegorz Zaniewicz. (2022). Development of digital bathymetric models from hydroacoustic and photogrammetric data. *Hydro International*, (2), 14–15.
12. Щипцов, О., Гордеев, А., Лебідь, О., Охарев, В., Теличко, Р., Федосеєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
13. Лебідь, О., Охарев, В., Федосеєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>

Стаття надійшла до редакції 09.05.2025 і прийнята до друку після рецензування 24.07.2025

REFERENCES

1. Shhipcov, A.A., Shnjukov, E.F., Kobolev, V.P., & Lebed', A.G. (1996). Kompleksnyye jekspedicionnye issledovaniya 4-go rejsa NIS «Kiev» [Complex expeditionary research of the 4th cruise of the NIS "Kiev"]. *Geofiz. zhurn.*, 18 (4), 83-84 [in Russian].
2. *GeoTIFF standard: OGC publications*. Open Geospatial Consortium. (2025, January 27). Retrieved from <https://www.ogc.org/standards/geotiff/>
3. *Hydroacoustic Data Processing – Echoview*. (n.d.). Echoview. Retrieved from <https://echoview.com/>
4. Savenko, O. (2020, January 15). Research and Conservation of Marine Mammals and Birds of the Black Sea. Retrieved from <https://community.esri.com/t5/conservation-gis/oksana-savenko-ukraine/ba-p/893121>
5. Trofymchuk, O.M., Trysniuk, V.M., Anpilova, Ye.S., Butenko, O.S., Vyshniakov, V.Yu., Zahorodnia, S.A., Klymenko, V.I., Klochko, T.O., Krasovska, I.H., Kreta, D.L., Myrontsov, M.L., Okhariev, V.O., & Popova, M.A. (2022). Heoinformatsiini doslidzhennia vodnykh ekosystem Ukrainy: monitorynh ta prohnozuvannia. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. Retrieved from <https://itgip.org/geoinformation-research-of-aquatic-ecosystems-of-ukraine-monitoring-and-forecasting/> [in Ukrainian].
6. Godlewska, M., & Ye, S. (2023). Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters. *Water*, 15(9), 1674. <https://doi.org/10.3390/w15091674>
7. *OGC Cloud Optimized GeoTIFF Standard*. (2023, Jul 14). OGC Public Document Repository – Open Geospatial Consortium. Retrieved from <https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html>
8. Mapping Ukraine's ecologically important areas – CEOBS. (2023, Oct). *CEOBS*. Retrieved from <https://ceobs.org/mapping-ukraines-ecologically-important-areas/>
9. *Ukraine Data Hub*. (n.d.). Ukraine Data Hub. Retrieved from <https://ukraine-data-hub-t-rex.hub.arcgis.com/>

10. *Ukrainian open initiative of creating tools for spatial planning in the QGIS environment QGIS Web Site.* (n.d.). Spatial without Compromise QGIS Web Site. Retrieved from https://qgis.org/project/case-studies/ukrainian_spt/
11. Jacek Łubczonek & Witold Kazimierski, Grzegorz Zaniewicz. (2022). Development of digital bathymetric models from hydroacoustic and photogrammetric data. *Hydro International*, (2), 14–15.
12. Shyptsov, O. A., Gordeev, A. Y., Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Telychko, R. I., Fedoseienkov, S. H., & Shundel, O. I. (2023). Information technologies for automation of hydrophysical situation modelling and forecasting in the Black Sea region. *Environmental Safety and Natural Resources*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103> [in Ukrainian].
13. Lebid, O. H., Okhariev, V. O., Fedoseienkov, S. H., Shundel, O. I., Telychko, R. I., & Klimenkov, O. A. (2023). Geoinformation technologies of environmental monitoring in the Black Sea after Kakhovska hydroelectric power plant disaster. *Environmental Safety and Natural Resources*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> [in Ukrainian].

The article was received 09.05.2025 and was accepted after revision 24.07.2025

Шундель Олексій Іванович

кандидат фізико-математичних наук, керівник групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

Федосєнков Сергій Геннадійович

кандидат геологічних наук, заступник директора з науково-технічної роботи Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

Неверова Світлана Іванівна

науковий співробітник групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

Сперанська Наталія Аркадіївна

провідний інженер групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б

e-mail: natsp_78@ukr.net