

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ГІДРОАКУСТИЧНИМИ ЗАСОБАМИ

О.А. Щипцов, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель

*Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ,
пр. Академіка Глушкова, 42, Україна, e-mail: oceanography@ukr.net*

Досліджено завдання пошуку малорозмірних замулених протяжних об'єктів із використанням гідроакустичних засобів огляду дна. Цілі виявлення моделювали імпедансними та пружними циліндричними тілами в імпедансному півпросторі неконсолідованих донних відкладів. Розв'язання прямої задачі гідроакустики дає змогу оцінювати на основі розрахованих амплітуд ехосигналів реальні можливості виявлення замулених протяжних об'єктів із наперед заданими властивостями, а також визначати необхідні для цього характеристики гідроакустичної апаратури. Виявлення циліндричних об'єктів підтверджено експериментально.

Ключові слова: гідроакустика, малорозмірні протяжні циліндричні об'єкти, відбите акустичне поле, ехосигнал.

Для виявлення донних об'єктів широко використовують панорамні гідроакустичні засоби [3]. Панорамні гідролокатори незамінні під час виконання пошукових, рятувальних і ремонтних робіт на дні океану, пошуків і розробки корисних копалин, причому найефективнішими є гідролокатори бокового огляду (ГБО). Вони мають високу продуктивність і розрізнявальну здатність, що дає змогу отримати гідролокаційне зображення дна з різним ступенем детальності, побачити і оцінити особливості рельєфу різної просторової протяжності: великі підводні каньйони, хребти, локальні виходи корінних порід, окремі уламки (малорозмірні цілі, у тому числі замулені) і мікрорельєф донних осадів, що заповнюють корінні породи.

Окремим класом об'єктів виявлення є малорозмірні протяжні (які мають малі поперечні розміри і велику довжину) цілі: придонні комунікації, лінії зв'язку, трубопроводи, затонулі інженерні конструкції, об'єкти в зонах затоплення промислових відходів та ін. Здебільшого такі об'єкти замулені. Практична значущість задачі пошуку і виявлення подібних цілей очевидна.

У статті розглянуто акустичне поле, що виникає в системі антена—дно—об'єкт; визначено ехосигнал від об'єкта. На цій основі теоретично оцінено можливість виявлення замулених протяжних цілей гідроакустичними засобами [4].

На цей час відомі розв'язки широкого кола задач дифракції акустичних хвиль на пружних циліндрах і сферах. При цьому циліндричні й сферичні тіла розглядають як суцільні або тіла, що містять концентричні порожнини (товсто- і тонкостінні оболонки). Дослідженню дифракції на зазначених тілах присвячені роботи Л.М. Лямшева, Н.Д. Векслера, І.А. Толоконникова, Е.Л. Шендерова, J.J. Fagan, G.C. Gaunard, F.A. Lee, H. Uberall та ін.

Форма і розміри об'єкта, топологія і природа донних шарів, розміщення об'єкта щодо меж поділу

середовищ істотно впливають на складність відповідних моделей і визначають прийоми їх аналізу. Додаткові труднощі викликає необхідність просторової постановки задачі, врахування неоднорідності природних середовищ, а також анізотропний та імпульсний характер акустичного поля. Природно, що розгляд складних і найближчих до реальних середовищ моделей дає змогу врахувати при аналізі ті фізичні явища, які визначають тонку структуру донних ехосигналів. Від вибору моделі істотно залежить математична складність методів аналізу модельованої системи, а також трудомісткість і точність чисельних оцінок.

Задачу визначення поля відгуку дна з протяжним замуленим об'єктом математично формують так: знайти розв'язок хвильового рівняння, що задовольняє задані в моделі крайові умови. Складність розв'язку відповідної крайової задачі полягає в тому, що межі середовищ зазвичай є координатними поверхнями в різних системах координат або взагалі межі — не канонічні поверхні. Розроблено достатньо методів розв'язання таких крайових задач. Вибір методу розв'язання конкретної крайової задачі залежить від багатьох чинників, таких як простота побудови розв'язання в аналітичному вигляді, ступінь збіжності і точність розв'язку, простота фізичної інтерпретації розв'язку, можливість побудови розв'язку для просторової постановки задачі і для моделей зі складними і, можливо, пересіченими межами поділу середовищ [7, 9].

Аналіз акустичних моделей і методів дослідження реальних донних структур, що містять об'єкти виявлення, дав змогу визначити адекватні типовим умовам пошуку модельні уявлення і вибрати найдоцільніші теоретичні підходи до розв'язання поставлених крайових задач. Крайову задачу розв'язують за такою схемою [4]:

$$P \rightarrow \hat{S}_p \rightarrow \hat{S}_p^* \rightarrow \hat{C}_{p_D} \rightarrow \hat{C}_{p_D}^* \rightarrow P_D^* .$$

Розглянемо її детально. Вихідною вважаємо хвилю $P(r, \theta, \varphi)$, яка знаходиться у дальній зоні випромінювача. Замулене дно в нульовому наближенні можна вважати рідким півпростором або системою компланарних шарів; особливостями поширення акустичної хвилі у в'язкопружних або флюїдонасичених гетерогенних середовищах при цьому нехтуємо. Задачу проходження хвилі P через донну поверхню (або шари), що маскує об'єкт, розв'язують шляхом відомого зображення \hat{S} сферичної хвилі P у вигляді плоских хвиль p . Проходження останніх через донну структуру ($p \rightarrow p^*$) вивчено детально — його виражають класичним розв'язком Френеля або розв'язком задачі Бреховських [1]. Протяжний замулений об'єкт було промодельовано циліндричною імпедансною поверхнею, а також пружною оболонкою. Поле розсіювання P_D хвилі p^* , яке потрапляє на об'єкт, описуємо циліндричними функціями Ханкеля [10, 11]. Для визначення поля P_D^* , яке розсіяне об'єктом і яке пройшло через донну структуру назад до антени—приймача, використовуємо зображення \hat{C} циліндричного поля розсіювання P_D у вигляді плоских хвиль p_D . Зображення \hat{C} виходить, якщо застосувати до поля P_D циліндра інтегральне зображення Зоммерфельда [5, 6]:

$$H_n^{(1)}(z) = \pi^{-1} e^{-1/n\pi/2} \int_{-\pi/2-i\infty}^{\pi/2-i\infty} e^{i(z \cos\beta + n\beta)} d\beta.$$

При цьому слід урахувувати особливості інтегральних перетворень; застосування в перетвореннях псевдополярних координат дає змогу коректно описувати швидко згасаючі неоднорідні хвилі, що виникають під час розв'язання. Зворотне проходження хвиль p_D через донну структуру ($p_D \rightarrow P_D^*$) описуємо аналогічно структурі $p \rightarrow p^*$. Модельну задачу визначення амплітуди ехосигналу об'єкта для сталих гармонійних коливань узагальнюємо на випадок імпульсного впливу за допомогою методів гармонічного аналізу.

Результатом виконаного аналітичного розв'язку крайових задач є вирази, що визначають залежність ехосигналу від замуленого об'єкта (цілі), від акустичних параметрів середовищ і об'єкта, розмірів об'єкта, а також від потужності шару відкладів, які вкривають об'єкт, і віддаленості об'єкта від приймально-передавальної антени. Ці вирази визначають амплітудно-частотні характеристики модельного середовища, що містить об'єкт виявлення, і є основою для подальших чисельних оцінок відгуків замуленого об'єкта на заданий імпульсний вплив. Амплітуду ехосигналу в такому випадку було прийнято за основний критерій оцінювання можливості виявлення об'єкта гідроакустичними засобами.

При збудженні встановлених гармонійних коливань замулений об'єкт, який моделюємо як нескінченну кругову циліндричну імпедансну поверхню, створює ехосигнал, який описують такими виразами [4]:

у двовимірному випадку

$$P_D(r_a, \varphi_a) = e^{-2(\beta_0 d_0 + \beta_1 d_1)} \tilde{W} W \times \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n A_n e^{in\Delta} H_n^{(1)}(k_0 r_a) \cos n\varphi_a, \quad (1)$$

у тривимірному випадку

$$P_D(r_a, \varphi_a, z_a) = e^{-2(\beta_0 d_0 + \beta_1 d_1)} \tilde{W} W e^{ik_0 z_a \sin \xi_0} \times \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n A_n e^{in\zeta_0} H_n^{(1)}(k_0 r_a \cos \xi_0) \cos n\varphi_a. \quad (2)$$

де $P_D(r_a, \varphi_a)$ — акустичне поле розсіювання від замуленого об'єкта, що реєструється в точці розміщення (r_a, φ_a) приймально-передавальної антени (полярна система координат); $P_D(r_a, \varphi_a, z_a)$ — поле розсіювання від об'єкта, що реєструється в точці розміщення (r_a, φ_a, z_a) антени (циліндрична система координат); W и \tilde{W} — коефіцієнти проходження через межу поділу вода—мул і назад; визначають кут падіння звукової хвилі на поверхню дна та імпедансами граничних середовищ; $\beta_{0,1}$ — коефіцієнти згасання звукових хвиль при поширенні у водній (0) і осадовій товщі (1) на відстані $d_{0,1}$; визначають за частотою звукових коливань і властивостями середовищ; A_n — коефіцієнти при модах коливань у розкладанні поля розсіювання від об'єкта по циліндричних функціях; розраховують при визначенні поля розсіювання з умов на межі об'єкта, яку зображують як імпедансну циліндричну поверхню або пружну оболонку з наповнювачем; залежать від геометричних і фізичних характеристик об'єкта; Δ и ζ_0 — фазові спотворення мод коливань, які визначаються заломними властивостями межі, що розділяє приймально-передавальну антену та об'єкт; ξ_0 — кут, що виникає у тривимірній постановці задачі і задає орієнтацію протяжного об'єкта щодо хвильового вектора \vec{k}_0 зондувальної хвилі; $H_n^{(1)}(\cdot)$ — циліндрична функція Ханкеля 1 роду n -го порядку.

Загальний аналіз подібних між собою виразів (1) і (2) показує, що рівень амплітуди ехосигналу від замуленого об'єкта пов'язаний з факторами, найважливішими серед яких є такі:

- 1) коефіцієнти проходження з водної товщі в мул (W) і назад (\tilde{W});
- 2) згасання при поширенні у водній товщі ($e^{-2\beta_0 d_0}$) та в мулі ($e^{-2\beta_1 d_1}$);
- 3) імпедансні властивості об'єкта або властивості пружної оболонки з імпедансним наповнювачем (A_n);
- 4) хвильові розміри ($k_1 R$) об'єкта;
- 5) фактор межі поділу, наприклад $e^{in\Delta}$.

Перший фактор (W, \tilde{W}) визначається імпедансами Z_j граничних середовищ, тобто густиною середовищ ρ_j і швидкостями поширення c_j акустичних хвиль у середовищах, а також кутом падіння θ розглянутої хвилі на поверхню дна. Якщо товща відкладів, що розмежовує приймально-передавальну антену і об'єкт, утворена декількома компланарни-

ми шарами, то цей фактор визначатиметься вхідним імпедансом пакета шарів, який істотно залежить від їх потужностей h_j [1]. Оцінити особливості впливу зазначених модельних параметрів на ехосигнал від замуленого об'єкта без численних експериментів складно. З певністю можна стверджувати лише те,

що будь-яка існуюча між антеною та об'єктом шарувата або нерегулярна структура, властива товщі відкладів, ускладнює виявлення об'єкта, відбиваючи частину корисного сигналу на межах поділу середовищ або розсіюючи його на внутрішніх неоднорідностях структури.

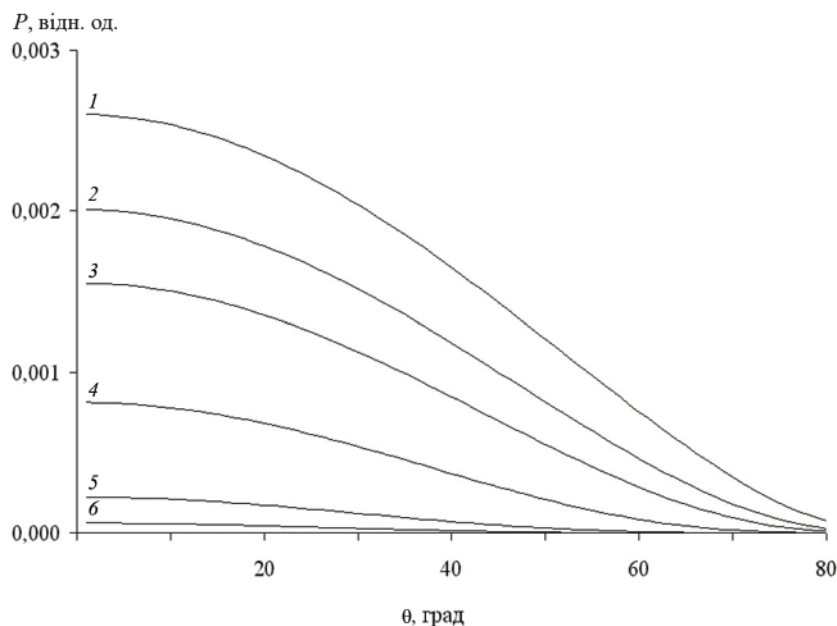


Рис. 1. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від кута падіння θ . Розраховано для різних заглиблень h_0 об'єкта у ґрунт: 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 2,0; 6 – 3,0 м

Fig. 1. Dependence of the amplitude of the echo generated by the object from the angle of incidence θ is calculated for the various holes of the object h_0 in the soil: 1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 2,0; 6 – 3,0 m

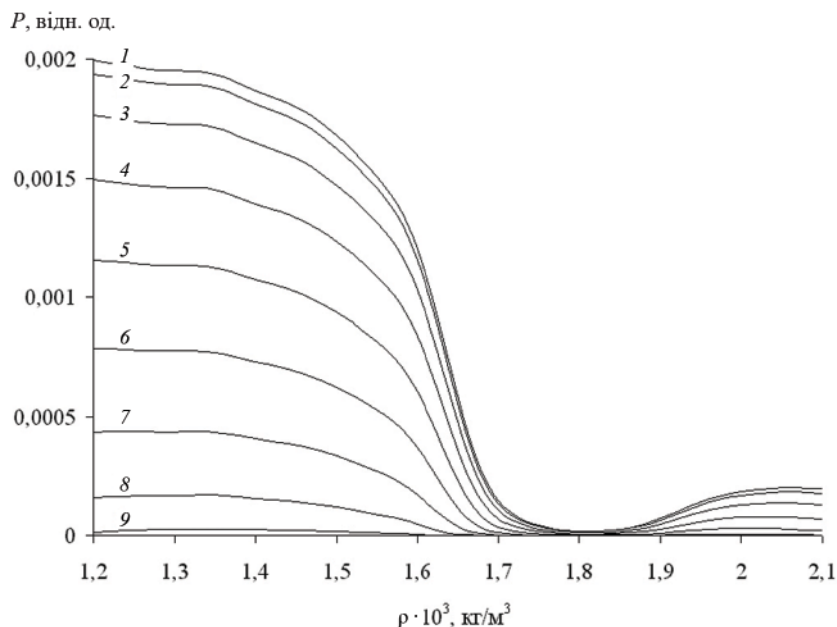


Рис. 2. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від густини ρ осадової товщі. Розраховано для різних кутів падіння θ : 1 – 0°, 2 – 10°, 3 – 20°, 4 – 30°, 5 – 40°, 6 – 50°, 7 – 60°, 8 – 70°, 9 – 80°

Fig. 2. The dependence of the echo amplitude created by the object on the density ρ_1 of the sedimentary layer is calculated for different angles of incidence θ : 1 – 0°, 2 – 10°, 3 – 20°, 4 – 30°, 5 – 40°, 6 – 50°, 7 – 60°, 8 – 70°, 9 – 80°

Другий фактор (вигляду $e^{-2\beta d}$) виражає згасання в середовищах, визначається шляхами d_j поширення хвиль і коефіцієнтами згасання β_j у середовищах, що розділяють антену і об'єкт виявлення. Згасання залежить від робочої частоти f практично лінійно і визначається типом матеріалу, що покриває об'єкт. Цей фактор залежить також від глибини h_a місця знімання, величини h_o занурення об'єкта у ґрунт,

віддаленості об'єкта від антени, акустичних властивостей товщі відкладів. Зі збільшенням відстані між антеною і ціллю ехосигнал зменшуватиметься через енергетичні втрати на розширення фронту хвилі, що до певної межі можна компенсувати збільшенням потужності випромінювача. Зі збільшенням робочої частоти f або занурення об'єкта в мул корисна частина ехосигналу істотно зменшується, що об-

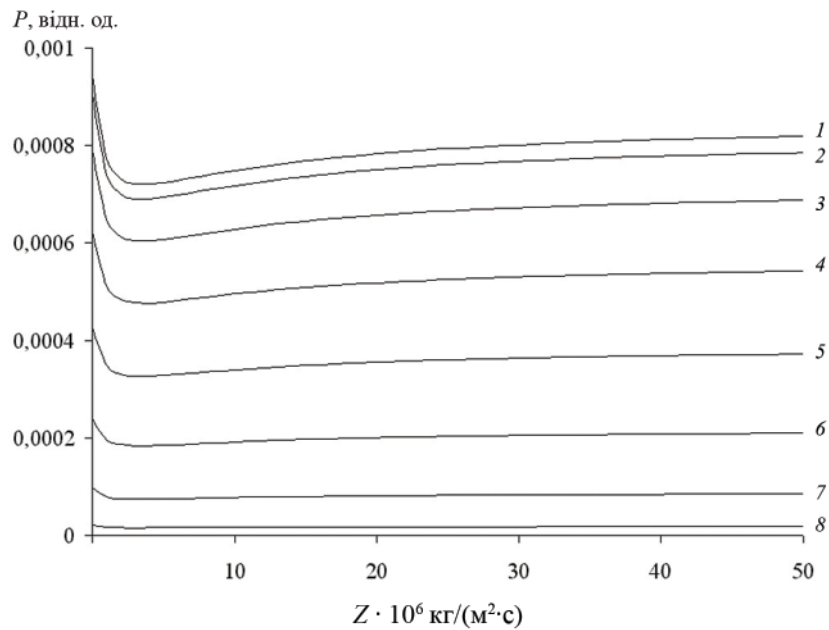


Рис. 3. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від імпедансу Z об'єкта. Розраховано для різних кутів падіння θ : 1 – 0° , 2 – 10° , 3 – 20° , 4 – 30° , 5 – 40° , 6 – 50° , 7 – 60° , 8 – 70°

Fig. 3. The dependence of the echo amplitude created by the object on the impedance Z of the object, calculated for different angles of incidence θ : 1 – 0° , 2 – 10° , 3 – 20° , 4 – 30° , 5 – 40° , 6 – 50° , 7 – 60° , 8 – 70°

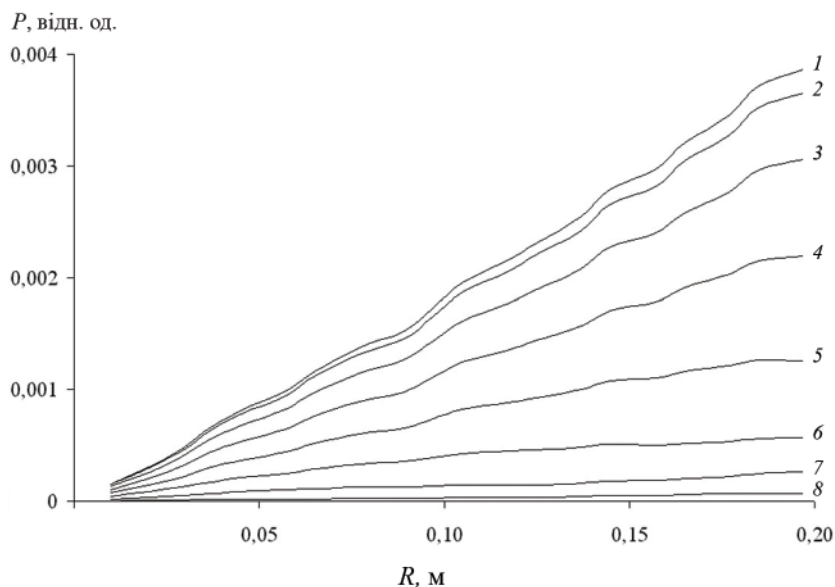


Рис. 4. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від радіуса поперечного перерізу R об'єкта. Розраховано для різних кутів падіння θ : 1 – 0° , 2 – 10° , 3 – 20° , 4 – 30° , 5 – 40° , 6 – 50° , 7 – 60° , 8 – 70° , 9 – 80°

Fig. 4. Dependence of the amplitude of the echo generated by the object on the radius of the cross-section of the object R , calculated for different angles of incidence θ : 1 – 0° , 2 – 10° , 3 – 20° , 4 – 30° , 5 – 40° , 6 – 50° , 7 – 60° , 8 – 70° , 9 – 80°

межує можливість виявлення замуленого об'єкта.

На рис. 1 показано залежність амплітуди ехо-сигналу, створюваного замуленим об'єктом, від кута падіння θ для різних заглиблень h_0 об'єкта в товщу мулу, розраховану при $\rho_1/\rho_0=1,400$, $c_1/c_0=0,980$, $h_a=50$ м, $R=0,05$ м, $Z=4,0 \cdot 10^7$ кг/м²с, $f=100 \cdot 10^3$ Гц, на рис. 2 — така сама залежність від густини ґрунту ρ для різних кутів падіння θ , розрахована при $h_a=50$ м, $h_0=1$ м, $R=0,1$ м, $Z=4,0 \cdot 10^7$ кг/м²с, $f=30 \cdot 10^3$ Гц. Для

розрахунку використані емпіричні залежності швидкості звуку $c_1=c_1(\rho_1)$ і коефіцієнта згасання у ґрунті $\beta_1=\beta_1(\rho_1)$ від густини ґрунту [2].

Третій фактор визначають акустичними властивостями матеріалу об'єкта: імпедансом Z суцільного тіла або коефіцієнтами Ламе λ та μ пружної оболонки, її густиною, а також імпедансом наповнювача. Вплив цих факторів практично неможливо розмежувати і складно оцінити без численних експериментів.

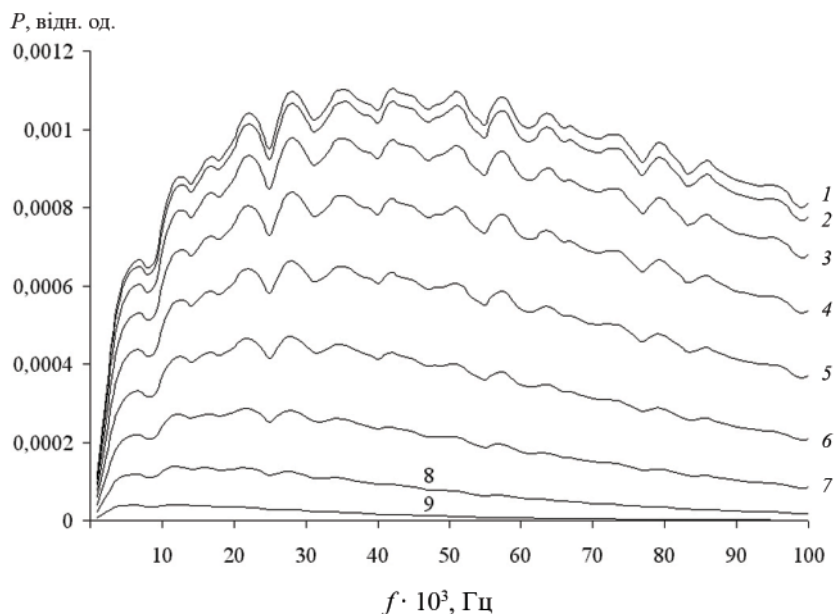


Рис. 5. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від робочої частоти f антени. Розрахована для різних кутів падіння θ : 1 — 0°, 2 — 10°, 3 — 20°, 4 — 30°, 5 — 40°, 6 — 50°, 7 — 60°, 8 — 70°, 9 — 80°

Fig. 5. The dependence of the echo amplitude generated by the object on the operating frequency f of the antenna, calculated for different angles of incidence θ : 1 — 0°, 2 — 10°, 3 — 20°, 4 — 30°, 5 — 40°, 6 — 50°, 7 — 60°, 8 — 70°, 9 — 80°

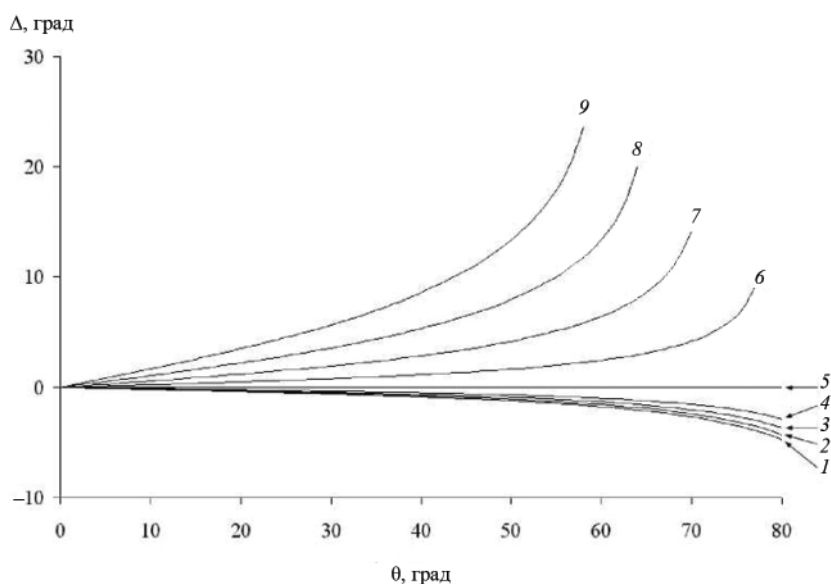


Рис. 6. Залежність фактора межі Δ від кута падіння θ . Розрахована для різних густин ρ_1 ґрунту: 1 — 1,5; 2 — 1,4; 3 — 1,6; 4 — 1,3; 5 — 1,7; 6 — 1,8; 7 — 1,9; 8 — 2,0; 9 — 2,1 $\cdot 10^3$ кг/м³

Fig. 6. Dependence of the boundary factor Δ on the angle of incidence θ , calculated for different densities ρ_1 of the soil: 1 — 1,5; 2 — 1,4; 3 — 1,6; 4 — 1,3; 5 — 1,7; 6 — 1,8; 7 — 1,9; 8 — 2,0; 9 — 2,1 $\cdot 10^3$ kg/m³

Проте існуючий в теорії дифракції масив результатів [9] дає змогу зробити кілька попередніх висновків. Можна очікувати істотне ослаблення ехосигналу від замуленого об'єкта, якщо його імпеданс близький за величиною до імпедансу навколишньої осадової товщі ($Z \approx Z_1$). Однак, як показує аналіз, навіть у цьому разі поле розсіювання від об'єкта не зникає повністю. Разом з тим при $Z \ll Z_1$ або $Z \gg Z_1$ поле розсіювання, а отже, і корисний ехосигнал різко

зростатимуть з досягненням максимуму при $Z \rightarrow 0$ і виходом на «насичення» при $Z \rightarrow \infty$. Ці два оптимальні варіанти відповідають акустично абсолютно м'якій та жорсткій поверхням. Для пружної оболонки, крім того, за певних значень товщини оболонки можливий прояв резонансних ефектів, що підвищують імовірність виявлення.

На рис. 3 показано залежність амплітуди ехосигналу, створюваного замуленим об'єктом, від імпедансу

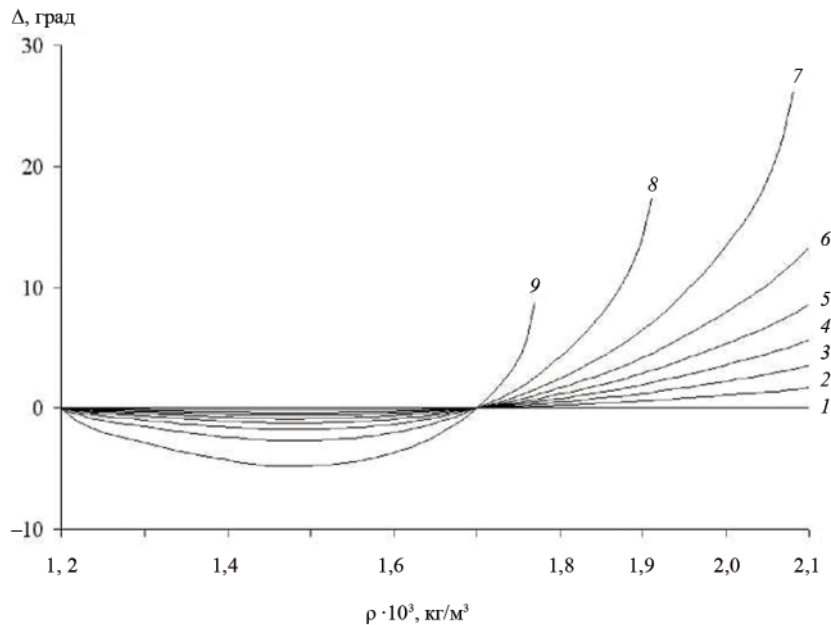


Рис. 7. Залежність фактора межі Δ від густини ρ_1 ґрунту. Розраховано для різних кутів падіння θ : 1 - 0°, 2 - 10°, 3 - 20°, 4 - 30°, 5 - 40°, 6 - 50°, 7 - 60°, 8 - 70°, 9 - 80°

Fig. 7. Dependence of the boundary factor Δ on the density ρ_1 of the soil, calculated for different angles of incidence θ : 1 - 0°, 2 - 10°, 3 - 20°, 4 - 30°, 5 - 40°, 6 - 50°, 7 - 60°, 8 - 70°, 9 - 80°



Рис. 8. Карта з траєкторією руху носія гідролокаторів бокового огляду з використанням сучасних GIS-технологій

Fig. 8. Map with the trajectory of the motion of the carrier HBO

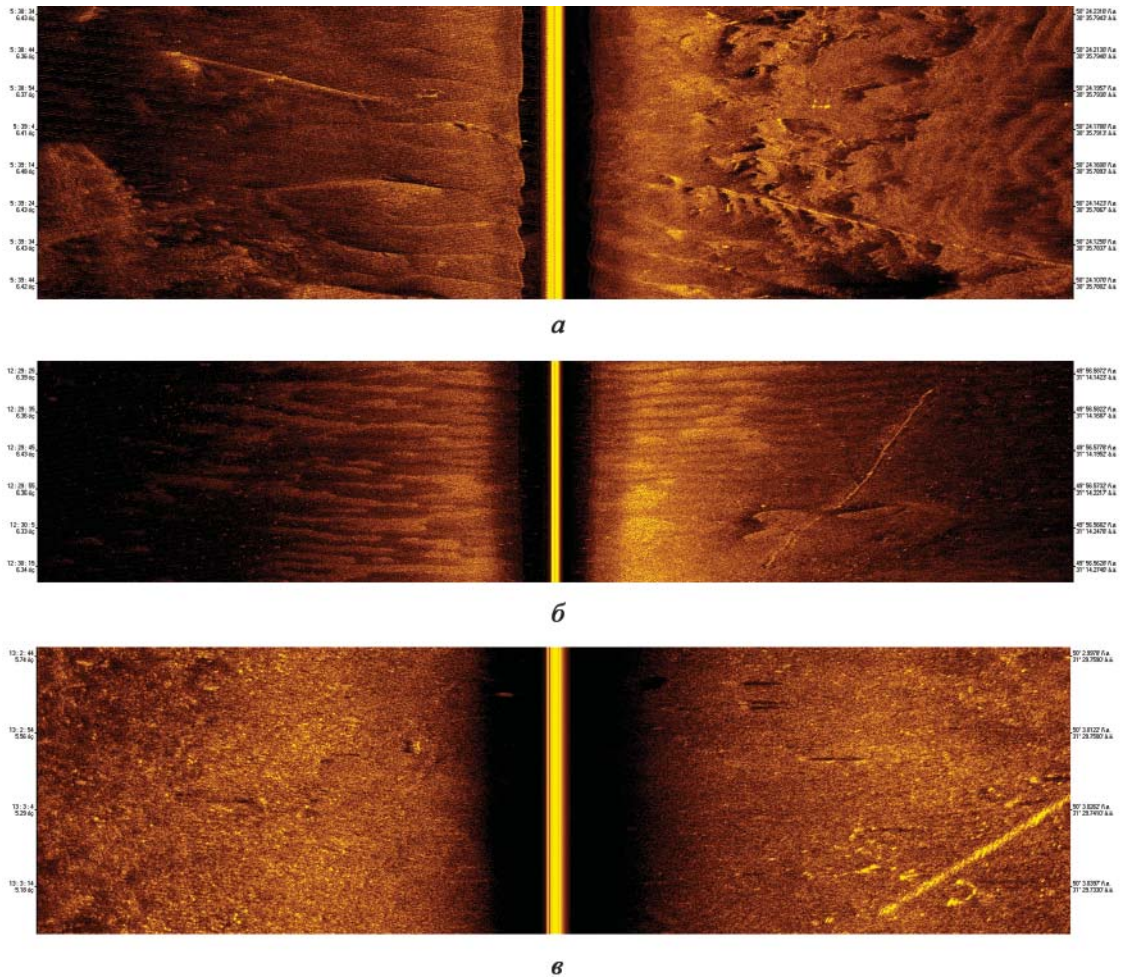


Рис. 9. Фрагменти ехограм. Дно р. Дніпро: а — частково замулений трубопровід; б — протяжний об'єкт циліндричної форми; в — трубопровід і численні малорозмірні цілі

Fig. 9. The fragments of an echogram. The bottom of the river Dnipro: а — the detected partly silted pipeline; б — an extended object of cylindrical shape; в — the detected pipeline and numerous small-scale targets

дансу Z об'єкта для різних кутів падіння θ ; її розраховано при $\rho_1/\rho_0=1,400$; $c_1/c_0=0,980$; $h_a=50$ м; $R=0,05$ м; $Z=4,0 \cdot 10^7$ кг/(м²·с), $f=100$ кГц.

Четвертим фактором є хвильові розміри замуленого об'єкта. Їх визначають за радіусом R поперечного перерізу об'єкта і робочою частотою f . Згідно з теорією дифракції на циліндричних об'єктах [9, 10], тіла з великими хвильовими розмірами мають великі поля розсіювання, а отже, великі величини ехосигналу.

Залежність $P(kR)$ поля зворотного розсіювання від хвильових розмірів тіла характеризується певними особливостями.

По-перше, тіла з малими хвильовими розмірами практично не створюють поля зворотного розсіювання (обмеження знизу). Тому для виявлення малорозмірних цілей необхідно використовувати вищі частоти f акустичних хвиль, які інтенсивніше згасають в осадовій товщі (обмеження зверху). Внаслідок цього можна стверджувати, що для кожного класу замулених цілей заданого розміру існує інтервал робочих частот, в межах якого величина ехосигналу більша, ніж поза цим інтервалом.

По-друге, залежність $P(kR)$ для циліндричних тіл має спадну послідовність локальних максимумів, які формують тонку структуру усієї системи. Виявлення цих максимумів за допомогою чисельного експерименту дає змогу виділити в оптимальному інтервалі частот окремі робочі частоти, найпридатніші для виявлення об'єкта заданого розміру. Якщо об'єкт виявлений, то за варіюванням робочої частоти можна визначити послідовність спектральних максимумів і оцінити за нею поперечний розмір цілі.

Рис. 4 ілюструє залежність амплітуди ехосигналу, створюваного замуленим об'єктом, від радіуса поперечного перерізу R об'єкта. Залежність розраховано для різних кутів падіння θ : $\rho_1/\rho_0=1,400$; $c_1/c_0=0,980$; $h_a=50$ м; $h_o=1$ м; $Z=4,0 \cdot 10^7$ кг/м²·с; $f=100 \cdot 10^3$ Гц. Залежність амплітуди ехосигналу, створюваного об'єктом, від робочої частоти f антени розраховано для різних кутів падіння θ при $\rho_1/\rho_0=1,400$; $c_1/c_0=0,980$; $h_a=50$ м; $h_o=1$ м; $R=0,05$ м; $Z=4,0 \cdot 10^7$ кг/м²·с (рис. 5)

Фактор межі поділу має вигляд $e^{in\Delta}$, причому Δ характеризує заломлення акустичної хвилі на межі,

і є фазовим спотворенням мод коливань у розкладанні поля розсіювання об'єкта за циліндричними хвилями. Для акустично «прозорої» межі кожна мода коливань виявляється неспотвореною, і розв'язок зводиться до визначення поля розсіювання від об'єкта, відповідно до теорії дифракції.

На рис. 6, 7 показано залежності величини Δ від кута падіння θ та густини ρ_1 товщі донних відкладів. Розрахунок здійснений для докритичних кутів падіння з урахуванням емпіричної залежності $c_1(\rho_1)$ [2].

Таким чином, акустична межа, що розділяє приймально-передавальну антену і замулений об'єкт, задає рівень амплітуди ехосигналу, проте циліндричний характер поля розсіювання від об'єкта зберігається. Використаний при оцінюванні ехосигналу від замуленого об'єкта спосіб інтегрального зображення поля розсіювання дає змогу отримати аналітично точний розв'язок, який застосовують для об'єктів, що розміщуються безпосередньо під межею поділу середовищ, та для об'єктів, дуже занурених у товщу осадов.

Вирази (1) і (2) в остаточному вигляді не містять інтегральних характеристик і зображень, за винятком типового для задач дифракції розкладання поля розсіювання. В результаті фактори, що входять до цих характеристик, отримують чітку фізичну інтерпретацію, тому чисельне оцінювання амплітуди ехосигналу є ефективним.

У період з 8 по 14 вересня 2018 р. державні установи «Держгідрографія» та «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України» виконали спільні комплексні науково-дослідні експедиційні дослідження на окремих акваторіях Канівського водосховища р. Дніпро. Було отримано нові детальні гідрографічні та океанографічні дані щодо стану річкового середовища, рельєфу дна, навігаційних небезпек, а також затонулих об'єктів (рис. 8). Зазначені дослідження зумовлені необхідністю поліпшення навігаційно-гідрографічного забезпечення безпеки судноплавства на внутрішніх водних шляхах України, зокрема, шляхом отримання нових детальних гідроакустичних та геоморфологічних даних стосовно рельєфу дна, виявлення навігаційних небезпек, а також затонулих об'єктів, у тому числі замулених і малорозмірних.

Площове гідроакустичне знімання дна та водної товщі загальною площею понад 50 км² дало змогу виявити та дослідити затоплені об'єкти природного і техногенного походження (рис. 9).

Загалом при дослідженні дна окремих акваторій Канівського водосховища за площею було знайдено більш як 1000 характерних об'єктів штучного та природного походження. Ці об'єкти потребують додаткового вивчення й реєстрації на картах для можливості їх моніторингу та повторного дослідження з метою підвищення ефективності навігаційно-гідрографічного забезпечення судноплавства на внутрішніх водних шляхах.

Отримані гідроакустичні, гідрографічні та гідрологічні дані доповнили гідрографічний фрагмент (річковий модуль), який спільно розробляють профільні установи Мінінфраструктури та НАН України, банку цифрових океанографічних даних НАН України з метою підвищення ефективності навігаційно-гідрографічного забезпечення судноплавства.

Висновки

1. Знайдено аналітичний вираз для ехосигналу, створюваного об'єктом, що розміщується в осадовій товщі, має велику довжину і малий радіус поперечного перерізу. Побудовано математичну модель поширення звукової хвилі через імпедансні півпростори, одне з яких містить циліндричне тіло з імпедансною поверхнею. Модель досить проста і разом з тим адекватно відображає специфіку хвильових полів у реальних середовищах. Виконані перетворення значно спрощують кінцевий варіант відповіді і дають змогу будувати ясні та ефективні фізичні інтерпретації, а також чисельно оцінювати ехосигнали без істотних витрат часу.

2. Показано, що на величину ехосигналу від замуленого об'єкта діють багато факторів, а саме:

- конфігурація приймально-передавальної антени і об'єкта відносно дна;
- робоча частота антени і форма зондувального імпульсу;
- акустичні властивості приповерхневого шару осадової товщі;
- акустичні властивості об'єкта виявлення;
- поперечні і поздовжні розміри об'єкта.

Аналіз впливу кожного з цих чинників на величину ехосигналу дає змогу визначати оптимальні для виявлення об'єкта умови огляду, а отже, виділяти інтервали акустичних і конфігураційних параметрів середовищ, в межах яких об'єкт може бути виявлений гідроакустичним засобом. Для цього розроблено алгоритми і програми оцінювання амплітуди розсіяної замуленим об'єктом акустичної хвилі за заданих модельних параметрів. Розрахунки ілюструють ступінь впливу кожного з виділених чинників на величину ехосигналу від об'єкта і тим самим на ймовірність його виявлення.

3. Показано, що величина збурення акустичного поля, зареєстрованого антеною і співвідносного з об'єктом, визначається двома основними факторами: хвильовими розмірами об'єкта і згасанням у середовищах, що розмежовують антену і об'єкт. Перший фактор, який визначають за довжиною хвилі і лінійними розмірами об'єкта, сприяє виявленню цілі. Другий фактор, який визначають за типом осадового матеріалу, відстанню, яку проходить хвиля, та за довжиною останньої, дуже обмежує можливість виявлення замуленого об'єкта з ростом робочої частоти або заглибленням об'єкта у товщу осадов.

4. Установлено, що вплив акустичних властивостей замуленого об'єкта на величину ехосигна-

лу суттєвий тільки для тіл з акустично абсолютно м'якою поверхнею, якщо ехосигнал різко зростає, і для тіл, імпеданс поверхні яких близький до імпедансу товщі донних осадів, що вкриває об'єкт, якщо ехосигнал швидко спадає, але повністю не зникає. За винятком цих двох випадків, величина імпедансу поверхні об'єкта практично не впливає на ймовірність виявлення.

5. Теоретичний аналіз і чисельне моделювання підтверджують, що існуюча між антеною та об'єктом шарувата або нерегулярна структура, властива товщі осадів, ускладнює виявлення об'єкта, відбиваючи частину корисного сигналу на межах поділу середовищ або розсіюючи його на внутрішніх неоднорідностях структури. Разом з тим показано, що межа поділу вода—мул або вода—алеврит практично не має «екранувальної» дії, на відміну, наприклад, від межі вода—пісок. В останньому випадку виявлення об'єкта практично неможливо через збільшення ділянки закритичних кутів падіння і великого згасання акустичних хвиль в осадівій товщі.

6. Розрахунки передатних функцій, що проведені для півпростору, який поглинає з об'єктом виявлення, показують складний і мінливий характер амплітудно-частотної характеристики середовища з локалізованою неоднорідністю. Це пояснюється особливостями розсіювання на об'єкті і призводить до формування різноманітної тонкої спектральної структури імпульсів відгуку, що потребує додаткового детального вивчення. Разом з тим існуючі особливості форми імпульсів відгуку середовища з об'єктом занадто слабкі і нестійкі для того, щоб за ними можна було оцінити геометричні та акустичні параметри замуленої цілі.

7. Визначено і проаналізовано особливості проходження циліндричного поля розсіювання об'єкта через плоску межу поділу середовищ. Показано, що заломлення на цій межі виражається у фазовому викривленні мод коливань у розкладанні поля розсіювання за циліндричними функціями. Для акустично «прозорої» межі акустичне поле поширюється без фазових викривлень. Межа, що розділяє приймально-передавальну антену і замулений об'єкт, впливає на рівень амплітуди ехосигналу, проте циліндричний характер поля розсіювання від об'єкта зберігається. Необхідно зазначити, що використаний в роботі спосіб інтегрального зображення поля розсіювання дає змогу отримати аналітично точний розв'язок, який застосовують як для об'єктів, що перебувають безпосередньо під межею поділу середовищ, так і для об'єктів, дуже занурених у товщу відкладів.

8. Виявлено, що основним параметром, за яким можна підвищити ймовірність виявлення замуленої цілі із заданими властивостями, є робоча частота приймально-передавальної антени. Показано, що для кожного класу замулених цілей існує інтервал робочих частот, в межах якого величина ехосигна-

лу більша, ніж поза цим інтервалом. Знайдено, що спадна послідовність локальних максимумів, яка характерна для більшості амплітудно-частотних характеристик циліндричних тіл, дає змогу в оптимальному інтервалі частот виділити окремі робочі частоти, найпридатніші для виявлення замуленої цілі заданого розміру.

Таким чином, теоретичний аналіз поширення акустичного поля в осадівій товщі, що містить об'єкт, який має велику довжину і малі поперечні розміри, показує принципову можливість виявлення замуленої цілі гідроакустичними засобами в окремих, умовах огляду сприятливих для пошуку. Такий аналіз підтверджений експериментально в науководослідній експедиції «Дніпро-2018». Ці умови можуть бути знайдені за допомогою розроблених алгоритмів оцінювання збурення акустичного поля замуленим тілом. Вони мають вигляд оптимальних інтервалів акустичних і конфігураційних параметрів елементів побудованої теоретичної моделі. Такі оптимальні інтервали, що розраховують для кожного окремого випадку, можуть бути використані для існуючих гідроакустичних засобів пошуку малорозмірних об'єктів як рекомендовані для підвищення ймовірності виявлення цілей.

Список бібліографічних посилань

1. Бреховских Л.Н. Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1977. 488 с.
2. Бунчук А.В., Житковский А.Ю. Рассеяние звука дном океана в мелководье. *Акустический журнал*. 1980. Т. 28, вып. 5. С. 641-654.
3. Гончар А.И., Голод О.С., Клочан Ю.А., Шлычек Л.И. Теоретические основы создания панорамных гидроакустических систем. Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 1999. 296 с.
4. Гончар А.И., Писанко И.Н., Шлычек Л.И. и др. Исследование возможностей обнаружения гидролокационными методами затонувших объектов с малым поперечным размером и большой длиной: Отчет по НИР (заключительный). Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 2002. 220 с. № ДР 0100U004759.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Москва: Наука, 1974. 832 с.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексной переменной. Москва: Наука, 1973. 736 с.
7. Ляпин А.А., Селезнев М.Г., Собисевич Л.Е. Механико-математические модели в задачах активной сейсмологии. Москва: ГНИЦ ПГК (МФ) при КубГУ Минобразования России, 1999. 294 с.
8. Метсавээр Я.М., Векслер Н.Д., Стулов А.С. Дифракция акустических импульсов на упругих телах. Москва: Наука, 1979. 239 с.
9. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. Москва: ОИФЗ РАН, ГНИЦ ПГК (МФ) при КубГУ Минобразования России, 2001. 299 с.

10. Шейдеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. Ленинград: Судостроение, 1972. 352 с.

11. Шейдеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. Ленинград: Судостроение, 1989. 304 с.

Надійшла до редакції 14.11.2019 р.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

А.А. Щипцов, С.Г. Федосеев, А.И. Шундель

Государственное учреждение «Научный гидрофизический центр Национальной академии наук Украины», г. Киев, просп. Академика Глушкова, 42, Украина, e-mail: oceanography@ukr.net

Исследована задача поиска малоразмерных заиленных протяженных объектов с использованием гидроакустических средств обзора дна. Цели обнаружения моделировались импедансными и упругими цилиндрическими телами в импедансном полупространстве неконсолидированных донных отложений. Решение прямой задачи гидроакустики позволяет оценивать на основе рассчитанных амплитуд эхосигналов реальные возможности обнаружения заиленных протяженных объектов с наперед заданными свойствами, а также определять необходимые для обнаружения характеристики гидроакустической аппаратуры.

Ключевые слова: гидроакустика, малоразмерные протяженные цилиндрические объекты, отраженное акустическое поле, эхосигнал.

THEORETICAL SUBSTANTIATION AND EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE DETECTION OF CYLINDRICAL OBJECTS BY HYDROACOUSTIC MEANS

A.A. Schiptsov, S.G. Fedoseenkov, A.I. Shundel

State Institution «Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kiev, Akademika Glushkova Ave., 42, Ukraine, e-mail: oceanography@ukr.net

Purpose. Theoretical study and experimental confirmation of the possibility of detecting by using sonar methods of silted objects with a small cross section and a large length.

Design/methodology/approach. Analytical determination of the acoustic field disturbance created by the object.

Findings. The problem of theoretically determining the amplitude of an echo signal from a silted cylindrical object is solved, calculations of the echo signals are performed depending on the impedance characteristics of the object and media, the relative position of the sonar antenna, the bottom surface and the object, as well as on the sounding wavelength and transverse dimensions of the object. The possibility of detecting cylindrical objects, including small-sized ones, with the help of hydroacoustic tools during the Dnepr-2018 research expedition has been experimentally confirmed.

Practical value/implications. The obtained results are new, they allow to assess the real possibilities of detecting silted objects with a small cross section and a large length, and also make it possible to determine the characteristics of sonar equipment necessary for detection.

Keywords: hydroacoustic, long low-sized silted cylindrical objects, echo-signal

References:

1. Brehovskih L.N. Volnyi v sloistyyih sredah. Moscow: Nauka, 1977. 488 s.
2. Bunchuk A.V., Zhitkovskiy A.Yu. Rasseyaniye zvuka dnom okeana v melkovodnyih. Akusticheskiy zhurnal. 1980. T. 28, vyip. 5. P. 641-654.
3. Gonchar A.I., Golod O.S., Klochan Yu.A., Shlyichek L.I. Teoreticheskie osnovy sozdaniya panoramnyih gidroakusticheskikh sistem. Zaporozhe: NTTs PAS NAN Ukrainyi, 1999. 296 p.
4. Gonchar A.I., Pisanko I.N., Shlyichek L.I., Klimenko L.A., Chirik A.S. Issledovanie vozmozhnostey obnaruzheniya gidrolokatsionnyimi metodami zailennyih ob'ektov s malyim poperechnym razmerom i bolshoy dlinoy: Otchet po NIR (zaklyuchitelnyiy). Zaporozhe: NTTs PAS NAN Ukrainyi, 2002. 220 s. N DR 0100U004759.
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnyih rabotnikov i inzhenerov). Moscow: Nauka, 1974. 832 p.
6. Lavrentev M.A., Shabat B.V. Metody teorii funktsiy kompleksnoy peremennoy. Moscow: Nauka, 1973. 736 p.
7. Lyapin A.A., Seleznev M.G., Sobisevich L.E. Mehaniko-matematicheskie modeli v zadachah aktivnoy seysmologii. Moscow: GNITs PGK (MF) pri Kub GU Minobrazovaniya Rossii, 1999. 294 p.
8. Metsaveer Ya.M., Veksler N.D., Stulov A.S. Difraktsiya akusticheskikh impulsov na uprugih telah. Moscow: Nauka, 1979. 239 p.
9. Sobisevich L.E., Sobisevich A.L. Volnovyye protsessy i rezonansy v geofizike. Moscow: OIFZ RAN, GNITs PGK (MF) pri Kub GU Minobrazovaniya Rossii, 2001. 299 p.
10. Sheyderov E.L. Volnovyye zadachi gidroakustiki. Leningrad: Sudostroenie, 1972. 352 p.
11. Sheyderov E.L. Izlucheniye i rasseyaniye zvuka. Leningrad: Sudostroenie, 1989. 304 p.

Received 14/11/2019