

<https://doi.org/10.15407/gpimo2022.04.053>

**А.А. Любицький**, наук. співроб.

e-mail: a.lubitckiy@gmail.com

ORCID 0000-0001-7375-1364

Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
61085, Харків, вул. Академіка Проскури, 12

**А.В. Омельченко**, кандидат тех. наук, доцент

e-mail: omela5656@gmail.com

ORCID 0000-0002-2338-6706

Харківський національний університет радіоелектроніки  
61166, Харків, пр. Науки, 14

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ РОЗСІЮВАННЯ ЗВУКУ В ГАЗОВИХ ФАКЕЛАХ І ОЦІНКИ ПОТЕНЦІЙНОЇ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ СИПІВ ЕХОЛОТОМ ІЗ РОЗЩЕПЛЕНИМ ПРОМЕНЕМ

---

*Представлено модель зворотного розсіювання звуку в газових факелах (ГФ), яка призначена для вирішення прямих та зворотних задач акустичного зондування факелів методом імітаційного (комп'ютерного) моделювання. Модель базується на уявленні про дискретний характер розсіювання звуку в ГФ, відповідно до якого прийнятий ехо-сигнал є сумою елементарних сигналів, розсіяних у зворотному напрямку бульбашками, що формують факел. При цьому розглядається модель реверберації звуку в ГФ як випадкового часового процесу за відсутності ефектів багатократного розсіювання на газових бульбашках. Модель враховує розподіл бульбашок за розмірами та швидкостями підйому до морської поверхні, а також їх еволюцію і газообмін з морським середовищем при спливанні. На цій основі оцінено потенційну точність визначення координат ГФ ехолотом з розщепленим променем. Встановлено, що основними параметрами, що визначають середньоквадратичне відхилення (СКВ) координат ГФ від дійсних є поперечний розмір факела, відношення сигнал/шум та обсяг вибірки ехо-сигналів для розрахунків. Отримано залежності СКВ від визначальних параметрів.*

**Ключові слова:** газовий факел, акустичне зондування, зворотне розсіювання звуку, імітаційне моделювання.

### Вступ

Широке розповсюдження у Світовому океані процесів донної емісії вільного газу (переважно метану), що розглядаються як потенційне джерело глобальних змін клімату, а також як екологічний, середотворчий та ресурсний феномен, зу-

---

Цитування: Любицький А.А., Омельченко А.В. Імітаційна модель розсіювання звуку в газових факелах і оцінки потенційної точності визначення координат сипів ехолотом із розщепленим променем. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2022. 18, № 4: 53—67. <https://doi.org/10.15407/gpimo2022.04.053>

мовляють підвищений інтерес до вивчення цієї проблеми у більшості розвинених країн світу. Тому, у останнє десятиріччя із зростаючою інтенсивністю проводяться комплексні мультидисциплінарні дослідження районів газового розвантаження дна морів і океанів, включаючи акваторію Чорного моря [2—4, 6—12, 34].

Основними методами пошуку, локалізації і діагностики проявів активної дегазації дна є методи гідроакустичного зондування, що дозволяють здійснювати оперативний моніторинг великих акваторій, визначати з борту судна параметри газовиділень і проводити неінвазійні спостереження за поведінкою викидів метану в водній товщі [2, 6—10, 12, 13]. Запропоновані методи ґрунтуються, головним чином, на прямих вимірах «сили цілі» одиночних бульбашок газу (у т.ч. за допомогою антен з розщепленим променем), швидкості їх підйому та сили об'ємного розсіювання звуку скупченнями бульбашок із подальшою інверсією акустичних даних у параметри газовиділень [2, 6, 13—21].

Важливими і поки недостатньо дослідженими методологічними проблемами дистанційної акустичної діагностики газовиділень з морського дна є оцінки потенційних можливостей, похибок і умов застосування методів, що розробляються, а також питання оптимізації алгоритмів обробки ехо-сигналів. Для вирішення цих проблем доцільне використання методів імітаційного моделювання, що дозволяють вивчати вплив на результати зондувань характеристик газовиділень, середовища розповсюдження звуку і параметрів гідроакустичних систем (ГАС) з урахуванням особливостей їх побудови. На відміну від натурних вимірів, модельні експерименти можуть бути проведені при повторюваних і повністю контрольованих умовах та не вимагають великих часових і матеріальних витрат. Такий підхід успішно використовується для вирішення широкого кола завдань гідролокації підводних цілей і моделювання характеристик сонарів [22, 23].

У статті наведено імітаційну модель зворотного розсіювання звуку в газових факелах (ГФ), які є найбільш поширеними проявами активної дегазації морського дна. Для вирішення завдань акустичного зондування ГФ являють собою множинні протяжні цілі, які утворені сукупністю дискретних розсіювачів — газових бульбашок з різними розмірами та швидкостями спливання, що випадково розташовані у просторі. Розроблена модель враховує дискретний характер розсіювання звуку, розподіли бульбашок за розміром і швидкістю підйому, а також їх еволюцію та газообмін з морським середовищем при спливанні. Наводяться отримані на її основі (методом імітаційного моделювання) результати досліджень потенційної точності визначення координат ГФ ехолотом з антеною «розщеплений промінь» (split beam), яка використовується в даному випадку як система локального позиціонування. Такими антенами в даний час оснащена більшість сучасних дослідницьких та рибопошукових ГАС [2, 6, 7, 12, 24, 25].

## Опис моделі

Розроблена модель призначена для вирішення прямих і зворотних задач розсіювання звуку в газових факелах методом імітаційного (комп'ютерного) моделювання. Вона включає в себе модуль формування газового факела над газовиділяючим джерелом (модель газового факела) і модуль розрахунку сигналів зворотного розсіювання звуку в факелі (модель ехо-сигналу).

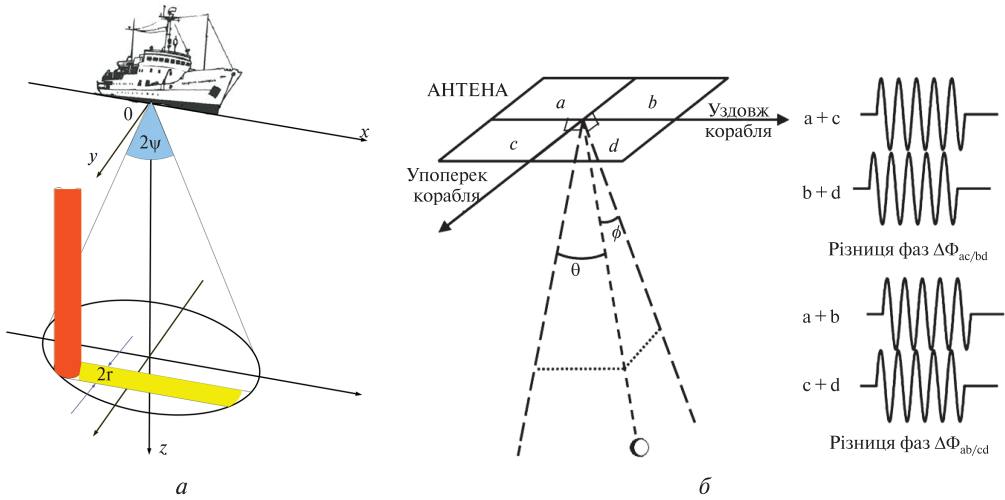


Рис. 1. Схема детектування ГФ (а) і принцип дії антени «розщеплений промінь» (б)

Модель ехо-сигналу. Модель заснована на уявленні про дискретний характер розсіювання звуку в ГФ відповідно до якого прийнятий ехо-сигнал є сумою елементарних сигналів, розсіяних у зворотному напрямі бульбашками, що формують факел. Нижче розглядається модель об'ємної реверберації звуку у факелах, як часового випадкового процесу, при наступних припущеннях:

- ефекти багатократного розсіювання звуку на газових бульбашках відсутні;
- в межах даного променевого пучка поширення зондуючого сигналу є однопроменевим.

У постановці задачі покладається, що корабель з ехолотом на борту рухається (або дрейфує) зі швидкістю  $V_s$  повз газовий факел (рис. 1, а), а координати корабля в кожен момент часу відомі. Ехолот на акустичній хвилі довжиною  $\lambda$  випромінює вертикально вниз послідовність тональних імпульсів тривалістю  $T$  з несучою частотою  $\omega_0$  і періодом повторення  $T_p$ . Враховується також, що ехолот оснащений антеною з розщепленим променем. Антена має діаграму спрямованості на передачу шириною  $2\psi$ . Вона електрично розділена на чотири сегменти, що збуджуються одночасно під час передачі, тоді як прийнятий кожним сегментом сигнал посилюється у чотирьоканальному приймачі незалежно. Це дозволяє визначити напрям приходу відбитого сигналу по різниці фаз між каналами (рис. 1, б).

Відповідно до запропонованої моделі на кожен із чотирьох сегментів антени  $r \in \{a, b, c, d\}$  в поточному циклі локації  $n$  приймається розсіяний сигнал [22, 26]:

$$S_{r,n}(t) = \text{Re}[\sum_i b_i U\left(\frac{t(1+v_i)}{T}\right) G(\varphi_{i,n}, \theta_{i,n}) \cdot e^{j\omega_0((1+v_i)t - \tau_{i,n})}], \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (1)$$

де  $n$  — номер зондуючого імпульсу;  $N$  — число зондувань в реалізації;  $U(\cdot)$  — огинаюча зондуючого імпульсу;  $\omega_0$  — частота зондуючого сигналу;  $b_i G(\varphi_i, \theta_i)$  — амплітудний множник, що враховує розсіювальну здатність  $i$ -ї бульбашки та форму діаграми спрямованості антени;  $\varphi_i$  і  $\theta_i$  — кути на  $i$ -ий відбивач відносно напрямку зондування;  $\tau_{i,n}$  — затримка сигналу в  $n$ -му циклі (періоді) зондування на трасі «передавальний центр антени  $\rightarrow$   $i$ -ий відбивач  $\rightarrow$  електромагнітний центр  $r$ -го сегменту антени».

У (1) врахований рух бульбашок відносно антени множителем  $(1 + v_i)$ , де коефіцієнт  $v_i = \frac{2v_{zi}}{c} \cos \gamma_i$ ;  $v_{zi}$  — швидкість підйому  $i$ -ї бульбашки;  $\gamma_i$  — кут між напрямом його руху і лінією, що сполучає бульбашку з акустичним центром антени;  $c$  — швидкість звуку.

Амплітуди  $b_i$  елементарних ехо-сигналів від бульбашок покладалися прямо пропорційними їх еквівалентним радіусам  $r$ , враховуючи що в придонних шарах ГФ розсіяння звуку на частотах  $f > 30$  кГц зумовлено в основному нерезонансними бульбашками з  $r \approx 0,5-10$  мм.

Згідно (1) комплексна огинаюча прийнятого сигналу  $r$ -им сегментом антени в  $n$ -му циклі зондування, має вигляд:

$$S_{r,n}(t) = \sum_i b_i U\left(\frac{t(1+v_i)}{T}\right) G(\varphi_{i,n}, \theta_{i,n}) \cdot e^{j\omega_0(v_i t - \tau_{i,n})}, \quad n = \overline{0, N-1}, \quad (2)$$

а її дискретні відліки:

$$S_{r,n}(t_k) = \sum_i b_i U\left(\frac{t_k(1+v_i)}{T}\right) G(\varphi_{i,n}, \theta_{i,n}) \cdot e^{j\omega_0(v_i t_k - \tau_{i,n})}, \quad k = 1, 2, \dots; n = \overline{0, N-1}, \quad (3)$$

де  $k$  — номер часового відліку прийнятого сигналу в поточному циклі зондування;  $t_k = k\Delta_t$  —  $k$ -ий часовий відлік сигналу;  $\Delta_t$  — інтервал дискретизації за часом.

В (3) величина  $nT_n$  відповідає відліку «повільного» часу, а величина  $t_k = k\Delta_t$  — відліку «швидкого» часу (або відліку по дальності  $d_k = ct_k/2$ ); інтервал розрізнення по дальності рівний  $h = ct/2$

Для спрощення подальших модельних розрахунків огинаючу зондуючого сигналу приймемо рівною

$$U(t) = \begin{cases} 1, & t \in [-T/2, T/2]; \\ 0, & t \notin [-T/2, T/2], \end{cases} \quad (4)$$

а зміною рівня ехо-сигналу внаслідок зміни масштабу часу будемо нехтувати через малість параметра  $v_i$ . Помітимо, що модель (1) допускає наявність, окрім випадкової, ще й когерентної складової у сумарному ехо-сигналі.

Враховуючи будову антени ехолота (див. рис. 1, б), розсіяна хвиля, рухаючись у напрямку до випромінювача, досягає чотирьох його сегментів у різні моменти часу. Це призводить до того, що фазові кути вихідних електричних сигналів виявляються різними. Можна показати, що положення поодиноких цілей в промені антени ехолота однозначно визначаються кутами  $\hat{\phi}$  і  $\hat{\theta}$  на ціль, які відраховуються від осі антени вздовж і впоперек судна, відповідно:

$$\hat{\phi} = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ac/bd}/4\pi g), \quad \hat{\theta} = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ab/cd}/4\pi g),$$

де  $2g$  характеризує відстань між центрами сусідніх сегментів антени (базу антенної системи);  $\Delta\Phi_{ab/cd}$  — різниця фаз сигналів  $S_a + S_b$  і  $S_c + S_d$ , а  $\Delta\Phi_{ac/bd}$  — різниця фаз сигналів  $S_a + S_c$  і  $S_b + S_d$ .

Відмітимо, що вищеописана модель дозволяє також моделювати ехо-сигнали від ГФ при використанні однопроменевих ехолотів зі звичайною антеною поршневого типу, шляхом підсумовування зворотно розсіяних сигналів, що синхронно приймаються усіма сегментами антени.

*Модель газового факела.* Модель базується на уявленні про випадковий характер газовиділень з морського дна. Вважається, що емісія бульбашок газу (переважно метану) відбувається з джерел, розташованих на майданчику заданої

форми і розмірів. Розміри бульбашок також вважаються випадковими, а їх еквівалентні радіуси  $r$  в тонкому придонному шарі над сипом описуються функцією розподілу бульбашок за розмірами (РБР):

$$N(r) = N_v p(r), \quad (5)$$

де  $N_v$  — концентрація бульбашок в одиниці об'єму,  $p(r)$  — щільність ймовірності РБР,  $N(r) dr$  — кількість бульбашок в одиниці об'єму з радіусами між  $r$  і  $r+dr$ .

До теперішнього часу відомості про розподіл бульбашок за розмірами у природних сипах залишаються нечисленними через надзвичайну складність і великі витрати часу і коштів при постановці вимірювань параметрів газовиділень в умовах великих глибин. Згідно з наявними даними, отриманими в різних районах Світового океану (включаючи Чорне море), розміри газовиділень змінюються у досить широких межах. Еквівалентні радіуси бульбашок варіюють від 0,3–0,5 мм до 10–12 мм і більше, а емпіричні гістограми РБР, незважаючи на певні відмінності, мають ряд спільних рис [2, 6, 7, 9, 12, 20, 27–31]. Як правило, спостерігаються чітко виражені максимуми гістограм РБР при найбільш імовірних розмірах бульбашок газу в емісії сипів ( $r_p \approx 1,5$ –4 мм), різкий спад при  $r < r_p$  і більш повільний при  $r > r_p$ . При моделюванні є доцільним використання апроксимуючої функції, що містить, з одного боку, мінімальне число фізично змістовних параметрів, а з іншого — зберігає характерні риси натурних даних.

У даній моделі в якості такої функції використовується гамма-розподіл із щільністю вірогідності:

$$p(r) = \frac{r^{\alpha-1}}{\theta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left\{-\frac{r}{\theta}\right\}, \quad r \in (0, \infty), \quad (6)$$

де  $\alpha > 0$ ,  $\theta > 0$  — параметри форми і масштабу, відповідно;  $\Gamma(\alpha)$  — гамма функція Ейлера.

Відомо, що математичне очікування і дисперсія випадкової величини з гамма-розподілом визначаються його параметрами:

$$r = \alpha\theta; D_r = \alpha\theta^2. \quad (7)$$

З (7) випливає, що коефіцієнт варіації випадкової величини з гамма-розподілом залежить тільки від параметра форми:

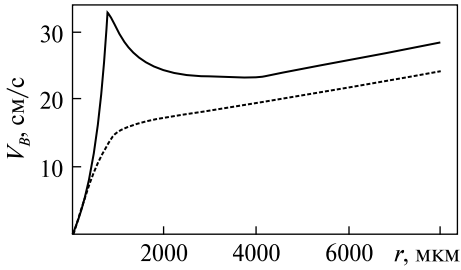
$$V = \frac{\sqrt{D_r}}{r} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}. \quad (8)$$

Відзначимо, що при  $\theta = 1/1700$  і  $\alpha = 3,8$  модель (6) зводиться до вигляду

$$p(r) = \frac{1700^{3,8}}{\Gamma(3,8)} r^{2,8} \cdot \exp\{-1700 r\}, \quad r \in (0, \infty) \quad (9)$$

(з коефіцієнтом варіації  $V \approx 0,513$ ), який підтверджується даними наших гідроакустичних досліджень процесів дегазації дна в Чорному морі [12]. У загальному ж випадку, при різних коефіцієнтах форми  $\alpha$  та середніх значень  $r$  гамма-розподіл дозволяє описувати емісію в водну товщу газових бульбашок з різними варіаціями їх розмірів.

Відомо, що розміри бульбашок визначають їх швидкість спливання. На динаміку бульбашок також істотно впливають поверхнево-активні речовини (ПАР), нафтові плівки, газогідратні оболонки, частинки мулу та інші сурфаканти, що «забруднюють» поверхню розділу фаз «газ-вода». У теперішній час для па-



**Рис. 2.** Залежності швидкості підйому бульбашок від їх радіусу: суцільна крива — для моделі «чистих» бульбашок; пунктирна крива — для моделі «брудних» бульбашок

раметризації швидкості підйому газових викидів набули широкого поширення моделі «чистих» і «брудних» бульбашок, що узагальнюють великий обсяг теоретичних даних і експериментальних досліджень [32, 33]. У розглянутій імітаційній моделі залежність швидкості підйому бульбашок від їх радіусу описується кусково-поліноміальними формулами, що забезпечують безперервність визначення швидкості у всьому діапазоні зміни розмірів бульбашок. Так, для моделі «чистих» бульбашок використовується апроксимація:

$$V_B = \begin{cases} a_{10} + a_{11}r + a_{12}r^2 + a_{13}r^3, & 0 \leq r \leq 750; \\ a_{20} + a_{21}r + a_{22}r^2 + a_{23}r^3 + a_{24}r^4, & 750 \leq r \leq 4500; \\ a_{30} + a_{31}r, & r > 4500, \end{cases} \quad (10)$$

а для моделі «брудних» бульбашок:

$$V_B = \begin{cases} b_{10} + b_{11}r + b_{12}r^2 + b_{13}r^3, & 0 \leq r \leq 750; \\ b_{20} + b_{21}r + b_{22}r^2 + b_{23}r^3 + b_{24}r^4, & 750 \leq r \leq 4500; \\ b_{30} + b_{31}r, & r > 4500, \end{cases} \quad (11)$$

де швидкість  $V_B$  вимірюється в см/с, а радіус  $r$  — в мкм.

Коефіцієнти поліномів в (10) і (11) визначалися за методом найменших квадратів, виходячи з найкращої апроксимації відповідних залежностей  $V_B(r)$  [32, 33]. Отримані залежності (10) і (11) зображені на рис. 2 суцільною і пунктирною кривими відповідно.

Облік нестационарних ефектів формування газових факелів. Співвідношення (5—6) і (10—11) описують початкові параметри газовиділень (концентрацію бульбашок, їх розподілу за розмірами і швидкостям в придонному шарі над сипом), що характеризують продуктивність джерела. У реальних природних сипах, згідно з даними акустичних і відео спостережень, емісія метанових бульбашок може мати нестационарний (наприклад, пульсуючий) характер [2, 12]. Крім того, початкові бульбашкові ансамблі еволюціонують при спливанні під впливом ряду різних факторів. Зміна гідростатичного тиску і фонових гідрофізичних умов, а також процеси розчинення і газообміну бульбашок з морським середовищем призводять до змін їх розмірів, швидкостей спливання і газового складу, а отже, до зміни їх звукорозсіювальних властивостей при підйомі до поверхні моря.

У розробленій імітаційній моделі, для врахування ефекту нестационарності емісії сипу, концентрація бульбашок у придонному шарі над сипом  $N_v$  (а за потреби — і щільність імовірності  $p(r)$ ) покладається як залежна від часу. З огляду на відсутність у даний час статистичних даних про мінливість емісії сипів, при моделюванні передбачається використання як регулярних (в тому числі квазіперіодичних), так і випадкових функцій  $N_v(t)$ .

Зміни початкових параметрів газовиділення при спливанні враховуються за допомогою моделі [16, 34], що була розроблена авторами раніше і яка описує

еволюцію бульбашок, їх динаміку і газообмін із середовищем при підйомі до поверхні. Вихідна система рівнянь, що складає цю модель, включає в себе:

- рівняння руху бульбашки;
- рівняння, що описує зміну радіуса бульбашки з урахуванням зниження гідростатичного тиску при спливанні й газообміні з морським середовищем;
- рівняння, що описує зміну в бульбашці мольних часток газів, які заповнюють бульбашку і містяться в морській воді.

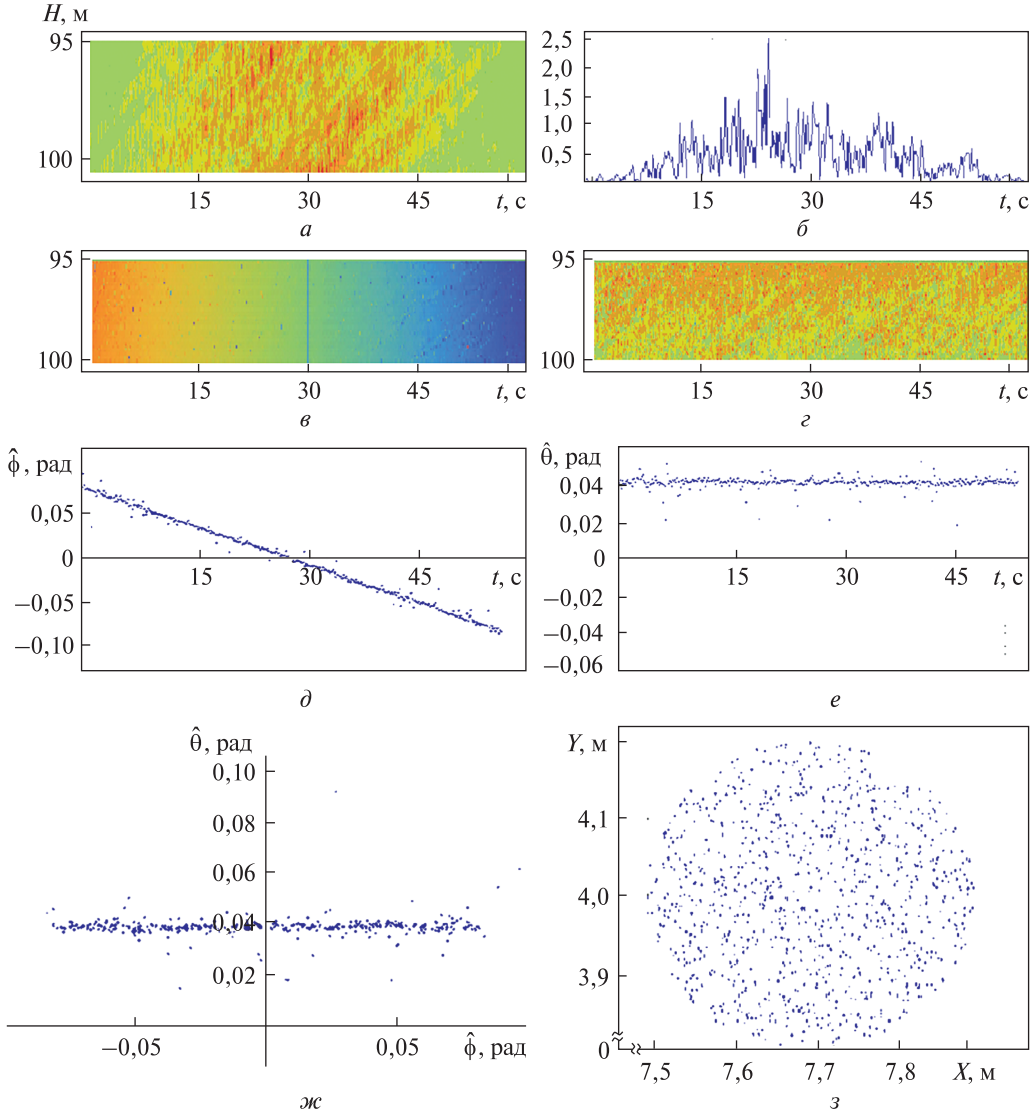
При виведенні рівнянь вважалося, що поведінка газу в бульбашках описується рівнянням стану ідеальних газів.

Система диференціальних рівнянь, що описують модель, чисельно інтегрується з використанням модифікованого методу Рунге-Кутта при заданих фонових параметрах середовища, глибині джерела і початкових розподілах бульбашок за розмірами і швидкостям спливання. Передбачається, що в момент відриву від дна газові бульбашки містять тільки метан. У міру їх спливання відбувається заміщення метану (в результаті зустрічної дифузії через його поверхню) розчинним у воді повітрям, яке є сумішшю основних його компонентів: азоту і кисню. Інтегрування проводиться до моменту розчинення бульбашки у воді (який умовно визначається після досягнення радіуса бульбашки 0,05 мм), або до моменту її спливання на поверхню моря. Модель дозволяє розраховувати поточні параметри бульбашок (радіус, швидкість підйому і газовий склад) в будь-який момент часу її перебування у водному стовпі. Детальний опис моделі дано у роботі [16].

Для проведення досліджень за допомогою розробленої імітаційної моделі був створений у середовищі *Wolfram Mathematica 8* комплекс програм, що реалізують вищеописані процедури. Для підвищення швидкодії обчислень процедура формування зворотнорозсіяних сигналів  $S_{r,n}(t)$  реалізована мовою C.

В якості ілюстрації «роботи» програмного комплексу в цілому на рис. 3 наведені результати модельних розрахунків амплітудно-фазових характеристик ехо-сигналів від газового факела, прийнятих на антену «розщеплений промінь». Газовиділяюче джерело (сип) з круглою основою радіуса  $r_{\phi} = 0,2$  м знаходиться на глибині 100 м на відстані 4 м від курсу судна, яке дрейфує з постійною швидкістю 0,5 вузла у напрямку осі OX. Факел над джерелом висотою 10 м сформований 1000 бульбашками (їх розташування у факелі показано на рис. 3, з в проекції на дно), початкові розподіли яких за розмірами і швидкостям спливання описуються формулами (9–10). Робоча частота ехолота і тривалість імпульсів, що випромінюються складають 38 кГц і 1 мс відповідно; напрямок зондування — вертикально вниз. Основні параметри моделювання, крім зазначених вище, були такі: півширина діаграми спрямованості  $\psi = 3,35^\circ$ ; період повторення надсилянь  $T_n = 0,15$  с; крок квантування ехо-сигналу по глибині  $\Delta z = 0,1$  м; швидкість звуку  $c = 1500$  м/с; розрізнення ехолота по дальності  $h = cT/2 = 0,75$  м; середня кількість бульбашок в елементі розрізнення  $\bar{K}_b = 30,48$ ; параметр форми розподілу бульбашок по розмірам  $\alpha = 3,8$ ; середній радіус бульбашок у придонному шарі  $\bar{r} = 2,4$  мм, середньоквадратичне відхилення СКВ  $r = 1,2$  мм; середня швидкість їх спливання  $\bar{V}_b = 0,25$  м/с; СКВ  $V_b = 0,028$  м/с; число циклів (проходів судна над ГФ) — 2.

На рис. 3 в палітрі кольорів веселки наведені ехограма придонного шару факела товщиною 5 м  $|S(H,t)|^2$  (тут  $S = S_a + S_b + S_c + S_d$  — сумарний прийнятий сигнал,  $H$  — відстань до центру розсіюючого об'єму по глибині), діаграми кутів на



**Рис. 3.** Результати модельних розрахунків амплітудно-фазових характеристик ехо-сигналів від газового факела: *a* — ехограма придонного шару факела товщиною 5 м; *б* — переріз ехограми по осі часу на відстані 4 м від джерела газу; *в* і *г* — діаграми кутів  $\hat{\phi}$  і  $\hat{\theta}$  уздовж і уперек курсу судна, відповідно в координатах «дальність-час»; *д*, *e* — перерізи діаграм кутів  $\hat{\phi}$  і  $\hat{\theta}$  по осі часу на відстані 4 м від джерела газу; *ж* — «трек» факела в площині кутів  $(\hat{\phi}, \hat{\theta})$  при його перетині променем ехолота; *з* — розподіл бульбашок у факелі (вигляд зверху)

придонний шар факела уздовж  $\hat{\phi}(H, t)$  і уперек  $\hat{\theta}(H, t)$  курсу судна, а також їхні перерізи по осі часу при  $H = 96$  м. Як видно з ехограми (рис. 3, *a*), розташування факела на часовій осі і тривалість його спостереження відповідає заданим вхідним параметрам моделі. Привертають увагу похилі смуги на ехограмі, що відображають підйом бульбашок до морської поверхні. Подібні смуги зазвичай спостерігаються також на ехограмах природних ГФ при зондуванні факелів у дрейфі та на малому ході судна, а їх нахил слугує оцінкою швидкості підйому



бульбашок [12]. Така оцінка за даними ехограми рис. 3, а дає значення середньої швидкості спливання бульбашок у придонному шарі факелу  $0,254 \pm 0,011$  м/с близьке до вхідного параметру моделювання  $\bar{V}_b$ .

Аналіз фазових характеристик показує, що поздовжній кут  $\phi$  (рис. 3, в), як і слід було очікувати, монотонно зменшується при наближенні судна до факелу від великих позитивних значень (червоний колір) до негативних (синій колір).

Зміна знака (див. рис. 3, д) відбувається у момент збігу X-координат корабля і центру факела (синя вертикальна лінія на кутовий діаграмі). При цьому середнє значення поперечного кута  $\hat{\theta}$  дорівнює 0,04 рад і точно відповідає очікуваному  $\hat{\theta} = L_y/H$  при заданій координаті  $L_y = 4$  м і глибині джерела  $H = 100$  м (рис. 3, е).

Таким чином, наведені результати моделювання наочно ілюструють очікувані акустичні ефекти при перетині факела променем ехолота і свідчать про адекватність модельних рішень і їх програмної реалізації.

**Оцінки потенційної точності визначення координат газовиділяючих джерел ехолотом із розщепленим променем.** Першочерговим завданням вивчення проявів активної дегазації морського дна є пошук і картування газових факелів. При цьому, координати газовиділяючих джерел (метанових сипів) зазвичай визначаються за даними приймача GPS, встановленого співосно (або поблизу) з антеною ехолота. У разі розташування сипів на значних глибинах, коли розміри «озвученої» ехолотом плями на морському дні істотно перевищують (у плані) розміри газовиділяючого майданчика і помилки GPS, дійсні координати сипів можуть сильно відрізнятись від даних корабельної навігаційної системи. Вони можуть бути уточнені за даними вимірів фазових кутів на факел із використанням (в якості системи локального позиціонування) ехолота з антеною типу «розщеплений промінь». Проте, погрішності такої корекції і головні причини виникнення помилок не досліджені. За допомогою вищеописаної моделі це завдання може бути вирішене методом імітаційного моделювання.

Метою моделювання було, по-перше, визначення координат газовиділяючих джерел за сигналом, що прийнятий антеною «розщеплений промінь» із мінімальним середньоквадратичним відхиленням (СКВ) і, по-друге, оцінка величини СКВ залежно від наступних параметрів: поперечного розміру факела, його відстані від центру «озвученої» плями на дні, кількості бульбашок в об'ємі розсіяння, їх розподілів за розмірами і швидкостями спливання, обсягів вибірок ехо-сигналів для розрахунків, співвідношення сигнал / шум та ін.

У ході моделювання будувалися ехограми газових факелів і їх кутові двовимірні діаграми. Ехограми (акустичні зображення факелів у координатах «інтенсивність ехо-сигналу — дальність — час») визначалися як двовимірні функції дискретних аргументів:

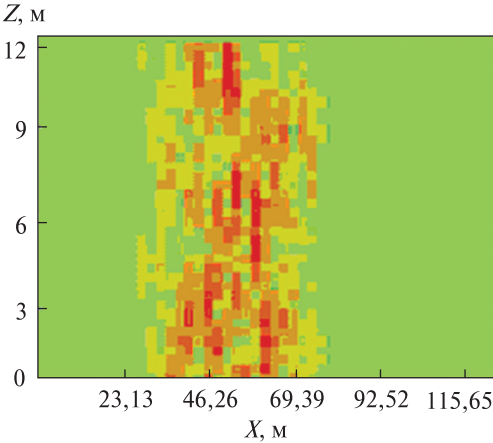
$$|S(q, k)|^2, q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots \quad (12)$$

де сумарний прийнятий сигнал  $S = S_a + S_b + S_c + S_d$ .

Кутові діаграми газових факелів визначалися як двовимірні функції:

$$\phi(q, k) = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ac/bd}(q, k)/4\pi g), q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

$$\hat{\theta}(q, k) = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ab/cd}(q, k)/4\pi g), q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots \quad (14)$$



**Рис. 4.** Ехограма газового факела для випадку  $r_{\phi} = 0,5$  м

точність такого алгоритму оцінювання координат джерел газовиділень у ряді випадків може бути підвищена шляхом заміни в (15) і (16) оператора усереднення оператором узяття медіани. У результаті такої заміни алгоритм оцінювання (15) і (16) матиме вигляд:

$$\hat{x}_f = \text{Median} \{d_k \lambda \cdot \Delta \Phi_{ac/bd}(q, k)/4\pi g\} + q \cdot \Delta x(q, k) \in V\}, \quad (17)$$

$$\hat{y}_f = \text{Median} \{d_k \lambda \cdot \Delta \Phi_{ab/cd}(q, k)/4\pi g, (q, k) \in V\}. \quad (18)$$

**Умови проведення модельних експериментів.** При моделюванні розглядалися випадки емісії бульбашок однакового радіуса  $r$ , (включаючи їх ланцюжки, що імітують струменеві газовиділення) і скупчення випадкових бульбашок, початковий радіус яких описується гамма-розподілом з щільністю ймовірності (9) (форма якої близька до тієї, що спостерігається у природних факелах Чорного моря [12, 31]) із урахуванням залежності швидкості спливання бульбашок у придонному шарі від їх еквівалентного радіусу (10). Число бульбашок в елементі розрізнення  $K_b$  змінювалося від 1 до 110, а радіус факела  $r_{\phi}$  — від 0,02 м (одиначний струмінь) до 20 м. Крім того, при моделюванні використовувалися типові характеристики широко поширених дослідницьких ехолотів з розщепленим променем норвезької фірми SIMRAD (моделі ЕК 500, ЕК 60): частота зондуючого сигналу  $f_0 = 38$  кГц; період повторення посилок  $T_n = 0,5-2$  с; тривалість зондуючого сигналу  $T = 0,3-3$  мс; півширина діаграми спрямованості антени  $\psi = 3,35^\circ$ ; крок квантування ехо-сигналів по глибині  $\Delta z = 0,1$  м. Відношення потужності шуму до потужності ехо-сигналів від факела варіювалося від 0 до 25 %. Відстань до дна при розрахунках змінювалося у межах  $H = 100-1000$  м. При цьому передбачалося, що судно рухається у напрямку осі ОХ зі швидкістю  $V_s = 0,2$  м/с (дрейф судна) або 2,57 м/с (5 вузлів, режим сервейрних зйомок). У всіх випадках також передбачалося, що в межах головної пелюстки характеристики спрямованості антени знаходиться не більше одного факела.

**Результати імітаційного моделювання.** На рис. 4, 5 (в палітрі «кольорів веселки») наведені приклади ехограм і кутових діаграм газового факела, які отримані методом моделювання за відсутності шумів при наступних умовах: відстань до

Для оцінювання координати центрів джерел газових факелів  $x_f$  і  $y_f$  використаний алгоритм

$$\hat{x}_f = \text{Mean} \{d_k \lambda \cdot \Delta \Phi_{ac/bd}(q, k)/4\pi g\} + q \cdot \Delta x(q, k) \in V\}, \quad (15)$$

$$\hat{y}_f = \text{Mean} \{d_k \lambda \cdot \Delta \Phi_{ab/cd}(q, k)/4\pi g, (q, k) \in V\}, \quad (16)$$

де  $d_k = c t_k / 2$ , а область  $V$  визначається з умови перевищення сигналом вибраного порогу  $\varepsilon > 0$ . У (15) і (16) використано позначення для оператора арифметичного усереднення величин, поміщених у фігурні дужки.

У результаті експериментальних досліджень було встановлено, що

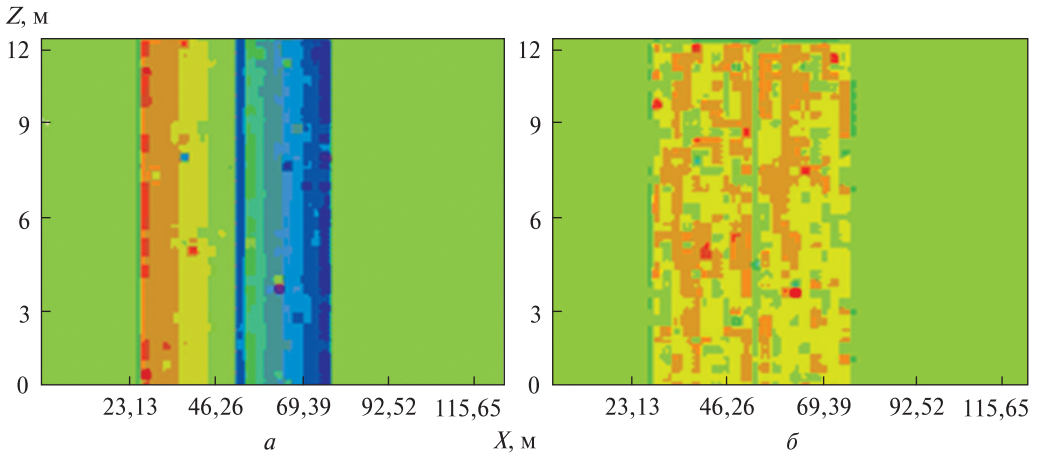


Рис. 5. Кутови діаграми факелу вздовж (а) і упоперек (б) курсу корабля для  $r_{\phi} = 0,5$  м

дна 400 м, тривалість зонduючого імпульсу 1 мс, число бульбашок в одному елементі розрізнення ехолота  $N = 31$ ; радіус ГФ біля основи  $r_{\phi} = 0,5$  м; початкове положення його центру  $x_f = 50$  м і  $y_f = 10$  м; початковий розподіл бульбашок за розмірами описується щільністю ймовірності виду (9).

При обраних умовах ширина озвученого об'єму поблизу дна становить  $L = 0,1128 N \approx 45,12$  м, а інтервал між сусідніми зондуваннями вздовж курсу  $\Delta x = \Delta t \cdot V_s = 2,313$  м. Число зондувань при проході діаграми спрямованості повз точкового об'єкта дорівнює  $N = 20$ ; розрізнення по дальності ехолота становить  $h = C \cdot T/2 \approx 0,75$  м.

Як бачимо, кут  $\phi$  уздовж курсу корабля (рис. 5, а) також монотонно зменшується при наближенні до факела від великих позитивних значень (червоний колір) до негативних (синій колір), змінюючи знак на траверсі факела (синя вертикальна лінія). Подальше збільшення розмірів факела веде до розмиття регулярної структури кутових діаграм, а реалізації їх перетинів уздовж курсу корабля поступово набувають шумовий характер.

Аналіз результатів модельних експериментів показав, що основними параметрами, які визначають відхилення розрахункових координат факелів від дійсних є радіус факела  $r_{\phi}$ , кількість відліків за дальністю  $K$ , що використовувались при усередненні за глибиною та співвідношення потужності шуму  $P_n$  до потужності сигналу  $P_s$  на виході лінійної частини приймача (до фазового детектора). На рис. 6—8 наведені приклади залежностей СКВ оцінки положення джерела газовиділень, що знаходиться на глибині 400 м:

$$S_x = \sqrt{M[x_f^A - x_f]^2}; \quad S_y = \sqrt{M[y_f^A - y_f]^2}$$

відносно дійсних значень його горизонтальних координат  $x_f = 50$  м і  $y_f = 10$  м від визначальних параметрів. Ці залежності отримані при  $r_{\phi} = 1$  м і досить високій концентрації бульбашок  $K_b = 31$  од/елемент розділення з використанням усіх вибірок (близько 20 зондувань) уздовж курсу корабля при 100 прогонах моделі. В якості шуму при моделюванні використовувався гаусівський процес з некорельованими відліками. Чорним кольором на графіках зображені характеристики оцінок зі звичайним усередненням, а сірим — з медіанної обробкою.

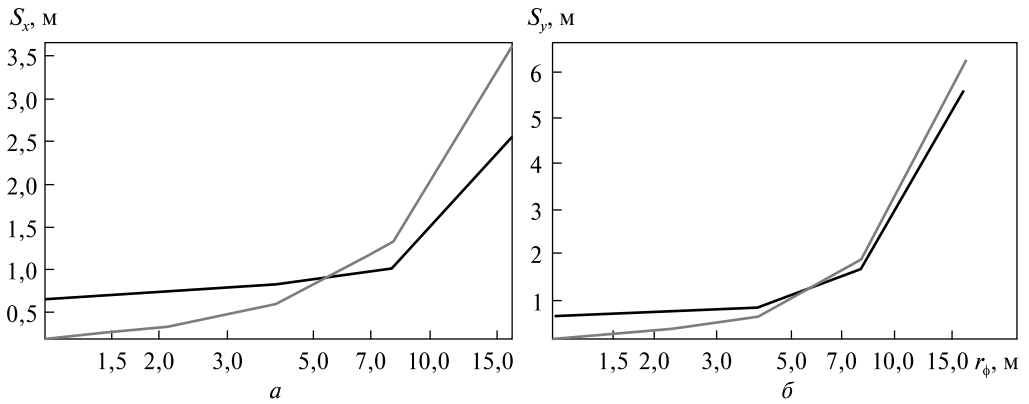


Рис. 6. Залежності СКП оцінювання координат газового факела від його радіуса  $r_\phi$ :  $a$  — по осі X;  $b$  — по осі Y

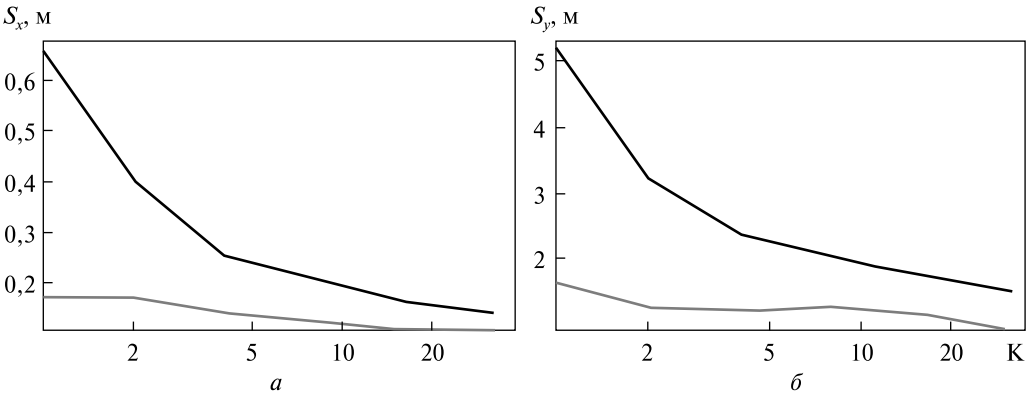


Рис. 7. Залежності СКВ оцінювання координат газового факела від числа відліків по вертикалі K при  $K_b = 31$ ,  $r_\phi = 1$  м:  $a$  — по осі X;  $b$  — по осі Y

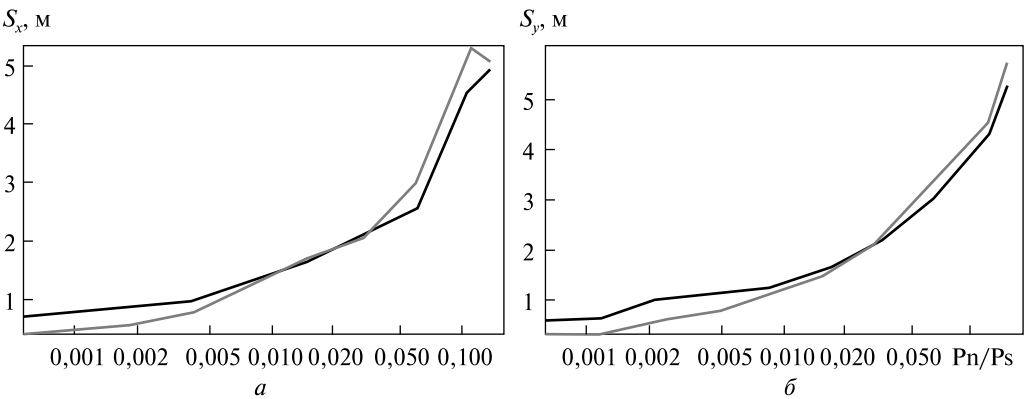


Рис. 8. Залежності СКВ оцінювання координат газового факела від співвідношення потужності шуму  $P_n$  до потужності сигналу  $P_s$ :  $a$  — по осі X;  $b$  — по осі Y

Аналізуючи результати моделювання відзначимо наступне. Для малих (у порівнянні з шириною променя) радіусів газових факелів точність оцінок координат практично не залежить від зсуву центрів факелу від курсу корабля (по осі  $Y$ ) доки вони залишаються в межах діаграми спрямованості антени. При цьому значення СКВ складають  $(0,4-0,8) r_{\phi}$ , що узгоджується з висновками теорії радіолокації протяжних цілей [35], і слабо залежать від числа бульбашок в елементі розрізнення при  $K_b \geq 5$ . Зі збільшенням площі основи факела  $S_f$  (розміру факела) помилки вимірювання його координат монотонно зростають і при  $S_f/S_s \geq 0,07-0,1$  (тут  $S_s$  — площа «озвученого» на дні плями), як правило, спостерігається швидке нелінійне зростання СКВ (рис. 6), що фактично виключає можливість корекції розташування протяжних газовиділяючих ділянок по фазовим характеристикам ехо-сигналів.

Збільшення числа відліків по вертикалі  $K$  в алгоритмах усереднення веде до очікуваного зниження СКВ, пропорційному  $1/\sqrt{K}$  (рис. 7). У той же час із збільшенням відношення  $P_n/P_s$  похибки визначення координат швидко зростають і вже при 10%-му шумі значення СКВ досягають 5–6 м (рис. 8). При цьому медіанна обробка даних в алгоритмах оцінювання координат ГФ забезпечує у більшості випадків більш високу точність, ніж арифметичне усереднення.

## Висновки

Розроблено модель зворотного об'ємного розсіювання звуку в газових факелах, яка призначена для вирішення прямих та зворотних завдань акустичного зондування факелів методом імітаційного моделювання. Реверберація звуку в ГФ розглядається як випадковий часовий процес за відсутності ефектів багаторазового розсіювання на газових бульбашках, що утворюють факел. Модель враховує дискретний характер розсіяння, розподіли бульбашок за розмірами та швидкостями підйому до водної поверхні, а також їх еволюцію та газообмін із морським середовищем при спливанні.

На цій основі проведено оцінку потенційної точності визначення координат ГФ ехолотом з антеною «розщеплений промінь» при використанні її як системи локального позиціонування. Встановлено, що основними параметрами, що визначають середньоквадратичне відхилення (СКВ) результатів моделювання від дійсних координат ГФ є поперечний розмір факелів, відношення сигнал/шум та обсяги вибірок ехо-сигналів для алгоритмів усереднення. Отримано залежності СКВ від визначальних параметрів.

Медіанна обробка даних в алгоритмах оцінювання забезпечує у більшості випадків більш високу точність, ніж арифметичне усереднення і може бути рекомендована для практичних оцінок координат природних ГФ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Judd A.G. The global importance and context of methane escape from seabed. *Geo. Mar. Letter*, 2003. 23. P. 147–154.
2. Егоров В.Н., Артемов Ю.Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 407 с.
3. Шнюков Е.Ф., Кобелев В.П. Струйные газовыделения дна Черного моря— уникальный средообразующий, экологический и ресурсный феномен. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*, 2013. №3. С.134–140.

4. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев: Логос, 2013. 384 с.
5. Macgregor D.S. Relationship between seepage, tectonics and subsurface petroleum reserves. *Marine and Petroleum Geology*, 1993. 10. P. 606—619
6. Veloso M., Greinert J., Mienert J., De Batist M. A new methodology for quantifying bubble flow rates in deep water using splitbeam echosounders : examples from the Arctic offshore NW-Svalbard. *Limnol. Oceanogr: methods*, 2015, 13(6). P. 267—287.
7. Weber T.S., Mayer L., Jerram K., Beadoin J., Rzhhanov Y., Lovando D. Acoustic estimates of methane gas flux from the sea bed in a 6000 km<sup>2</sup> region in the Northern Gulf of Mexico. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2014. 15. P.1911—1925.
8. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyk A. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature geosciences*, 2013. 7. P. 64—70.
9. Römer M., Sahling H., Pape T., Bohrman G., Spiess V. Quantification of gas bubble emissions from submarine hydrocarbon seeps at the Makran continental margin offshore Pakistan. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2012. Vol. 117. C10015, doi: 1029/2011JC007424.
10. Коболев В.П., Верпаховская А.О., Захаров И.Г., Козленко Ю.В., Кутас Р.И., Любицкий А.А. и др. Комплексные геофизические исследования на склоне северо-западного шельфа Черного моря /Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа/ Докл. XI Международной конференции «Крым-2013», Симферополь, 2013. С. 52—78.
11. Römer M., Sahling H., Pape T., Bahr A., Feseker T., Wintresteller P., Bohrman G. Geological control and magnitude of methane ebullition from a high-flux area in the Black Sea — The Kerch seep area. *Marine Geology*, 2012. 319—322. P. 57—74.
12. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Любицкий А.А. и др. Газовые факелы Черного моря. Киев: ДНУ «МорГеоЭкоЦентр НАН Украины». 2021. 508 с.
13. Artemov Yu.G. Acoustic observations of gas bubble streams in the NW Black sea as a method for estimation of gas flux from vent sites. European Geophysical Society Geophysical Research Abstracts. 2003. 5. P.09421.
14. Любицкий А.А. Гидроакустические исследования явлений активного газовыделения в северо-западной части Черного моря. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2003. Вып. 9. С. 226—240.
15. Саломатин А.С., Юсупов В.И. Количественная оценка параметров газовых факелов с помощью эхолота. Сборник трудов 16-ой сессии РАО. 2005. С. 230—233.
16. Любицкий А.А. Обратная задача рассеяния звука в интенсивных газовых факелах и модельные оценки пузырькового массопереноса метана по данным акустического зондирования. Сб. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, 2005. Вып. 13. С. 412—424.
17. Artemov Yu.G. Software support for investigation of natural methane seeps by hydroacoustic method. *Marine ecological Journal*. 2006. 5. No 1. P. 57—71.
18. Nikolska A., Sahling H., Bohrman G. Hydroacoustic methodology for detection, localization and quantification of gas bubbles rising from seafloor at gas seeps from the eastern Black Sea. *Geophysics Geosystems*, 2008. 9. № 10. P. 481—494.
19. Lyubitskiy A.A. Remote acoustic diagnosis of gas release sources on seabed. *Journal of Geology (VAG)*, 2008. Series B. № 31—32. P. 33—38.
20. Ostrovsky I., McGinnis D.F., Lapidus L., Eckert W. Quantifying gas ebullition with echosounder: the role of methane transport by bubbles in a medium-sized lake. *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 2008. 6. P.105—118.
21. Muyakshin, S., Sauter E. The hydroacoustic method for the quantification of the gas flux from a submersed bubble plume. *Oceanology*, 2010, 50. С. 1045—1051.
22. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации (модели, алгоритмы, решения). Ленинград: Судостроение. 1983. 280 с.
23. Ainslie M.A. Principles of sonar performance modeling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010. 707 p.
24. Simrad EK500 Scientific Echo Sounder Instruction Manual, Simrad Subsea P2170, Horten. Norway. 1992.

25. Simmonds J., MacLennan D. Fisheries acoustics. Blackwell Science, 2005. 437 p.
26. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т 3. Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовых сигналов на фоне помех. Москва: Сов. Радио. 1977. 663 с.
27. Sahling H., Bohrmann G., Artemov Y.G. et al. Vodyanitskii mud volcano, Sorokin trough, Black Sea: Geological characterization and quantification of gas bubble streams. *Marine and Petroleum Geology*, 2009. **26**. P. 1799—1811.
28. Greinert J., Nutzal B. Hydroacoustic experiments to establish a method for the determination of methane bubble fluxes at cold seeps. *Geo-Mar Lett.*, 2004. **24**. P. 75—85.
29. Ostrovsky I. Methane bubbles in Lake Kinneret: quantification and temporal and spatial heterogeneity. *Limnol. Oceanogr.*, 2003. **48**. № 3. P.1030—1036.
30. Leifer I., Judd A.G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis. *Terra Nova*. 2002, 14, № 6, P. 417—424.
31. Любичкий А.А., Бережная Н.Д. Обратное Рассеяние звука в газовых факелах Черного моря / Акустика океана / Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. Москва: «ГЕОС». 2013. С. 138—141.
32. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles .Elsevier, New York. 1978. 380 p.
33. Leifer I., Patro R.K. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed the surface: A review and sensitivity study. *Continental Shelf Research*, 2002. **22**. P. 2409—2428.
34. Sovga E.E., Lyubartseva S.P., Lyubitsky A.A.. Investigation of the biochemistry of methane and mechanisms of its transfer in the Black Sea. *Physical Oceanography*, Sept. 2008. **18**. Issue 5. P. 272—287.
35. Островитянинов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. Москва: Радио и связь. 1982. 232 с

Стаття надійшла 11.11.2022

*A.A. Lyubitskiy*, Researcher, Senior member IEEE

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine

12, Proskura Str. , Kharkiv, 61085, Ukraine

e-mail: a.lubitckiy@gmail.com

ORCID 0000-0001-7375-1364

*A.V. Omelchenko*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

14, Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

e-mail: omela5656@gmail.com

ORCID 0000-0002-2338-6706

#### SIMULATION MODEL OF SOUND BACKSCATTERING IN GAS FLARES AND EVALUATION OF THE POTENTIAL ACCURACY OF DETERMINING SEEP COORDINATES BY SPLIT-BEAM ECHOSOUNDERS

A simulation model of sound backscattering in gas flares is presented, designed to solve direct and inverse problems of acoustic sensing of flares using the simulation (computer) modeling method. The model is based on the concept of the discrete character of sound scattering in a gas plume, according to which the received echo signal is the sum of elementary signals, backward-scattered bubbles that form the flare. At the same time, the model of sound reverberation in a gas flare is considered as a temporary random process in the absence of multiple scattering effects. The model takes into account the distributions of gas bubbles by sizes and rise velocities, as well as the evolution of bubbles and their gas exchange with the marine environment during ascent. Based on this, the potential accuracy of determining the coordinates of gaseous sources (seeps) by a split-beam echo sounder was estimated by simulation modeling. It has been established that the main parameters that determine the RMS (root-mean-square deviations) of the estimates from the actual coordinates are the transverse size of the flare near the bottom, the SNR (signal-to-noise ratio), and the volume of echo signal samples. Dependences of the RMS on the determining parameters are obtained.

**Keywords:** *gas flares, acoustic sensing, backscattering of sound, simulation modeling.*