

УДК 551.46:528.8:681.7:004.9

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-140-164

ПІДВОДНИЙ LiDAR ЯК КЛЮЧОВИЙ КОМПОНЕНТ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ДОСЛІДЖЕННЯ ОКЕАНУ

О.І. Россомаха

к.т.н., доцент

доцент кафедри навігації і керування судном

<https://orcid.org/0000-0002-4425-2192>

Г.Г. Томчаковський

ст. викладач кафедри навігації і керування судном

<https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>

О.А. Россомаха

доцент, начальник навчально-методичного відділу ОНМУ,
доцент кафедри судових енергетичних установок та технічної експлуатації

<https://orcid.org/0000-0002-0230-9453>

О.В. Колеснік

ст. викладач кафедри навігації і керування судном

<https://orcid.org/0009-0003-3713-2015>

О.С. Саф'ян

ст. викладач кафедри навігації і керування судном

<https://orcid.org/0000-0001-8866-7456>

Л.Е. Оберто Сантана

ст. викладач кафедри навігації і керування судном

<https://orcid.org/0009-0009-4407-3766>

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Технологія *Light Detection and Ranging (LiDAR)* відкриває нові горизонти для вивчення морських глибин. У той час як наземні та повітряні LiDAR-системи активно використовуються для створення високоточних топографічних карт, підводні LiDAR-системи являють собою інноваційний і перспективний напрямок для батиметричного картографування.

Пропоновані підводні LiDAR-системи здатні забезпечити сантиметрову точність вимірювань у прибережних і мілководних зонах, де традиційні акустичні методи стикаються з обмеженнями.

Завдяки використанню лазерного випромінювання в синьо-зеленому спектральному діапазоні (зазвичай 532 нм), підводні LiDAR здатні проникати крізь водну товщу до глибин у десятки метрів, забезпечуючи щільне покриття точками даних.

Система може бути інтегрована з автономними підводними апаратами (*autonomous underwater vehicle, AUV*), дистанційно керованими апаратами (*remotely operated underwater vehicle, ROV*) або надводними платформами для ефективного збору даних про рельєф морського дна, структуру підводних об'єктів і характеристики водного середовища.

Розробка доступних підводних LiDAR-систем має стратегічне значення для розвитку науки у морській сфері, забезпечуючи можливість детального вивчення підводних ландшафтів, морських екосистем, археологічних об'єктів і прибережної інфраструктури. Реалізація цієї технології сприятиме розв'язанню амбітної задачі з повного картографування океанського дна до 2030 року, особливо в тих галузях, де наявні технології неефективні або незастосовні.

Ключові слова. LiDAR, підводні LiDAR-системи, батиметричне картографування, лазерне випромінювання 532 нм, автономні підводні апарати (AUV), дистанційно керовані апарати (ROV), морське дно, підводні об'єкти, морські екосистеми, археологічні об'єкти, прибережна інфраструктура, картографування океанського дна.

УДК 551.46:528.8:681.7:004.9

DOI 10.47049/2226-1915-2025-3-140-164

UNDERWATER LIDAR AS A KEY COMPONENT OF INTEGRATED OCEAN RESEARCH SYSTEMS

O. Rossomakha

PhD, Associate Professor at the Department of Navigation and Control of the Ship

<https://orcid.org/0000-0002-4425-2192>

G. Tomchakovsky

Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship

<https://orcid.org/0000-0002-9799-4368>

O. Rossomakha

Associate Professor ONMU, Head of the Educational and Methodical Department,
Associate Professor at the Department of Ship Power Plants and Technical Operation

<https://orcid.org/0000-0002-0230-9453>

O. Koliesnik

Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship

<https://orcid.org/0009-0003-3713-2015>

O. Safyan

Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship

<https://orcid.org/0000-0001-8866-7456>

Oberto Santana Leonid

Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship

<https://orcid.org/0009-0009-4407-3766>

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *Light Detection and Ranging (LiDAR) technology is opening up new horizons for exploring the deep sea. While ground-based and airborne LiDAR systems are actively used to create high-precision topographic maps, underwater LiDAR systems represent an innovative and promising direction for bathymetric mapping. The proposed underwater LiDAR systems are capable of providing centimeter accuracy in coastal and shallow water areas where traditional acoustic methods face limitations.*

By using laser radiation in the blue-green spectral range (typically 532 nm), underwater LiDAR is able to penetrate the water column to depths of tens of meters, providing dense coverage of data points. The system can be integrated with autonomous underwater vehicles (AUVs), remotely operated vehicles (ROVs), or surface platforms to efficiently collect data on seabed topography, underwater object structure, and water environment characteristics.

The development of affordable underwater LiDAR systems is of strategic importance for the development of science in the marine field, providing an opportunity to study in detail underwater landscapes, marine ecosystems, archaeological sites and coastal infrastructure. The implementation of this technology will contribute to the ambitious goal of complete mapping of the ocean floor by 2030, especially in areas where existing technologies are inefficient or inapplicable.

Keywords: *LiDAR, underwater LiDAR systems, bathymetric mapping, 532 nm laser radiation, autonomous underwater vehicles (AUVs), remotely operated vehicles (ROVs), seabed, underwater objects, marine ecosystems, archaeological sites, coastal infrastructure, ocean floor mapping.*

Вступ. У статті аналізується сучасний стан технології підводних LiDAR-систем і оцінюються перспективи розробки доступного мілководного LiDAR для забезпечення батиметричних досліджень прибережних зон. Для картографування морського дна використовується широкий спектр методів і технологій. Автори приділяють особливу увагу підводному LiDAR як додатковому інструменту для отримання високоточних батиметричних даних.

Картографування морського дна – це трудомісткий процес, що вимагає значних часових і матеріальних ресурсів. Нові технології можуть підвищити ефективність цього процесу, особливо в мілководних і прибережних водах. Оптична зйомка дна здатна поліпшити якість даних і розуміння батиметрії прибережних та мілководних районів. Однак сучасні LiDAR-системи і супутні компоненти залишаються дорогими, що обмежує їх широке застосування. Розроблення економічно ефективного підводного LiDAR збільшить доступність цієї технології, даючи змогу регулярно отримувати високоточні батиметричні дані навіть із невеликих суден.

Автори у статті аналізують методи, що використовуються для отримання батиметрії, особливостей і характеристик різних підходів. Існуючі застосування LiDAR для збору батиметричних даних надають цінну інформацію про можливості та обмеження цієї технології.

Однією з технічних задач при отриманні точних батиметричних даних у морі є компенсація руху платформи (судна) – диференту, крену і вертикального

переміщення. У роботі автори розглядають методи компенсації руху та інші нюанси навігації, а також різні застосування LiDAR для вивчення прибережних районів.

Постановка проблеми. Світовий океан, що покриває більшу частину поверхні Землі, досі залишається однією з найменш вивчених територій нашої планети. Значні ділянки морського дна не відображені на картах, навіть, з високою точністю, що істотно обмежує наше розуміння підводних екосистем, геологічних процесів і ускладнює стаке використання морських ресурсів.

Сучасні технології картографування морського дна стикаються із серйозними обмеженнями. Акустичні методи із застосуванням багатопробеневи ехолотів добре справляються з поставленими завданнями в глибоководних районах, але виявляються малоефективними в мілководних і прибережних зонах через проблеми судноплавства, спотворення сигналу і недостатню роздільну здатність. Повітряні LiDAR-системи пропонують рішення для прибережних районів, однак їхнє застосування обмежене глибиною проникнення світла, що зазвичай не перевищує 40 метрів навіть в ідеальних умовах. Вони також сильно залежать від погодних умов і забезпечують відносно низьку роздільну здатність даних. Пасивні оптичні методи залежать від прозорості води і стикаються з труднощами інтерпретації отриманих сигналів. Наявні підводні LiDAR-системи, хоча й забезпечують високу точність, залишаються занадто дорогими для широкого застосування в регулярних дослідженнях морського дна.

Міжнародна ініціатива Seabed 2030 [1] поставила амбітну мету повністю картографувати дно Світового океану до 2030 року. Під час поточного аналізу виявлено, що більшу частину часу зйомки, що залишився, потрібно витратити на картографування мілководних районів із глибинами менше 200 метрів, які становлять лише малу частку загальної площі океану. [2]

Розроблення економічно ефективної підводної LiDAR-системи могло б заповнити наявну технологічну прогалину, забезпечуючи ефективну роботу саме в тому діапазоні глибин, де ні повітряні LiDAR-системи, ні акустичні методи не досягають оптимального результату. Така система має забезпечувати сантиметрову точність вимірювань, легко інтегруватися з різними носіями, включно з автономними підводними апаратами, компенсувати рухи платформи та адаптуватися до різних умов прозорості води.

Розв'язання цієї комплексної проблеми значно прискорить процес повного картографування морського дна, розширить наше розуміння підводних екосистем і забезпечить надійною інформацією фахівців у галузі сталого управління прибережними зонами і морськими ресурсами.

Мета статті. В статті проведено аналіз можливості створення доступної підводної LiDAR-системи для високоточного картографування морського дна в мілководних і прибережних зонах. Автори визначають ключові технічні параметри і проєктні рішення, необхідні для розроблення оптимальної системи, що поєднує високу точність з економічною доступністю.

У статті висвітлюються перспективні сфери застосування підводних LiDAR-систем і оцінюється їх потенційний внесок у міжнародну ініціативу Seabed 2030 щодо повного картографування дна Світового океану.

Основний матеріал. Батиметричне картографування є фундаментальним інструментом вивчення морських екосистем і геологічних структур океанічного (морського) дна. Традиційно для побудови батиметричних карт використовували акустичні методи, проте з розвитком технологій з'явилися альтернативні оптичні підходи, включно з пасивними методами дистанційного зондування та активними системами, такими як підводний LiDAR. Комплексне розуміння переваг і обмежень кожного методу необхідне для вибору оптимального інструментарію залежно від умов дослідження і необхідних характеристик даних.

Багатопроменеві ехолоти (MBES) являють собою сучасний стандарт акустичного зондування морського дна. Принцип роботи MBES ґрунтується на одночасній емісії множинних акустичних імпульсів, що дає змогу проводити зйомку значних ділянок морського дна за один прохід дослідницької платформи. Сучасні системи MBES характеризуються кутовим покриттям 120° - 150° у поперечному напрямку судна і здатні випромінювати сотні акустичних імпульсів (зазвичай 100-240) віялоподібної конфігурації. Ці імпульси одночасно фіксують показники глибини на смузі, ширина якої може досягати 7,5-кратного значення глибини водного стовпа [3; 4].

Вертикальна роздільна здатність MBES зазвичай не перевищує 1 % від глибини океану, а горизонтальна роздільна здатність становить лише невеликий відсоток від загальної глибини [5; 6]. Такі характеристики роблять MBES особливо ефективним у глибоководних акваторіях, де переваги поширення звукових хвиль у водному середовищі та широке охоплення сканування найбільш очевидні [7].

Однак при дослідженні мілководних прибережних зон акустичні методи стикаються з низкою обмежень. Основна проблема пов'язана з вимогами безпечної навігації дослідницьких суден, що інколи унеможливорює проведення акустичної зйомки через габарити судна або складну берегову лінію. Іншою суттєвою проблемою є явище багатошляхового поширення ехо-сигналів, спричинене відбиттями від навколишнього рельєфу.

Для підвищення якості даних у мілководних районах застосовують акустичні системи з підвищеною частотою випромінювання, здатні досягати роздільної здатності до 10 см за глибини близько 10 м, хоча для повноцінного картографування часто потрібно кілька проходів дослідницького судна [8; 9].

Інтенсивність зворотного сигналу MBES також надає додаткову інформацію про твердість і шорсткість донних відкладень, що є цінним для поверхневого картографування морського дна [10]. Незважаючи на обмеження в прибережних зонах, акустичні методи залишаються домінантними в батиметричному картографуванні, особливо з огляду на те, що значна частина Світового океану із середньою глибиною близько 3,9 км ще не досліджена.

У мілководних районах, де застосування акустичних методів обмежене, ефективно використовують оптичні методи картографування. Оптична зйомка має істотну перевагу перед іншими методами, оскільки дає змогу одночасно фіксувати додаткові параметри: характеристики поверхні, властивості водної товщі, топологію морського дна і відбивну здатність субстрату.

Для батиметричного аналізу великих акваторій застосовується метод складання мозаїки з фотографічних зображень з подальшим аналізом окремих пікселів. Відмінності в показниках відбивної здатності корелюються з глибиною води, кольором донного субстрату і характеристиками водної товщі шляхом прив'язки до відомих даних про глибину. Отримані співвідношення екстраполюються на інші пікселі зображення для оцінки глибини [11]. Однак цей метод може призводити до неоднозначних результатів через складність диференціації між мілководними темними об'єктами і глибоководними світлими об'єктами.

Ефективність пасивної оптичної зйомки обмежена глибиною проникнення сонячного світла під водну поверхню. В оптично прозорих прибережних водах видимість може досягати 30 метрів, але частіше обмежена 10-13 метрами внаслідок поверхневої турбулентності та підвищеної каламутності [12; 13; 14]. Незважаючи на те, що аерофотозйомка забезпечує відмінне просторове покриття за короткий період часу, нездатність розрізнити причини зміни відбивної здатності може призвести до неправильної інтерпретації даних.

Складність отримання точних батиметричних даних за допомогою дистанційного оптичного зондування посилюється безліччю чинників, включно зі складом донного субстрату, глибиною, турбулентністю, каламутністю, сонячними відблисками й атмосферним поглинанням. Крім того, цей метод вимагає безперешкодного огляду досліджуваної акваторії, що може бути ускладнено атмосферними умовами і природними перешкодами.

Для компенсації деяких обмежень застосовуються різні методи коригування, такі як радіаційно-транспортні моделі (наприклад, метод Lyzenga), які вносять поправки на зміну кута заломлення у воді. Ці методи найефективніші за однорідного складу донних відкладень, коли всі варіації кольору можуть бути атрибутовані виключно змінам глибини [15; 16].

Пряма підводна оптична зйомка стикається з низкою технічних викликів, основними з яких є: швидке поглинання світла, що обмежує максимальну дальність реєстрації; заломлення світлових променів на кордоні розділу середовищ повітря-скло-вода; розсіювання світла на зважених у воді частинках. Ці фактори призводять до розсіювання світла, зниження контрастності (зворотне розсіювання) і розмиття зображення (пряме розсіювання) [17; 18].

Для мінімізації спотворень, викликаних заломленням, застосовується калібрування камери з використанням відомих шаблонів або маркерів для внесення коригувальних коефіцієнтів. Однак цей метод не враховує зміни показника заломлення води, спричинені варіаціями тиску, температури та солоності [7]. Проблема розсіювання можна частково розв'язати шляхом оптимального розміщення джерел освітлення і камер, наприклад, через просторовий поділ для зниження ефекту зворотного розсіювання [17; 18].

Картографування морського дна здійснюється із застосуванням як фото-, так і відеокамер, що використовують різні методики, включно зі стереоскопічною зйомкою. Стереокамери дають змогу фіксувати синхронні зображення з різних кутів огляду, що в поєднанні з даними про взаємне розташування камер і загальну локалізацію системи дає змогу точно визначити тривимірні координати об'єктів.

Геоприв'язка стереозображень досягається шляхом інтеграції навігаційних датчиків на підводну платформу, що забезпечує можливість вимірювання шорсткості, нахилу та інших характеристик морського дна в прибережних водах із сантиметровою точністю.

Метод Structure from Motion (SfM), який описано у [19; 20], являє собою технологію створення тривимірних моделей на основі серії зображень. Цей підхід вимагає тільки однієї камери для зйомки множинних зображень сцени (або об'єкта) і базується на ідентифікації ключових особливостей у послідовних кадрах для визначення відносної тривимірної траєкторії руху камери. SfM зарекомендував себе як економічно ефективний інструмент для топографічного і батиметричного моделювання.

Для навігації та картографування в умовах невизначеності абсолютного положення та орієнтації сенсора застосовується метод одночасної локалізації та картографування (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM). Ця технологія забезпечує побудову карти довкілля на основі реєстрації характерних особливостей з одночасною оцінкою місця розташування апарата, що уможливорює повністю автономну навігацію AUV на значних площах. Слід зазначити, що точність SLAM знижується зі збільшенням тривалості місії через кумулятивну похибку навігаційного дрейфу, яка може досягати 0,5 % від пройденої відстані [21; 22; 23].

Істотною перевагою підводної фото- і відеозйомки, особливо стереофотограмметричних підходів, є можливість прямого вимірювання різних параметрів, таких як дистанція до об'єкта, його розмір і нахил. Цю технологію успішно застосовують для оцінки рибних запасів та ідентифікації об'єктів у глибоководних середовищах із використанням буксируваних платформ.

Light Detection and Ranging (LiDAR) являє собою активний метод оптичного дистанційного зондування, який використовують переважно для вимірювання відстаней у різних галузях досліджень, включно з атмосферними дослідженнями, топографією і батиметрією [24]. Основний принцип функціонування LiDAR у підводному середовищі полягає в емісії короткого, високоенергетичного світлового (лазерного) імпульсу, що висвітлює частинки у водній товщі та бентичні структури. Найбільш інтенсивний сигнал зворотного розсіювання зазвичай відповідає відбиттю від дна, що дає змогу визначити глибину. На основі відбивної здатності сигналу і щільності точок вимірювання глибини також можливе оцінювання складу і шорсткості морського дна.

Аналогічно до інших підводних оптичних методів, діапазон дії LiDAR обмежений поглинанням світла і розсіюванням на частинках. У разі використання повітряної платформи в ідеальних умовах можливе зондування на глибинах до 80 м, проте на практиці зазвичай досягається глибина не більше 40 м [25; 26]. Підвищення потужності випромінювання для збільшення дальності має зменшувану ефективність, особливо з огляду на супутнє збільшення розмірів і вартості обладнання, а також обмеження, пов'язані з габаритами та вагою приладів на мобільних платформах. Окрему увагу слід приділяти забезпеченню безпеки для очей операторів і морської біоти.

Батиметричні LiDAR-системи (рис. 1) зазвичай використовують лазери, що працюють у зеленій ділянці електромагнітного спектра, з найпоширенішою довжиною хвилі 532 нм, що забезпечує максимальне проникнення в прибережних водах і легко досяжна з використанням сучасних лазерних технологій [10; 27; 28]. Для отримання підводних LiDAR-вимірювань застосовують три основні методи: час прольоту (Time of Flight, ToF), триангуляція та фазове вимірювання.

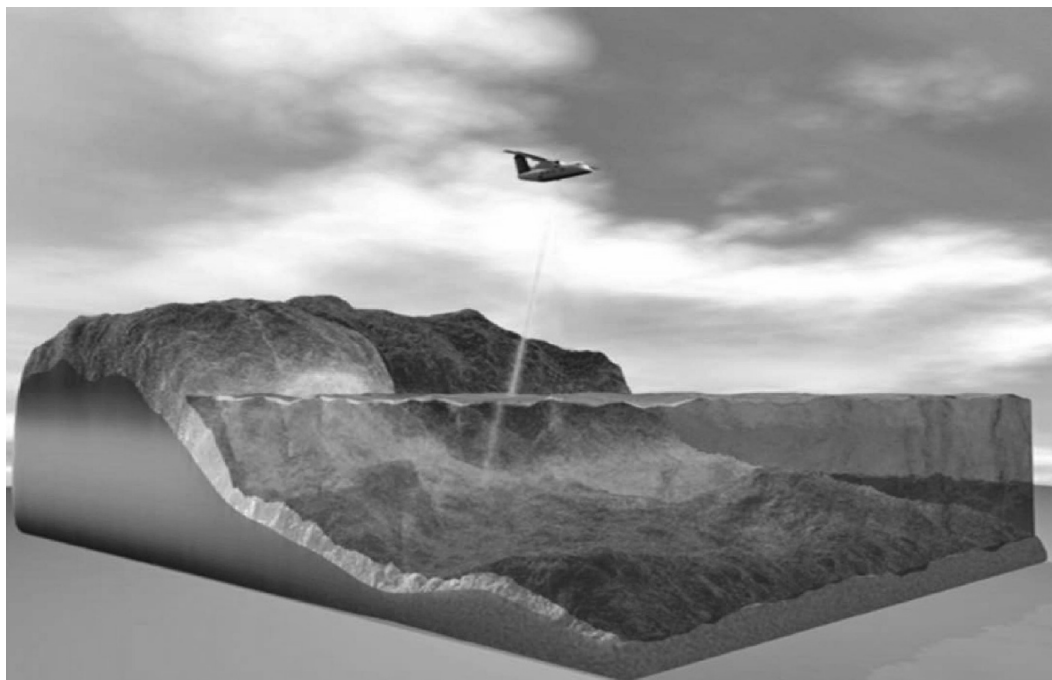


Рис. 1. Батиметрична LiDAR-система

Джерело: [29]

Метод ToF функціонує за тим самим принципом, що й акустичні/сонарні системи, але з використанням світлового імпульсу як джерела. Це призводить до значно коротших часових інтервалів для реєстрації сигналу на аналогічних глибинах (через різницю в швидкості поширення світла і звуку), що дає змогу отримувати дані з більш високою роздільною здатністю. Просторова роздільна здатність залежить від тривалості лазерного імпульсу і характеристик фотодетектора. Когерентні світлові пучки, здатні формувати надзвичайно короткі (~10 нс або менше) імпульси, використовуються в імпульсних LiDAR-технологіях для максимальної ефективності. З огляду на те, що швидкість світла відома з високою точністю, роздільна здатність і точність вимірювань зазвичай обмежені тільки точністю тимчасової реєстрації [30; 31].

У підводному середовищі показник заломлення води варіюється залежно від температури, тиску і солоності, тому важливим є паралельний моніторинг цих

змінних для підвищення точності глибинних вимірювань. Внаслідок імпульсного характеру сигналу, швидкість збирання даних обмежена часовими вимірами, а точність дещо нижча, ніж під час використання методу фазових вимірювань. Проте вона значно перевершує точність акустичних методів на малих дистанціях завдяки кількості точок даних, які можуть бути зібрані за короткий проміжок часу. Крім того, діаметр лазерного променя істотно менший за акустичний сигнал, який поширюється, і це значно покращує просторову щільність і ефективну роздільну здатність даних.

Сенсори, засновані на триангуляції, випускають сигнал (лазерний промінь) із джерела, фізично відокремленого від приймача, для розрахунку глибини через геометричний підхід, аналогічний методам стереокамер. Промінь потрапляє на ціль (поверхню) під певним кутом і відбивається до приймального сенсора для визначення глибинних показників [32]. Даний метод забезпечує чудову просторову і дистанційну роздільну здатність на малих відстанях, проте похибка вимірювання глибини зростає експоненціально зі збільшенням дистанції. Таким чином, триангуляційний метод перевершує ToF LiDAR тільки на відстанях менше ніж 1 м з очікуваною роздільною здатністю менше ніж 1 мм, у той час як обидва методи забезпечують однакову роздільну здатність на дистанції 1-2,5 м, за межами якої ToF демонструє точніші результати [33].

Необхідно зазначити, що обидва методи значно перевершують акустичні/сонарні технології за роздільною здатністю на малих дистанціях.

Третій метод, відомий як фазовий зсув (також іменований різницею фаз або фазовим вимірюванням), реалізовано в деяких системах для визначення відстані [7; 27; 34]. У цьому методі використовують безперервний лазерний промінь з амплітудною модуляцією, а глибину визначають шляхом розрахунку фазового зсуву поворотного сигналу щодо локальної копії вихідного сигналу. Наявні системи, що використовують цю техніку, мають операційний діапазон понад 70 м. Значною перевагою методу є висока стійкість до шумів за рахунок зниження зворотного розсіювання, що дає змогу досягти дуже високої роздільної здатності. Однак застосування безперервного високопотужного лазерного джерела створює додаткові проблеми безпеки, оскільки навіть при відносно низьких рівнях потужності перевищуються допустимі значення для безпеки очей [35; 36].

При використанні батиметричних LiDAR-систем з різними методами отримання даних енергія лазерного імпульсу є одним із головних чинників. Хоча оптичні характеристики приймача, зокрема його охоплення та поле зору, теж впливають на глибину сканування, найбільше значення мають потужність випромінювання та тривалість імпульсу. Чим вони вищі, тим глибше лазер проникає у водну товщу. Водночас, це зменшує частоту імпульсів, а отже, і щільність отриманих точок. Однак навіть за таких умов повного проникнення сигналу в донні шари досягти не вдається.

прямолінійна	кругова дуга	коло	еліптична дуга	дуга	неосцилююча еліптична дуга

Рис. 2. Схеми шаблонів сканування батиметричних LiDAR-систем (не в масштабі)

Джерело: [29]

Різноманітність умов застосування і технічних рішень призвела до формування кількох класів LiDAR-систем, диференційованих за середовищем використання, мобільністю та конструктивними особливостями.

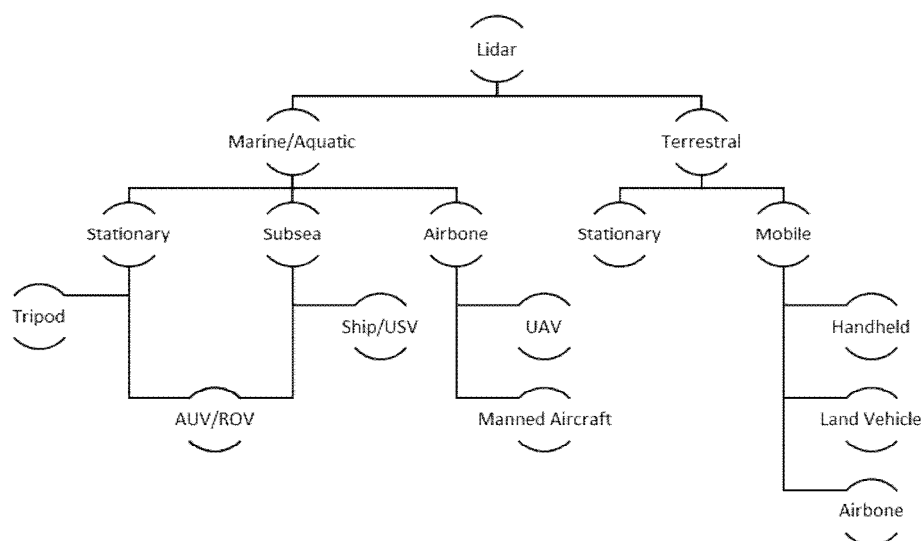


Рис. 1. Класифікація морських і наземних LiDAR-систем для вимірювання топографії

Джерело: розроблено авторами на основі [37]

Систематизація наявних підходів дає змогу визначити основні напрямки розвитку технології та виявити ключові параметри, що впливають на ефективність систем у різних умовах експлуатації.

Наземні LiDAR-системи призначені для дослідження земної поверхні з використанням лазерного зондування, розміщеного на наземних платформах. Цей клас систем поділяють на дві основні категорії: стаціонарні та мобільні. Стаціонарні системи зазвичай монтуються на штативи і призначені для високоточного сканування навколишнього простору з формуванням повних тривимірних моделей хмар точок [31].

Більш релевантними для розвитку підводних LiDAR-технологій є мобільні сканери, встановлювані на рухомі платформи. Такі системи вимагають безперервної геореференції, що зумовлює необхідність інтеграції глобальних навігаційних супутникових систем (Global Navigation Satellite System, GNSS) та інерційних вимірювальних пристроїв (ІБП, англ. IMU) на жорсткій платформі для підвищення просторової точності одержуваних даних.

В урбанізованих районах точність позиціонування знижується через численні перешкоди для супутникових сигналів, що вимагає додаткових технічних рішень, таких як інтеграція датчиків пройденої відстані для кореляції з надійними геопозиційними даними. Дані про орієнтацію платформи та LiDAR-сенсора фіксуються для подальшої післяобробки, що дає змогу коригувати вплив руху на результати вимірювань [31, 38].

Прикладом інноваційного підходу до мобільного лазерного сканування є розроблена CSIRO ручна система Zebedee, що забезпечує тривимірне картографування із застосуванням алгоритмів SLAM. Ключова перевага цієї системи – можливість субсантиметрової роздільної здатності з використанням відносно недорогого, портативного та легкого обладнання, здатного функціонувати в умовах обмеженого або відсутнього GPS-покриття. Алгоритмічні рішення, реалізовані в Zebedee, можуть бути адаптовані для різних мобільних лазерних конфігурацій [38].

Технологію LiDAR розробляють із 1960-х років, коли було вперше застосовано повітряну лазерну батиметрію (ПЛБ, англ. ALB). Історично LiDAR-системи використовували випромінювання з довжиною хвилі 1064 нм (ближній інфрачервоний діапазон) для топографічного картографування наземних об'єктів [28]. Оскільки інфрачервоне випромінювання швидко поглинається водою, для батиметричних досліджень стандартні топографічні LiDAR модифікують із переходом на синьо-зелений спектральний діапазон, де найтипівішою є довжина хвилі 532 нм, що забезпечує максимальне проникнення в прибережних акваторіях [39; 40].

Для збільшення ймовірності успішного отримання батиметричного сигналу потрібні більш енергетичні імпульси, що долають загасання у водному стовпі. Таке завдання вирішується збільшенням тривалості імпульсів при збереженні пікової потужності в поєднанні зі зниженими частотами повторення для підтримки середньої потужності системи. Це призводить до зниження роздільної здатності за дальністю і горизонтальної щільності точок даних. З огляду на роботу батиметричних систем у видимому спектрі та необхідність дотримання норм безпеки для очей, традиційно застосовують відносно високу дивергенцію променю для розподілу лазерної енергії на більшій площі, що додатково знижує точність і якість даних на складному рельєфі.

Розвиток повітряних батиметричних LiDAR-систем випереджає наземні аналоги через можливість оперативного картографування великих акваторій з використанням авіаційних платформ і значну вартість розробки окремих систем незалежно від сфери застосування. Точність і роздільна здатність повітряних LiDAR дещо знижені порівняно з наземними топографічними системами, оскільки ці параметри варіюються залежно від висоти польоту, швидкості та кута

сканування. Системи проєктуються для максимального проникнення за помірних частот імпульсів, що призводить до відстаней між точками вимірювання (роздільної здатності) до кількох метрів. Крім того, потрібне ретельне планування польотних завдань для забезпечення сприятливих умов збору даних, особливо з огляду на сезонні обмеження в деяких регіонах через погодні умови і каламутність вод.

Вимірювання вертикальних дистанцій здійснюється на основі ToF сигналу. У системах із двоохвильовим лазерним джерелом час повернення ближнього інфрачервоного сигналу фіксує поверхнєве відбиття, а часовий інтервал між поверхневим і донним сигналами дає змогу розрахувати глибину. Позицію й орієнтацію сенсора для кожного повернення визначають під час післяобробки шляхом інтеграції даних глобальної системи позиціонування (GPS), IMU, а також інформації про дальність лазера і кут сканування [28].

Суттєвою проблемою для ALB є хвильові процеси, оскільки відбиття від поверхні значно залежать від форми хвиль, що може вносити значні похибки. Залежно від стану моря та розміру лазерного відбитка (площі, сканованої одним імпульсом), розбіжності у вимірах можуть варіюватися від кількох дециметрів до кількох метрів. Складність полягає у квантифікації невизначеності вимірювань для картографування відповідно до стандартів Міжнародної гідрографічної організації (International Hydrographic Organization, ІНО) S-44 «Стандарти МГО для гідрографічних зйомок», що суттєво різняться залежно від стану моря, коли хвилі значно змінюють напрямок і геометрію траєкторії лазерного променя. Додатково слід враховувати, що менше 2 % зеленого лазерного імпульсу відбивається назад у повітря від поверхні, тому шум від прямого або зворотного розсіювання може створювати труднощі при визначенні донного відбиття [41; 42].

Підводний, або субаквальний, LiDAR є відносно новим напрямком лазерного сканування, що перебуває на початковій стадії розвитку. Існує достатньо спільних технологічних елементів між наземними, повітряними і підводними системами, включно з компенсацією руху, технологіями джерел і приймачів, а також методиками отримання вимірювань, що дає змогу застосовувати накопичений досвід до підводних мобільних платформ. Підводні системи зазвичай використовують джерело синьо-зеленого світла (довжина хвилі 532 нм у стандартній конфігурації), аналогічне тому, яке застосовують у підводних скануючих лазерних джерелах ALB-систем для забезпечення максимальної дальності дії.

Основна перевага отримання LiDAR-батиметрії з надводної або підводної платформи порівняно з повітряною полягає в підвищеній просторовій і часовій роздільній здатності, а також поліпшеній точності. Випромінювання не проходить через кордон розділу повітря-вода, що усуває втрати енергії лазерного променя через дисперсію і варіації напрямку під впливом хвиль; платформа рухається зі значно меншою швидкістю, а дистанція повернення істотно коротша, що зменшує горизонтальну відстань між точками вимірювання (за однакової тривалості лазерного імпульсу від одного джерела). Крім того, відбиток променя помітно менший внаслідок скороченої дистанції та нижчого показника заломлення води, що знижує похибки, особливо на складному рельєфі.

Наразі комерційно доступні кілька високоякісних підводних LiDAR-систем. Компанія 3D at Depth [43] пропонує системи, що забезпечують точність 6 мм у діапазоні від 2 до 40 м. INScan від Teledyne CDL також функціонує в діапазоні від 2 до 45 м з горизонтальною точністю менше 3 мм на максимальній дистанції. Обидві системи можуть інтегруватися з AUV або ROV для сканування глибоководного обладнання. Ці конфігурації переважно використовують для метрологічних застосувань у нафтогазовій індустрії. Обидві системи функціонують на основі ToF. Альтернативне рішення – 2G Robotics ULS-500 Pro [44; 45] – використовує тріангуляційний метод і забезпечує точність 1,3 мм на дистанції 3 м, з максимальним діапазоном сканування 20 м за точності 8,9 мм. Усі зазначені системи розраховані на глибоководні умови, у більшості випадків до 3000 м і більше. Значна частка вартості припадає на корпуси, розраховані на високий тиск, що негативно позначається на економічній доступності. Та більше, точність, що досягається, істотно перевершує необхідний сантиметровий масштаб для початкових застосувань, що відкриває можливості для перегляду функціональності або скорочення витрат шляхом використання компонентів меншої вартості.

Аналіз вивчених експериментальних даних і наявного практичного досвіду застосування різних технологій демонструє, що повітряне лазерне сканування має переваги в ефективності та деталізації під час роботи на малих глибинах, порівнюючи з традиційними акустичними методами. Ця закономірність спостерігається за умови, що прозорість водної товщі та характеристики відбивної здатності дна забезпечують формування чіткого відбитого сигналу. Ключовими перевагами лазерного сканування є висока спрямованість випромінювання, оперативність отримання даних і точність визначення дистанцій.

З огляду на те, що ефективність гідроакустичних методів мінімально залежить від оптичної прозорості води і теоретично не має обмежень за глибиною, акустичні та лазерні технології слід розглядати як взаємодоповнювальні інструменти, що в сукупності забезпечують можливість комплексного картографування морського дна. У прибережних акваторіях із глибинами до 50 метрів повітряне лазерне сканування надає можливість оперативного обстеження великих ділянок із високою вертикальною точністю та горизонтальною роздільною здатністю, хоча й потребує сприятливих метеорологічних і гідрологічних умов для збору даних.

У ситуаціях, коли потрібна сантиметрова або субсантиметрова точність, підводні лазерні сканери демонструють якісну перевагу над повітряними системами. Підводний LiDAR забезпечує отримання значно більш деталізованих даних порівняно з гідролокаційними системами за аналогічні або навіть скорочені тимчасові інтервали, залежно від кута сканування, швидкості пересування платформи та кількості проходів, необхідних для картографування конкретної ділянки відповідно до стандартів ІНО. На великих глибинах ехолокаційні системи зберігають статус стандартів ІНО для батиметричних досліджень, оскільки їхня ефективність зростає пропорційно збільшенню глибини, водночас забезпечуючи прийнятні показники роздільної здатності та вертикальної точності для картографічних завдань.

Дальність дії сучасних лазерних сканерів обмежується балансом між загасанням світлового випромінювання у водному середовищі, що вимагає підвищення потужності, і зворотним розсіюванням від зважених часток, яке призводить до посилення шуму під час збільшення потужності випромінювання. Експлуатаційні характеристики наближаються до 4-кратної оптичної глибини, еквівалентної глибині видимості диска Секкі (рис. 3), для більшості систем, що демонструє переваги когерентного монохроматичного активного джерела світла порівняно з альтернативними оптичними методами батиметричного картографування.

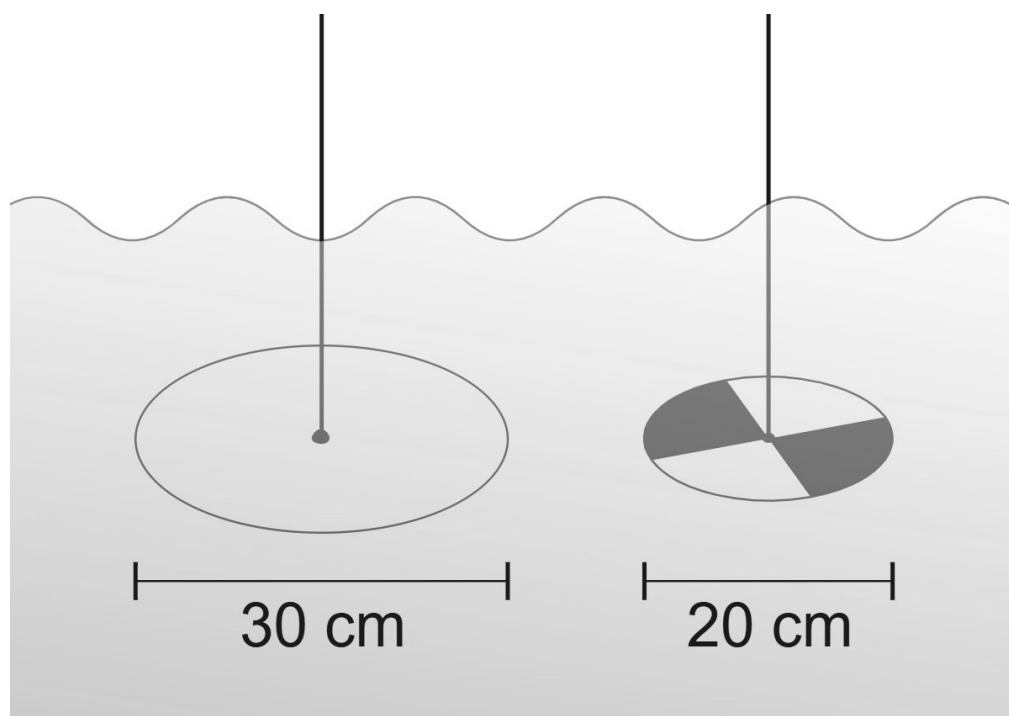


Рис. 3. Різновиди дисків Секкі в роботі

Джерело: [46]

Зростаюча значущість управління прибережними зонами, що включає біологічну оцінку, аналіз екологічних взаємозв'язків, геологічну характеристику і морську археологію, стимулює вдосконалення методик картографування морського дна для інформаційного забезпечення прибережного планування. Розроблення економічно ефективної системи, здатної функціонувати на глибинах до 100-150 метрів залежно від гідрологічних умов на базі автономних підводних апаратів, розширить доступність технології для проведення паралельних досліджень, забезпечуючи збір критично важливої інформації в більшій кількості районів із підвищеною деталізацією порівняно з традиційними методами.

Сучасні підводні лазерні системи не оптимізовані для роботи на швидко-рухомих платформах, хоча в цій галузі спостерігається технологічний прогрес. Компанія Sonardyne [47] продемонструвала можливості системи SPRINT-Mapper для мобільного підводного картографування із застосуванням LiDAR-технології, що потенційно скорочує тимчасові витрати на обстеження підводних конструкцій і морських об'єктів у нафтогазовій галузі за збереження сантиметрової роздільної здатності у сформованих інженерних моделях. Телекерований підводний апарат SPRINT-Mapper являє собою динамічну платформу, що інтегрує інерціальну навігаційну систему SPRINT, вимірювач швидкості відносно дна Syrinx та акустичну систему позиціювання довгою базовою лінією Fusion 6G для забезпечення високоточного просторового прив'язування. Лазерний сканер 2G Robotics ULS-500 PRO, змонтований на підводному апараті Sonardyne, успішно застосовується для формування високощільних хмар точок у глибоководних умовах.

Інтегровані технічні рішення досягли безпрецедентного рівня точності, забезпечуючи можливість ефективного динамічного лазерного сканування для археологічних досліджень, інспекції трубопроводів, контролю вільних прольотів, моніторингу структурної цілісності та метрологічних вимірювань трубопровідних систем. Компанія 3D at Depth [43] також успішно провела експериментальні роботи зі збору LiDAR-даних з використанням інерціальної навігаційної системи на рухомій платформі, у співпраці з TechnipFMC і iXblue, на швидкості до 2 вузлів.

Комплексна система містила підводний лазерний сканер 3DAD SL1, інерціальну навігаційну систему Phins у поєднанні з доплерівським вимірювачем швидкості 1200 кГц, систему iXblue RAMSES і підводний оптоволоконний/тимчасовий мультиплексор 3DAD, забезпечуючи точність відповідності з еталонними даними статичного сканування в межах 1,8 мм на дистанції 22,45 м [37].

Світові дослідницькі організації активно розробляють підводні лазерні технології, адаптуючи комерційні продукти в поєднанні з додатковими науковими приладами для використання на різних платформах.

Дослідницький інститут акваріума Монтерей-Бей (Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI) [48] інтегрував підводну лазерну систему 3DAD SL1 на телекерований підводний апарат, доповнивши її стереокамерами, імпульсними освітлювачами, багатопроменевим гідролокатором, доплерівським вимірником швидкості та інерціальною навігаційною системою для досягнення батиметричної роздільної здатності близько 1 см. Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США проводить експериментальні роботи з лазерними сканерами на автономних надводних апаратах для обстеження мілководних ділянок, хоча через технічні обмеження в каламутних водах застосовують комбінування багатопроменевих даних для оновлення навігаційних карт.

Лабораторія Джаффе [49] розробляє перспективну систему лазерної візуалізації для забезпечення операцій військово-морських сил в умовах підвищеної каламутності, спрямовану на поліпшення контрастності зображення і розширення робочого діапазону в акваторіях з типово низькою прозорістю. Система оснащена імпульсним волоконним лазером з високою частотою повторення, встановленим на автономному підводному апараті REMUS 600, і демонструє чудові результати

порівняно з традиційними методами візуалізації, забезпечуючи працездатність на платформі, що рухається зі швидкістю до 3 вузлів, з формуванням даних про дистанцію та відбивну здатність, а також тривимірних моделей після обробки. Поле огляду підводного лазерного сканера може бути розширено шляхом сканування лазерного імпульсу в кутовому діапазоні, як у системі з куполоподібним лінзовим корпусом і горизонтальним кутом сканування 120 градусів, розробленої групою Імакі в Японському агентстві морських і наземних науково-технічних досліджень (JAMSTEC) [50]. Це технічне рішення підвищує просторову ефективність лазерного сканування на малих глибинах, додатково посилюючи практичну цінність технології порівняно із загальноприйнятими методиками.

Після проведеного аналізу автори наголошують на необхідності розроблення інтегрованих систем, що поєднують різні методи залежно від конкретних умов досліджуваної акваторії. Перспективним напрямом є створення модульних платформ, здатних адаптувати набір інструментів відповідно до завдань дослідження і характеристик середовища. Для забезпечення максимальної інформативності одержуваних даних доцільним є поєднання лазерного сканування з багатопробними гідролокаційними системами, що дасть змогу об'єднати переваги високого розділення лазерних технологій у зоні їхньої ефективної роботи з широким просторовим охопленням акустичних методів. Такий комбінований підхід забезпечить безперервність даних при переході від мілководних ділянок до глибших акваторій.

Перспективною технологією підвищення ефективності підводних лазерних систем є застосування адаптивних алгоритмів оброблення сигналів, що враховують мінливість оптичних характеристик водного середовища. Розвиток методів машинного навчання відкриває можливості для створення інтелектуальних систем, що автоматично коригують параметри сканування залежно від поточних умов і оптимізують процес збирання та інтерпретації даних. Інтеграція підводних лазерних сканерів із системами відеоспостереження і спектрального аналізу відбитого випромінювання дасть змогу доповнити батиметричні дані інформацією про склад і структуру донних відкладень, рослинність і бентосні співтовариства, формуючи комплексне уявлення про підводні ландшафти та екосистеми. Розвиток технологій передавання даних та енергетичної автономності підводних платформ створює передумови для формування розподілених мереж моніторингу, що забезпечують безперервне спостереження за динамікою прибережних акваторій і своєчасне виявлення змін, пов'язаних як із природними процесами, так і з антропогенним впливом.

Висновок

Проведений аналіз дає змогу визначити місце підводних лазерних сканерів в екосистемі технологій морських досліджень і сформулювати ключові напрямки їхнього подальшого розвитку. Батиметричне картографування сьогодні являє собою складний комплекс методів, де кожна технологія має свої переваги в певних умовах.

У контексті сучасних завдань морської науки можна виділити кілька стратегічних напрямків розвитку підводних LiDAR-систем.

Першим є зниження вартості компонентів. Використання технологічних рішень, що розробляються для масового ринку автономних транспортних засобів, дає змогу значно оптимізувати витрати за незначної модифікації оптичних елементів для роботи у водному середовищі.

Другим ключовим напрямом стає створення багатофункціональних модульних систем. Об'єднання лазерних сканерів із додатковими сенсорами й утворювальними системами дає змогу отримувати не тільки геометрію морського дна, а й комплексну інформацію про біологічне різноманіття, структуру донних відкладень і процеси у водній товщі. Такий інтегрований підхід посилює наукову цінність даних за одночасного підвищення економічної ефективності дослідницьких експедицій.

Третім напрямком є підвищення автономності та інтелектуальності систем. Розвиток енергоефективних компонентів і алгоритмів опрацювання даних безпосередньо на борту дасть змогу створити мережі автономних підводних обсерваторій, що забезпечують довготривалий моніторинг морських акваторій. Інтеграція з алгоритмами штучного інтелекту відкриває можливості для автоматизованого виявлення аномалій і подій, що потребують уваги дослідників.

Четвертим напрямком слугує розвиток гібридних систем картографування. Комбінування акустичних і оптичних методів дає змогу нівелювати обмеження кожної технології, забезпечуючи безперервність даних під час переходу між різними глибинами та умовами прозорості. Створення уніфікованих протоколів обміну даними та форматів їх подання суттєво спростить інтеграцію результатів, отриманих різними методами.

П'ятий напрям пов'язаний із розробленням спеціалізованих систем для конкретних наукових і прикладних завдань. Профілювання водної товщі для вивчення розподілу планктону, мікропластику та інших зважених частинок вимагає інших підходів до оптимізації параметрів сканування, ніж батиметрична зйомка. Аналогічно, системи для вивчення коралових рифів або підводної археології мають свою специфіку, пов'язану з необхідністю розпізнавання дрібних деталей за високого ступеня структурної складності об'єктів.

Особливої значущості набуває розробка метрологічного забезпечення підводних лазерних вимірювань. Створення стандартів калібрування і валідації дасть змогу забезпечити порівнянність даних, отриманих різними системами в різний час, що критично для довгострокових спостережень і моніторингу змін морського середовища.

Важливим є також розвиток освітніх програм і професійних стандартів. Ефективне використання підводних лазерних технологій вимагає кваліфікованих фахівців, що володіють міждисциплінарними компетенціями в галузі оптики, океанології, обробки даних та інженерних дисциплін.

Дуже важливе значення має міжнародна кооперація в розвитку підводних лазерних технологій. Спільні проекти зі стандартизації форматів даних, інтеркалібрації систем і створення відкритих програмних платформ для опрацю-

вання та візуалізації результатів сприяють ефективнішому використанню накопичених знань і технічних рішень.

У контексті екологічних викликів сучасності підводні лазерні системи стають важливим інструментом вивчення наслідків зміни клімату для морських екосистем. Висока точність і деталізація даних дають змогу реєструвати зміни в структурі донних угруповань, морфології берегової лінії та батиметрії мілководних районів, що є критично важливим для прогнозування й адаптації до підвищення рівня моря та екстремальних погодних явищ.

Таким чином, підводні LiDAR-системи являють собою напрямок морських дослідницьких технологій, що динамічно розвивається і знаходиться на перетині фундаментальної науки, інженерних розробок і практичних застосувань. Їхня подальша еволюція визначатиметься як прогресом у суміжних галузях (матеріалознавство, фотоніка, штучний інтелект), так і трансформацією завдань морської науки та інженерії в умовах глобальних екологічних змін і зростаючої потреби в стійкому управлінні ресурсами Світового океану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проект Seabed 2030 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://seabed2030.org>.
2. Майер Л. та ін. Фонд Ніппон – Проект морського дна GEBCO 2030: прагнення повністю нанести на карту світові океани до 2030 року, *Geosciences*, том. 8, № 2, 2018.
3. Майер Л.А. Межі в картографуванні та візуалізації морського дна, *Морські геофізичні дослідники*, том. 27, вип. 1, с. 7-17, березень 2006.
4. Деметра 5. Каталог багатопроменевих ехолотів (MBES) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.demetra5.kiev.ua/ua/catalog/MBES>.
5. Колбо К., Росс Т., Браун К. і Вебер Т. Огляд океанографічних застосувань даних водної товщі від багатопроменевих ехолотів, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 145, с. 41-56, 2014.
6. Браун К.Дж., Сміт С.Дж., Лоутон П. і Андерсон Дж.Т. Картування донних середовищ існування: огляд прогресу на шляху до кращого розуміння просторової екології морського дна за допомогою акустичних методів, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 92, вип. 3.
7. Массо-Кампос М. і Олівер-Кодіна Г. Оптичні сенсори та методи підводної 3D-реконструкції, *Датчики* (Базель), вип. 15, немає. 12, с. 31525-57, 15 грудня 2015 р.
8. Вестфельд П., Маас Х.-Г., Ріхтер К. і Вайс Р. Аналіз і корекція систематичних помилок координат, спричинених хвилями океану, у батиметрії бортового лідара, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 128, с. 314-325, 2017.
9. Дірссен Х.М. і Теберге А.Е. Батиметрія: методи оцінки, в *Encyclopedia of Natural Resources: Water*, 2016, p. 629-636.

10. Коста Б.М., Баттіста Т.А. та Пітман С.Дж. Порівняльна оцінка батиметрії та інтенсивності бортового ЛіДАР і корабельного багато-променевого SoNAR для картографування екосистем коралових рифів, Дистанційне зондування навколишнього середовища, том. 113, вип. 5, с. 1082-1100, 2009.
11. Шінтані К. та Фонстад М.А. Порівняння методів дистанційного зондування, що збирають батиметричні дані з річки з гравійним руслом, Міжнародний журнал дистанційного зондування, т. 38, вип. 8-10, С. 2883-2902, 2017.
12. Деккер А.Г. та ін. Взаємне порівняння батиметрії мілководдя, гідро-оптики та методів картографування бентосу в прибережних середовищах Австралії та Карибського моря, Лімнологія та океанографічні методи, том. 9, С. 396-425, 2011-09-27 2011.
13. Казелла Е. та ін. Картографування коралових рифів за допомогою дронів споживчого класу та структури з методів фотограмметрії руху, Coral Reefs, vol. 36, вип. 1, С. 269-275, 2016.
14. Фінкл Ч. і Маковський С. Картографування морського дна вздовж континентальних шельфів: дослідження та методи візуалізації придонних середовищ (Coastal Research Library). Springer, 2016.
15. Джордан Д.К. і Фонстад М.А. Двомірне картографування річкової батиметрії та потужності за допомогою аерофотозйомки та ГІС на річці Бразос, Техас, Geocarto International, том. 20, № 3, С. 13-20, 2005.
16. Фейрер Д., Bailly Й.-С., Puech С., Le Coarer Y. та Viau A.A. Картографування зануреної в річку топографії за допомогою дистанційного зондування з дуже високою роздільною здатністю, Progress in Physical Geography, vol. 32, вип. 4, С. 403-419, 2008.
17. Косак Д.М. і Оуян Б. Підводне зображення: фотографічна, цифрова та відеотехніка. 2013, С. 275-293
18. Уотсон Дж. Підводне зображення та бачення: вступ. 2013. С. 17-34.
19. Вестобі М.Дж., Брасінгтон, Глассер Н.Ф., Хембрі М.Дж. та Рейнольдс Дж.М. Фотограмметрія Дж. структури з руху: недорогий, ефективний інструмент для геонаукових застосувань, Geomorphology, vol. 179, С. 300-314, 2012/12/15/2012.
20. Дітріх Дж.Т. Батиметрична структура з руху: вилучення батиметрії мілкового потоку з багаторакурсної стереофотограмметрії. Процеси земної поверхні та форми рельєфу, том. 42, вип. 2, С. 355-364, 2017.
21. Вільямс С.Б., Пісарро О., Махон І., Джонсон-Робертсон М. Одночасна локалізація та картографування та щільна стереоскопічна реконструкція морського дна за допомогою АНПА т. 54, ред., 2009, С. 407-416.
22. Трун С. і Леонард Дж.Дж. Одночасна локалізація та відображення, у Спрінгері. Довідник з робототехніки, Б. Січіліано та О. Хатіб, ред. Берлін, Гейдельберг: Спрингер Берлін Гейдельберг, 2008, С. 871-889.

23. Кунц К. і Сінгх Х. Стереосамокалібрування для картографування морського дна за допомогою AUV, у 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, 2010, С. 1-7.
24. Чазетт П., Тотемс Дж., Хеспел Л., Байі Ж.-С. Принцип і фізика вимірювання за допомогою ЛіДАР, у Оптичному дистанційному зондуванні поверхні землі, 2016, С. 201-247.
25. Дірссен Г.М. і Теберге А.Е. Батиметрія: методи оцінки», в Енциклопедія природних ресурсів: Вода, 2016, С. 629-636.
26. Куадрос Н.Д., Кольєр П.А. і Фрейзер К.С. Інтеграція батиметричного та топографічного лідарів: попереднє дослідження. pdf, Міжнародні архіви фотограмметрії, дистанційного зондування та просторової інформації, том. 37, вип. Частина В8.
27. Рамбо Л. 532-нм хаотичний волоконний лазерний передавач для підводного лідара, магістр наук (електротехніка), кафедра електротехніки та комп'ютерної інженерії, Університет Кларксона, 2013.
28. Кінзел П., Леглейтер К., Нельсон Дж. Картографування річкової батиметрії за допомогою зеленого ЛІДАРу малого розміру: застосування та проблеми. Журнал Американської асоціації водних ресурсів, вип. 49, вип. 1, 2013 р.
29. Технологія у фокусі: батиметричний лідар. Натан Квадрос (Науково-дослідний центр просторової інформації, Австралія). 10 01 2018 р., Сучасні технології вимірювань. <https://www.hydro-international.com/content/article/technology-in-focus-bathymetric-lidar>
30. Циммерман Р.К., Сукеник С.І., і Хілл В.Дж. Підводні системи ЛІДАР, в підводній оптиці і зображення, 2013, С. 471-488e.
31. Шан Дж. Принципи та обробка топографічної лазерної локації та сканування. Бока-Ратон: Бока-Ратон: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2009.
32. Дехонг К., Ліангкі З., Liangqi Z., Пенпен С., Зайянг Т., Юхао М. та Йонг В. Розробка та реалізація навігаційної системи LiDAR на основі триангуляційних вимірювань, 29-та Китайська конференція з контролю та прийняття рішень (CCDC), 2017 р., С. 6060-6063.
33. Д. Маклеод, Дж. Джейкобсон, М. Харді та К. Ембрі. Автономна інспекція за допомогою підводного 3D-лідара, представлена на OCEANS 2013, Сан-Дієго, 2013.
34. Попеску С.К. Лідарне дистанційне зондування (Розділ 3). Досягнення дистанційного зондування навколишнього середовища, Q. Венг, ред.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011.
35. Хоу В.В. та ін. Техніка оптичного визначення дальності FMCW у каламутній воді, представлена на VII Конференції з дослідження та моніторингу океану, 2015 р.

36. Калден П. та Стерна Е. Розробка недорогого лазерного далекоміра (LIDAR). Магістр систем, управління та мехатроніки, Департамент мікротехнологій та нанонаук, Технологічний університет Чалмерса, Гетеборг, Швеція, 2015.
37. Філісетті Ендрю, Маручос Андреас, Мартіні Ендрю, Мартін Тара, Коллінгс Саймон. Розробки та застосування підводних систем LiDAR на підтримку морської науки Конференція: OCEANS 2018 MTS/IEEE Чарлстон, жовтень 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.860.
38. Споре Н.Дж. та Броді К.Л. Збір, обробка та точність мобільних наземних даних лідарної зйомки в прибережному середовищі, 1 квітня 2017 р. 2017 р.
39. Чуст Г., Гранде М., Гальпарсоро І., Уріарте А. та Борха А. Можливості батиметричного лідара «Яструбине око» для картографування прибережних середовищ існування: практичне дослідження в межах Баскського лиману, Наука про естуарії, узбережжя та шельф, том. 89, вип. 3, С. 200-213, 2010.
40. Ілліг Д.В., Рамбо Л.К., Банавар М.К. і Джемісон В.Д. Сліпе розділення сигналів для підводних лідарів, 2016 р.
41. Біркебак М., Ерен Ф., Пе'єрі С. та Вестон Н. Вплив поверхневих хвиль на похибки вимірювань батиметрії на борту лідара (ALB). Дистанційне зондування, вип. 10, № 3, стор. 453, 2018 рік.
42. Песері С., Гарднер Дж.В., Уорд Л.Г. і Моррісон Дж.Р. Морське дно: ключовий фактор у виявленні дна лідаром Транзакції IEEE щодо геонауки та дистанційного зондування, т. 49, вип. 3, С. 1150-1157, 2011.
43. 3D на глибині [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3datdepth.com/>.
44. Робототехніка 2G публічно представить передовий ULS-500 PRO, 15.03.2017 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://ocean-roboticsplanet.com/2g-robotics-to-publicly-launch-cutting-edge-uls-500-pro-15-03-2017>.
45. Журнал ЛІДАР [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lidarmag.com/>.
46. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/>.
47. Сонардин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sonardyne.com/>.
48. Науково-дослідний інститут акваріумів Монтерей-Бей (MBARI) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mbari.org/>.
49. Лабораторія Jaffe для підводних зображень, Каліфорнійський університет у Сан-Дієго [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://jaffeweb.ucsd.edu>.
50. Японське агентство морських і земних наук і технологій (JAMSTEC) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jamstec.go.jp/e/>.

REFERENCES

1. Seabed 2030 Project [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://seabed2030.org/>.
2. Mayer L. et al. The Nippon Foundation – GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030, *Geosciences*, vol. 8, no. 2, 2018.
3. Mayer L.A. *Frontiers in Sea Floor Mapping and Visualization. Marine Geophysical Researchers*, vol. 27, no. 1, pp. pp. 7-17, March 2006.
4. Demetra 5. Каталог багатопроменивих ехолотів (MBES) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.demetra5.kiev.ua/ua/catalog/MBES>.
5. Colbo K., Ross T., Brown C., and Weber T. A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 145, P. 41-56, 2014.
6. Brown C.J., Smith S.J., Lawton P., and Anderson J.T. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 92, no. 3,.
7. Massot-Campos M. and Oliver-Codina G. Optical Sensors and Methods for Underwater 3D Reconstruction. *Sensors (Basel)*, vol. 15, no. 12, P. 31525-57, Dec 15 2015.
8. Westfeld P., Maas H.-G., Richter K., and Weiß R. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 128, P. 314-325, 2017.
9. Dierssen H.M. and Theberge A.E. Bathymetry: Assessing Methods in *Encyclopedia of Natural Resources: Water*, 2016, P. 629-636.
10. Costa B.M., Battista T.A., and Pittman S.J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 5, P. 1082-1100, 2009.
11. Shintani C. and Fonstad M.A. Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 8-10, P. 2883-2902, 2017.
12. Dekker A.G. et al. Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography Methods*, vol. 9, P. 396-425, 2011-09-27 2011.
13. Casella E. et al. Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, vol. 36, no. 1, P. 269-275, 2016.
14. Finkl C. and Makowski C., *Seafloor Mapping along Continental Shelves: Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments (Coastal Research Library)*. Springer, 2016.

15. Jordan D.C. and Fonstad M.A. Two Dimensional Mapping of River Bathymetry and Power Using Aerial Photography and GIS on the Brazos River, Texas. *Geocarto International*, vol. 20, no. 3, P. 13-20, 2005.
16. Feuer D., Bailly J.-S., Puech C., Coarer Y.Le, and Viau A.A. Very-high-resolution mapping of river-immersed topography by remote sensing. *Progress in Physical Geography*, vol. 32, no. 4, P. 403-419, 2008.
17. Kocak D.M. and Ouyang B. Underwater imaging: Photographic, digital and video techniques. 2013, P. 275-293.
18. Watson J., *Subsea imaging and vision: An introduction*. 2013, P. 17-34.
19. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J. and Reynolds J.M. Structure-from-Motion' photogrammetry: A lowcost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, vol. 179, P. 300-314, 2012/12/15/ 2012.
20. Dietrich J.T. Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 42, no. 2, P. 355-364, 2017.
21. Williams S.B., Pizarro O., Mahon I. and Johnson-Roberson M., Simultaneous Localisation and Mapping and Dense Stereoscopic Seafloor Reconstruction Using an AUV. vol. 54, ed, 2009, P. 407-416.
22. Thrun S. and Leonard J.J. Simultaneous Localization and Mapping in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 871-889.
23. Kunz C. and Singh H. Stereo self-calibration for seafloor mapping using AUVs in 2010 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, 2010, P. 1-7.
24. Chazette P., Totems J., Hespel L., and Bailly J.-S. Principle and Physics of the LiDAR Measurement in Optical Remote Sensing of Land Surface, 2016, P. 201-247.
25. Dierssen H.M. and Theberge A.E. Bathymetry: Assessing Methods,» in *Encyclopedia of Natural Resources: Water*, 2016, P. 629-636.
26. Quadros N.D., Collier P.A., and Fraser C.S. Integration of Bathymetric and Topographic Lidar: A Preliminary Investigation.pdf. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, no. Part B8.
27. Rumbaugh L. A 532 nm Chaotic Fiber Laser Transmitter for Underwater Lidar. Master of Science (Electrical Engineering), Department of Electrical and Computer Engineering, Clarkson University, 2013.
28. Kinzel P., Legleiter C., and Nelson J. Mapping River Bathymetry With A Small Footprint Green LIDAR: Applications and Challenges. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 49, no. 1, P. 22, February 2013.

29. Технологія у фокусі: батиметричний лідар. Натан Квадрос (Науково-дослідний центр просторової інформації, Австралія). 10 01 2018 р., Сучасні технології вимірювань. [https:// www.hydro- international. com/content/article/technology-in-focus-bathymetric-lidar](https://www.hydro-international.com/content/article/technology-in-focus-bathymetric-lidar)
30. Zimmerman R.C., Sukenik C.I., and Hill V.J. Subsea LIDAR systems in Subsea Optics and Imaging, 2013, P. 471-488e.
31. Shan J., Topographic laser ranging and scanning principles and processing. Boca Raton: Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2009.
32. Dehong C., Liangqi Z., Pengpeng S., Zaiyang T., Yuhao M. and Yong W. Design and implementation of LiDAR navigation system based on triangulation measurement in 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2017, P. 6060-6063.
33. Mcleod D., Jacobson J., Hardy M., and Embry C. Autonomous Inspection using an Underwater 3D LiDAR presented at the OCEANS 2013, San Diego, 2013.
34. Popescu S.C. Lidar Remote Sensing (Chapter 3) in Advances in Environmental Remote Sensing, Q. Weng, Ed.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011.
35. Hou W.W. et al. FMCW optical ranging technique in turbid waters presented at the Ocean Sensing and Monitoring VII, 2015.
36. Kalden P. and Sterna E. Development of a low-cost laser rangefinder (LIDAR). Master's of Systems, Control and Mechatronics, Department of Microtechnology & Nanoscience, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2015.
37. Filisetti Andrew, Marouchos Andreas, Martini Andrew, Martin Tara, Collings Simon. Developments and applications of underwater LiDAR systems in support of marine science Conference: OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, October 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.860.
38. Spore N.J. and Brodie K.L. Collection, Processing, and Accuracy of Mobile Terrestrial Lidar Survey Data in the Coastal Environment. 01 Apr 2017 2017.
39. Chust G., Grande M., Galparsoro I., Uriarte A., and Borja Á. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 89, no. 3, P. 200-213, 2010.
40. Illig D.W., Rumbaugh L.K., Banavar M.K. and Jemison W.D. Blind signal separation for underwater lidar applications, 2016.
41. Birkebak M., Eren F., Pe'eri S., and Weston N. The Effect of Surface Waves on Airborne Lidar Bathymetry (ALB) Measurement Uncertainties. Remote Sensing, vol. 10, no. 3, P. 453, 2018.
42. Pe'eri S., Gardner J.V., Ward L.G. and Morrison J.R. The Seafloor: A Key Factor in Lidar Bottom Detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, no. 3, P. 1150-1157, 2011.
43. 3D at Depth [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https:// 3datdepth.com/](https://3datdepth.com/).

44. 2G Robotics to publicly launch cutting-edge ULS-500 PRO, 15.03.2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oceanroboticsplanet.com/2g-robotics-to-publicly-launch-cutting-edge-uls-500-pro-15-03-2017>.
45. LIDAR Magazine [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lidarmag.com/>.
46. Вікіпедія: вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/>.
47. Sonardyne [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sonardyne.com/>.
48. Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mbari.org/>.
49. Jaffe Lab for Underwater Imaging, UC San Diego [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://jaffeweb.ucsd.edu>.
50. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jamstec.go.jp/e/>.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025

Посилання на статтю: Россомаха О.І., Томчаковський Г.Г., Россомаха О.А., Колеснік О.В., Саф'ян О.С. Підводний LiDAR як ключовий компонент інтегрованих систем дослідження океану // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 3 (77). С. 140-164. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-140-164.

Article received 03.02.2025

Reference a journal artic: Rossomakha O., Tomchakovsky G., Rossomakha O., Koliesnik O., Safyan O., Oberto S. L. Uunderwater LiDAR as a key component of integrated ocean research systems // *Herald of the Odessa national maritime university*: Coll. scient. works, 2023. № 3 (77). P. 140-164. DOI 10.47049/2226-1893-2025-3-140-164.