

# Акустичні прилади та системи

УДК 534.2

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.6.134022](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.6.134022)

## Визначення первинних класифікаційних ознак монохроматичного джерела звуку в мілкому морі

Чайка<sup>f</sup> О. С., ORCID [0000-0002-2501-595X](https://orcid.org/0000-0002-2501-595X)e-mail [sanyarouge@gmail.com](mailto:sanyarouge@gmail.com)Ярошенко<sup>f</sup> М. О., ORCID [0000-0001-6327-148X](https://orcid.org/0000-0001-6327-148X)e-mail [yaroshenom13@gmail.com](mailto:yaroshenom13@gmail.com)Коржик<sup>s</sup> О. В., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)e-mail [ov.korjik@aae.kpi.ua](mailto:ov.korjik@aae.kpi.ua)

Національний Технічний Університет України

"Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

**Анотація**—Робота присвячена проблемі первинної класифікації автономних рухомих технічних засобів дослідження моря. На основі класичної моделі мілкого моря, поданого плоским хвилеводом з комбінованими границями, розглянуто особливі точки векторного поля інтенсивності звукового сигналу, який створюється монохроматичним точковим джерелом та встановлено залежності позиціонування джерел звуку від змінення фази прийнятого сигналу.

Наведено результати розрахунків векторного поля інтенсивності та девіаційних характеристик прийнятого сигналу, що відповідають певній сукупності вихідних умов. При цьому встановлена відповідність таких параметрів прийнятого сигналу як знак, величина і періодичність проявів девіації частоти хвилі-носія – певним розподіленням векторного поля інтенсивності та встановлено однозначний зв'язок результатів аналізу девіаційних характеристик і горизонтів розміщення джерела звуку (що і відповідає первинним класифікаційним ознакам джерела).

Бібл. 10, рис. 11.

**Ключові слова** — інтенсивність; сингулярна точка; тиск; коливальна швидкість; мілке море; девіація; частота.

### I. ВСТУП

Сучасний стан розвитку такої області гідроакустики, як підводна телеметрія, вимагає розв'язання задач позиціонування підводних і надводних об'єктів. Проблематика підводних робіт у мілких районах морів та особливості режимів звукопідводного зв'язку показують достатню складність, а іноді й неможливість розв'язку задач визначення місцезнаходження та приналежності підводних технічних засобів у районах промислової діяльності.

Пов'язаний з таким напрямом розвиток векторно-фазових методів досліджень полів інтенсивності звуку (наприклад, [1]–[6]) надає можливість з'ясування принципів розв'язання задач первинної класифікації (підводний – надводний об'єкт) пошукових та спеціальних морських технічних засобів. Слід зазначити, що математичні підстави щодо використання перспективних векторно-фазових методів та математичне забезпечення проблеми залучає результати

робіт [1], [2], [4]–[7]. Означений напрям є перспективним і актуальним, що підтверджується відсутністю впорядкованих відомостей щодо питань первинної класифікації морських технічних засобів у мілкому морі. Отже, запропонована робота присвячена проблематиці визначення первинних класифікаційних ознак керованого автономного підводного технічного засобу та має на меті пошук та з'ясування ознак, що надають можливість визначити положення вказаного об'єкта в мілкому морі – за характеристиками прийнятого стаціонарною системою сигналів.

### II. ПОСТАНОВКА І ЗАГАЛЬНИЙ РОЗВ'ЯЗОК

Розглянемо класичний плоский регулярний хвилевод з комбінованими границями (рис. 1), який моделює мілке море і визначений в системі прямокутних координат  $xOz$ . У хвилеводі розміщені рухоме точкове монохроматичне джерело і нерухома система прийому, яка може містити один або декілька приймачів певної фізичної природи (наприклад приймачі



рv-типу). Розміщення джерела та приймальної системи в загальному випадку може бути довільним у межах глибин запропонованої ділянки мілкого моря 0-H та визначається відповідними прямокутними координатами  $xz, x_0z_0$ . Рух джерела – рівномірний та прямолінійний. Швидкість руху –  $V_{дж}$ .

Граничні умови задачі визначаються у відповідності до обраних акустично жорсткої поверхні дна та акустично м'якої поверхні, що межує з повітрям.

Акустичне поле у хвилеводі формується вказаним вище джерелом та описується за допомогою відомого виразу ([8], [9]) для сукупності поширюваних мод у вигляді безкінечної суми відповідних нормальних хвиль:

$$\varphi(r, z) = \frac{v_0}{2H} \sum_{n=0}^{\infty} H_0^{(1)}(k_n r) \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z_0\right] \times \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z\right] e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

де  $v_0$  – об'ємна швидкість точкового джерела;  $H_0^{(1)}(k_n r)$  – функція Ганкеля першого роду нульового порядку;  $r$  – похила відстань, що зв'язана з прямокутними координатами  $xz, x_0z_0$ ;  $z_0$  – глибина розташування джерела;  $z$  – глибина розташування приймача;  $H$  – глибина хвилеводу (товщина шару води);  $\omega$  – кругова частота;  $k_n$  – хвильове число n-тої моди, яке визначається формулою:

$$k_n = k \sqrt{1 - \left(\frac{(2n+1)\pi}{2Hk}\right)^2} = k \sqrt{1 - \left(\frac{(2n+1)\lambda}{4H}\right)^2}, \quad (2)$$

$k = 2\pi f / c$  – хвильове число для безмежного простору;  $\lambda = c / f$  – довжина хвилі-носія.

За допомогою відомих (наприклад, [10]) формул переходу від потенціалу до тисків  $p(x, z, t) \rightarrow p(r, t)$ , складових коливальної швидкості  $v_x(x, z, t) \rightarrow v_x(r, t)$ ,  $v_z(x, z, t) \rightarrow v_z(r, t)$  та інтенсивності звуку в роботах [1]–[3], [7] показані особливості формування векторного поля інтенсивності звуку  $J_{\Sigma}(r)$  для ситуації поширення сукупності нижніх мод та околу критичних частот у вигляді маломасштабних вихрових складових [3] або – особливих точок поля типу «вихор» і «сідло» [7].

Так, якщо:

$$p_n(x, z) = -\omega \rho_0 \frac{v_0}{2H} \sum_{n=1}^2 C_{1n} H_0^{(1)}(k_n x) e^{-i\omega t},$$

$$v_{xn}(x, z) = -\frac{v_0}{2H} \sum_{n=1}^2 k_n C_{1n}(z, z_0) H_1^{(1)}(k_n x) e^{-i\omega t}, \quad (3)$$

$$v_{zn}(x, z) = \frac{v_0}{2H} \sum_{n=1}^2 C_{2n}(z, z_0) H_1^{(1)}(k_n x) e^{-i\omega t},$$

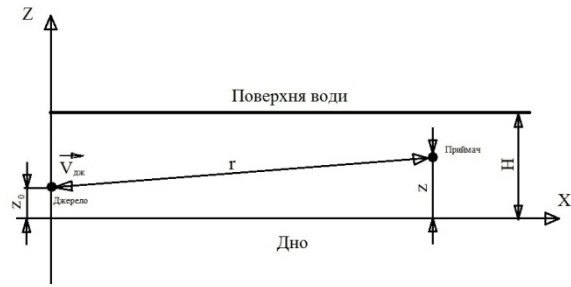


Рис. 1. Хвилеводне подання мілкого моря

де  $k_n = k \sqrt{1 - \left(\frac{(2n+1)\lambda}{4H}\right)^2}$  – хвильове число ;

$$C_{1n}(z, z_0) = \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z\right] \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z_0\right],$$

$$C_{2n}(z, z_0) = \left(\frac{(2n+1)\pi}{2H}\right) \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z\right] \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H} z_0\right] = \left(\frac{(2n+1)\pi}{2H}\right) C_{1n}(z, z_0),$$

то сукупність виразів (2) забезпечує можливість розрахунку:

- модуля вектора інтенсивності для кожної точки хвилеводу  $J_{\Sigma}(r) = \sqrt{J_x(r)^2 + J_z(r)^2}$ ,

де

$$J_x(r) = \frac{1}{T} \int_0^T p_n(r, t) v_{xn}(r, t) dt,$$

$$J_z(r) = \frac{1}{T} \int_0^T p_n(r, t) v_{zn}(r, t) dt, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

- кута нахилу вектора інтенсивності відносно горизонтальної осі хвилеводу.

Такий підхід дозволяє отримати розподілення вектора інтенсивності по хвилеводу для бажаного сполучення вихідних умов – глибини моря  $H$  (ширини хвилеводу), частоти хвилі-носія  $f$ , горизонтів розташування джерела ( $x_0, z_0$ ) і приймача ( $x, z$ ).

Результати розрахунків розподілення вектора інтенсивності для хвилеводів з акустично жорсткими та комбінованими границями [1], [7] показують обумовлене вище виникнення особливих точок, що відповідає започаткованим у [7] положенням про розвинення «сингулярних точок векторного поля» поданих за типом - як «вихор» та «сідло». Такі локальні структури векторного поля інтенсивності, а також відомості про напрямки обертання «вихорів», їхні відносні розміри та координати – в силу своєї впорядкованості та однозначній відповідності певним положенням джерела, значенню частоти та граничним умовам, дозволять визначити горизонт розташування джерела звуку та характер змінення таких параметрів прийнятого сигналу, як фаза та її похідні.



За результатами роботи [2] для ілюстрації просторового розподілення вектора інтенсивності у хвилеводі з комбінованими границями нижче наведено діаграми для придонного та поверхневого положення джерела (частота  $f=35$  Гц, глибина моря  $H=55$  м) (рис. 3, 4).

Відомо, що швидкість змінення фази визначає змінення частоти. Очевидно, що швидкість змінення фази на ділянках вільного робочого простору хвилеводу при рівномірному русі джерела і відсутності дисперсії та сингулярності (а отже, при використанні умов неперервності розв'язку (1) разом зі своїми похідними) є сталою. Проте, використання результатів робіт [1], [2], [7] щодо наявності «особливих точок» показує можливість оцінки саме швидкості змінення фази хвилі-носія в околі «локально-вихрових» утворень з ізольованим нулем тиску або «сідлового утворення» з ізольованим нулем коливальної швидкості.

Швидкість змінення фази в області «вихрового утворення» пов'язана, власне, з самим фактом існування «вихрової» або «сідлової» області, умовами збігу вказаних областей і нерухомого приймача інтенсивності приймальної системи з їхніми геометричними розмірами та швидкістю руху джерела. Зазначимо, що приймач інтенсивності містить канали тиску і канали коливальної швидкості ( або grad p ) [4].

Реєстрація швидкості змінення фази прийнятого сигналу в околі особливих точок поля інтенсивності визначатиме короткотривале змінення частоти хвилі-

носія тобто – девіації частоти. Тривалість такого змінення часто визначається розміром вихрової області та швидкістю руху джерела. Знак девіації залежатиме від розташування приймача системи: над (чи під) вихровою областю. Напрямок обертання вихору – пов'язаний з напрямком вектора коливальної швидкості, а величина девіації – від відстані фазового центру приймача від центру особливої точки.

За відсутності дисперсії і особливих точок, очевидно, такого короткотривалого змінення частоти не буде, а буде лише плавне і повільне збільшення частоти, яке обумовлене ефектом Доплера для ситуації наближення джерела сигналу до спостерігача.

Нехай фаза  $n$ -тої моди виразу (1) визначається фазовою залежністю:

$$\Phi_n(r, z) = \omega t - \varphi(k_n, x), \quad (4)$$

де  $\varphi(k_n, x)$  – фазова функція, що описує змінення фази (в радіанах) – на шляху змінення координати  $x$  за час  $t$  та враховує комплексний характер функції Ганкеля.

Похідна за часом від (4), що визначатиме частоту

$$\frac{d\Phi_n(r, z)}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega t - \varphi(k_n, x)),$$

після переходу до змінної диференціювання  $x$ :

$$dt = d\left(\frac{x}{V_{дж}}\right) = \frac{dx}{V_{дж}}$$

набуває вигляду:

$$\frac{d\Phi_n(r, z)}{dt} \rightarrow \frac{d\Phi_n(x, z)}{dt} = V_{дж} \frac{d}{dx} \left( \omega \frac{x}{V_{дж}} - \varphi_n(k_n, x) \right) = 2\pi f - V_{дж} \frac{d}{dx} (\varphi_n(k_n, x)) = 2\pi f - \Delta F, \quad (5)$$

де

$$\Delta F = Dev = V_{дж} \frac{d}{dx} (\varphi_n(k_n, x)). \quad (6)$$

Вираз (6) є девіацією частоти хвилі-носія.

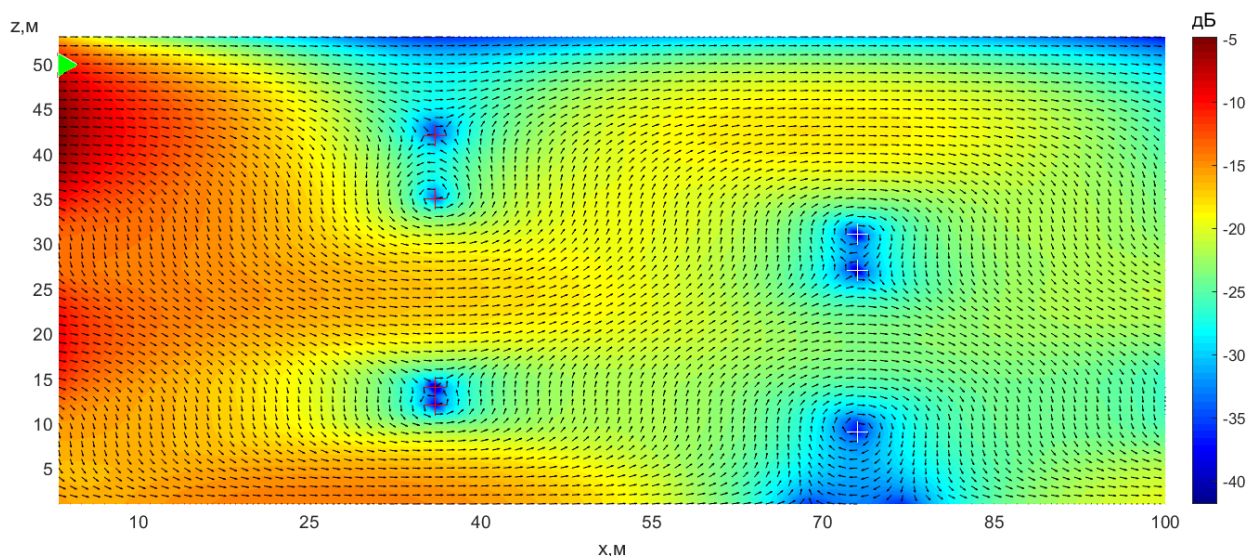
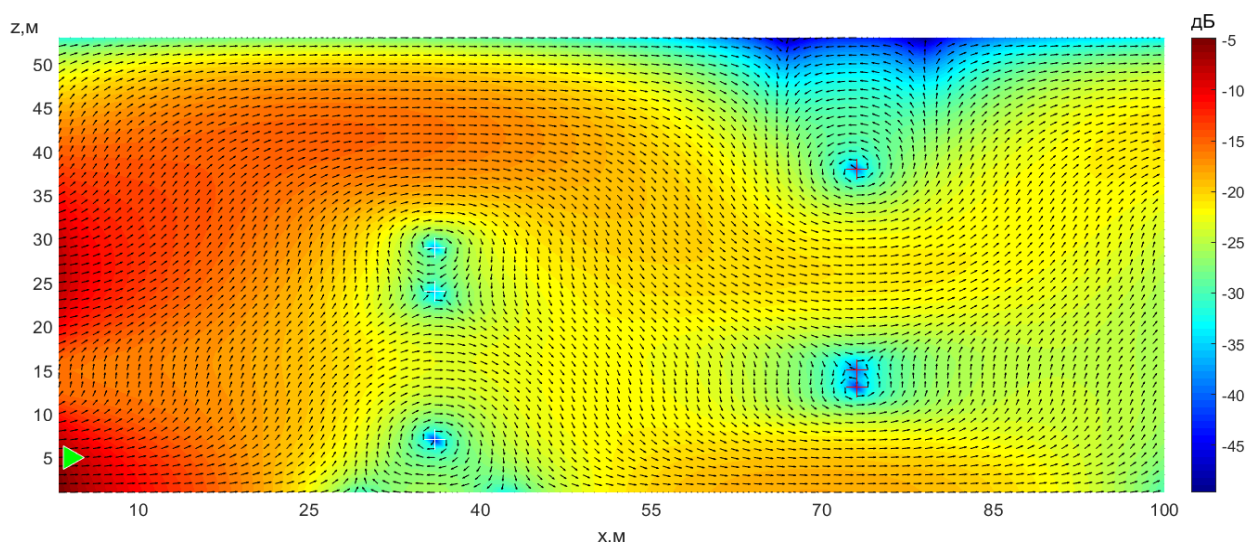
Для суперпозиції нижчих мод загальна девіація частоти хвилі-носія в околах особливих точок  $\Omega_\partial$  може бути записана як

$$\Omega_\partial = V_{дж} [Dev1 + Dev2], \quad (7)$$

де

$$Dev1 = \frac{\frac{2}{\pi x} (C_1^2(z) + C_2^2(z))}{\left[ \left( J_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + J_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 + \left( N_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + N_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$Dev2 = \frac{C_1(z) C_2(z) \left( J_1^{(1)}(k_1 x) N_0^{(1)}(k_2 x) - J_0^{(1)}(k_2 x) N_1^{(1)}(k_1 x) \right)}{\left[ \left( J_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + J_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 + \left( N_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + N_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 \right]} + \frac{C_1(z) C_2(z) \left( J_1^{(1)}(k_2 x) N_0^{(1)}(k_1 x) - J_0^{(1)}(k_1 x) N_1^{(1)}(k_2 x) \right)}{\left[ \left( J_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + J_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 + \left( N_0^{(1)}(k_1 x) C_1(z) + N_0^{(1)}(k_2 x) C_2(z) \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

Рис.2 Розподілення вектора інтенсивності  $H=55$  м,  $f=35$  Гц,  $z_0=50$  мРис.3 Розподілення вектора інтенсивності  $H=55$  м,  $f=35$  Гц,  $z_0=55$  м

$$C_n(z) = \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H}z\right] \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2H}z_0\right].$$

Формально, задачу зведено до розрахунку девіації частоти хвилі-носія за формулами (6 - 9) на границях областей вихрових (сідлових) утворень при потраплянні приймача в окіл вказаної особливої точки, що сама по собі є ізольованим нулем тиску або ізольованим нулем коливальної швидкості. При цьому очікувані закономірності девіації частоти хвилі носія мають відповідати на питання щодо горизонту розташування джерела звуку.

### III. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для з'ясування обставин ухвалення рішення щодо класу джерела (занурене або надводне) слід:

- спираючись на розрахункові дані про формування векторного поля інтенсивності встановити відповідність отриманого розподілення

інтенсивності певним горизонталом розміщення джерела;

- визначити характер (величину і знак) девіації частоти хвилі-носія в областях розміщення приймачів з врахуванням результатів отриманого розподілення поля інтенсивності.

Розрахункові дослідження проведено із залученням підходів робіт [1], [2] та наведено на рис. 2 для наступних ситуацій: глибина моря  $H=55$  м; частота хвилі-носія  $f=35$  Гц. Розміщення джерела: біля дна ( $z_0=5$  м) і біля поверхні ( $z_0=50$  м). Зелений трикутник показує положення джерела. Особливі точки позначено мітками.

Розглянемо рис. 2 та рис. 3. Діаграми однозначно визначають відповідність структури поля інтенсивності – розміщенню джерела звуку і подають дві групи особливих точок, які розташовані в перерізах хвилеводу з певним просторовим періодом (показано лише 2 перерізи для одного просторового періоду). Відмі-

тимо, що сталість позиціонування відповідних особливих точок у перерізах зберігається при зміні горизонту джерела в межах до 20 відсотків глибини хвилеводу при відрахування від дна і до 40 відсотків глибини хвилеводу при відрахування від поверхні.

Для обох випадків розташування джерела («біля поверхні», «біля дна») – положення перерізів з особливими точками відносно перерізу джерела – однакові  $x=35$  м,  $x=75$  м. Кожне утворення в своєму перерізі містить «вихори» й «сідла». Для фіксованого положення джерела напрямком обертання вихорів від перерізу до перерізу змінюється на протилежний. При зануренні джерела на максимальну глибину, напрямки обертання всіх вихрових утворень в свою чергу змінюються на  $180^\circ$  та зберігають характер відмінності обертання від перерізу до перерізу.

Встановлення приймальної системи на горизонтах виникнення придонних особливих точок є засобом, що забезпечить відповідь на питання: «Де розташоване джерело звуку?». При цьому реєстрацію сигналу слід виконувати приймачами *pv*-типу із застосуванням каналу реєстрації тиску в «сідловій» точці і каналу реєстрації коливальної швидкості в точці «вихору». Проте, внесення приймача тиску на периферію вихрової області, яка визначається як розрахований окіл вихрової складової, дозволяє проілюструвати можливості девіаційної характеристики прийнятого сигналу щодо встановлення її відповідності заглибленню джерела.

Як приклад можливої ситуації застосуємо два приймача тиску, що розміщені в придонній області на горизонтах  $z_1=H/10$ ,  $z_2=H/10$  від дна і забезпечують реєстрацію девіації частоти, яка визначається за виразами (7 - 9). Завдяки руху джерела вихрове утворення набігає на приймачі і частота прийнятого сигналу має відхилитись від значення частоти хвилі-носія. Це відхилення ілюструють рис. 4 - рис.11. При цьому для околу вихрової області виявлено загальну закономірність, яка полягає в наступному:

- якщо **приймач** потрапляє в область **над вихором, що обертається за годинниковою стрілкою**, то **девіація** частоти відбувається зі знаком «плюс». Якщо приймач розміщено **нижче** цього **вихору**, то **девіація** відбувається зі знаком «мінус».
- якщо **приймач** потрапляє в область **над вихором, що обертається проти годинникової стрілки**, то **девіація** частоти має знак «мінус», а якщо приймач розміщено **нижче** цього **вихору**, то **девіація** – зі знаком «плюс».

Очевидно, що вказані закономірності стануть в нагоді при визначенні певного горизонту розміщення джерела.

Розглянемо ситуацію визначення девіаційних характеристик при використанні двох приймачів (рис. 4 - рис.11).

#### А. Джерело біля поверхні

Перший приймач розташовано на горизонті  $z_1$  (частотна залежність подана синім кольором), другий на горизонті  $z_2$  (червоний колір). Горизонт першого

вихрового утворення  $z_6$ , що лежить в перерізі  $x=75$  м (рис.2), – відповідає придонному вихору, який обертається за годинниковою стрілкою. Вихрове утворення потрапляє на приймач. У цьому випадку можливі наступні варіанти:

- 1)  $z_6 > z_2 > z_1$ . Вихор вище обох приймачів. У каналі приймача 2 реєструється збільшення девіації зі знаком «мінус», а канал приймача 1 або взагалі не фіксує змінення частоти, або фіксує менше значення змінення (рис. 4).
- 2)  $z_6 < z_1 < z_2$ . Вихор нижче обох приймачів. У каналі приймача 1 реєструється збільшення частоти зі знаком «плюс», а в каналі приймача 2 або взагалі не буде зміни частоти, або зміна суттєво менша (рис.5).
- 3)  $z_1 < z_6 < z_2$ . Вихор між приймачами. Тут у каналі приймача 1 буде зафіксовано зміну частоти зі знаком «мінус», а в каналі приймача 2 – зі знаком «плюс» (рис.6).

При подальшому русі джерела приймальна система потрапляє в окіл придонного вихору перетину, що знаходиться на відстані  $x=35$  м. Вихор обертається проти годинникової стрілки. Взаємне розташування приймача та вихрового околу визначатимуть аналогічні зміни частоти хвилі-носія, але зі зміною знаків на протилежні, наприклад, для ситуації  $z_6 > z_2 > z_1$ , повторюваність виникнення девіації з вказаними ознаками формує поняття про наявність саме надводного джерела.

#### В. Джерело біля дна

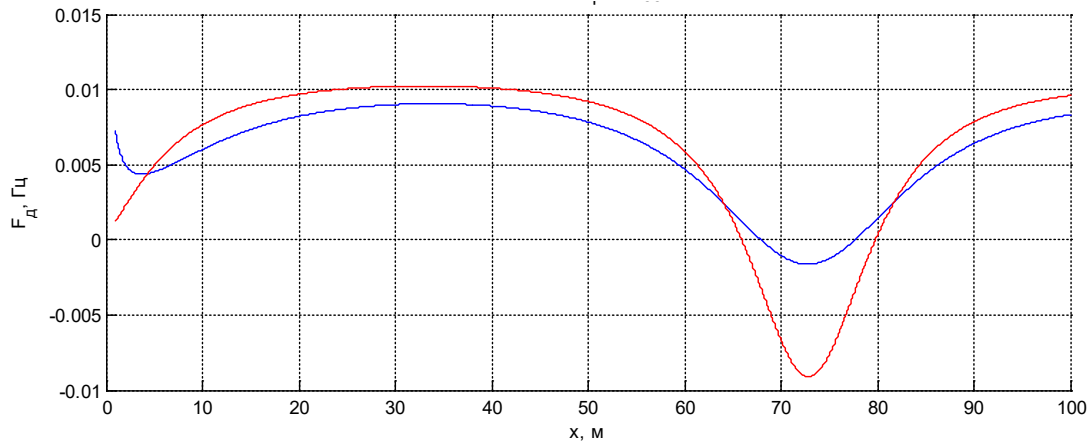
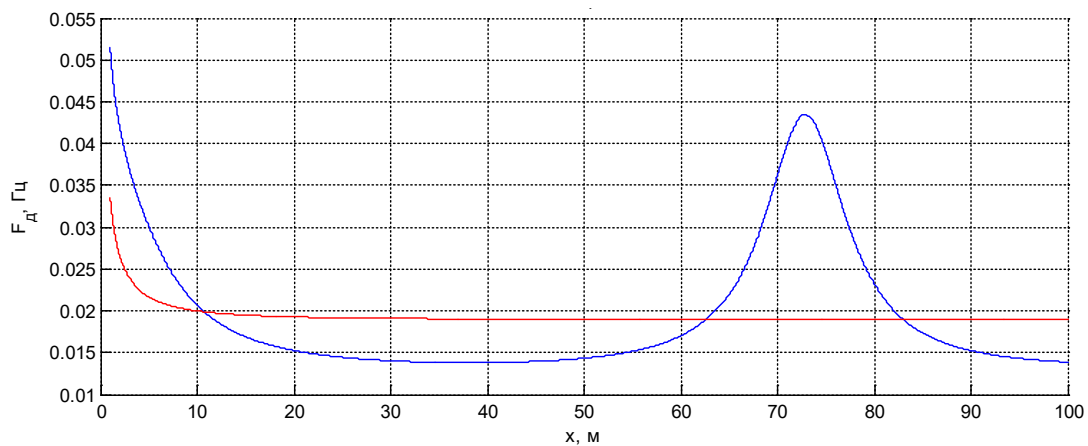
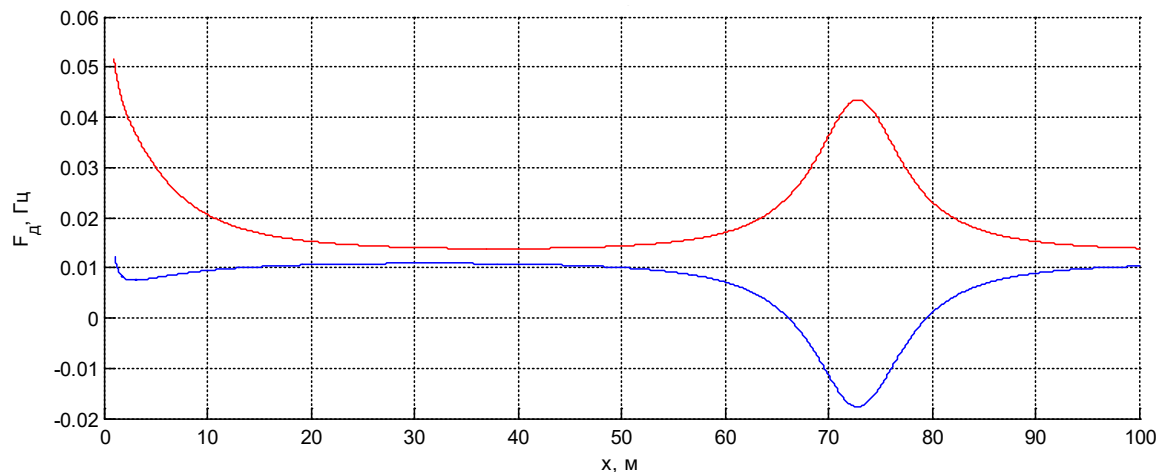
За умови незмінності положення приймачів при заглибленні джерела загальна картина розподілення вектора інтенсивності змінюється (рис. 3), що обумовлює змінення результатів реєстрації девіації частоти. Девіаційні характеристики наведено на рис. 8 – рис. 11.

Придонне вихрове утворення перерізу  $x=75$  м змінило своє положення – піднялось 3-5 м і обертається проти годинникової стрілки (рис.3). Відповідно, змінилося положення груп особливих точок в перетині  $x=35$  м.

Такі змінення роблять можливою лише ситуацію:  $z_6 > z_2 > z_1$ . Вихор вище обох приймачів. У каналі приймача 2 реєструється збільшення девіації зі знаком «плюс», а канал приймача 1 може фіксувати менше змінення частоти (рис. 8). При подальшому русі джерела приймальна система потрапляє в окіл придонного вихору, що знаходиться в перетині  $x=35$  м, де в залежності від взаємного розташування приймача та вихрового околу розглянемо наступні варіанти:

- 1)  $z_6 > z_2 > z_1$ . Вихор вище обох приймачів. В каналі приймача 2 реєструється збільшення девіації зі знаком «мінус», а канал приймача 1 або взагалі не фіксує змінення частоти, або фіксує менше значення (рис. 9).

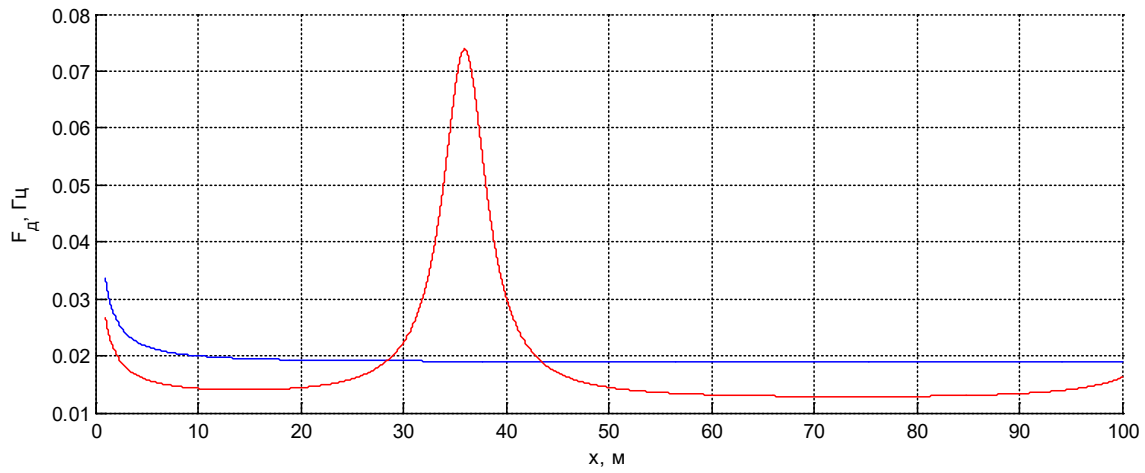
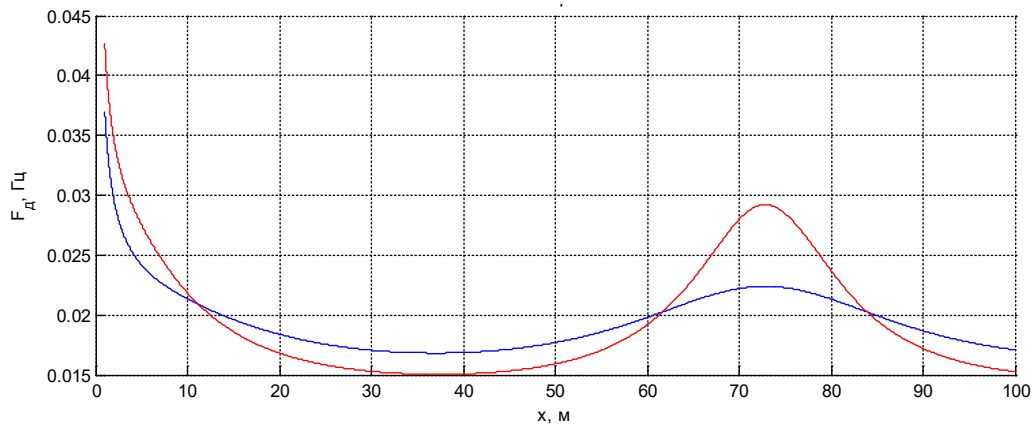
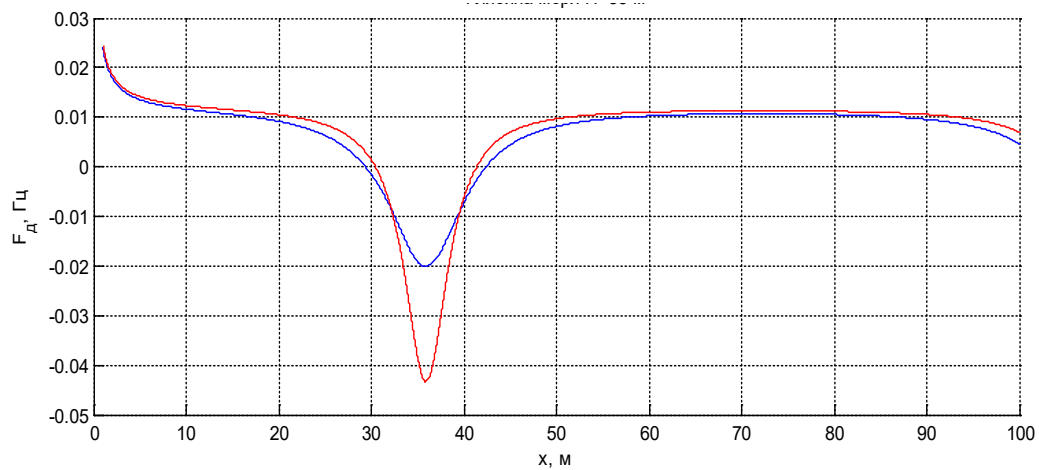


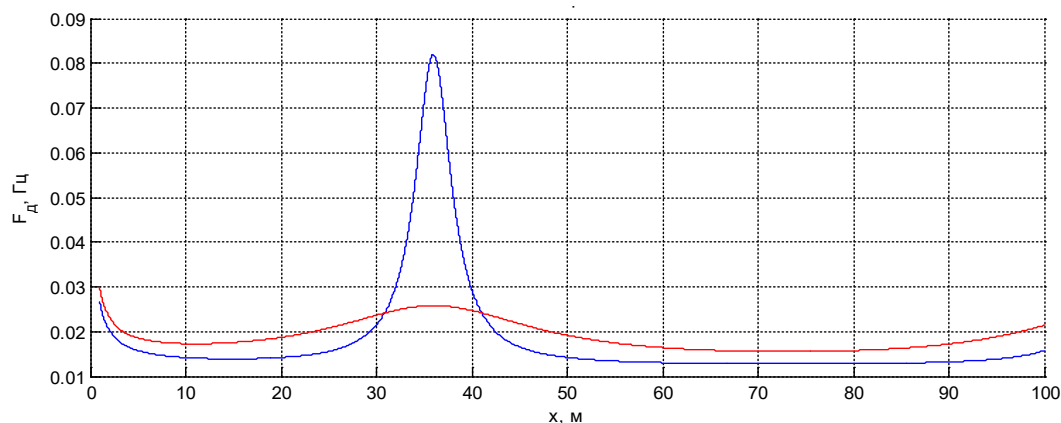
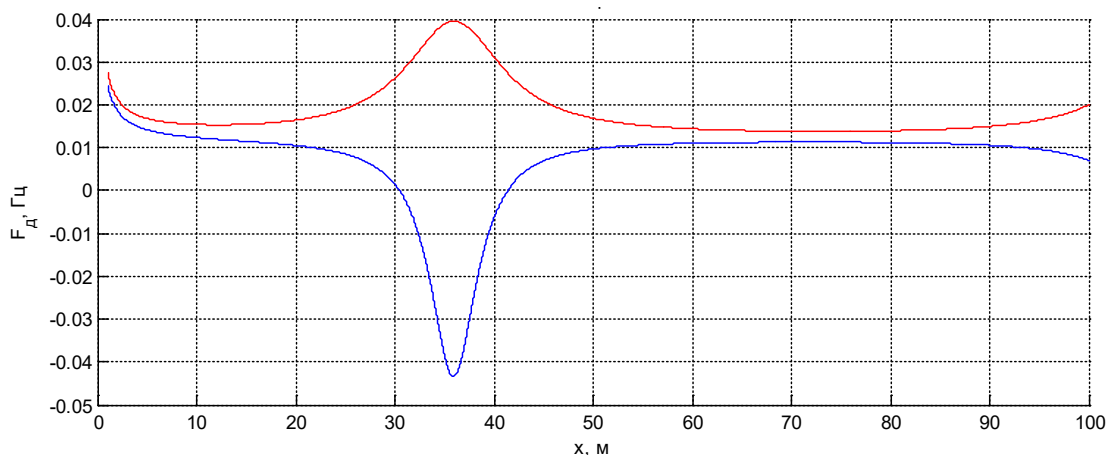
Рис. 4 Девіація для ситуації  $z_e > z_2 > z_1$ , вихор вище обох приймачівРис. 5. Девіація для ситуації  $z_e < z_1 < z_2$ , вихор нижче обох приймачівРис. 6. Девіація для ситуації  $z_1 < z_e < z_2$ , вихор між приймачами

- 2)  $z_e < z_1 < z_2$ . Вихор вище обох приймачів. В каналі приймача 1 реєструється збільшення частоти зі знаком «плюс», а в каналі приймачі 2 або взагалі не буде змінення частоти, або змінення суттєво менше (рис.10).

- 3)  $z_1 < z_e < z_2$ . Вихор між приймачами. У каналі приймача 1 буде зафіксовано змінення частоти зі знаком «мінус», а в каналі приймача 2 зі знаком «плюс». (рис.11).

Періодична повторюваність виникнення девіації з вказаними ознаками формує розуміння того, що джерело біля дна.

Рис. 7. Девіація для ситуації  $z_0 > z_2 > z_1$ , вихор вище обох приймачівРис. 8. Девіація для ситуації  $z_0 > z_2 > z_1$ , вихор вище обох приймачівРис. 9. Девіація для ситуації  $z_0 > z_2 > z_1$ , вихор вище обох приймачів

Рис. 10. Девіація для ситуації  $z_0 < z_1 < z_2$ , вихор нижче обох приймачівРис. 11. Девіація для ситуації  $z_1 < z_0 < z_2$ , вихор між приймачами

### ВИСНОВКИ

В результаті проведення розрахунків та аналізу отриманих польових та девіаційних характеристик розв'язків задачі про прийом в плоскому регулярному хвилеводі нерухомою приймальною системою  $pv$ -типу монохроматичного сигналу довільно розташованого джерела, можна зробити наступні висновки:

- Особливості формування в хвилеводі векторного поля інтенсивності акустичного монохроматичного сигналу, який створено точковим рухомих джерелом, визначають зв'язок типу та розташування особливих точок поля і девіаційних характеристик сигналу, який реєструється комбінованими приймачами.
- Сталість векторних розподілень поля інтенсивності і позиціонування відповідних особливих точок в перерізах хвилеводу зберігається при зміні горизонту джерела в межах до 20 відсотків глибини хвилеводу при відрахування від дна і до 40 відсотків глибини хвилеводу при відрахування від поверхні.
- Відповідність таких параметрів прийнятого сигналу як знак, величина та періодичність

проявів девіації частоти хвилі-носія – певним розподіленням векторного поля інтенсивності – встановлює однозначний зв'язок результатів аналізу девіаційних характеристик та горизонтів розміщення джерела звуку.

- Визначені таким чином горизонти розташування джерела звуку є підставою щодо з'ясування приналежності джерела надводним, чи зануреним об'єктам.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] O. R. Lastovenko, V. A. Lisiutin, and A. A. Yaroshenko, "Osobnosti vektornykh akusticheskikh poley v volnovodah melkogo morya [Vector acoustic fields features in waveguides of the shallow water]," in *Consonance. Acoustic symposium.*, 2011, pp. 188–193.
- [2] O. S. Chaika, M. O. Yaroshenko, and O. V. Korzhuk, "Singular points of vector intensity's field in waveguide with combine boundaries," *Microsystems, Electron. Acoust.*, vol. 23, no. 1, pp. 44–51, 2018, DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.1.107853](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.1.107853).
- [3] B. A. Kasatkin, N. V. Zlobina, S. B. Kasatkin, D. V. Zlobin, and G. V. Kosarev, "Vortical oscillator in Pekeris waveguide theory and experiment," *Underw. Investig. Robot.*, vol. 1, no. 21, pp. 46–55, 2016, URL: <http://jmtf.febras.ru/journal/1-21-2016/46-55.pdf>.
- [4] V. A. Gordienko, *Vektorno-fazovyie metody v akustike [Vector-phase methods in acoustics]*. Moscow, Russia: PHISMATHLIT, 2007.
- [5] V. A. Shchurov, V. P. Kuleshov, and A. V. Cherkasov,





- “Vyihrevyie svoystva vektora akusticheskoy intensivnosti v melkom more [Intensity’s vortex properties in shallow water],” *Acoust. J.*, vol. 57, no. 6, pp. 837–843, 2011, URL: [http://www.akzh.ru/pdf/2011\\_6\\_837-843.pdf](http://www.akzh.ru/pdf/2011_6_837-843.pdf).
- [6] D. R. Dall’Osto, P. H. Dahl, and J. Woong Choi, “Properties of the acoustic intensity vector field in a shallow water waveguide,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 3, pp. 2023–2035, 2012, DOI: [10.1121/1.3682063](https://doi.org/10.1121/1.3682063).
- [7] C. F. Chien and R. V. Waterhouse, “Singular points of intensity streamlines in two-dimensional sound fields,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, no. 2, pp. 705–712, 1997, DOI: [10.1121/1.188034](https://doi.org/10.1121/1.188034).
- [8] A. P. Stashkevich, *Akustika morya [Acoustic of sea]*. Leningrad, USSR: Sudostroenie, 1966.
- [9] V. V. Meleshko, V. T. Matsypura, and I. A. Ulitko, *Teoriya volnovodov [Waveguide’s theory]*. Kyiv, Ukraine: PCC Kyiv University, 2013.
- [10] V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, and V. T. Matsypura, *Osnovy akustyky [Basics of acoustics]*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2007, ISBN: 978-966-00-1022-2.
- Надійшла до редакції 18 червня 2018 р.

УДК 534.2

## Определение первичных классификационных признаков монохроматического источника звука в мелком море

Чайка<sup>f</sup> А. С., ORCID [0000-0002-2501-595X](https://orcid.org/0000-0002-2501-595X)

e-mail [sanyarouge@gmail.com](mailto:sanyarouge@gmail.com)

Ярошенко<sup>f</sup> М. А., ORCID [0000-0001-6327-148X](https://orcid.org/0000-0001-6327-148X)

e-mail [yaroshenkom13@gmail.com](mailto:yaroshenkom13@gmail.com)

Коржик<sup>с</sup> А. В., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)

e-mail [ov.korjik@aae.kpi.ua](mailto:ov.korjik@aae.kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

**Анотация**—Работа посвящена проблеме первичной классификации автономных подвижных технических средств исследования моря. На основе классической модели мелкого моря, представленного плоским волноводом с комбинированными границами, рассмотрены особые точки векторного поля интенсивности звукового сигнала, создаваемого монохроматическим точечным источником, и установлены зависимости позиционирования источников звука от изменения фазы принятого сигнала.

Приведены результаты расчетов векторного поля интенсивности и девиационных характеристик принимаемого сигнала, соответствующие определенной совокупности исходных условий. Установлено соответствие таких параметров принимаемого сигнала: знак, величина и периодичность проявлений девиации частоты несущей определенным распределением векторного поля интенсивности и установлено однозначную связь результатов анализа девиационных характеристик и горизонтов размещения источника звука, что соответствует первичным классификационным признакам источника.

Библ. 10, рис. 11.

**Ключевые слова** — интенсивность; сингулярная точка; давление; колебательная скорость; мелкое море; девиация; частота.



# Determination of the Primary Classification Characteristics of Monochromatic Sound Source in Shallow Sea

O. S. Chaika<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-2501-595X](https://orcid.org/0000-0002-2501-595X)

e-mail [sanvarouge@gmail.com](mailto:sanvarouge@gmail.com)

M. O. Yaroshenko<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-6327-148X](https://orcid.org/0000-0001-6327-148X)

e-mail [yaroshenkom13@gmail.com](mailto:yaroshenkom13@gmail.com)

O. V. Korzhuk<sup>s</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0001-6793-1676](https://orcid.org/0000-0001-6793-1676)

e-mail [ov.korjik@aae.kpi.ua](mailto:ov.korjik@aae.kpi.ua)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—The work is devoted to the problems of determining the primary classification characteristics of a controlled autonomous underwater technical means, as well as searching for and clarifying the features that make it possible to determine the position of the indicated object in the shallow sea by the stationary signal system adopted.

Based on the model of shallow sea, given by the classical flat regular waveguide with combined boundaries (the bottom is presented as an acoustically hard border, and the surface is served as an acoustically soft border), special points of the vector field of the intensity of the sound signal are considered. This signal is created by a monochromatic point source, which moves evenly and straightforwardly, and is fixed by a stationary reception system, which can contain one or more receivers of a certain physical nature.

Connection of the type and location of special points of the field and the deviation characteristics of the signal recorded by the combined receivers is established.

It is established that the constancy of the vector distribution of the intensity field and the positioning of the corresponding singular points in the waveguide sections is maintained at the change of the source horizon in certain limits of the depth of the waveguide when deduced from the bottom and when deduced from the surface.

The results of calculations of the vector field of intensity and deviation characteristics of the received signal corresponding to a certain set of such initial conditions as the depth of the sea, the frequency of the carrier wave of the source (from the region of the boundary frequencies of the waveguide) are given. In this case, the correspondence of such parameters of the received signal as the sign, the magnitude and periodicity of the deviations of the wave-carrier frequency is established by a certain distribution of the vector intensity field. An unequivocal connection is also established between the results of the analysis of the deviation characteristics and the horizons of the location of the sound source (which corresponds to the primary classification criteria of the source).

An example of the implementation of the inserted classification features for the application of two pressure receptors located in the bottom area on defined horizons is provided and the frequency deviation registration is provided. This allows you to not record the value of the intensity field. In this case, the general regularity of their work is revealed and described in detail.

Ref. 10, fig. 11.

*Key words* — intensity; singular point; pressure; vibration speed; shallow sea; deviation; frequency.

