

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДВОДНОГО РОЗМІНУВАННЯ В УКРАЇНІ

Є. А. Крючина, О. Б. Салтиков, А. А. Крючин

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

У статті досліджено сучасний стан розмінування прісноводних водойм і морських акваторій України та його значення в умовах воєнного стану для забезпечення безпеки цивільного населення, торговельного судноплавства та збереження екологічної рівноваги. Проаналізовано законодавчі акти, що регламентують процеси мінування та розмінування морських і прісноводних акваторій. Здійснено аналіз існуючих підводних вибухових пристроїв і розглянуто сучасні технології підводного розмінування, зокрема методи підводного виявлення мін, використання машинного навчання в процесі обробки сигналів ультразвукових датчиків, стратегії застосування морських і річкових мін, особливості конструкції підводних апаратів, а також інноваційні підходи до виявлення руху за допомогою мікрохвильових радарних датчиків.

Оцінено роль дайверів, водолазів-підричників і водолазів-розвідників у розмінуванні водойм у провідних країнах світу, окреслено основні напрями їх діяльності та систему підготовки фахівців. Узагальнено міжнародний досвід і визначено перспективи комплексної підготовки спеціалістів різних напрямів в Україні для проведення підводного розмінування. Розглянуто особливості медичної та психологічної підготовки таких фахівців і методи їх реабілітації, а також акцентовано увагу на подальшому розвитку баромедицини.

Ключові слова: підводне розмінування; вибухонебезпечні предмети; гідролокаційні системи; підводні безпілотні апарати; дайвери-сапери; підготовка фахівців.

ANALYSIS OF THE USE OF UNDERWATER MINE CLEARANCE TECHNOLOGIES IN UKRAINE

Ye. Kryuchyna, O. Saltukov, A. Kryuchyn

Institute for Information Recording, National Academy of Sciences of Ukraine

Background. Mine contamination in Ukraine remains a serious security challenge not only on land but also in marine and freshwater environments. During the ongoing full-scale war, the demining of rivers, reservoirs, and sea areas has become critically important. Particularly dangerous zones include territories that were temporarily occupied, areas of active hostilities, the region affected by the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant, as well as the Black and Azov Seas. Underwater explosive devices pose significant risks to civilian populations, maritime navigation, and aquatic ecosystems.

Materials and Methods. The study is based on theoretical analysis, generalization, and systematization of scientific publications on underwater mine detection, classification, and clearance technologies. The analysis was conducted using major scientometric databases, including ESCI, ResearchBib, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Open Ukrainian Citation Index,

ScienceDirect, Scopus, Web of Science, WorldWideScience, Science.gov, Google Scholar, BASE, the V.I. Vernadsky National Library database, Directory of Open Access Journals, and Scite.ai.

Results. The study evaluates the current state of mine contamination in Ukrainian marine and freshwater areas and its impact on military operations, civilian safety, maritime navigation, and the environment. Legislative frameworks regulating mining and demining processes are analyzed. Modern underwater mine-clearance technologies are reviewed, including sonar-based detection methods, synthetic aperture sonar systems, underwater drones, remotely operated vehicles, and machine learning approaches for processing hydroacoustic data. The role of divers and explosive ordnance disposal specialists is examined, together with international practices of their professional training. Special attention is given to the medical and psychological preparation of specialists and the importance of baromedicine and hyperbaric physiology for maintaining their health and operational capability.

Conclusions. Underwater mine clearance is a key factor in ensuring safety in marine and freshwater environments. Future development of demining operations is associated with automated systems, unmanned underwater vehicles, and advanced sonar technologies. Synthetic aperture sonar significantly improves underwater imaging and mine detection. Although autonomous systems are increasingly used, highly qualified diving specialists remain essential for complex underwater tasks. The development of underwater demining technologies in Ukraine requires the integration of NATO experience together with national technological and training initiatives.

Key words: underwater mine clearance; explosive ordnance; sonar systems; unmanned underwater vehicles; diver-sappers; specialist training.

Вступ. Протягом 2010 – 2024 років у світі встановлено більше ніж 70 мільйонів мін, з яких близько 15% розташовані у внутрішніх водоймах. В Україні ці виклики посилюються значною кількістю вибухонебезпечних предметів на узбережжі Чорного та Азовського морів; аналогічна проблема характерна й для інших чорноморських країн [1–3]. Водойми в Україні також забруднені значною кількістю вибухонебезпечних предметів, які потрапили до них під час Другої світової війни [4]. Науковці, що здійснювали дослідження даної проблематики визначають, що підводні міни становлять значну загрозу безпеці на морі, що вимагає розроблення та використання передових технологій для їх виявлення, класифікації та подальшого знешкодження [5]. Слід зазначити, що кожен 20-ий вибухонебезпечний предмет в Україні був знешкоджений саме під водою, а тому для реалізації миротворчих місій, а також виконання підводних підривних робіт необхідно мати компетентних фахівців, яких в Україні, на жаль, поки що недостатньо. Підводні міни широко

використовуються як для забезпечення захисту територій, так і для військових операцій, тому для підводного розмінування необхідні точні системи їх ідентифікації [6]. За деякими оцінками, у світі на озброєнні понад 60 військово-морських флотів перебуває близько одного мільйона морських мін більш ніж 300 типів, не враховуючи США, де їхня кількість, імовірно, є значно більшою. Простота виготовлення та застосування робить такі міни доступними навіть для економічно менш розвинених держав і терористичних угруповань. У Чорному морі наразі може перебувати близько 400 морських мін, однак визначити їх точну кількість складно. Зменшення рівня води у Каховському водосховищі внаслідок підриву Каховської ГЕС з боку Росії суттєво змінило ландшафт півдня України та, окрім об'єктивно катастрофічних наслідків, створило додаткову небезпеку, пов'язану з наявністю річкових мін, якими російські війська замінували русло Дніпра та акваторію водосховища. Частина з них була зірвана з якорних кріплень, частина залишилась на дні, яке тепер

стало суходолом. Точні терміни, що необхідні для розмінування Чорного та Азовського морів, а також прісних водойм визначити наразі неможливо. Тим не менш, в Україні постійно розвиваються новітні моделі розмінування прісноводних акваторій та морів [7]. Оскільки частину мін зривають шторми, мінна загроза частково зменшується, однак оборонні мінно-вибухові загородження періодично відновлюються як Україною, так і Росією [8]. Мінування акваторії Чорного моря та річок фіксувалося документаторами Т4Р від початку повномасштабної війни. Зокрема, вже у березні 2022 року російські збройні сили замінували рекомендовані морські шляхи від Босфору до Одеси. Серед ключових напрямів розмінування визначають створення ефективних систем запобігання загибелі людей від вибухонебезпечних предметів, збільшення чисельності піротехнічних підрозділів, формування регіональних оперативних напрямів діяльності в кожній області, а також упровадження у практику передових технологій розмінування [9].

Наразі активно застосовуються безекіпажні катери, призначені для розмінування неконтактних мін; зокрема, проєкт компанії Textron Systems. Близько 14 тис. км² водних шляхів України забруднені вибухонебезпечними предметами внаслідок російської агресії. За даними Міністерства оборони України, росія продовжує скидати у Чорне море авіаційні бомби – як нові, так і ті, що були захоплені на військових базах після анексії Криму у 2014 році.

На сьогодні у Київській області вже обстежено понад 1 га водойм, де виявлено понад 150 вибухонебезпечних предметів. Крім того, з початку повномасштабного вторгнення з боку Росії, піротехнічними та водолазними розрахунками ДСНС в межах Миколаївщини вилучено з водойм та знищено в установленому порядку 149 вибухонебезпечних предметів. Протягом поточного року обстежено 3,11 га та вилучено 8 вибухонебезпечних предметів [10]. Водночас таке оперативне розмінування не гарантує повної безпеки та не забезпечує передачу водойми для безпечного використання

кінцевими користувачами, оскільки не відповідає процедурам гуманітарного розмінування. На жаль, надати вичерпну оцінку рівня замінування нині неможливо, оскільки бойові дії продовжуються, а у морі ще знаходяться ворожі кораблі. Підводне розмінування є значно дорожчим порівняно з наземним, оскільки потребує застосування спеціалізованого обладнання з високою вартістю. Крім того, робота відповідних фахівців є значно дорожчою, а кількість підготовлених спеціалістів у цій сфері залишається обмеженою. До того ж, необхідна спеціальна техніка, обладнання, апаратура тощо.

Спільні мінно-тральні сили Туреччини, Румунії та Болгарії не вважаються операцією НАТО, проте є першою масштабною спільною дією чорноморських союзників після початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну у лютому 2022 року. З цього ж року Туреччина, Румунія та Болгарія розпочали спільну місію з гуманітарного розмінування частини акваторії Чорного моря та запровадили постійне патрулювання у зоні, яка наразі обмежується північним кордоном Румунії [11]. При цьому Туреччина має у складі свого флоту шість найбільш просунутих у регіоні тральників Aydin, а загальна кількість тральників у флотах цих країн сягає двох десятків.

Мета дослідження: дослідити статистичні показники замінування морських та прісноводних водойм України, проаналізувати різноманітні варіанти застосування підводних вибухонебезпечних засобів, підводних сонарів та дронів; оцінити сучасні технології підводного розмінування; проаналізувати комплексну систему теоретичної та практичної підготовки профільних фахівців.

Матеріал і методи дослідження. У дослідженні використано методи теоретичного аналізу, узагальнення та систематизації наукових публікацій, присвячених проблематиці виявлення, класифікації та розмінування підводних мін. Аналіз проведено з використанням провідних наукометричних баз даних і науково-інформаційних ресурсів, зокрема ESCI (Emerging Sources Citation

Index), Scopus, Web of Science, ScienceDirect, WorldWideScience, Science.gov, Google Scholar, BASE, ResearchBib, Index Copernicus, UlrichsWeb (Ulrich's Periodicals Directory), Open Ukrainian Citation Index, електронних ресурсів Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського, проєкту «Наукова періодика України», Directory of Open Access Journals, Scite.ai, WorldCat та інших відкритих наукових джерел.

Результати та їх обговорення. У науковій літературі класифікація підводних мін стала предметом дослідження багатьох авторів [12–19]. Ключова проблема із річковими мінами полягає у тому, що вони виглядають інакше, на відміну від сухопутних. Якірні річкова міна (далі – ЯРМ) – це радянська фугасна міна, призначена для ураження десантно-висаджувальних засобів противника шляхом встановлення в акваторіях річок, озер та водосховищ. Характерна хрестовина міни – це і є засіб ініціації, який відповідає за підрив 3 кг тротилу. Без неї вона скоріше виглядає, як балон, при цьому це не робить її менш небезпечною. ЯРМ уже виносить до узбережжя в районі Одеси. Якщо деякі старі радянські морські та річкові міни ще можуть асоціюватися з кадрами кінохроніки, зокрема мала якірні міна (далі – МЯМ) через характерні гальваноударні ковпаки («роги»), то в інших випадках розпізнати таку небезпеку значно складніше. Наприклад, існують протидесантні міни. Вони призначені для встановлення прямо на мілководді поряд з берегом. Зокрема ПДМ-1 спрацьовує, коли штанга відхиляється у будь-яку сторону на 10–15 градусів, зазвичай вона знаходиться у воді на глибині 1,1–2 метра та містить 10 кг тротилу. Коли рівень води знижується, такі міни можуть виглядати як звичайна гілка, що стирчить серед водоростей. Наступною модифікацією цієї міни є ПДМ-2, яка зовні радше нагадує радіобуй. Вона також встановлюється на металеву опору, а її характерний сферичний корпус дещо більший за футбольний м'яч і має так звану «антену». Водночас усередині цієї кулі міститься близько 15 кг вибухової речовини, а «антена» фактично є щоглою детонатора.

Крім того, доволі нехарактерний вигляд має сплавна міна, що оснащена 20 кг вибухової речовини. Вона має характерні «роги», але й може оснащуватись щоглою, подібним у мінах ПДМ-1 та ПДМ-2 [20]. Походження морських мін бере свій початок від XVI століття, коли було створено першу міну-прототип, що була спрямована на боротьбу з піратами, які були активними біля берегів Китаю. Після російсько-японської війни 1904–1905 років військово-морські міни стали звичним засобом ведення морської війни. Неодноразове використання морських мін та їх деструктивний вплив на комерційне судноплавство змусило країни узгодити конкретні міжнародні правові обмеження щодо їх використання, які зараз закріплені в Гаазькій конвенції VIII про встановлення підводних мін, що автоматично підриваються при доторканні [21].

Військово-морські міни можна диференціювати на шість видів: швартові міни, дрейфуючі або плавучі міни, донні міни, міни з дистанційним керуванням, мобільні міни, які запускають із підводних човнів та спливаючі або ракетні міни. Крім того, існують попередньо встановлені міни, які можна приводити в бойову готовність дистанційно або вручну. Донні міни – небезпечніші, перебувають на глибинах до 100 м та мають велику кількість вибухової речовини. Для їх виявлення потрібно залучати судна та гвинтокрили, оскільки спеціальні механізми цих мін можуть спрацювати не з першого разу. Донна неконтактна міна MN103 «Manta», розроблена італійськими спеціалістами, є зразком сучасного конструювання морських мін і становить серйозну загрозу для мінно-тральних сил, а також для великих надводних кораблів, зокрема крейсерів типу Ticonderoga. Маса міни становить близько 220 кг, з яких приблизно 130 кг припадає на вибухову речовину. Постановка міни здійснюється шляхом спуску на воду за допомогою крана та стропильної системи. Міна Mark 60 CAPTOR реалізує концепцію використання торпеди калібру 324 мм як «пересувної міни» для розширення зони ураження кораблів. Пристрій являє собою контейнер, у якому розміщена торпеда Mk 46. Після занурення у воду контейнер

відокремлюється від якоря та займає вертикальне положення. Максимальна глибина встановлення становить до 914 м, дальність роботи головки самонаведення – до 1500 м, дальність ходу торпеди – до 7 км. Періодичність роботи системи – 40 с кожні 5 хв. Загальна маса міни становить близько 1 тонни, маса вибухової речовини – 44 кг (PBXN-103, приблизно у 1,7 рази потужніша за тротил). Наразі ця система поступово замінюється модифікацією з торпедою Mk 50, відомою під назвою Substrike. Авіаційна плануюча міна Quickstrike-ERi створена на основі авіаційної бомби Mk 82, додатково оснащеної австралійським модулем корекції та планування Winged JDAM-ER.

Міна обладнана крилами та стабілізаторами; під час скидання зі швидкістю 0,8 М з висоти 11 000 м вона здатна планувати на відстань до 74 км перед приводненням. Це дає змогу здійснювати постановку мін без входу носія у зону протиповітряної оборони противника, а також істотно підвищує прихованість мінування. Міни також можуть оснащуватися блоками неконтактних детонаторів Mk 57 TTD і Mk 71 TTD.

Самотранспортована донна міна-торпеда Mk 67 SLMM. Принцип дії таких мін полягає в тому, що боеголовка торпеди і головка самонаведення замінюються на донну безконтактну дію. Такий самохідний апарат виходить на задану точку і залягає на дно. Саме ця міна-торпеда була розроблена на базі торпеди Mk37 Mod2, але новітні модифікації базуються на конструкції Mk48 Mod4 (ISLMM) і оснащені двома мінами, які встановлюються незалежно одна від одної. Дальність ходу такої торпеди складає 16,5 км, зі швидкістю близько 48 вузлів. Детонатори – гідродинамічні та магнітні; маса бойової частини становить 234 кг. МДМ-1, МДМ-2, МДМ-3, МДМ-5 – це морські донні міни, що перебувають на озброєнні ВМФ Росії. Вони призначені для створення мінної небезпеки та ураження надводних кораблів, підводних човнів у надводному й підводному положеннях, а також десантних засобів під час встановлення поблизу узбережжя. Постановка мін може здійснюватися як з борту надводних кораблів, так і з літаків.

Із підводних човнів, оснащених торпедними апаратами калібру 533 мм, може встановлюватися міна МДМ-1. Маса мін цього типу становить від 590 до 1500 кг, водночас маса бойової частини – від 300 до 1070 кг у тротиловому еквіваленті. Глибина встановлення – від 3 до 125 м. Детонатори – магнітні та гідроакустичні. Термін бойового чергування під водою – до одного року.

Протичовнова міна-торпеда ПМК-2 – це аналог американського Mark 60 Captor. Має діаметр корпусу в 534 мм і довжину до 8000 мм, що дозволяє встановлювати її не тільки з борту надводного корабля, літаків, а й з торпедних апаратів підводного човна. Маса міни складає до 1800 кг при масі вибухівки в 130 кг. Як і американський аналог, ПМК-2 після встановлення на глибині до 1500 м, головна частина від'єднується від якоря і піднімається до рівня 100-250 м і стає на бойове чергування. Розміри зони сканування – 500 на 500 метрів над міною. Після знаходження цілі, відбувається пуск торпедної бойової частини зі швидкістю до 80 м/с для враження цілі. Може бути активною до 1 року в бойовому положенні. Зони встановлення мін чітко розділені за глибиною моря. Для зони прибою (0-3 м глибини) найкраще підходять донні та протидесантні міни. Для мілководдя (3-12 м глибини) вже можна використовувати донні, якірні та плаваючі міни. Для прибережних (12-60 м глибини) і відкритих вод (60 м і глибше) також треба додати випірноючі міни, оскільки ефективність донних мін, наприклад, проти надводних кораблів, вагомо знижується.

Наразі противник має підводні човни проєкту 636.3, які можуть застосовувати самотранспортовані міни, створені на базі колишньої кисневої торпеди 53-65К. Такі міни здатні долати відстань до 20 км, після чого опускаються на дно та переходять у бойовий стан через певний час. Тривалий час морським мінам приділялося відносно мало уваги, оскільки останніми десятиліттями вони використовувалися нечасто. Водночас це відносно недорогі автономні вибухові пристрої, що мають значний тактичний, оперативний і стратегічний потенціал. Однак, попри свої військові характеристики, вони продовжують

становити серйозну загрозу для цивільного населення та комерційного судноплавства під час збройних конфліктів. Їх поява та використання в таких акваторіях, як Чорне та Азовське моря, привертають увагу міжнародних гуманітарних організацій через їхній шкідливий вплив на цивільне населення.

У міжнародному праві не існує визначення про те, що саме вважається морською міною. Тим не менш, НАТО визначає морські міни як «вибуховий пристрій, встановлений у воді, на морському дні або підводних надрах, з метою пошкодження чи потоплення кораблів або перешкоджання судноплавства для входу на територію» [22]. На відміну від протипіхотних мін, які заборонені для держав, що ратифікували Оттавську конвенцію, військово-морські міни розглядаються державами як законний вид озброєння, використання якого обмежується і регулюється нормами договірного права та міжнародного гуманітарного права [23]. Оскільки дія Оттавської конвенції не поширюється на військово-морські міни, правила встановлення різних типів морських мін – як державними, так і недержавними збройними суб'єктами – визначаються нормами права, що регулюють ведення морської війни. Ці норми мають певні відмінності від положень, які регулюють міжнародні збройні конфлікти, оскільки морські бойові дії можуть впливати і на держави, що не беруть участі у конфлікті та мають нейтральний статус. Завдяки автоматизації, адаптації та використанню новітніх засобів доставки до районів постановки морські міни поступово трансформуються із суто оборонної зброї на засіб активного наступального впливу. Для паралізації судноплавства або зриву розгортання ворожого флоту нині достатньо здійснити постановку мін за допомогою плануючих авіаційних боєприпасів чи підводних безпілотних апаратів без входу в зону дії протиповітряної оборони противника або навіть поза межами його територіальних вод.

Для України оснащення подібними засобами постановки мінних полів може розглядатися як один із елементів асиметричної відповіді у Чорному морі та як інструмент стримування

на початковому етапі формування повноцінних військово-морських спроможностей. За попередніми оцінками, для цього може бути достатньо закупівлі близько 200–300 сучасних мін і відповідних засобів їх доставки. Наприклад, літак Су-24 здатний нести 5–6 мін типу Quickstrike-ER у варіантах масою 500–1000 фунтів, що дає змогу оперативно створювати мінну небезпеку в районах бухт і виходів із чорноморських портів Росії та окупованого Криму. Виліт ескадрильї може забезпечити постановку приблизно 50–60 мін за заданими координатами без входу носіїв у зону ураження зенітних ракетних комплексів. Водночас частина таких мін може бути представлена інертними або імітаційними засобами, що не зменшує потреби противника витратити ресурси й час на їх виявлення та нейтралізацію.

Додаткові можливості для розвитку засобів доставки мін, застосування водолазів-саперів і сенсорних систем може забезпечити створення підводного безпілотного апарата, подібного до проекту для ВМС США під назвою Proteus. Він представляє собою платформу, яка може працювати в двох площинах: безпілотної вантажівки для дистанційної або автоматичної доставки вантажів, або сенсорів в задану точку, або засіб доставки бойових водолазів та диверсійних груп під водою.

Основними джерелами права, що регулює ведення морської війни, є Гаазькі конвенції VI, VII та VIII, а також Інструкція Сан-Ремо з міжнародного права, що застосовується до збройних конфліктів на морі 1995 року [24]. Серед визначених джерел, саме Гаазька конвенція VIII залишається основним договором, що регулює використання військово-морських мін і містить п'ять основних положень щодо їх використання. Відповідно до Гаазької конвенції VIII будь-який вид морського мінування до початку або після початку збройного конфлікту підпорядковується принципам ефективного нагляду, контролю за ризиками та застереженнями. Крім того, для забезпечення мирного судноплавства слід вживати застережних заходів. Виведений зі статей 3 і 5 Гаазької конвенції VIII принцип ефективного нагляду,

зокрема, вимагає від сторін, які застосовують міни, реєструвати місця розташування мінних полів і перевіряти правильність їх встановлення або налаштування. Це, своєю чергою, сприяє здійсненню попереджувальних заходів і подальшому розмінуванню. Із положень статей 1 і 3 Гаазької конвенції VIII впливає, що сторони, які застосовують міни, повинні здійснювати ефективне управління ризиками, які мінні поля створюють для мирного судноплавства. Конкретні заходи безпеки залежать від типу мін, що використовуються. Втрата ефективного контролю над такими ризиками зумовлює виникнення обов'язку попередження про небезпеку. Водночас воююча сторона зобов'язана повідомляти про небезпечні або заміновані райони лише настільки, наскільки це дозволяють міркування воєнної необхідності [21].

Щодо запобіжних заходів, які може застосовувати сторона збройного конфлікту, що встановлює міни, така сторона зобов'язана забезпечити мирному судноплавству можливість залишити акваторію, яка планується до мінування або вже замінована. Це може передбачати надання безпечних проходів або організацію проведення суден. Водночас виявлення та класифікація підводних мін залишаються критично важливими завданнями. Водночас під час агресії Росії проти України до загроз для водних акваторій додалося застосування ракетних систем, зокрема ракет типу «Калібр», «Іскандер», Х-101, С-300 та інших. У свою чергу, ракети під час падіння в акваторію можуть містити у собі залишки реактивного палива, яке несе велику небезпеку, а тому такий вибухонебезпечний предмет повинно бути знищений у найкоротший термін.

У низці аналітичних публікацій 2024 року звертається увага на недооцінені оперативні, навігаційні та юридичні виклики, пов'язані з масштабними операціями з мінування в Чорному морі в умовах російсько-українського збройного конфлікту. Морські навігаційні попередження NAVAREA залишаються чинними, і, за наявними повідомленнями, російська авіація здійснює постановку мін уздовж чорноморського маршруту експорту зерна. Виявлення мін є звичайним

явищем, і деякі чорноморські держави розпочали локальні операції з розмінування. Туреччина, Румунія та Болгарія, члени НАТО, прагнуть до спільної операції з розмінування. Найбільш корисною формою багатонаціональної операції з розмінування є та, що ґрунтується на мандаті Ради Безпеки ООН у розділі VII. Подібні операції не є новими. Наймасштабнішою на сьогодні була операція з розмінування, проведена у територіальних морях і внутрішніх водах Кувейту та Іраку, а також у прилеглих виключних економічних зонах після воєн 1991 та 2003 років. Хоча в центрі уваги цього дослідження перебуває Чорне море, значний досвід можна запозичити з практики Перської затоки. Цей регіон упродовж тривалого часу був ареною активного застосування морських мін, що суттєво впливало як на військово, так і на торговельне судноплавство. Ірано-іракська війна 1980–1988 рр. і пов'язана з нею «танкерна війна» (у контексті рішення Міжнародного суду ООН у справі щодо нафтових платформ), а також пізніші інциденти, пов'язані з мінною загрозою поблизу Ормузької протоки, демонструють тривалість, асиметричний характер і стійкість морської мінної загрози.

Ведення підводної війни здебільшого залежить від вдосконалення датчиків і матеріалів виявлення, а також ідентифікації [25–29]. Одним із основних завдань підводної боротьби є виявлення підводних об'єктів, таких як транспортні засоби, судна, зброя та техніка. Морські міни не обов'язково повинні бути фактично встановлені, щоб мати стримувальний ефект: навіть припущення про можливе мінування акваторії може бути достатнім для обмеження руху кораблів. У військових конфліктах широко використовують новітні технології з виготовлення морських мін і саморобних вибухових пристроїв. Різноманітність типів і характеристик матеріалів може вплинути на можливості виявлення об'єктів під водою. Відомо, що матеріали з високою пористістю забезпечують нижчу акустичну характеристику, ніж звичайні металеві пластини. Акустичні характеристики покриття та/або корпусу морських мін можуть змінюватися в частотному діапазоні

80–100 кГц, у якому працюють гідролокаційні системи, зокрема завдяки використанню спіненої кераміки (SiC) з відкритою пористою структурою. Застосування пінокерамічних матеріалів на основі карбіду кремнію здатне знижувати рівень відбиття акустичного сигналу порівняно зі сталевими поверхнями. Крім того, одним із напрямів підвищення малопомітності морських мін є використання композитних або гібридних матеріалів для покриття їх корпусу, що ускладнює їх виявлення гідролокаційними засобами [30].

У зв'язку з удосконаленням технології виготовлення мін і вибухових пристроїв, відповідно необхідно вдосконалювати системи ідентифікації та знищення вибухонебезпечних пристроїв. В умовах зростання геополітичної напруженості, спричиненої поточними збройними конфліктами, безпека судноплавства опинилася під загрозою через значну кількість морських мін, розміщених, зокрема, у районах морських бойових дій. Значна кількість мін також дрейфує у Чорному морі поблизу узбережжя чорноморських країн – України, Румунії, Болгарії, Грузії та Туреччини. З огляду на інтенсивну комерційну діяльність у прибережних акваторіях цих держав така ситуація створює додаткові ризики для безпеки морських перевезень і господарської діяльності через можливі аварійні інциденти [31].

Збройні конфлікти часто залишають після себе значні площі територій, забруднених нерозірваними боєприпасами, зокрема мінами, бомбами та артилерійськими снарядами. Такі вибухонебезпечні предмети можуть становити небезпеку протягом тривалого часу після завершення бойових дій, створюючи ризики для населення, інфраструктури та довкілля [32].

Україна оцінює тривалість очищення акваторії Чорного моря від мін приблизно у 7–10 років. Водночас забруднення водних басейнів підводними мінами негативно впливає на стан морських екосистем. Підводні міни вважаються головною загрозою для підводних човнів, торгової і військово-морської діяльності. Виявлення та визначення місцезнаходження цих мін є складним завданням внаслідок особливостей

підводного середовища. Розгортання мереж підводних акустичних датчиків (UWASN) може забезпечити ефективне вирішення проблеми виявлення та визначення місцезнаходження підводних мін [33]. Сили військово-морського флоту іноземних країн використовують підводні міни та іншу зброю, з метою запобігання проникненню сил іншої держави за лінію кордону своєї країни. Держава, яка здійснила постановку мін, як правило, володіє інформацією про їх розташування. Водночас інші держави не мають точних даних про місцезнаходження підводних мін. Унаслідок цього їхні кораблі та підводні човни можуть становити ризик зіткнення з такими вибухонебезпечними пристроями, що може призвести до вибуху та пошкодження або втрати судна. Для виявлення та нейтралізації мін силами оборони використовуються мінно-тральні кораблі.

Тральщики – це надводні військові кораблі, які використовуються для виявлення та знищення підводних мін. Для виявлення підводних мін найчастіше використовують систему SONAR (звукова навігація та визначення дальності). Фактично, це техніка, яка використовує поширення звукових хвиль для вимірювання відстаней (діапазону), навігації або виявлення об'єктів на або під поверхнею води [34–37]. Процес підводного розмінування – це повільний, надзвичайно небезпечний процес, який включає виконання операцій з класифікації та знищення мін. Виникають випадки, коли операції можна виконати за допомогою підводного апарату з дистанційним керуванням, а іноді для цього потрібні послуги висококваліфікованих спеціалістів-дайверів. Військово-морські міни розглядають як законну зброю, хоча її використання обмежене і регулюється договірним і міжнародним гуманітарним правом [38]. Більшість публікацій з проблеми підводного розмінування стосується проведення робіт в акваторії морів, тоді як для України важливе значення має розмінування внутрішніх водоймах. В періодичних виданнях України, за даними Google Scholar, опубліковано понад 300 наукових публікацій з проблематики підводного розмінування. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що значна

частина робіт, присвячених проблемам виявлення підводних мін, була опублікована протягом останніх п'яти років і переважно представлена матеріалами конференцій та наукових семінарів різного рівня. Водночас більшість існуючих методів виявлення мін потребують використання складного та вартісного обладнання для дослідження морського середовища та/або залучення операторів для забезпечення функціонування систем ідентифікації мін. У зв'язку з цим актуальним завданням залишається створення високоточної системи виявлення підводних мін, яка дозволить підвищити ефективність процесу розмінування, скоротити час ідентифікації та знищення мін, зменшити вартість відповідних операцій, а також знизити ризик травмування або загибелі операторів системи ідентифікації.

Слід зауважити, що підводне розмінування включає низку пов'язаних технологій зокрема: сучасні методи підводного виявлення мін, використання машинного навчання в процесі обробки сигналів ультразвукових датчиків, стратегію використання морських та річкових мін, особливості конструкції підводних човнів та інноваційні підходи для виявлення руху за допомогою мікрохвильових радарних датчиків [39–42]. Використання сонарних датчиків вважається ефективним способом виявлення мін через низьку вартість виготовлення таких датчиків та низьке енергоспоживання [43–45]. Крім того, сигнали гідролокатора зазнають меншого затухання у водному середовищі порівняно з іншими підводними методами. Розроблення ефективної системи підводного виявлення мін потребує можливості їх надійного розрізнення (класифікації) серед інших міноподібних об'єктів з високою точністю [46]. У зв'язку з цим виникає необхідність вилучення релевантної інформації з гідролокаційних даних для коректної обробки та ідентифікації сигналів. Використання методів виділення ознак сигналів безпосередньо впливає на ефективність системи класифікації виявлених об'єктів [47].

Для розв'язання задачі виділення інформативних ознак сигналів запропоновано численні підходи,

зокрема кореляцію спектрограм, частотно-часовий аналіз, приховані моделі Маркова, вейвлет-перетворення (WT) та інші методи [48]. Вейвлет-перетворення сигналів широко застосовується для виділення ознак об'єктів. Порівняно з іншими підходами системи виділення ознак на основі вейвлет-перетворення характеризуються нижчим енергоспоживанням. Ефективність застосування вейвлет-перетворення до гідролокаційних сигналів для виділення ознак об'єктів була широко досліджена у низці наукових праць [49]. Водночас ідентифікація різних типів підводних об'єктів, таких як міни, каміння та інші міноподібні об'єкти, залишається складним завданням у процесі класифікації цілей на основі гідроакустичних сигналів.

Розвиток зазначених підходів не тільки сприяє підвищенню безпеки судноплавства, але й має важливе значення для збереження морського середовища. Було досліджено різні підходи, зокрема використання сонара із синтетичною апертурою (SAS) та безпілотних апаратів, спрямовані на підвищення ефективності протимінних заходів. Водночас слід враховувати, що сучасні морські міни характеризуються зниженою помітністю завдяки застосуванню спеціальних покриттів. Тому гідролокаційні системи, призначені для протидії мінній загрозі, повинні використовувати вдосконалені методи класифікації об'єктів. Процес ухвалення рішення щодо класифікації мін передбачає розрізнення власне мін і донних об'єктів, що не є мінними (NOMBO). Необхідність підвищення точності класифікації зумовлена значною кількістю немінних об'єктів, які виявляються на початковому етапі операцій пошуку мін.

Для отримання високої продуктивності процесу ідентифікації необхідно забезпечити низький коефіцієнт неоднозначності. Найкращий спосіб подолати цю складність у класифікації у звичайних умовах експлуатації – це отримати високу роздільну здатність і багатоаспектне представлення об'єкта, що класифікується.

Підвищення ефективності систем виявлення підводних об'єктів може бути досягнуто

завдяки застосуванню сучасних методів, що використовуються у різних системах спостереження, зокрема в гідролокаторах, встановлених на корпусі суден, та безпілотних підводних апаратах. До таких методів належать формування зображень із синтетичною апертурою та тривимірна реконструкція об'єктів. Водночас через високу вартість отримання гідролокаційних зображень підводних цілей зазвичай складно сформувати достатню кількість зразків зображень мін. Для розв'язання цієї проблеми пропонується метод виявлення та розпізнавання мінних цілей, що ґрунтується на моделюванні зображень і подальшому навчанні нейронної мережі. У запропонованому підході імітаційна модель мінної цілі формується відповідно до механізму утворення зображення гідролокатора бокового огляду, що дає змогу генерувати значну кількість зображень мінних цілей для навчання системи.

Для підвищення точності розпізнавання використовується глибока згортова нейронна мережа (CNN), яка проходить попереднє навчання на наборі даних ImageNet, після чого додатково налаштовується на основі реальних та змодельованих гідролокаційних зображень мінних цілей для адаптації до задачі їх виявлення [50–53]. Надалі налаштована CNN використовується як базова модель мережі виявлення цілей, на основі якої здійснюється подальше навчання системи детекції [54–56].

Експериментальні результати свідчать, що запропонований метод виявлення мін, заснований на моделюванні вибірки та перенесенні навчання (transfer learning), забезпечує вищу точність ідентифікації мінних цілей порівняно з деякими традиційними методами виявлення та підходами глибокого навчання, які використовують лише реальні зразки для навчання [57–59]. Такий підхід є ефективним для задач підводного виявлення цілей. Крім того, для класифікації підводних об'єктів на зображеннях гідролокатора бокового огляду застосовувалися методи глибокого навчання із використанням напівсинтетичних навчальних даних, зосереджених на міноподібних об'єктах (MLO).

З метою точної класифікації об'єктів та забезпечення безпеки безпілотних засобів спеціально розроблена потужна бібліотека машинного навчання XGBoost («Extreme Gradient Boosting») для ефективного й масштабного навчання складних моделей. Однією з ключових особливостей XGBoost є здатність ефективно обробляти відсутні значення без необхідності значної попередньої обробки даних. Ця функція дозволяє бібліотеці програм обробляти дані реального світу з неповною або відсутньою інформацією, що робить її адаптованою для використання в різноманітних програмах. В Україні також проводиться розробка методів та засобів активного та пасивного розпізнавання мін на основі глибоких нейронних мереж. Перспективною технологією ідентифікації мін вважається використання бездротових сенсорних мереж (WSN), що мають вагомий потенціал для моніторингу водного середовища, оскільки вони можуть сприймати, збирати та передавати дані без фізичного контакту. Фактично, такі мережі можуть вважатися альтернативою ручним операціям з ідентифікації мін. Бездротові сенсорні мережі забезпечують ефективне рішення для недорогого постійного моніторингу підводного середовища. У свою чергу, підводні акустичні сенсорні мережі (UWASN) можуть ефективно застосовуватися для виявлення підводних мін, у тому числі на значній глибині. Сенсорні вузли мають певні обмеження щодо можливостей обробки сигналів, пов'язані з ємністю акумуляторної батареї, пропускну здатності бездротової мережі та об'ємом пам'яті для зберігання відповідних даних.

Основним недоліком, що ставить під сумнів доцільність застосування цих датчиків, є енергетичні обмеження на їх функціонування. Для вирішення цієї проблеми пропонується використання кластерного підходу, який є одним із практичних рішень для ефективного управління енергоспоживанням сенсорної мережі та забезпечує розподіл енергетичного навантаження між її вузлами. У більшості випадків вузли розгортаються з високою щільністю для охоплення необхідних зон спостереження, що дозволяє частині з них

переходити в режим сну, зменшуючи споживання енергії. Використання кластерної архітектури забезпечує розподіл навантаження між датчиками кластера, що знижує енергоспоживання окремих вузлів і сприяє подовженню терміну служби мережі. Крім того, кластерний підхід дозволяє зменшити обсяг переданих даних, що також позитивно впливає на енергоефективність мережі. Водночас критичним аспектом запропонованого підходу є необхідність виконання розширеної обробки сигналів безпосередньо на датчиках, що може призводити до значного енергоспоживання. У зв'язку з цим використання механізмів виділення ознак є важливим для зменшення обчислювальних витрат і загального енергоспоживання системи.

Підводне розмінування – це важлива операція з виявлення, класифікації та знешкодження мін, занурених у водойми. Для вирішення цієї проблеми розроблено різні методи та технології [60,61]. Вертолітні системи з дистанційно керованими апаратами (ROV) та безпілотні підводні апарати (UUV) дедалі частіше використовуються для проведення протимінних заходів (MCM). Для виявлення та класифікації підводних мін активно використовуються передові технології, такі як автономні підводні апарати (AUV). Такі апарати є частиною більшої групи підводних апаратів, що мають назву – безпілотні підводні апарати. Прогрес у технологіях автономних підводних апаратів стимулював зростання інтересу до автоматичних систем розпізнавання цілей, спрямованих на автоматизацію процесів, які наразі виконуються оператором. Безпілотні підводні апарати стали однією з провідних технологій для виконання завдань підводного розмінування. Зокрема, операції підводної розвідки та спостереження, пошуку мін і протичовнової боротьби пов'язані зі значними ризиками для людини, тому застосування безпілотних систем розглядається як перспективний напрям їх реалізації. Такі технічні засоби відіграють важливу роль у протимінних операціях, взаємодіючи з автономними платформами та спеціалізованими системами для забезпечення надійного виявлення й нейтралізації вибухонебезпечних об'єктів.

Крім того, спільне використання об'єктно-орієнтованих систем автономних транспортних засобів і економічно доступних безпілотних підводних апаратів розглядається як важливий елемент підвищення ефективності протимінних операцій. Наведення, навігація та контроль конфігурації приладів безпілотних підводних апаратів реалізуються автоматично для отримання оптимального детального плану маршруту операції, шляхом обробки навігаційних датчиків, таких як зображення гідролокатора, положення, дальність, пеленг та інформація про підводну базу даних.

Слід зауважити, що машинне навчання відіграє важливу роль в обробці підводних акустичних даних для класифікації цілей, включаючи міни, за допомогою автономних підводних апаратів. Технології глибокого навчання дедалі ширше застосовуються у військовій сфері, зокрема для протидії безпілотним літальним апаратам та іншим автономним роботизованим системам. У перспективі система протимінної боротьби має бути комплексною, надійною та максимально автономною. Вона повинна включати автономні безпілотні платформи та мобільний операційний центр, з якого можна планувати, координувати та контролювати повний цикл операції з розмінування.

Традиційно морське розмінування здійснюється спеціалізованими тральщиками. Зокрема, Україна має отримати від Великої Британії два мінні тральщики класу Sandown, які отримали назви «Черкаси» та «Чернігів» на честь кораблів, втрачених під час окупації Криму. З появою підводних безпілотних апаратів з'явилися так звані тральщики-шукачі мін, які за допомогою підводних апаратів здійснюють пошук мін не лише візуально, але й за фізичними полями. У разі виявлення мін вони можуть або позначати їх місцезнаходження, або застосовувати спеціальні заряди для їх знешкодження.

Практично всі ВМС світу мають відповідні підрозділи, які здійснюють підводне розмінування [62]. Дайвери-сапери – це спеціалізований військовий персонал, який навчений виконувати

підводні операції, такі як розмінування, знешкодження вибухонебезпечних предметів, рятування та інші завдання на підтримку військово-морських і військових операцій [63]. Технології роботи військових дайверів постійно вдосконалюються, водночас така робота передбачає й значні ризики [64,65]. Обов'язки дайвера-сапера зазвичай передбачають проведення розмінування, а саме знаходження, ідентифікацію та знешкодження підводних мін та інших вибухових пристроїв, які становлять загрозу для кораблів, підводних човнів та інших військово-морських засобів. Це потребує застосування спеціалізованого обладнання та технічних засобів для безпечного знешкодження мін. Військові дайвери-сапери також часто залучаються до проведення підводних рятувальних операцій [66].

Вони використовують спеціалізовані інструменти та обладнання для підйому та переміщення важких предметів під водою. Підрозділи дайверів-саперів були сформовані під час і після Другої світової війни та активно залучалися до очищення портів і гаваней Середземного моря та Північної Європи від боєприпасів, що не вибухнули, уламків кораблів і мін-пасток. Проблематика найменувань і класифікації спеціальностей є досить специфічною, тому вона недостатньо висвітлена в наукових джерелах. Водночас слід зазначити, що останнім часом наукова спільнота приділяє цій проблемі дедалі більше уваги.

У своєму дисертаційному дослідженні А. Окіпняк проаналізував системи підготовки військовослужбовців-підводників-водолазів. Зокрема зазначено, що протягом десяти тижнів, поряд із загальновійськовою підготовкою, здійснюється підготовка водолаза як розвідника, а також опановуються основи військово-підривної справи. Терміни підготовки водолазів-диверсантів, водолазів-підривників, водолазів спеціального призначення в усіх країнах різняться, але їх усіх об'єднує наявність дисциплін «Вибухова справа», «Інженерні загородження» і «Водолазна підготовка». Теоретична підготовка становить до 30 % загального обсягу підготовки, тоді як практична – близько 70 %. З досвіду

країн Балтії, під час підготовки всі слухачі проходять курс легковололазної підготовки з виконанням водолазних робіт на глибинах до 55 м у легковололазному спорядженні з закритою схемою дихання. Відповідний курс також включає теоретичну і практичну підготовку на березі та у воді, опанування методик пошуку вибухонебезпечних предметів різними методами й технічними засобами, психологічну підготовку та навчання основам тактичної медицини [67].

Основні переваги використання дайверів для проведення підводного розмінування в полягають у тому що:

по-перше, дайвери можуть проводити роботи на різних глибинах згідно відповідної класифікації та наявності спеціального обладнання;

по-друге, дайвери є підготовленими фахівцями, здатними виконувати складні операції підводного розмінування;

по-третє, використання водолазного спорядження із замкнутим або напівзамкнутим контуром дихання дозволяє безпечно пересуватися у безпосередній близькості до мін для їх виявлення, ідентифікації та знищення;

по-четверте, дайвери здатні забезпечити високий рівень очищення водою від мін та вибухонебезпечних предметів;

по-п'яте, дайвери можуть здійснювати переміщення міни з місця її виявлення до безпечного району для подальшого знешкодження у випадках, коли ліквідація міни безпосередньо в зоні виявлення є неприпустимою;

по-шосте, дайвери є єдиними фахівцями, що спеціалізуються на виконанні робіт із розмінування об'єктів підводної критичної інфраструктури (кораблів, мостів, шлюзів, доків, нафтових платформ тощо).

У межах процесу підводного розмінування дайвери виконують послідовно наступні етапи розмінування:

- пошук, виявлення та маркування мін є найбільш ресурсоємною і трудомісткою частиною операції підводного розмінування. Виконання цього етапу значною мірою залежить від точності отриманої інформації, правильного визначення орієнтирів,

а також підводних умов. До оптимальних процедур виконання належать: пошук на позначених проходах, надводний буксирований пошук, підводний руховий пошук та інструментальний пошук із застосуванням підводних або надводних засобів виявлення.

- ідентифікація – означає операцію розпізнавання форми, розмірів, особливостей пристрою та їх порівняння з існуючою базою даних вибухонебезпечних пристроїв та мін. Ідентифікація вважається позитивною, якщо виявлений пристрій було знайдено в спеціалізованих виданнях, з точним визначенням його типу та категорії. Ідентифікація вибухового пристрою надзвичайно важлива для подальшого безпечного проведення дій зі знешкодження та знищення. Виконання операції з ідентифікації вибухового пристрою, передусім залежить від досвіду дайвера, підводної видимості та доступної бази даних;

- нейтралізація полягає у перериванні ланцюга ініціювання підривного механізму міни і застосовується у випадках, коли її підриу в місці виявлення є неприпустимим. У такій ситуації міну переміщують до іншого, безпечного району для подальшого знищення. Міну/пристрій необхідно вилучити у відповідній зоні для дослідження.

Таким чином, дайвери-сапери відіграють важливу роль щодо забезпечення безпеки морських операцій, виконуючи підводні завдання, які потребують спеціальної підготовки, навичок та обладнання. В Європі активно функціонує декілька центрів підводного розмінування, в яких роботи з розмінування здійснюються дайверами, як-от в Чорногорії та Румунії.

Більшість робіт з підводного розмінування в Україні проводиться дайверами (водолазами), хоча ці завдання мають досить високі ризики для здоров'я та життя спеціаліста [68,69]. Водолазні підрозділи залучаються до пошуку вибухонебезпечних предметів часів Другої світової війни, а також сучасних боєприпасів, що залишилися або потрапляють у водойми внаслідок збройної агресії з боку Росії. На жаль, в Україні наразі немає жодного вітчизняного зразка підводного дрона-робота сапера, який пройшов

повний цикл випробувань і виготовляється серійно.

Технологія підводного розмінування передбачає виконання певної послідовності робіт. Спочатку водолаз здійснює спуск під воду та проводить пошук затонулого предмета. Після його виявлення місцезнаходження позначається маркерним буєм, який спливає на поверхню. Далі водолаз піднімається на поверхню, бере остропочний кінець, після чого знову підходить до буя та здійснює остроп затонулого предмета. Після завершення цих дій водолаз залишає воду, і лише після цього виконується підйом предмета, оскільки відповідно до правил водолазної служби заборонено здійснювати підйом, поки водолаз перебуває під водою [70,71].

Підвищення рівня підготовленості найбільш помітно впливає на ефективність виконання завдань дайверами-саперами з початковим рівнем підготовки, особливо у випадку підводного підриву вибухонебезпечного предмета. Водночас для цієї категорії персоналу несприятливі зовнішні умови можуть призводити до зниження ефективності виконання завдань підводного розмінування.

Для виконання водолазних спусків і робіт водолазами інженерних військ широко використовуються дихальні апарати типу АВА. Водолазне спорядження цього типу зарубіжного виробництва належить до спорядження з відкритою схемою дихання та призначене для дайвінгу. Дихальні апарати АВА мають низку відмінностей від апаратів, що перебувають на озброєнні інженерних військ Збройних Сил України ще з часів СРСР. Основними відмінностями зарубіжних дихальних апаратів типу АВА від радянських зразків, зокрема апарата АВМ-5, що входить до складу водолазного спорядження типу СВУ-3, є відсутність резервного запасу повітря та можливості подачі повітря по шлангу.

Для кращого розуміння зазначених відмінностей доцільно розглянути конструктивні особливості дихального апарата АВМ-5. По-перше, при закінченні робочого запасу повітря в балонах дихального апарата АВМ-5 водолаз вчасно повідомляється про необхідність закінчити роботу на глибині і підніматись на поверхню.

По-друге, об'єм робочого і запасного об'єму повітря дихального апарату АВМ-5 (час перебування під водою) розрахований таким чином, що водолаз може піднятися на поверхню без дотримання режиму декомпресії з глибин, які визначені тактико-технічними характеристиками дихального апарата. По-третє, дихальний апарат АВМ-5 має можливість під'єднання до систем подачі повітря по шлангу з поверхні, а у разі припинення повітропостачання для дихання водолаза використовується запас повітря, що міститься в балонах апарата. Таким чином, принцип роботи дихального апарата АВМ-5 забезпечує безпечне його використання з урахуванням фізіологічних особливостей організму людини під час водолазних спусків. По-четверте, штуцер гідрокомбінезона (водолазної маски) та клапанна коробка дихального апарата з'єднуються за допомогою різьбового з'єднання, що унеможливує випадіння загубника під водою у разі втрати водолазом свідомості. У зв'язку з вищевказаними особливостями конструкцій дихальних водолазних апаратів є необхідність у модернізації зарубіжних зразків водолазного спорядження, які використовуються водолазами під час російсько-українського конфлікту.

Вкрай важливим є моніторинг фізіологічного стану водолазів-підривників як до, так і після виконання професійних завдань. Крім того, важливим є подальший розвиток барофізіології (гіпербаричної медицини) як наукового напрямку, а також укомплектування відповідних підрозділів декомпресійними камерами, здатними забезпечувати необхідні режими тиску, які наразі в Україні практично відсутні. Загалом гіпербарична медицина – це метод лікування, при якому використовується підвищений атмосферний тиск, що перевищує такий показник на рівні моря. До її основних методів належить гіпербарична оксигенація, яка проводиться у барокамерах.

Також застосовується терапевтична рекомпресія або декомпресія при відповідних захворюваннях, що спрямована на мінімізацію шкідливого впливу системних газових бульбашок шляхом фізичного зменшення їх розміру та створення сприятливих умов для їх усунення і виведення надлишку

розчинених газів. Наразі в Україні спостерігається дефіцит цілеспрямованих наукових досліджень у галузі гіпербаричної фізіології, а також обмежений доступ до профільної інформації. Це не дозволяє у повному обсязі враховувати медико-біологічні ефекти під час вивчення механізмів адаптаційних і дизадаптаційних перебудов в організмі водолаза, а також удосконалювати технології практичного використання інертних газів, газових сумішей та гіпербаричної оксигенації для потреб медицини [72]. Гіпербарична фізіологія у своєму широкому спектрі досліджень має безпосереднє відношення до встановлення механізмів газообміну в організмі при перебуванні людини в умовах підвищеного барометричного і парціального тиску інертних та респіраторних газів. На сьогодні, у багатьох країнах активно продовжуються наукові дослідження у галузі водолазної медицини та гіпербаричної фізіології з урахуванням перманентного створення нових водолазних технологій, наукових досягнень біомедицини тощо. Слід звернути увагу на наявність значних індивідуальних відхилень у реакції водолазів на однакові навантаження. Навіть за однакового рівня фізичної підготовки у водолазів може спостерігатися різний ступінь переносимості чинників, пов'язаних із гіпербарією, що можуть призводити до розвитку гіперкапнії, гіпоксії та так званого гіпербаричного наркозу. Це свідчить про необхідність індивідуального відбору до водолазної професії з урахуванням спадкової (філогенетичної) схильності до впливу факторів підвищеного тиску та водного середовища. У процесі еволюції в людини не сформувалися спеціалізовані механізми адаптації до гіпербаричних умов, зокрема до підвищеного парціального тиску кисню та азоту і їх проникнення в кров.

Тому, захисні функції організму опосередковані компенсаторними реакціями з боку функціональних систем. При диханні стисненим повітрям (починаючи з глибини 30-40 метрів) проявляються ознаки змін з боку функціонального стану центральної нервової системи. Тим не менш, при збільшенні тиску порушується діяльність центральної нервової системи, що призводить

до втрати людиною працездатності [73–75]. Дихання в умовах підвищеного тиску з використанням спеціального підводного спорядження пов'язано із збільшенням опору диханню, що обмежує резервні можливості вентиляції легень. У людини активним стає вдих і видих, знижується життєва ємність легень, частота дихання зменшується, погіршуються показники бронхіальної прохідності, особливо, при зростанні вентиляції внаслідок виконання фізичної роботи. Зміни показників кислотно-лужного балансу крові після виконання фізичного навантаження під водою вказує на розвиток ознак дихального ацидозу, виникнення ретенції вуглекислого газу в організмі, що може бути пов'язано зі змінами нормальних умов газообміну в легеневій ланці транспорту респіраторних газів в організмі. Варто зауважити, що у водолазів захворювання серцево-судинної системи виникають частіше, ніж у інших категорій працівників, що дає підставу про віднесення цих захворювань до професійної патології. Підводне середовище характеризується антигравітаційним впливом на організм людини, в результаті чого відбувається перерозподіл крові, а кровообіг переходить на новий функціональний рівень. У такому разі, збільшується об'єм крові у грудній порожнині, підвищується центральний об'єм крові при зменшенні обсягу дихального газу в легенях. Вплив підводного середовища і підвищеного парціального тиску кисню призводять до зменшення частоти скорочень серця, а підвищений опір диханню каталізує дихальну серцеву аритмію, в результаті чого можливе виникнення порушення серцевого ритму. У гіпербаричних умовах на електрокардіограмі можуть спостерігатися зміни у вигляді синусової брадикардії та дихальної аритмії, що пов'язані з підвищенням тону парасимпатичної нервової системи. Також зростає ймовірність виникнення шлуночкових екстрасистол.

Отже, з проведеного аналізу можна дійти до висновку, щодо комплексного характеру проблеми підводного розмінування в Україні. Повний масштаб наслідків мінної кампанії та пов'язаних із нею викликів, імовірно, стане очевидним

лише після завершення війни. Уже сьогодні фіксуються випадки підривів і пошкоджень суден на морських мінах, а подальше мінування морських і річкових акваторій лише ускладнюватиме та здорожчуватиме процес їх розмінування після завершення конфлікту. З огляду на те, що Чорне море є важливою системою морських комунікацій, зокрема для транспортування зерна, стає очевидною необхідність того, щоб міжнародне співтовариство вже зараз розглядало шляхи відновлення безпечного судноплавства та морської діяльності в його акваторії [76]. Майбутнє цих зусиль залежить від розвитку міжнародного співробітництва, технологічних інновацій, тривалої комплексної підготовки персоналу усіх ланок та рівнів, ретельного стратегічного передбачення.

Висновки. 1. Проведений аналіз свідчить, що підводне розмінування є важливим елементом забезпечення безпеки морських і прісноводних акваторій України, особливо в умовах збройного конфлікту та значного забруднення водою вибухонебезпечними предметами. Ефективність таких операцій значною мірою залежить від використання сучасних систем виявлення та ідентифікації мін, зокрема гідролокаторів бокового огляду та гідролокаторів із синтетичною апертурою, які забезпечують високоточне формування акустичних зображень підводних об'єктів і підвищують точність їх класифікації.

2. Сучасні тенденції розвитку протимінної діяльності передбачають активне застосування безпілотних і дистанційно керованих підводних апаратів (AUV, ROV), що дозволяє зменшити ризику для людини під час виконання операцій пошуку та знищення мін. Водночас у складних умовах або при виконанні точних операцій із нейтралізації вибухонебезпечних предметів залучення висококваліфікованих дайверів-саперів залишається необхідним.

3. Подальший розвиток технологій підводного розмінування в Україні потребує комплексного підходу, що включає впровадження роботизованих систем, використання методів машинного

навчання для обробки гідроакустичних даних, удосконалення системи підготовки фахівців і розвиток досліджень у галузях гідроакустики,

Література.

1. Detection of rock or mine underwater from sensors using ML, IoT and web / Tamanna S. E., Nagaprapthi P. S., Likhith Kumar S., Suraj S. M., Nikhil Raj G. // *Int. J. Trendy Res. Eng. Technol.* – 2023. – Vol. 7, № 6. – DOI: 10.54473/ijtret.2023.7604.
2. Weapons: Naval Mines in the Black Sea // *Strategy Page*. – 2023. – Feb. 2. – URL: <https://www.strategypage.com/html/htwep/articles/20230202.aspx>.
3. Sea mine found on Turkey's Black Sea coast near Istanbul / Ozberk T. // *The Defense Post*. – 2024. – URL: <https://thedefensepost.com/2024/12/24/sea-mine-turkey-black-sea/>.
4. У ВМС назвали приблизну кількість мін у Чорному морі / Плетенчук Д. // *Слово і діло*. – 2024. – URL: <https://www.slovoidilo.ua/2024/07/11/novyna/suspilstvo/vms-nazvaly-pryblyznu-kilkist-min-chornomu-mori>.
5. Аналіз роботи та обов'язків підрозділів підводного розмінування, котрі займаються очищенням акваторії України від вибухонебезпечних предметів / Шевчук О. Р., Педосенко В. В. // *Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків : матеріали круглого столу (вебінару), 23 лют. 2023 р., Харків. – Харків, 2023. – С. 190–191.*
6. Порівняльний аналіз дронів для розмінування українських територій / Довбня М. // *Автоматизація та приладобудування = Automation and Development of Electronic Devices : зб. студ. наук. статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. – С. 200–206.*
7. Моделювання процесу розмінування українських територій за допомогою роботизованих комплексів / Кухаренко Д. В., Косюта Р. В. // *Manufacturing & Mechatronic Systems : Proc. VII Int. Conf., 19–20 Oct. 2023, Kharkiv. – 2023.*
8. Ukraine says Russia planting mines in Black Sea as shipping perils grow / Saul J. // *Reuters*. – 2022. – Mar. 30. – URL: <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-says-russia-planting-mines-black-sea-shipment-perils-grow-2022-03-30/>.
9. Методика обґрунтування оперативних технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами Державної служби України з надзвичайних ситуацій / Соловйов П. І., Стрілець В. М., Бляшенко О. В., Серватюк В. М., Пруський А. В. // *Наук. вісн.: Цивільний захист та пожежна безпека*. – 2022. – № 2 (14). – С. 108–111.
10. Світова глобальна проблема розмінування: український вектор / Горбулін В. П. // *Вісн. Нац. акад. наук України*. – 2022. – № 2. – С. 3–13. – DOI: 10.15407/visn2022.02.003.
11. Standard operating procedures for humanitarian underwater demining in South Eastern Europe. – URL: <https://old.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/references-publications/Humanitarian-Underwater-Demining-in-South-Eastern-Europe.pdf>.
12. A review of underwater mine detection and classification in sonar imagery / Hożyń S. // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – 2943. – DOI: 10.3390/electronics10232943.
13. Model-based approach to the detection and classification of mines in sidescan sonar / Reed S., Petillot Y., Bell J. // *Appl. Opt.* – 2004. – Vol. 43. – P. 237–246. – DOI: 10.1364/AO.43.000237.
14. Underwater object classification in sidescan sonar images using deep transfer learning and semisynthetic training data / Huo G., Wu Z., Li J. // *IEEE Access*. – 2020. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978880.
15. The future of mine warfare: a quicker, safer approach. – URL: <https://minwara.org/blog/wp-content/uploads/2019/04/The-FutureofAirborneMineCountermeasures.pdf>.
16. U.S. Navy mines // *U.S. Navy Fact File*. – URL: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2167942/us-navy-mines/>.
17. The special case of sea mines / Tellez O. L. L., Borghgraef A., Mersch E. // *InTech*. – 2017. – DOI: 10.5772/66994.

18. Fusion of adaptive algorithms for the classification of sea mines using high resolution side scan sonar in very shallow water / Aridgides T., Fernández M., Dobeck G. // OCEANS 2001. An Ocean Odyssey : Conf. Proc., Honolulu, HI, USA, 2001. – Vol. 1. – P. 135–142. – DOI: 10.1109/OCEANS.2001.968692.
19. Deep learning applied to underwater mine warfare / Denos K., Ravaut M., Fagette A., Lim H. S. // OCEANS 2017. – 2017. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/OCEANSE.2017.8084910.
20. A study on detection and classification of underwater mines using neural networks / Geethalakshmi S., Subashini P., Ramya S. // Int. J. Soft Comput. Eng. – 2011. – Vol. 1. – P. 150–157.
21. Convention (VIII) relative to the laying of automatic submarine contact mines. The Hague, 18 October 1907. – URL: <https://ihl-databases.icrc.org/en/ihl-treaties/hague-conv-viii-1907>.
22. NATO glossary of terms and definitions (English and French) AAP-06 (Edition 2019). – NATO Standardization Office (NSO), 2019. – URL: https://www.coemed.org/files/stanags/05_AAP/AAP-06_2019_EF.pdf.
23. Convention on the prohibition of the use, stockpiling, production and transfer of anti-personnel mines and on their destruction. – URL: <https://www.apminebanconvention.org/en/convention-text>.
24. San Remo manual on international law applicable to armed conflicts at sea, 12 June 1994. – URL: <https://ihl-databases.icrc.org>.
25. Survey on the developments of unmanned marine vehicles: intelligence and cooperation / Bae I., Hong J. // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – 4643. – DOI: 10.3390/s23104643.
26. Navy invests in new mine warfare technology / Tadjdeb Y. // National Defense Magazine. – 2020. – Vol. 104, № 797. – P. 36–37. – URL: <https://www.jstor.org/stable/27022952>.
27. From classical approach to deep-learning: a review on underwater target segmentation with sonar image / Cai W., Zhu J., Zhang M. // Neurocomputing. – 2025. – Vol. 637. – 130087. – DOI: 10.1016/j.neucom.2025.130087.
28. Structural prior driven regularized deep learning for sonar image classification / Gerg I. D., Monga V. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2022. – Vol. 60. – Art. no. 4200416. – P. 1–16. – DOI: 10.1109/TGRS.2020.3045649.
29. Side-scan sonar imagery fusion for sea mine detection and classification in very shallow water / Aridgides T., Fernandez M. F., Dobeck G. J. // Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI : Proc. SPIE. – 2001. – Vol. 4394. – DOI: 10.1117/12.445440.
30. Underwater acoustic performance of SiC foam ceramic materials / Şahiner B., Özbek S., Baykara T., Demirural A. // SN Appl. Sci. – 2023. – Vol. 5. – DOI: 10.1007/s42452-023-05333-8.
31. Sea mine detection framework using YOLO, SSD and EfficientDet deep learning models / Munteanu D., Moina D., Zamfir C. G., Petrea Ş. M., Cristea D. S., Munteanu N. // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – 9536. – DOI: 10.3390/s22239536.
32. Image mining applications for underwater environment management – a review and research agenda / Nair R. S., Agrawal R., Dominic S., Kumar A. // Int. J. Inf. Manag. Data Insights. – 2021. – DOI: 10.1016/j.jjime.2021.100023.
33. Energy-aware framework for underwater mine detection system using underwater acoustic wireless sensor network / Al-Ahmadi S. A. // Electronics. – 2023. – Vol. 12. – 4598. – DOI: 10.3390/electronics12224598.
34. Sonar rock vs mine prediction using XGBoost and randomized search CV / Devi Lakshmi G. S., Divyadharshini R. S., Nanditha M. // Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci. – 2023. – Vol. 5, № 5. – DOI: 10.56726/IRJMETS39065.
35. Synthetic aperture and 3D imaging for mine hunting sonar / Florin F., Fohanno F., Quidu I., Malkasse J.-P. // Undersea Defence Technology Europe 2004 : Proc. Conf. – 2004.
36. A review on deep learning-based approaches for automatic sonar target recognition / Neupane D., Seok J. // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – 1972. – DOI: 10.3390/electronics9111972.
37. Survey on deep learning based computer vision for sonar imagery / Steiniger Y., Kraus D., Meisen T. // Eng. Appl. Artif. Intell. – 2022. – Vol. 114. – 105157. – DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105157.

38. The sea of mines: how will the Black Sea mine demining operation affect the region's security? / Romanenko V. // Ukraine Crisis Media Center. – URL: <https://uacrisis.org/en/the-sea-of-mines>.
39. Conceptual design of future undersea unmanned vehicle (UUV) system for mine disposal / Song K. S., Chu P. C. // IEEE Syst. J. – 2014. – Vol. 8, № 1. – P. 43–51. – DOI: 10.1109/JSYST.2012.2210592.
40. AUV-based side-scan sonar real-time method for underwater-target detection / Tang Y., Wang L., Jin S., Zhao J., Huang C., Yu Y. // J. Mar. Sci. Eng. – 2023. – Vol. 11. – P. 690. – DOI: 10.3390/jmse11040690.
41. Amplitude-based dominant component analysis for underwater mines extraction in side scans sonar / Attaf Y., Boudraa A. O., Ray C. // OCEANS 2016 : Proc. Conf. – 2016. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485712.
42. An overview of machine learning within embedded and mobile devices – optimizations and applications / Ajani T. S., Imoize A. L., Atayero A. A. // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 4412. – DOI: 10.3390/s21134412.
43. A multistatic synthetic aperture sonar to detect a cylinder lying on a rough interface: experimental results / Hervé C., Sessarego J.-P., Guillermin R. et al. // 9th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA 2008) : Proc. Conf., Paris, France, July 2008. – P. 321–326.
44. Study on metal mine detection from underwater sonar images using data mining and machine learning techniques / Padmaja V., Rajendran V., Vijayalakshmi P. // J. Ambient Intell. Humaniz. Comput. – 2021. – Vol. 12. – DOI: 10.1007/s12652-020-01958-4.
45. A statistically-based method for the detection of underwater objects in sonar imagery / Abu A., Diamant R. // IEEE Sensors J. – 2019. – Vol. 19, № 16. – P. 6858–6871. – DOI: 10.1109/JSEN.2019.2912325.
46. Research on unmanned underwater vehicle threat assessment / Yao H., Wang H., Li Y., Wang Y., Han C. // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 11387–11396. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2891940.
47. An adaptive clustering protocol for medium-scale wireless sensor networks / Xu Z., Zhang S., Zhang X., Bao B., Li P. // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2007) : Proc. Int. Conf. – 2007. – P. 2436–2439. – DOI: 10.1109/WICOM.2007.607.
48. Scaled-YOLOv4: scaling cross stage partial network / Wang C. Y., Bochkovskiy A., Liao H. Y. M. // Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR). – 2021. – P. 13024–13033. – DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.01283.
49. Classification of electroencephalogram signals with combined time and frequency features / Iscan Z., Dokur Z., Demiralp T. // Expert Syst. Appl. – 2011. – Vol. 38. – P. 10499–10505. – DOI: 10.1016/j.eswa.2011.02.110.
50. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. // Adv. Neural Inf. Process. Syst. – 2012. – Vol. 25. – DOI: 10.1145/3065386.
51. What's mine is yours: pretrained CNNs for limited training sonar ATR / McKay J., Gerg I., Monga V., Raj R. G. // arXiv. – 2017. – DOI: 10.48550/arXiv.1706.09858.
52. Transfer-learning with deep neural networks for mine recognition in sonar images / Warakagoda N., Midtgaard Ø. // Institute of Acoustics : Proc. Conf. – 2018. – Vol. 40.
53. Target localization in synthetic aperture sonar imagery using convolutional neural networks / Berthomier T., Williams D. P., Dugelay S. // OCEANS 2019 : Proc. Conf. – 2019. – P. 1–9. – DOI: 10.23919/OCEANS40490.2019.8962774.
54. Development of an artificial neural network with oscillatory neurons for spectral image recognition / Peleshchak R., Lytvyn V., Peleshchak I., Vysotska V. // Bull. Natl. Univ. "Lviv Polytechnic". Ser.: Inf. Syst. Netw. – 2020. – № 7. – P. 16–23. – DOI: 10.23939/sisn2020.07.016.
55. Non-linear convolutional neural network for automatic detection of mine-like objects in sonar imagery / Dzieciuch I., Gebhardt D., Barngrover C., Parikh K. // Proc. Int. Conf. – 2017. – P. 309–314. – DOI: 10.1007/978-3-319-52621-8_27.
56. Deep convolutional neural network target classification for underwater synthetic aperture sonar imagery / Galusha A. P., Dale J., Keller J., Zare A. // Proc. SPIE. – 2019. – DOI: 10.1117/12.2519521.

57. Reducing energy consumption in wireless sensor networks using a routing protocol based on multi-level clustering and genetic algorithm / Rezaeipanah A., Nazari H., Abdollahi M. // *Int. J. Wireless Microw. Technol.* – 2020. – № 3. – P. 1–16. – DOI: 10.5815/ijwmt.2020.03.01.
58. An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks / Wang K., Gao H., Xu X., Jiang J., Yue D. // *IEEE Sensors J.* – 2015. – Vol. 16. – DOI: 10.1109/JSEN.2015.2428712.
59. Underwater object images classification based on convolutional neural network / Zhu K., Tian J., Huang H. // *Signal Processing : Proc. Conf.* – 2018. – P. 301–305. – DOI: 10.1109/SIPROCESS.2018.8600472.
60. On pre-trained image features and synthetic images for deep learning / Hinterstoisser S., Lepetit V., Wohlhart P., Konolige K. // *arXiv*. – 2017. – DOI: 10.48550/arXiv.1710.10710.
61. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. – URL: https://www.researchgate.net/publication/316445503_Underwater_target_classification_in_synthetic_aperture_sonar_imagery_using_deep_convolutional_neural_networks.
62. The importance of humanitarian underwater demining / Mijajlović V. // *NCT CBNW*. – URL: <https://nct-cbnw.com/the-importance-of-humanitarian-underwater-demining/>.
63. What are the duties of a clearance diver? / Walilck J. // *Quora*. – URL: <https://www.quora.com/What-are-the-duties-of-a-clearance-diver>.
64. Mathematical model of underwater demining by dipper divers of the SESU / Soloviev I. // *Municipal Economy of Cities*. – 2021. – Vol. 6 (166). – P. 175–183. – URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5887>.
65. Search and recovery of munitions by divers / Rancich T. // *Mar. Technol. Soc. J.* – 2011. – Vol. 45, № 6. – P. 75–79. – DOI: 10.4031/MTSJ.45.6.92.
66. Modernization of breathing apparatus used by divers of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine when performing diving descents and works / Melnyk R., Karshen A., Lyszchinsky O. // *Prospects for the development of weapons and military equipment of the ground forces : Proc. Int. Sci. Tech. Conf., Lviv, 14–15 May 2020.* – Lviv, 2020. – P. 318–319.
67. Педагогічні умови формування професійних якостей у військовослужбовців-водолазів : автореф. дис. ... канд. пед. наук : 13.00.04 / Окіпняк А. С. – Хмельницький : Нац. акад. держ. прикордон. служби України ім. Б. Хмельницького, 2004. – 20 с.
68. The role of explosive ordnance disposal divers in eliminating the danger generated by naval mines / Onţică A., Gordeş A. // *Land Forces Acad. Rev.* – 2024. – Vol. 29. – P. 219–226. – DOI: 10.2478/raft-2024-0023.
69. The Far East clearance diving team / Gillam M. – URL: https://www.mcdoa.org.uk/FECDT_History.htm.
70. Як готують українських військових водолазів-саперів / Богач А. // *АрміяInform.* – 2023. – URL: <https://armyinform.com.ua/2023/05/30/yak-gotuyut-ukrayinskyh-vijskovykh-vodolaziv-saperiv/>
71. Regularities of air consumption during underwater mine clearance of water areas / Solovyov I. I., Stetsyuk E. I., Strylets V. M. // *Проблеми надзвичайних ситуацій.* – 2020. – № 2 (32). – С. 132-144.
72. Actual aspects of hyperbaric physiology and medico-biological effects of inert gases / Trinka I. S., Moiseyenko Ye. V. // *Ukr. J. Military Medicine.* – 2023. – Vol. 4, № 3. – P. 49–62. – DOI: 10.46847/ujmm.2023.3(4)-049.
73. Основи гіпербаричної фізіології та медичного забезпечення водолазних спусків : навч. посіб. / Моїсеєнко Є. В., Трінька І. С. – Київ : МП Леся, 2022. – 247 с.
74. Physiological mechanisms of divers adaptation to the conditions of deepwater dives in the Arctic / Dmitrouk A. I., Gulyar S. A., Ilyin V. N., Moiseenko E. V. // *Joint Meeting on Diving and Hyperbaric Medicine (EUBS).* – Amsterdam, 1990. – P. 303–311.
75. Effects of inert gas narcosis on behavior: a critical review / Fowler B., Ackles K. N., Porlier G. // *Undersea Biomed. Res.* – 1985. – Vol. 12, № 4. – P. 369–402.
76. Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield / Bekker J., Schmid J. B. // *ORION.* – 2006. – Vol. 22. – DOI: 10.5784/22-1-30.

References.

1. Tamanna, S. E., Nagapraphi, P. S., Likhith Kumar, S., Suraj, S. M., & Nikhil Raj, G. (2023). Detection of rock or mine underwater from sensors using ML, IoT and web. *International Journal of Trendy Research in Engineering and Technology*, 7(6). doi: 10.54473/ijtret.2023.7604.
2. Strategy Page. (2023). Weapons: Naval mines in the Black Sea. Retrieved from: <https://www.strategypage.com/htm/htweap/articles/20230202.aspx>.
3. Ozberk, T. (2024). Sea mine found on Turkey's Black Sea coast near Istanbul. *The Defense Post*. Retrieved from: <https://thedefensepost.com/2024/12/24/sea-mine-turkey-black-sea/>.
4. Pletenchuk, D. (2024). U VMS nazvaly pryblyznu kilnist min u Chornomu mori [The Navy announced the approximate number of mines in the Black Sea]. *Slovo i Dilo*. Retrieved from : <https://www.slovoidilo.ua/2024/07/11/novyna/suspilstvo/vms-nazvaly-pryblyznu-kilnist-min-chornomu-mori> [In Ukrainian].
5. Shevchuk, O. R., & Pedosenko, V. V. (2023). Analiz roboty ta obov'iazkiv pidrozdiliv pidvodnoho rozminuvannia, kotri zaimaiutsia ochyshchenniam akvatorii Ukrainy vid vybukhonebezpechnykh predmetiv [Analysis of the work and responsibilities of underwater demining units engaged in clearing the waters of Ukraine from explosive hazards]. In *Zapobihannia vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii, reahuvannia ta likvidatsiia yikh naslidkiv: materialy kruhloho stolu (vebinaru)*, 23 February 2023, Kharkiv (pp. 190–191). Kharkiv [In Ukrainian].
6. Dovbnia, M. (2024). Porivnialnyi analiz droniv dlia rozminuvannia ukrainskykh terytorii [Comparative analysis of drones for demining Ukrainian territories]. In *Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2024)* (pp. 200–206). Kharkiv: KhNURE [In Ukrainian].
7. Kukharenko, D. V., & Kosiuta, R. V. (2023). Modeliuvannia protsesu rozminuvannia ukrainskykh terytorii za dopomohoiu robotyzovanykh kompleksiv [Modeling the process of demining Ukrainian territories using robotic systems]. In *Manufacturing & Mechatronic Systems: Proceedings of the VII International Conference*, 19–20 October 2023, Kharkiv. Retrieved from: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/44110fef-c226-4354-b1eb-7af487eb8039/content> [In Ukrainian].
8. Saul, J. (2022). Ukraine says Russia planting mines in Black Sea as shipping perils grow. *Reuters*. Retrieved from: <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-says-russia-planting-mines-black-sea-shipment-perils-grow-2022-03-30/>.
9. Soloviov, P. I., Strilets, V. M., Bliashenko, O. V., Servatiuk, V. M., & Pruskyi, A. V. (2022). Metodyka obruntuvannia operatyvno-tekhnichnykh rekomendatsii shchodo skorochennia chasu pidvodnoho rozminuvannia vodolazamy-saperamy Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii [Methodology for substantiating operational and technical recommendations for reducing the time of underwater demining by diver-sappers of the State Emergency Service of Ukraine]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2(14), 108–111 [In Ukrainian].
10. Horbulin, V. P. (2022). Svitova hlobalna problema rozminuvannia: Ukrainskyi vektor [The global problem of demining: The Ukrainian vector]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (2), 3–13. DOI: 10.15407/vsn2022.02.003 [In Ukrainian].
11. Mine Action Standards. (n.d.). Standard operating procedures for humanitarian underwater demining in South Eastern Europe. Retrieved from: <https://old.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/references-publications/Humanitarian-Underwater-Demining-in-South-Eastern-Europe.pdf>.
12. Hożyń, S. (2021). A review of underwater mine detection and classification in sonar imagery. *Electronics*, 10, 2943. doi: 10.3390/electronics10232943.
13. Reed, S., Petillot, Y., & Bell, J. (2004). Model-based approach to the detection and classification of mines in sidescan sonar. *Applied Optics*, 43, 237–246. doi: 10.1364/AO.43.000237.
14. Huo, G., Wu, Z., & Li, J. (2020). Underwater object classification in sidescan sonar images using deep transfer learning and semisynthetic training data. *IEEE Access*. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2978880.

15. Minwara. (2019). The future of mine warfare: A quicker, safer approach. Retrieved from: <https://minwara.org/blog/wp-content/uploads/2019/04/The-FutureofAirborneMineCountermeasures.pdf>.
16. U.S. Navy. (n.d.). U.S. Navy mines. Retrieved from: <https://www.navy.mil/Resources/Fact-Files/Display-FactFiles/Article/2167942/us-navy-mines/>.
17. Tellez, O. L. L., Borghgraef, A., & Mersch, E. (2017). The special case of sea mines. In *Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. doi: 10.5772/66994.
18. Aridgides, T., Fernández, M., & Dobeck, G. (2001). Fusion of adaptive algorithms for the classification of sea mines using high resolution side scan sonar in very shallow water. In *OCEANS 2001: An Ocean Odyssey (Vol. 1, pp. 135–142)*. doi: 10.1109/OCEANS.2001.968692.
19. Denos, K., Ravaut, M., Fagette, A., & Lim, H. S. (2017). Deep learning applied to underwater mine warfare. In *OCEANS 2017 (pp. 1–7)*. doi: 10.1109/OCEANSE.2017.8084910.
20. Geethalakshmi, S., Subashini, P., & Ramya, S. (2011). A study on detection and classification of underwater mines using neural networks. *International Journal of Soft Computing Engineering*, 1, 150–157.
21. International Committee of the Red Cross. (1907). Convention (VIII) relative to the laying of automatic submarine contact mines. Retrieved from: <https://ihl-databases.icrc.org/en/ihl-treaties/hague-conv-viii-1907>.
22. NATO Standardization Office. (2019). NATO glossary of terms and definitions (AAP-06). Retrieved from: https://www.coemed.org/files/stanags/05_AAP/AAP-06_2019_EF.pdf.
23. International Campaign to Ban Landmines. (n.d.). Convention on the prohibition of the use, stockpiling, production and transfer of anti-personnel mines and on their destruction. Retrieved from: <https://www.apminebanconvention.org/en/convention-text>.
24. International Committee of the Red Cross. (1994). San Remo manual on international law applicable to armed conflicts at sea. Retrieved from: <https://ihl-databases.icrc.org>.
25. Bae, I., & Hong, J. (2023). Survey on the developments of unmanned marine vehicles: Intelligence and cooperation. *Sensors*, 23, 4643. doi: 10.3390/s23104643.
26. Tadjdeb, Y. (2020). Navy invests in new mine warfare technology. *National Defense Magazine*, 104(797), 36–37. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/27022952>.
27. Cai, W., Zhu, J., & Zhang, M. (2025). From classical approach to deep-learning: A review on underwater target segmentation with sonar image. *Neurocomputing*, 637, 130087. doi: 10.1016/j.neucom.2025.130087.
28. Gerg, I. D., & Monga, V. (2022). Structural prior driven regularized deep learning for sonar image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–16. doi: 10.1109/TGRS.2020.3045649.
29. Aridgides, T., Fernandez, M. F., & Dobeck, G. J. (2001). Side-scan sonar imagery fusion for sea mine detection and classification in very shallow water. In *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI (Vol. 4394)*. doi: 10.1117/12.445440.
30. Şahiner, B., Özbek, S., Baykara, T., & Demirural, A. (2023). Underwater acoustic performance of SiC foam ceramic materials. *SN Applied Sciences*, 5. doi: 10.1007/s42452-023-05333-8.
31. Munteanu, D., Moina, D., Zamfir, C. G., Petrea, Ş. M., Cristea, D. S., & Munteanu, N. (2022). Sea mine detection framework using YOLO, SSD and EfficientDet deep learning models. *Sensors*, 22, 9536. doi: 10.3390/s22239536.
32. Nair, R. S., Agrawal, R., Domnic, S., & Kumar, A. (2021). Image mining applications for underwater environment management – A review and research agenda. *International Journal of Information Management Data Insights*. doi: 10.1016/j.jjimei.2021.100023.
33. Al-Ahmadi, S. A. (2023). Energy-aware framework for underwater mine detection system using underwater acoustic wireless sensor network. *Electronics*, 12, 4598. doi: 10.3390/electronics12224598.

34. Devi Lakshmi, G. S., Divyadharshini, R. S., & Nanditha, M. (2023). Sonar rock vs mine prediction using XGBoost and randomized search CV. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, 5(5). doi: 10.56726/IRJMETS39065.
35. Florin, F., Fohanno, F., Quidu, I., & Malkasse, J.-P. (2004). Synthetic aperture and 3D imaging for mine hunting sonar. In *Undersea Defence Technology Europe 2004: Proceedings of the Conference*.
36. Neupane, D., & Seok, J. (2020). A review on deep learning-based approaches for automatic sonar target recognition. *Electronics*, 9, 1972. doi: 10.3390/electronics9111972.
37. Steiniger, Y., Kraus, D., & Meisen, T. (2022). Survey on deep learning based computer vision for sonar imagery. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114, 105157. doi: 10.1016/j.engappai.2022.105157.
38. Romanenko, V. (n.d.). The sea of mines: How will the Black Sea mine demining operation affect the region's security? Ukraine Crisis Media Center. Retrieved from: <https://uacrisis.org/en/the-sea-of-mines>.
39. Song, K. S., & Chu, P. C. (2014). Conceptual design of future undersea unmanned vehicle (UUV) system for mine disposal. *IEEE Systems Journal*, 8(1), 43–51. doi: 10.1109/JSYST.2012.2210592.
40. Tang, Y., Wang, L., Jin, S., Zhao, J., Huang, C., & Yu, Y. (2023). AUV-based side-scan sonar real-time method for underwater-target detection. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 690. doi: 10.3390/jmse11040690.
41. Attaf, Y., Boudraa, A. O., & Ray, C. (2016). Amplitude-based dominant component analysis for underwater mines extraction in side scans sonar. In *OCEANS 2016: Proceedings of the Conference* (pp. 1–4). doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485712.
42. Ajani, T. S., Imoize, A. L., & Atayero, A. A. (2021). An overview of machine learning within embedded and mobile devices – Optimizations and applications. *Sensors*, 21, 4412. doi: 10.3390/s21134412.
43. Hervé, C., Sessarego, J.-P., Guillermin, R., et al. (2008). A multistatic synthetic aperture sonar to detect a cylinder lying on a rough interface: Experimental results. In *9th European Conference on Underwater Acoustics (ECUA 2008)* (pp. 321–326).
44. Padmaja, V., Rajendran, V., & Vijayalakshmi, P. (2021). Study on metal mine detection from underwater sonar images using data mining and machine learning techniques. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12. doi: 10.1007/s12652-020-01958-4.
45. Abu, A., & Diamant, R. (2019). A statistically-based method for the detection of underwater objects in sonar imagery. *IEEE Sensors Journal*, 19(16), 6858–6871. doi: 10.1109/JSEN.2019.2912325.
46. Yao, H., Wang, H., Li, Y., Wang, Y., & Han, C. (2019). Research on unmanned underwater vehicle threat assessment. *IEEE Access*, 7, 11387–11396. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891940.
47. Xu, Z., Zhang, S., Zhang, X., Bao, B., & Li, P. (2007). An adaptive clustering protocol for medium-scale wireless sensor networks. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2007)* (pp. 2436–2439). doi: 10.1109/WICOM.2007.607.
48. Wang, C. Y., Bochkovskiy, A., & Liao, H. Y. M. (2021). Scaled-YOLOv4: Scaling cross stage partial network. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 13024–13033). doi: 10.1109/CVPR46437.2021.01283.
49. Iscan, Z., Dokur, Z., & Demiralp, T. (2011). Classification of electroencephalogram signals with combined time and frequency features. *Expert Systems with Applications*, 38, 10499–10505. doi: 10.1016/j.eswa.2011.02.110.
50. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25. doi: 10.1145/3065386.
51. McKay, J., Gerg, I., Monga, V., & Raj, R. G. (2017). What's mine is yours: Pretrained CNNs for limited training sonar ATR. *arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.1706.09858.

52. Warakagoda, N., & Midtgaard, Ø. (2018). Transfer-learning with deep neural networks for mine recognition in sonar images. In Proceedings of the Institute of Acoustics Conference (Vol. 40).
53. Berthomier, T., Williams, D. P., & Dugelay, S. (2019). Target localization in synthetic aperture sonar imagery using convolutional neural networks. In OCEANS 2019: Proceedings of the Conference (pp. 1–9). doi: 10.23919/OCEANS40490.2019.8962774.
54. Peleshchak, R., Lytvyn, V., Peleshchak, I., & Vysotska, V. (2020). Development of an artificial neural network with oscillatory neurons for spectral image recognition. Bulletin of the National University “Lviv Polytechnic”. Series: Information Systems and Networks, (7), 16–23. doi: 10.23939/sisn2020.07.016.
55. Dzieciuch, I., Gebhardt, D., Barngrover, C., & Parikh, K. (2017). Non-linear convolutional neural network for automatic detection of mine-like objects in sonar imagery. In Proceedings of the International Conference (pp. 309–314). doi: 10.1007/978-3-319-52621-8_27.
56. Galusha, A. P., Dale, J., Keller, J., & Zare, A. (2019). Deep convolutional neural network target classification for underwater synthetic aperture sonar imagery. In Proceedings of SPIE. doi: 10.1117/12.2519521.
57. Rezaeipanah, A., Nazari, H., & Abdollahi, M. (2020). Reducing energy consumption in wireless sensor networks using a routing protocol based on multi-level clustering and genetic algorithm. International Journal of Wireless and Microwave Technologies, (3), 1–16. doi: 10.5815/ijwmt.2020.03.01.
58. Wang, K., Gao, H., Xu, X., Jiang, J., & Yue, D. (2015). An energy-efficient reliable data transmission scheme for complex environmental monitoring in underwater acoustic sensor networks. IEEE Sensors Journal, 16. doi: 10.1109/JSEN.2015.2428712.
59. Zhu, K., Tian, J., & Huang, H. (2018). Underwater object images classification based on convolutional neural network. In Signal Processing: Proceedings of the Conference (pp. 301–305). doi: 10.1109/SIPROCESS.2018.8600472.
60. Hinterstoisser, S., Lepetit, V., Wohlhart, P., & Konolige, K. (2017). On pre-trained image features and synthetic images for deep learning. arXiv. doi: 10.48550/arXiv.1710.10710.
61. Underwater target classification in synthetic aperture sonar imagery using deep convolutional neural networks. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/316445503_Underwater_target_classification_in_synthetic_aperture_sonar_imagery_using_deep_convolutional_neural_networks.
62. Mijajlović, V. (n.d.). The importance of humanitarian underwater demining. NCT CBNW. Retrieved from: <https://nct-cbnw.com/the-importance-of-humanitarian-underwater-demining/>.
63. Walilck, J. (n.d.). What are the duties of a clearance diver? Quora. Retrieved from: <https://www.quora.com/What-are-the-duties-of-a-clearance-diver>.
64. Soloviev, I. (2021). Mathematical model of underwater demining by diver divers of the SESU. Municipal Economy of Cities, 6(166), 175–183. Retrieved from: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5887>.
65. Rancich, T. (2011). Search and recovery of munitions by divers. Marine Technology Society Journal, 45(6), 75–79. doi: 10.4031/MTSJ.45.6.92.
66. Melnyk, R., Karshen, A., & Lischinsky, O. (2020). Modernization of breathing apparatus used by divers of the engineering troops of the Armed Forces of Ukraine when performing diving descents and works. In Prospects for the Development of Weapons and Military Equipment of the Ground Forces: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (pp. 318–319). Lviv.
67. Okipniak, A. S. (2004). Pedagogichni umovy formuvannia profesiinykh yakostei u viiskovoslužhbovtsiv-vodolaziv [Pedagogical conditions for the formation of professional qualities of military divers]. Abstract of PhD dissertation in Pedagogical Sciences (13.00.04). Khmelnytskyi: National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine [In Ukrainian].
68. Onțică, A., & Gordeș, A. (2024). The role of explosive ordnance disposal divers in eliminating the danger generated by naval mines. Land Forces Academy Review, 29, 219–226. doi: 10.2478/raft-2024-0023.

69. Gillam, M. (n.d.). The Far East clearance diving team. Retrieved from: https://www.mcdoa.org.uk/FECDT_History.htm.
70. Bohach, A. (2023). Yak hotuiut ukrainskykh viiskovykh vodolaziv-saperiv [How Ukrainian military diver-sappers are trained]. ArmyInform. Retrieved from: <https://armyinform.com.ua/2023/05/30/yak-gotuyut-ukrayinskyh-vijskovykh-vodolaziv-saperiv/> [In Ukrainian].
71. Solovyov, I. I., Stetsyuk, E. I., & Strylets, V. M. (2020). Regularities of air consumption during underwater mine clearance of water areas. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(32), 132–144.
72. Trinka, I. S., & Moiseyenko, Ye. V. (2023). Actual aspects of hyperbaric physiology and medicobiological effects of inert gases. *Ukrainian Journal of Military Medicine*, 4(3), 49–62. doi: 10.46847/ujmm.2023.3(4)-049.
73. Moiseienko, Ye. V., & Trinka, I. S. (2022). *Osnovy hiperbarychnoi fiziologhii ta medychnoho zabezpechennia vodolaznykh spusktiv* [Fundamentals of hyperbaric physiology and medical support of diving descents]. Kyiv: MP Lesia [In Ukrainian].
74. Dmitrouk, A. I., Gulyar, S. A., Ilyin, V. N., & Moiseenko, E. V. (1990). Physiological mechanisms of divers adaptation to the conditions of deepwater dives in the Arctic. In *Joint Meeting on Diving and Hyperbaric Medicine (EUBS)* (pp. 303–311). Amsterdam.
75. Fowler, B., Ackles, K. N., & Porlier, G. (1985). Effects of inert gas narcosis on behavior: A critical review. *Undersea Biomedical Research*, 12(4), 369–402.
76. Bekker, J., & Schmid, J. B. (2006). Planning the safe transit of a ship through a mapped minefield. *ORiON*, 22. doi: 10.5784/22-1-30.

ORCID:

Ye. Kryuchyna: 0000-0003-4157-8389

A. Kryuchyn: 0000-0002-5063-4146