

© Головань А.І.

## ПІДВОДНІ ДРОНИ У СИСТЕМІ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ: СУЧАСНИЙ СТАН, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Статтю присвячено комплексному огляду сучасного стану, технологічних рішень та перспектив застосування підводних дронів у системі водного транспорту. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до безпеки судноплавства, надійності експлуатації суден і портової інфраструктури, а також необхідністю підвищення ефективності підводного моніторингу в умовах інтенсивного розвитку морського та річкового транспорту. Значна частина критично важливих об'єктів водного транспорту перебуває у підводному середовищі, що ускладнює їх регулярний контроль традиційними методами та підвищує потребу у використанні сучасних безпілотних технологій. У роботі проаналізовано основні напрями наукових досліджень, присвячених підводним дронам, зокрема підходи до їх класифікації, конструктивні та технологічні особливості, розвиток навігаційних систем і систем позиціонування, мультисенсорних комплексів, засобів зв'язку та алгоритмів автономного керування. Особливу увагу приділено застосуванню методів штучного інтелекту, машинного зору та злиття даних для підвищення точності інспекції, автоматизованого виявлення дефектів і підтримки прийняття рішень. На основі узагальнення актуальних наукових джерел систематизовано відповідність ключових технологій підводних дронів та сфер їх практичного використання у системі водного транспорту. Показано, що підводні дрони можуть ефективно застосовуватися для інспекції корпусів суден, гребних і кермових комплексів, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, моніторингу фарватерів і донних перешкод, а також для забезпечення навігаційної безпеки в обмежених акваторіях. Разом із тим встановлено, що більшість існуючих науково-технічних рішень розробляється в контексті загальної підводної робототехніки та не завжди враховує специфічні експлуатаційні умови водного транспорту, зокрема мілководдя, змінну гідрологію, високу щільність інфраструктурних об'єктів і вимоги до безперервності транспортних процесів. Виявлено ключові обмеження, пов'язані з навігаційною надійністю, автономністю роботи та інтеграцією підводних дронів із системами управління водним транспортом. Обґрунтовано доцільність переходу від ізольованого використання підводних дронів як інспекційних засобів до їх системної інтеграції з цифровими інструментами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень, зокрема в рамках концепцій цифрових двійників суден, портів і внутрішніх водних шляхів. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, орієнтовані на розвиток гібридних ROV/AUV платформ, підвищення автономності та надійності роботи, а також адаптацію підводних дронів до потреб сучасного водного транспорту.

**Ключові слова:** підводні дрони; водний транспорт; автономні підводні апарати; дистанційно керовані апарати; навігаційна безпека; підводний моніторинг; портова інфраструктура; цифровізація водного транспорту.

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток водного транспорту супроводжується зростанням вимог до рівня безпеки судноплавства, надійності експлуатації суден і портової інфраструктури, а також до оперативності отримання та обробки технічної інформації. Значна частина критично важливих елементів системи водного транспорту – корпуси суден, гребні та кермові комплекси, гідротехнічні споруди, донні ділянки фарватерів – перебуває у підводному середовищі, що суттєво ускладнює їх регулярний контроль та оцінювання технічного стану.

Традиційні методи підводного обстеження, засновані на залученні водолазних команд або буксированих систем, характеризуються високою вартістю, значними часовими витратами та підвищеними ризиками для персоналу. Крім того, такі підходи не забезпечують необхідної частоти моніторингу й оперативності реагування, що є критичним в умовах інтенсивної експлуатації флоту, розвитку портової інфраструктури та зростання навігаційного навантаження на внутрішніх водних шляхах.

Застосування підводних дронів розглядається як перспективна альтернатива традиційним методам підводних робіт, здатна забезпечити підвищення безпеки, ефективності та цифровізації процесів у водному транспорті. Однак, попри значну кількість наукових досліджень у галузі підводної робототехніки, існуючі технологічні рішення здебільшого розробляються поза системним контекстом водного транспорту та не враховують специфічні експлуатаційні умови судноплавства, портових акваторій і внутрішніх водних шляхів.

Особливої актуальності набуває проблема адаптації навігаційних, комунікаційних і автономних функцій підводних дронів до умов обмежених глибин, змінної гідрології, акустичних завад і високої щільності інфраструктурних об'єктів. Відсутність уніфікованих підходів до інтеграції підводних дронів із системами управління водним транспортом, моніторингу флоту та технічного обслуговування знижує ефективність їх практичного впровадження.

Таким чином, наявна суперечність між зростаючою потребою водного транспорту в сучасних засобах підводного моніторингу та фрагментованим характером існуючих науково-технічних рішень зумовлює необхідність комплексного аналізу сучасного стану, технологій і перспектив застосування підводних дронів саме в системі водного транспорту. Усунення цієї суперечності можливе шляхом систематизації наукових підходів, виявлення ключових технологічних обмежень і визначення напрямів подальших досліджень, орієнтованих на транспортні задачі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Упродовж останнього десятиліття спостерігається суттєве зростання наукового інтересу до підводних дронів як складової сучасних безпілотних морських і річкових систем. У наукових публікаціях підводні дрони розглядаються переважно в контексті підводної робототехніки, океанографічних досліджень, офшорної енергетики та безпекових застосувань, що зумовило активний розвиток їх конструктивних, навігаційних і інформаційних технологій [1-4].

У значній кількості робіт запропоновано різні підходи до класифікації підводних дронів, зокрема виділення дистанційно керованих апаратів (ROV), автономних підводних апаратів (AUV) та гібридних платформ, які поєднують автономні й операторські режими роботи. Такі дослідження [5-7] спрямовані на визначення сфер ефективного застосування кожного типу апаратів і формування базових вимог до їх технічних характеристик залежно від умов експлуатації.

Окрему групу наукових публікацій присвячено розвитку навігаційних і позиціонувальних систем підводних дронів. Розглядаються акустичні методи навігації, інерціальні навігаційні системи, доплерівські вимірювачі швидкості, а також комбіновані підходи на основі злиття даних і алгоритмів SLAM та фільтрації Калмана [8-12]. У цих роботах досягнуто суттєвого прогресу в підвищенні точності позиціонування, однак більшість результатів орієнтована на відкриті або глибоководні акваторії та лише частково враховує специфіку портових і річкових умов.

Важливим напрямом сучасних досліджень є розробка мультисенсорних систем і методів обробки інформації для підводних дронів. У публікаціях широко представлено використання оптичних камер, гідролокаторів, комбінованих сенсорних комплексів, а також методів машинного зору та штучного інтелекту для автоматизованого виявлення дефектів і аномалій підводних об'єктів [13-17]. Такі підходи істотно розширюють функціональні можливості підводних дронів, однак здебільшого розглядаються без інтеграції з системами управління водним транспортом.

У ряді робіт підкреслюється перспективність застосування підводних дронів для інспекції корпусів суден, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, моніторингу фарватерів і забезпечення навігаційної безпеки [18-22]. Разом із тим зазначені дослідження мають фрагментарний характер і, як правило, зосереджені на окремих технологічних або апаратних рішеннях, не розглядаючи підводні дрони як елемент цілісної системи водного транспорту.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про наявність значного науково-технічного заділу у сфері підводних дронів, водночас виявляє недостатній рівень систематизації результатів з позицій їх практичного використання у водному транспорті. Це обґрунтовує доцільність узагальненого огляду сучасного стану технологій, визначення їх переваг і обмежень, а також формування напрямів подальших досліджень, орієнтованих на транспортні застосування.

**Мета дослідження** полягає у комплексному аналізі сучасного стану, технологічних рішень та перспектив застосування підводних дронів у системі водного транспорту, з урахуванням специфіки експлуатаційних умов судноплавства, портових акваторій та внутрішніх водних шляхів, а також визначення ключових напрямів їх інтеграції з цифровими системами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень.

**Основні результати дослідження.** У результаті проведеного аналізу сучасних наукових досліджень і публікацій встановлено, що підводні дрони посідають дедалі важливіше місце у системі водного транспорту як ефективний інструмент підводного моніторингу, інспекції та забезпечення навігаційної безпеки. Узагальнення наукових підходів дозволило систематизувати ключові технологічні рішення, які визначають функціональні можливості підводних дронів, а також окреслити основні напрями їх практичного застосування у судноплавстві, портових акваторіях і на внутрішніх водних шляхах. У табл. 1 наведено узагальнення відповідності ключових технологій підводних дронів та сфер їх застосування у системі водного транспорту з посиланням на актуальні наукові джерела.

Проведений аналіз наукових джерел, узагальнений у табл. 1, свідчить про стрімкий розвиток підводних дронів як технологічного інструменту для вирішення широкого спектра завдань у системі водного транспорту. При цьому простежується чітка еволюція від окремих експериментальних рішень до комплексних багатофункціональних платформ, інтегрованих у цифрові транспортні та інфраструктурні системи.

Результати огляду показують, що більшість сучасних досліджень зосереджені на окремих технологічних підсистемах підводних дронів – навігації, позиціонуванні, системах зв'язку або автономного керування. Найбільш зрілими напрямами є акустичні та інерціальні навігаційні системи, комбіновані INS/DVL підходи, а також мультисенсорні комплекси для інспекцій та моніторингу. Ці технології вже демонструють практичну придатність для портових акваторій, інспекції корпусів суден і контролю гідротехнічних споруд.

Водночас аналіз таблиці виявляє фрагментованість більшості рішень: значна частина робіт розглядає підводні дрони поза системним контекстом водного транспорту, без урахування експлуатаційних обмежень флоту, портів та внутрішніх водних шляхів. Це обмежує можливість безпосереднього масштабування запропонованих технологій у реальні транспортні процеси.

Навігаційна складова залишається одним із найбільш критичних факторів застосування підводних дронів у водному транспорті. Хоча сучасні дослідження пропонують ефективні алгоритми акустичного позиціонування, SLAM та фільтрації даних, їхня надійність суттєво знижується в умовах мілководдя, портових перешкод, інтенсивного судноплавства та акустичних завад.

Для внутрішніх водних шляхів характерні специфічні умови – обмежені глибини, змінна гідрологія, висока щільність інфраструктури – які не завжди враховуються в існуючих моделях. Це свідчить про необхідність адаптації навігаційних алгоритмів саме під умови річкового та портового середовища, а не їх прямого перенесення з океанографічних або військових застосувань.

Таблиця 1. Відповідність наукових джерел, технологічних рішень та сфер застосування підводних дронів у системі водного транспорту

Джерело	Ключова технологія / підхід	Транспортне застосування
[1]	Класифікація UUV, цифрові комунікації	Систематизація підводних дронів для суден і портової інфраструктури
[2]	Автономне керування, гібридний зв'язок	Масштабовані інспекції у портах та на внутрішніх водних шляхах
[3]	Алгоритми автономної навігації, swarm cooperation	Підвищення безпеки судноплавства в обмежених акваторіях
[4]	Класифікація ROV/AUV/HUV, AI-інтеграція	Інтеграція підводних дронів у комплексні транспортні системи
[5]	Комунікації та енергоживлення UUV	Довготривалий технічний моніторинг гідротехнічних споруд
[6]	Акустична, INS, DVL навігація	Навігаційна підтримка на внутрішніх водних шляхах
[7]	Акустичне позиціонування, DVL	Точне позиціонування для портових інспекцій
[8]	Мультисенсорні системи	Моніторинг дна та підводної інфраструктури
[9]	Радіомаяки, shallow-water monitoring	Контроль мілководних фарватерів
[10]	UAV-UUV інтегровані системи	Комплексний огляд портових акваторій
[11]	Deep Learning, Visual SLAM	Автоматичне виявлення дефектів корпусів суден
[12]	Векторна тяга, multi-joint propulsion	Маневрування біля суден і гідроспоруд
[13]	Модульні XLUUV	Модульні платформи для технічного моніторингу
[14]	Біоміметичні AUV, AI-керування	Енергоефективні інспекції у транспортних системах
[15]	Hybrid UUV, obstacle detection	Патрулювання та безпека портових зон
[16]	Сонар + INS навігація	Інспекція підводних комунікацій і трубопроводів
[17]	ROV для підводних інспекцій	Огляд корпусів суден без залучення водолазів
[18]	Акустичний SLAM	Навігація у GNSS-denied портових середовищах
[19]	MEMS-сонар, модульна архітектура	Моніторинг технічного стану портових споруд
[20]	Інтегровані ROV/AUV рішення	Підтримка підводних операцій водного транспорту
[21]	Автономні підводні апарати (AUV) з елементами штучного інтелекту, системами виявлення загроз і алгоритмами навігаційної безпеки	Забезпечення безпеки портових акваторій, моніторинг підводної обстановки та захист критичної інфраструктури водного транспорту
[22]	Інспекційні ROV з оптичними камерами та системами сонарів для дистанційного огляду підводних конструкцій	Огляд корпусів суден, гребних і кермових комплексів без залучення водолазів у процесах технічного обслуговування флоту

Важливим трендом, що простежується у розглянутих роботах, є поступовий перехід від використання підводних дронів виключно як інспекційних засобів до їх інтеграції у системи підтримки прийняття рішень. Використання методів штучного інтелекту, машинного зору та автоматичного виявлення дефектів відкриває можливості для формування цифрових моделей стану суден, портових споруд і фарватерів.

Однак більшість досліджень зосереджені на алгоритмах обробки даних, тоді як інтеграція результатів роботи дронів у системи управління водним транспортом (VTS, fleet monitoring, maintenance planning) залишається недостатньо опрацьованою. Це створює науково-практичний розрив між збором даних і їх використанням у реальних експлуатаційних рішеннях.

Аналіз також показує, що автономність підводних дронів у транспортних застосуваннях часто обмежується не лише енергетичними ресурсами, а й вимогами до безпеки та надійності. У портових і суднових умовах перевага все ще часто надається ROV або гібридним рішенням, які забезпечують контроль оператора та передбачуваність поведінки апарата.

Це вказує на доцільність розвитку гібридних ROV/AUV платформ, спеціально орієнтованих на завдання водного транспорту, де автономність поєднується з можливістю дистанційного втручання та інтеграції з береговими системами управління.

Узагальнення результатів, наведених у таблиці, дозволяє виділити низку ключових наукових прогалин:

- відсутність єдиних підходів до адаптації підводних дронів для внутрішніх водних шляхів;
- обмежена кількість досліджень, що розглядають підводні дрони як елемент цілісної транспортної системи;
- недостатня увага до нормативних, експлуатаційних і організаційних аспектів впровадження;
- слабка інтеграція з концепціями цифрових двійників суден і портової інфраструктури.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку системно орієнтованих рішень, у яких підводні дрони розглядатимуться не як ізольовані роботизовані пристрої, а як активний елемент цифрової екосистеми водного транспорту.

**Прогалини в дослідженнях та майбутні напрямки.** Проведений огляд і узагальнення результатів сучасних досліджень дозволяють виокремити низку наукових прогалин, які стримують широке та системне впровадження підводних дронів у водному транспорті, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень.

*Основні наукові прогалини.* По-перше, у більшості наукових робіт підводні дрони розглядаються як ізольовані роботизовані платформи, без урахування їх функціонування у складі цілісної системи водного транспорту. Недостатньо досліджено питання інтеграції підводних дронів із системами управління судноплаством, портовою інфраструктурою та технічним обслуговуванням флоту, що обмежує практичну цінність отриманих результатів.

По-друге, існує дефіцит досліджень, орієнтованих на внутрішні водні шляхи та портові акваторії. Значна частина навігаційних і комунікаційних рішень розроблена для відкритих або глибоководних середовищ і не повною мірою враховує мілководдя, змінну гідрологію, акустичні завади та високу щільність інфраструктурних об'єктів, характерні для транспортних умов.

По-третє, незважаючи на активне використання методів штучного інтелекту та машинного зору, залишається недостатньо опрацьованим питання достовірності, інтерпретованості та стандартизації результатів, отриманих за допомогою підводних дронів. У більшості робіт відсутній зв'язок між алгоритмами автоматичного аналізу даних і конкретними експлуатаційними рішеннями у водному транспорті.

По-четверте, недостатню увагу приділено експлуатаційним і нормативним аспектам використання підводних дронів, зокрема питанням безпеки, відповідальності, сертифікації та регламентування робіт у портових і судноплавних зонах.

*Перспективні напрями подальших досліджень.* Перспективним напрямом є розробка системно орієнтованих концепцій застосування підводних дронів, у яких вони розглядаються як елемент

цифрової екосистеми водного транспорту, інтегрований з інформаційними системами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення гібридних ROV/AUV платформ, адаптованих до транспортних завдань, які поєднують автономність із можливістю дистанційного керування та контролю з боку операторів і берегових служб.

Важливим напрямом є розвиток адаптивних навігаційних і комунікаційних алгоритмів, спеціально орієнтованих на умови портових акваторій та внутрішніх водних шляхів, з урахуванням змінних гідрометеорологічних факторів і обмежень інфраструктури.

Окремої уваги потребують дослідження, пов'язані з інтеграцією підводних дронів у концепції цифрових двійників суден, портів і гідротехнічних споруд, що відкриває можливості для переходу від реактивного контролю до предиктивного та прескриптивного технічного обслуговування.

Загалом подолання виявлених наукових прогалин і реалізація окреслених напрямів подальших досліджень створюють передумови для формування нового рівня безпеки, ефективності та стійкості системи водного транспорту з використанням підводних дронів.

**Висновки.** У статті виконано комплексний огляд сучасних досліджень, присвячених застосуванню підводних дронів у системі водного транспорту, з акцентом на їхній технологічний розвиток, функціональні можливості та перспективи впровадження у транспортну практику. Проведений аналіз свідчить, що підводні дрони поступово трансформуються з вузькоспеціалізованих інспекційних засобів у багатофункціональні елементи цифрових транспортних систем.

Узагальнення наукових джерел показало, що найбільш розвиненими напрямками є навігаційні системи та системи позиціонування, мультисенсорні комплекси моніторингу, а також алгоритми автономного керування з використанням методів штучного інтелекту. Ці технології вже демонструють практичну придатність для інспекції корпусів суден, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, а також забезпечення навігаційної безпеки в обмежених акваторіях.

Водночас встановлено, що значна частина існуючих рішень залишається фрагментованою та недостатньо адаптованою до специфічних умов водного транспорту, зокрема внутрішніх водних шляхів. Навігаційні, комунікаційні та експлуатаційні обмеження в мілководних і портових середовищах потребують розробки спеціалізованих підходів, орієнтованих на транспортні завдання, а не прямого перенесення технологій з океанографічних або військових застосувань.

Важливим висновком є необхідність переходу від ізольованого використання підводних дронів до їх системної інтеграції з цифровими інструментами управління водним транспортом, зокрема системами моніторингу флоту, управління портовою інфраструктурою та планування технічного обслуговування. Такий підхід дозволяє розглядати підводні дрони як джерело даних для підтримки прийняття рішень, а не лише як засіб збору інформації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних ROV/AUV платформ, підвищенням автономності та надійності роботи в складних експлуатаційних умовах, а також інтеграцією підводних дронів у концепції цифрових двійників суден і портів. Реалізація цих напрямів створює передумови для підвищення безпеки, ефективності та стійкості водного транспорту, зокрема в умовах цифрової трансформації галузі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, J., Zhou, K., Xing, W., Li, H., & Yang, Z. (2023). Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>
2. Jayashankari, J., Sahu, S., Arunkumar, B., Yadav, K., Gokilavani, M., & Vijayaprabhu, A. (2024). A Development of Aquatic Landscape Type of Drones for the Implementation for Future Technology. *2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, 292–297. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617310>
3. Orłowski, M. (2022). Directions of Development of the Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. A Review. *Maritime Technical Journal*, 224(1), 68–79. <https://doi.org/10.2478/sjpna-2022-0005>

4. Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). *State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.18667>
5. Wibisono, A., Piran, Md. J., Song, H.-K., & Lee, B. M. (2023). A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7321. <https://doi.org/10.3390/s23177321>
6. Zaiets, A., & Kalinichenko, Y. (2023). АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАВІГАЦІЇ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ. *Системи Управління, Навігації Та Зв'язку. Збірник Наукових Праць*, 4(74), 5–11. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.005>
7. Alexandris, C., Papageorgas, P., & Piromalis, D. (2024). Positioning Systems for Unmanned Underwater Vehicles: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9671. <https://doi.org/10.3390/app14219671>
8. Lambertini, A., Menghini, M., Cimini, J., Odetti, A., Bruzzone, G., Bibuli, M., Mandanici, E., Vittuari, L., Castaldi, P., Caccia, M., & De Marchi, L. (2022). Underwater Drone Architecture for Marine Digital Twin: Lessons Learned from SUSHI DROP Project. *Sensors*, 22(3), 744. <https://doi.org/10.3390/s22030744>
9. Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). IMPROVEMENT OF TECHNICAL SUPPLY OF PROJECTS OF ROBOTIZED MONITORING OF UNDERWATER CONDITIONS IN SHALLOW WATER AREAS. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>
10. Nishitani, A., Kawada, R., & Kojima, J. (2022). Development of combined aerial and underwater drone system. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977370>
11. Merveille, F. F. R., Jia, B., & Xu, Z. (2024). *Advancements in Underwater Navigation: Integrating Deep Learning and Sensor Technologies for Unmanned Underwater Vehicles*. Engineering. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0548.v1>
12. HAN, T., HU, Z., CUI, Q., QING, X., & XU, B. (2023). *Scheme Design and Key Technology Application of Multi-joint Unmanned Underwater Vehicle*. <https://doi.org/10.13889/j.issn.2096-5427.2023.06.004>
13. ZHANG, X., & HUA, J. (n.d.). *Study on the Development and Application of Foreign Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles*. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03493>
14. Hasan, K., Ahmad, S., Liaf, A. F., Karimi, M., Ahmed, T., Shawon, M. A., & Mekhilef, S. (2024). Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing. *IEEE Access*, 12, 46202–46231. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380458>
15. Kiselev, L. V., Kostenko, V. V., & Medvedev, A. V. (2022). Motion Control Model and HUV Dynamics for Patrolling Sea Areas with Complex Bottom Topography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(2), 022080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022080>
16. Jacobi, M., & Karimanzira, D. (2013). Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles. *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608089>
17. António Neves Lousada, S., Freitas Camacho, R., & Suárez Palacios, J. (2021). Underwater Technical Inspections Using ROV Applied to Maritime and Coastal Engineering: The Study Case of Canary Islands. In S. António Neves Lousada (Ed.), *Underwater Work*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95599>
18. Miller, A., Miller, B., & Miller, G. (2021). Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System. *Drones*, 5(3), 83. <https://doi.org/10.3390/drones5030083>
19. Akinina, T., Symonenkov, V., Symonenkova, I., & Trushkov, G. (2022). IMPROVING THE EFFICIENCY OF APPLICATION UNCAVATED UNDERWATER DEVICES FOR THE NEEDS OF THE NAVAL FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*, 16, 126–134. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.126-134>
20. Ioannou, G., Forti, N., Millefiori, L. M., Carniel, S., Renga, A., Tomasicchio, G., Binda, S., & Braca, P. (2024). Underwater Inspection and Monitoring: Technologies for Autonomous Operations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 39(5), 4–16. <https://doi.org/10.1109/MAES.2024.3366144>
21. McNelly, B. P., Whitcomb, L. L., Brusseau, J. P., & Carr, S. S. (2022). Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977239>
22. Lorenčić, V. (2022). Seabed Surveillance and Underwater Structures Inspection with Remotely Operated Vehicle – Power Ray. *Transactions on Maritime Science*, 11(1), 110–118. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w07>

## REFERENCES

1. Wang, J., Zhou, K., Xing, W., Li, H., & Yang, Z. (2023). Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>
2. Jayashankari, J., Sahu, S., Arunkumar, B., Yadav, K., Gokilavani, M., & Vijayaprabhu, A. (2024). A Development of Aquatic Landscape Type of Drones for the Implementation for Future Technology. 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), 292–297. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617310>
3. Orłowski, M. (2022). Directions of Development of the Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. A Review. *Maritime Technical Journal*, 224(1), 68–79. <https://doi.org/10.2478/sjpna-2022-0005>
4. Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.18667>
5. Wibisono, A., Piran, Md. J., Song, H.-K., & Lee, B. M. (2023). A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7321. <https://doi.org/10.3390/s23177321>
6. Zaiets, A., & Kalinichenko, Y. (2023). Analysis of contemporary methods and prospects for the development of underwater vehicle navigation. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 4(74), 5–11. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.005>
7. Alexandris, C., Papageorgas, P., & Piromalis, D. (2024). Positioning Systems for Unmanned Underwater Vehicles: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9671. <https://doi.org/10.3390/app14219671>
8. Lambertini, A., Menghini, M., Cimini, J., Odetti, A., Bruzzone, G., Bibuli, M., Mandanici, E., Vittuari, L., Castaldi, P., Caccia, M., & De Marchi, L. (2022). Underwater Drone Architecture for Marine Digital Twin: Lessons Learned from SUSHI DROP Project. *Sensors*, 22(3), 744. <https://doi.org/10.3390/s22030744>
9. Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). IMPROVEMENT OF TECHNICAL SUPPLY OF PROJECTS OF ROBOTIZED MONITORING OF UNDERWATER CONDITIONS IN SHALLOW WATER AREAS. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>
10. Nishitani, A., Kawada, R., & Kojima, J. (2022). Development of combined aerial and underwater drone system. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977370>
11. Merveille, F. F. R., Jia, B., & Xu, Z. (2024). Advancements in Underwater Navigation: Integrating Deep Learning and Sensor Technologies for Unmanned Underwater Vehicles. *Engineering*. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0548.v1>
12. HAN, T., HU, Z., CUI, Q., QING, X., & XU, B. (2023). Scheme Design and Key Technology Application of Multi-joint Unmanned Underwater Vehicle. <https://doi.org/10.13889/j.issn.2096-5427.2023.06.004>
13. ZHANG, X., & HUA, J. (n.d.). Study on the Development and Application of Foreign Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03493>
14. Hasan, K., Ahmad, S., Liaf, A. F., Karimi, M., Ahmed, T., Shawon, M. A., & Mekhilef, S. (2024). Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing. *IEEE Access*, 12, 46202–46231. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380458>
15. Kiselev, L. V., Kostenko, V. V., & Medvedev, A. V. (2022). Motion Control Model and HUV Dynamics for Patrolling Sea Areas with Complex Bottom Topography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(2), 022080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022080>
16. Jacobi, M., & Karimanzira, D. (2013). Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles. 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608089>
17. António Neves Lousada, S., Freitas Camacho, R., & Suárez Palacios, J. (2021). Underwater Technical Inspections Using ROV Applied to Maritime and Coastal Engineering: The Study Case of Canary Islands. In S. António Neves Lousada (Ed.), *Underwater Work*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95599>
18. Miller, A., Miller, B., & Miller, G. (2021). Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System. *Drones*, 5(3), 83. <https://doi.org/10.3390/drones5030083>
19. Akinina, T., Symonenkov, V., Symonenkova, I., & Trushkov, G. (2022). IMPROVING THE EFFICIENCY OF APPLICATION UNCAVATED UNDERWATER DEVICES FOR THE NEEDS OF THE NAVAL FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*, 16, 126–134. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.126-134>
20. Ioannou, G., Forti, N., Millefiori, L. M., Carniel, S., Renga, A., Tomasicchio, G., Binda, S., & Braca, P. (2024). Underwater Inspection and Monitoring: Technologies for Autonomous Operations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 39(5), 4–16. <https://doi.org/10.1109/MAES.2024.3366144>

21. McNelly, B. P., Whitcomb, L. L., Brusseau, J. P., & Carr, S. S. (2022). Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. *OCEANS 2022*, Hampton Roads, 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977239>
22. Lorenčič, V. (2022). Seabed Surveillance and Underwater Structures Inspection with Remotely Operated Vehicle – Power Ray. *Transactions on Maritime Science*, 11(1), 110–118. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w07>

**Golovan A.I.**

## **UNDERWATER DRONES IN THE WATER TRANSPORT SYSTEM: CURRENT STATUS, TECHNOLOGIES, AND PROSPECTS FOR APPLICATION**

*The article is devoted to a comprehensive review of the current state, technological solutions, and prospects for the use of underwater drones in the water transport system. The relevance of the study is due to the growing requirements for navigation safety, reliability of ships and port infrastructure, as well as the need to improve the efficiency of underwater monitoring in the context of intensive development of sea and river transport. A significant part of critically important water transport facilities are located in the underwater environment, which complicates their regular monitoring using traditional methods and increases the need for modern unmanned technologies. The paper analyzes the main areas of scientific research devoted to underwater drones, in particular approaches to classification, design and technological features, the development of navigation and positioning systems, multisensory complexes, communication means, and autonomous control algorithms. Attention is paid to the use of artificial intelligence, machine vision, and data fusion methods to improve inspection accuracy, automated defect detection, and decision support. Based on a review of current scientific sources, the correspondence between key underwater drone technologies and their practical applications in the water transport system has been systematized. It is shown that underwater drones can be effectively used for inspecting ship hulls, propulsion and steering systems, monitoring port and hydraulic infrastructure, monitoring fairways and bottom obstacles, as well as ensuring navigational safety in restricted water areas. At the same time, it has been established that most existing scientific and technical solutions are developed in the context of general underwater robotics and do not always consider the specific operating conditions of water transport, in particular shallow waters, variable hydrology, high density of infrastructure objects, and requirements for the continuity of transport processes. Key limitations related to navigational reliability, autonomy, and the integration of underwater drones with water transport management systems have been identified. The feasibility of transitioning from the isolated use of underwater drones as inspection tools to their systematic integration with digital monitoring, control, and decision-making support tools, particularly within the framework of digital twin concepts for ships, ports, and inland waterways, has been substantiated. Promising areas for further research have been identified, focused on the development of hybrid ROV/AUV platforms, increasing autonomy and reliability, and adapting underwater drones to the needs of modern water transport.*

**Keywords:** *underwater drones; waterborne transport; autonomous underwater vehicles; remotely operated vehicles; navigation safety; underwater monitoring; port infrastructure; digitalization of water transport*

*Стаття прийнята 10.09.2025*