

В.К.Богушевич, Л.Н.Замаренова, М.И.Скипа

Отделение гидроакустики

Морского гидрофизического института НАН Украины, г.Одесса

**О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ДОННЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ
НА ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ
МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Рассматриваются вопросы возможностей выявления и оценивания донных газовыделений на шельфе Черного моря методом акустического горизонтального лучевого зондирования.

Актуальность вопроса обнаружения зон газовыделений из морского дна трудно переоценить. С процессом газовыделений из дна тесно связана газоносность глубинных структур Чёрного моря. Метановые газовыделения часто приурочены к газоносным районам и являются признаком их перспективности при поиске газовых месторождений [1]. Поиск газовых месторождений производится с помощью глубинного сейсмического зондирования. Но при этом основным критерием для отождествления выделенных на сейсмических разрезах структур с газонасыщением осадочной толщи [1, 2] служит выход газа из дна в воду.

Основными задачами акустического мониторинга газовыделений являются определение интенсивности газовыделения из дна, газосодержания (объёмной доли газовой фракции) и размерно-количественного состава пузырьков на разных глубинах. В настоящее время для этих целей в первую очередь используются эхолоты и гидролокаторы [3 – 5]. Однако их применение имеет ряд недостатков, что не обеспечивает эффективности и достоверности наблюдений и оценок. Во-первых, отражающая способность пузырька пропорциональна квадрату его радиуса и отражённый сигнал не характеризует его объём. При этом определение газосодержания по уровню отражённого сигнала возможно только в случае известного размерно-количественного состава пузырьков. Во-вторых, уровень отражённого сигнала от совокупности пузырьков зависит от соотношения среднего расстояния между ними и длины звуковой волны, размеров области пузырьков и длительности зондирующего сигнала (рассеяние однократное или многократное, а отражение – когерентное или некогерентное). Всё это делает неоднозначным результат эхолокационного наблюдения. В-третьих, отражающая способность пузырьков на дорезонансных частотах очень мала. Поэтому для наблюдения «маленьких» пузырьков приходится увеличивать значения рабочих частот, использование которых при двухстороннем распространении звука не может обеспечить гидролокаторам значительных дальностей.

Повышения эффективности мониторинга газовыделений можно достичь при использовании методов акустического горизонтального зондирования (прозвучивания), при которых звук при распространении пересекает область газовыделения. По сравнению с локационными системами в систе-

© В.К.Богушевич, Л.Н.Замаренова, М.И.Скипа, 2008

мах прозвучивания используются более низкие частоты, что позволяет увеличивать расстояния до наблюдаемых газовыделений.

Идея акустического прозвучивания состоит в использовании информации о распространении звука для получения информации о характеристиках среды. Выделяющиеся из дна пузырьки метана изменяют скорость распространения звуковых волн c_0 . Аномалия скорости звука, вызываемая моноразмерными пузырьками, определяется частотой зондирующего сигнала f_c , резонансной частотой пузырьков f_R и газосодержанием τ_N [6] (рис.1, а):

$$\Delta c(f_c) = -7,3 \cdot 10^3 \cdot c_0 \cdot \tau_N \cdot (1 - f_c/f_R) / [(1 - f_c^2/f_R^2)^2 + \Delta^2 (f_c^2/f_R^2)], \quad (1)$$

$f_R = (3,26/R)(1 + 0,1z)^{1/2}$; R – радиус; z – глубина; Δ – постоянная затухания.

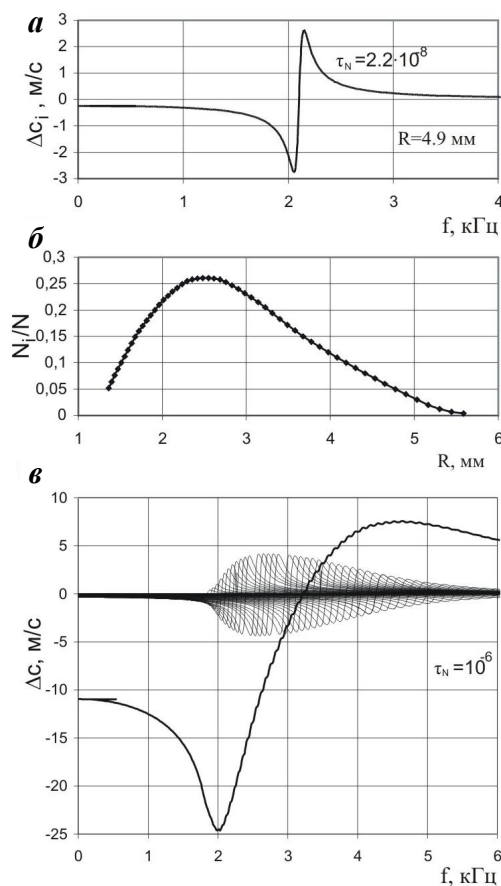
В случае широкого спектра размеров пузырьков (рис.1, б) каждый из них в соответствии со своим газосодержанием τ_{Ni} формирует свою кривую аномалии $\Delta c_i(f) = F(R_i, \tau_{Ni})$. Результирующая кривая аномалии скорости звука

совокупности пузырьков разных размеров определяется как сумма кривых $\Delta c_i(f)$ (рис.1, в).

Для выявления и оценивания газовыделений предлагается измерять аномалию времени распространения ΔT и по ней оценивать аномалию Δc [7, 8]. На низких частотах, $f_c \ll f_{Ri}$, согласно (1) $\Delta c = -7,3 \cdot 10^3 c_0 \tau_N$, что позволяет определять газосодержание τ_N по измеренному значению Δc при произвольном размерном составе пузырьков. Для определения размерно-количественного состава пузырьков нужно находить зависимость $\Delta c(f)$, используя зондирование на нескольких (5 – 7) частотах.

Для акустического мониторинга газовыделений предлагается использовать лучевой подход. При лучевом подходе к решению задачи оценки аномалии Δc и выявления газовыделений с помощью распространяющегося звука в качестве измеряемых величин берутся времена распространения сигналов по лучам. При этом аномалия времени прихода, обусловленная аномалией поля $\Delta c = c - c_0$, равна

$$\Delta T_m = \int_{\Gamma_m} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-1} ds, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2)$$



Р и с . 1 . Зависимость аномалии скорости звука от частоты для моноразмерных пузырьков (а) и совокупности пузырьков (в) со спектром размеров (б).

где $c_0(x, y, z)$ – исходное, «опорное» состояние поля; $c(x, y, z, t)$ – поле наблюдаемой среды; s – расстояние по лучу; Γ_m^0 – опорный луч, соединяющий излучатель и приёмник в среде с $c = c_0$; Γ_m – луч в среде с $c = c_0 + \Delta c$.

Соотношения (2) образуют систему из M интегральных уравнений относительно неизвестной функции $\Delta c(x, y, z)$, которую и требуется найти по измеренным ΔT_m . При $\Delta c/c_0 \ll 1$ и незначительном отличии траекторий Γ_m и Γ_m^0 задачу инверсии (2) можно упростить путём её линеаризации [9]. В этих случаях, с относительной ошибкой $\Delta c/c_0$ выражение для ΔT_m можно приближённо, в линеаризованном по Δc виде, записать

$$\Delta T_m \approx - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \Delta c ds, \quad m = 1, \dots, M. \quad (3)$$

В случае локальных неоднородностей (горизонтальный и вертикальный размеры которых L и B меньше длин циклов и разницы глубин заворота используемых при зондировании лучей), какими обычно и являются газовыделения, для решения задачи восстановления аномального поля $\Delta c(x, y, z, t)$ предлагается метод акустического лучевого зондирования и лучевой реконструкции [10, 11]. Суть метода состоит в анализе времен распространения сигналов разных лучей и определении по их изменению траекторий, пересекавших аномальную область. Зная аномальные и неаномальные траектории и их положение в пространстве, можно определить положение и размер неоднородности. В месте расположения газовыделения аномальные лучи находятся в минимальном интервале глубин, примерно равном его вертикальному размеру (рис.2, б). Неаномальные лучи в этом же месте у дна формируют свободную область примерно той же высоты (рис.2, в). Характер распределения аномалии Δc в неоднородности можно установить по величине аномалий времен распространения сигналов и длине аномальных участков траекторий.

При зондировании газовыделений из-за малости углов скольжения лучей χ часто значения опорного поля c_0 и аномалии поля Δc в пределах аномального участка траектории s_{am} ($s_{am} \approx L$) можно принимать неизменными. При этом

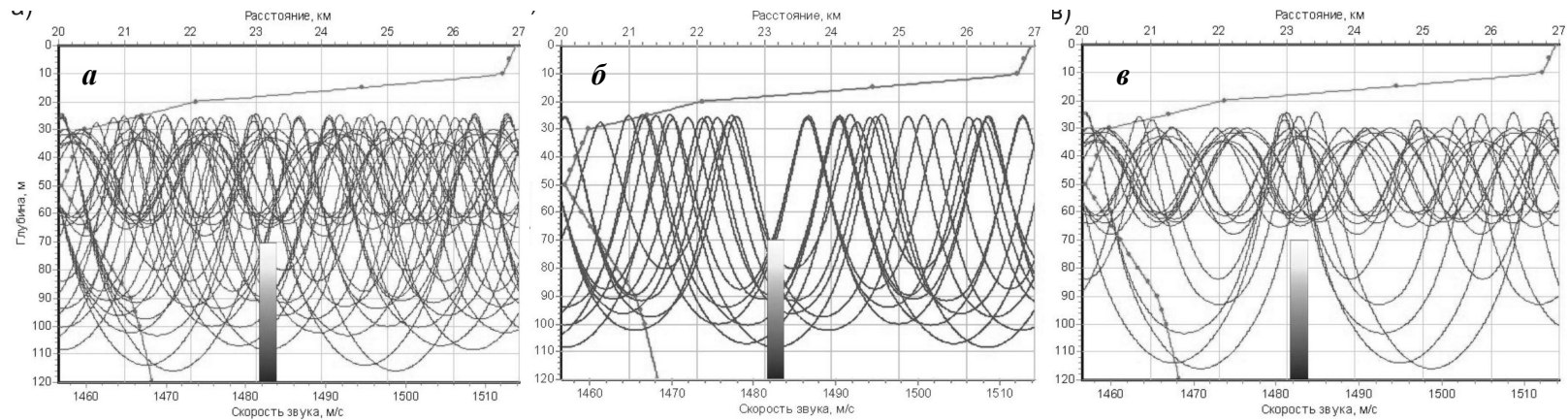
$$\Delta T_m \approx - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \Delta c ds \approx -c_{0m}^{-2} \int_{\Gamma_m^0} \Delta c ds = -s_{am} \cdot \delta c_m / c_{0m}^2, \quad (4)$$

где δc_m – аномалия поля Δc на аномальном участке траектории s_{am} . Принимая $c_{0m} \approx 1470$ м/с, получим

$$\Delta T_m \approx -0,46 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \delta c_m. \quad (5)$$

В соответствии с горизонтальными размерами L и газосодержанием у дна τ_N [3, 5] все газовыделения на шельфе Чёрного моря с определённым приближением можно отнести к пяти характерным типам [11]. Учитывая, что на «низких» частотах $\Delta c = -7,3 \cdot 10^3 c_0 \tau_N \approx -11,24 \cdot 10^6 \tau_N$ ($c_0 = 1470$ м/с), эти газовыделения можно охарактеризовать величинами аномалии Δc ($\Delta c = \delta c$) и аномальности $L \delta c$, приведенными в таблице.

Указанные величины аномальности $L \delta c$ позволяют оценить величину аномалии времени распространения (5) и способность систем акустического мониторинга выявлять и оценивать донные газовыделения. Для обнаружения газовыделения аномалия времени распространения должна превышать точность измерения времени прихода сигнала, $\Delta T_m > \sigma_\tau$, для оценивания –



$T_{p1}=27,365\text{с}$ $z_{m1}=115,9\text{ м}$ $T_{p5}=27,383\text{с}$ $z_{m5}=103,3\text{ м}$ $T_{p9}=27,400\text{с}$ $z_{m9}=97,5\text{ м}$ $T_{p13}=27,415\text{с}$ $z_{m13}=91,6\text{ м}$ $T_{p17}=27,438\text{с}$ $z_{m17}=83,9\text{ м}$
 $T_{p2}=27,370\text{с}$ $z_{m2}=114,0\text{ м}$ $T_{p6}=27,388\text{с}$ $z_{m6}=102,3\text{ м}$ $T_{p10}=27,405\text{с}$ $z_{m10}=96,2\text{ м}$ $T_{p14}=27,419\text{с}$ $z_{m14}=91,0\text{ м}$ $T_{p18}=27,439\text{с}$ $z_{m18}=80,1\text{ м}$
 $T_{p3}=27,374\text{с}$ $z_{m3}=108,4\text{ м}$ $T_{p7}=27,392\text{с}$ $z_{m7}=100,4\text{ м}$ $T_{p11}=27,408\text{с}$ $z_{m11}=93,9\text{ м}$ $T_{p15}=27,429\text{с}$ $z_{m15}=89,5\text{ м}$
 $T_{p4}=27,379\text{с}$ $z_{m4}=106,9\text{ м}$ $T_{p8}=27,396\text{с}$ $z_{m8}=100,1\text{ м}$ $T_{p12}=27,412\text{с}$ $z_{m12}=93,0\text{ м}$ $T_{p16}=27,433\text{с}$ $z_{m16}=87,5\text{ м}$

Р и с . 2 . Лучевая структура в присутствии неоднородности: все лучи (а), аномальные (б) и неаномальные (в) траектории, времена распространения по лучам.

Т а б л и ц а . Характерные типы газовыделений на шельфе Черного моря.

тип газовыделения	L , м	τ_N	δc , м/с	$L\delta c$, м ² /с
мощный факел	30 – 60	$(20 - 60) \cdot 10^{-6}$	220 – 660	$(6,8 - 40,9) \cdot 10^3$
средний факел	10 – 30	$(5 - 20) \cdot 10^{-6}$	55 – 220	568 – 6810
участок струй	5 – 20	$(0,5 - 5) \cdot 10^{-6}$	5,5 – 55	28,4 – 1135
участок факелов	100 – 200	$0,5 \cdot 10^{-6}$	5,5	568 – 1135
район факелов	100 – 1000	$0,22 \cdot 10^{-6}$	2,4	749 – 2497

$\Delta T_m > (3 - 5)\sigma_\tau$. Потенциальная точность измерения времени прихода сигнала [10]: $\sigma_\tau \leq 0,4/F_c(u_c/u_{ш})$, где F_c – полоса частот сигнала; $u_c/u_{ш}$ – отношение сигнал/шум в точке приёма.

Для акустической мощности сигнала 400 Вт, направленности излучателя $k_p = 3,0$, частоты сигнала $f_c = 3$ кГц и полосы $F_c = 750$ Гц, коэффициента затухания 0,17 дБ/км, спектрального уровня шума моря 0,4 мПа/Гц^{1/2} и расстояния $r = 50$ км достигается $u_c/u_{ш} = 13,8$ и потенциальная точность измерения времени равна $\sigma_\tau = 0,04$ мс. При $r = 100$ км потенциальная точность измерения $\sigma_\tau = 0,2$ мс, при $r = 25$ км $\sigma_\tau = 0,01$ мс [10, 11]. Полученные значения σ_τ позволяют оценить «степень аномальности» $L\delta c$, при которой неоднородности поддаются обнаружению в идеализированной морской среде на расстояниях 25, 50 и 100 км: 23, 91 и 455 м²/с, и поддаются анализу: 80, 300 и 1500 м²/с.

В условиях реальной рассеивающей среды возможности обнаружения и анализа газовыделений ухудшаются – рассеяние длительности сигнала и времени его распространения снижает точность измерения аномалии времени. Рассеяние траекторий распространения приводит к явлению «толщины» луча, ограничивающему мониторинг неоднородностей малых размеров и саму возможность акустического лучевого зондирования в случае малых глубин моря.

Условия рассеяния звука при распространении определяются дифракционным параметром Λ , параметром неоднородности среды Φ и степенью насыщения флуктуаций сигнала в точке приёма [12]. При насыщенных флуктуациях, $\Phi > 1$, $\Lambda\Phi > 1$, между точками излучения и приёма существует несколько лучей, $N \approx \Lambda\Phi$, разнесенных по вертикали на величину $\xi = L_v$, где L_v – вертикальный интервал корреляции неоднородностей. При этом «толщина» лучевой трубки (диаметр), увеличение длительности рассеянного сигнала и флуктуация времени распространения сигнала определяются соотношениями

$$d_v \approx NL_v \approx \Lambda\Phi \cdot L_v > L_v, \quad \Delta T_c = \Lambda\Phi^2 \cdot \ln \Phi / 2\pi f, \quad \tau = \Lambda\Phi^2 \cdot \ln \Phi / 2\pi f.$$

При частично насыщенных флуктуациях $\Phi > 1$, $\Lambda < 1$, $\Lambda\Phi^2 > 1$, но $\Lambda\Phi < 1$:

$$d_v = \Lambda\Phi L_v < L_v, \quad \Delta T_c = \Lambda\Phi \cdot \ln \Phi / 2\pi f, \quad \tau = \Phi / 2\pi f.$$

При ненасыщенных флуктуациях $\Lambda\Phi^2 < 1$, $\Lambda < 1$ или $\Phi < 1$, $\Lambda > 1$:

$$d_v = 2(\lambda r / 2\pi\mu)^{1/2} \cdot (\lambda / 2\pi L_v) = 2(\lambda r)^{1/2} \cdot (\lambda / 2\pi L_v) (1/2\pi\mu)^{1/2},$$

$$\Delta T_c = 0, \quad \tau = \Phi / 2\pi f.$$

Для определения условий рассеяния звука и оценки d_v , ΔT_c и τ необходимо вычисление параметров Λ и Φ и используемого для определения Λ

френелевского размера лучей $R_F(x, z)$: $\Phi^2 \approx k^2 \cdot \langle \mu^2 \rangle L_p \cdot r$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\langle \mu^2 \rangle = \langle (\Delta c/c)^2 \rangle$; $L_p \approx 0,4L_c$ – интегральный масштаб неоднородностей; L_c – интервал пространственной корреляции неоднородностей.

$$\Lambda = (1/r) \int_0^r (1/2\pi) [R_F(x, z)/L_c(z)]^2 dx.$$

Френелевский размер зависит от профиля скорости звука и характеристик траектории D_u и z_m . Вопросы зависимости R_F от геометрии лучевого пространства в условиях ПЗК океана рассматривались в [12]. В условиях ПЗК и ППЗК Чёрного моря в силу существенно иной гидрологии и других траекторно-лучевых соотношений значения френелевских размеров $R_F(x, z)$ будут другими [13, 14]. В условиях ПЗК, $H_m \geq 150$ м, и типичных характеристиках рассеивающих неоднородностей $L_V \sim 50 - 120$ м и $\langle \mu^2 \rangle \sim (20 - 100) \cdot 10^{-10}$ [15] при $r = 50$ км, $f_c = 5,0$ кГц «толщину» луча у дна можно оценить при ненасыщенных флуктуациях типовым и максимальным значениями $d_{V1} \approx 7$ м, $d_{V2} \approx 14$ м, при частично насыщенных флуктуациях максимально-возможным значением $d_{V3} \approx 25$ м. Изменение расстояния r и связанное с этим изменение частоты f_c приводят при ненасыщенных флуктуациях к изменению «толщины» луча – $d_V \sim \lambda^{3/2} \cdot r^{1/2}$. В тех же условиях ухудшение точности измерений аномалии времени, $\Delta_\sigma = \tau + \Delta T_c/2$, будет иметь типовое значение $\Delta_\sigma = 0,06$ мс и максимальное $\Delta_{\sigma \max} = 0,11$ мс. При изменении r (и изменении f_c) ухудшение точности измерений будет определяться соотношением $\Delta_\sigma \sim r^{1/2}$. В условиях ППЗК для $H_m = 75$ и 100 м и типичных характеристик рассеивающих неоднородностей [15] при $r = 15$ км и $f_c = 10$ кГц «толщина» луча у дна оценивается величинами $4,8$ и $3,2$ м с увеличением этих значений к поверхности [14]. Ухудшение точности измерений при этом составит $0,010$ и $0,011$ мс для глубин 75 и 100 м.

Таким образом, реальная рассеивающая среда ограничивает поперечные размеры наблюдаемых газовыделений величинами $L \geq 10 - 15$ м при $r = 50$ км, $H_m \geq 150$ м и $L \geq 5 - 7$ м при $r = 15$ км, $H_m = 75 - 100$ м. Ухудшение точности измерений до значений $\sigma_\tau^* 0,06; 0,12$ и $0,30$ мс на расстояниях $25, 50$ и 100 км ограничивает способность обнаруживать неоднородности до величин $L\delta c$ $133, 267, 666$ м²/с и способность оценивать их до $L\delta c$ $400, 800, 2000$ м²/с.

При лучевом зондировании интервал времени между сигналами лучей Δt_{pi} должен превышать сумму длительности сигнала ($T_c \approx 1/F_c$) и возможной аномалии времени распространения ΔT_m , $\Delta t_{pi} > 1/F_c + \Delta T_m$. При частоте сигнала $f_c = 3,0$ кГц и полосе частот $F_c = 750$ Гц ($F_c \approx 0,2 - 0,3f_c$) первое слагаемое $1/F_c = 1,3$ мс. Для указанных выше газовыделений аномалия времени распространения, $\Delta T_m = -0,46 \cdot 10^{-6} L\delta c$ в большинстве случаев не превышает $1 - 2$ мс и требуемый интервал между сигналами лучей можно определить как $\Delta t_{pi} \geq 3$ мс.

Времена прихода сигналов по отдельным лучам определяются условиями распространения (поле скорости звука, положение точек излучения и приёма), а интервалы между сигналами зависят от глубин точек заворота z_m этих лучей и для ПЗК Чёрного моря при $z_m \geq 120 - 140$ м с определённой точностью составляют [10]:

$$\mathcal{A}(z_m) \approx 4\sqrt{2a} \cdot z_m^{3/2} / 3c_0, \quad (6)$$

где a – относительный градиент скорости звука.

Из (6) следует, что в более мелководных районах сложнее производить отдельный приём сигналов и, соответственно, поиск газовыделений. Для глубин 300, 200 и 150 м рассчитанные для конкретного ПЗС интервалы времени составили 25,1; 13,6 и 8,9 мс. Для $z_m = 120$ м расчёты для четырёх характерных ПЗК дали величину $\mathcal{A}(z_m) \geq 6,3$ мс [10]. Для меньших глубин, 100, 90 и 80 м, для ПЗК, приведенного на рис.2, интервалы составляли 8,0; 7,0 и 4,6 мс.

Указанные интервалы $\mathcal{A}(z_m)$ соответствуют случаю выхода лучей из излучателя вверх или вниз и приходу их на приемник снизу или сверху. Если таких ограничений нет, то число лучей в 4 раза больше, а интервалы между сигналами меньше. Выбор числа используемых лучей зависит от специфики решаемой задачи и требований к пространственному и временному разрешению систем зондирования. При максимальном числе лучей для обеспечения равенства интервалов между сигналами, $\Delta t_{pi} \leq \mathcal{A}(z_m)/4$, соответствующим образом выбираются глубины излучения z_u и приёма z_{np} . Для выбора этих глубин и формирования необходимой временной структуры принимаемого сигнала в ОГА МГИ НАНУ разработан метод временных интервалов и форма представления интервалов в виде временных диаграмм [11, 16].

При малых глубинах моря и недостаточных Δt_{pi} задачу акустического мониторинга газовыделений можно решать или при меньших r (больших f_c , F_c и меньших $1/F_c$) или в случае газовыделений с меньшими величинами аномальности $L\delta c$. Отдельный приём сигналов лучей можно осуществлять и при меньших, чем в случаях ПЗК, глубинах, но при других гидрологиях, например в условиях зимнего ПЗК или летней отрицательной рефракции. Но в этих случаях приходится использовать лучи, имеющие отражения от поверхности или дна, что усложняет задачу мониторинга.

Еще одной причиной, усложняющей мониторинг донных газовыделений при малых глубинах моря, является неустойчивость лучевой и временной структур распространения и сложность идентификации лучей. Большие и часто разнознаковые значения вертикального градиента скорости звука в случае мелководных районов ($H_m \leq 30 - 50$ м), обуславливают неоднозначность лучевой и временной структур распространения (несколько траекторий с одинаковым числом циклов, но разными глубинами заворота z_m и разными временами прихода T_m), их неустойчивость к незначительным изменениям аномалии Δc и изменения количества лучей, трансформацию их характеристик и времён распространения. В этих случаях идентификация лучей затруднена. При больших глубинах ($H_m \sim 60 - 80$ м), благодаря водам холодного промежуточного слоя (ХПС), а при глубинах $H_m > 80 - 100$ м благодаря ХПС и постоянному галоклину, в области глубин $z \geq 50$ м формируется стабильная нижняя ветвь профиля скорости звука ПЗК. Эта стабильность повышает устойчивость придонных лучей к воздействию аномального поля, идентификация лучей упрощается. При глубинах $H_m \geq 100 - 140$ м траектории в придонном пространстве в основном определяются стабильной частью профиля СЗ в области глубин $z_m > 80$ м, как правило, демонстрируют однозначность траекторно-временных соотношений ($\chi_{вых} \uparrow \rightarrow z_m \uparrow \rightarrow D_u \uparrow \rightarrow T_m \downarrow$ [10])

и проблем с идентификацией лучей обычно не возникает.

Возможности выявления и оценивания газовыделений определяются их размерами и величинами аномалий скорости звука Δc . Приближение лучевой акустики требует малости изменения скорости звука ($\Delta c/c_0 \ll 1$) на длине волны. Это требование выполняется практически для всех газовыделений. Упрощение задачи инверсии за счет линеаризации (3) требует малости изменения скорости звука ($\Delta c/c_0 \ll 1$) в области газовыделения и малости отличия исходной Γ_m^0 и аномальной Γ_m траекторий. Эти требования выполняются для всех газовыделений, за исключением мощных факелов с величинами газо-содержания $\tau_N \geq 15 \cdot 10^{-6}$. В последнем случае точность оценок характеристик газовыделений будет существенно ухудшаться. Точность оценок газовыделений зависит также от соотношения их горизонтального размера L и длины цикла лучевой траектории $D_{\text{ц}}$. При $D_{\text{ц}} \geq 3,0$ км (при $H_m \geq 100$ м) хорошая точность (приближение линейности аномального участка траектории) обеспечивается для большинства газовыделений (с размерами $L \leq 0,5$ км). Вопросы искажения лучевых траекторий при прохождении через область газовыделения, отличия исходной Γ_m^0 и аномальной Γ_m траекторий и точности оценок характеристик газовыделений рассматриваются нами в готовящейся к публикации работе.

Пример выявления и анализа донного газовыделения: все лучи, аномальные и неаномальные траектории и времена распространения по лучам, показаны на рис.2.

Возможности оценивания размерного состава пузырьков газовыделения зависят от самого размерного состава и связаны с длиной трасс зондирования и возможным диапазоном используемых частот. В ряде случаев для решения этого вопроса помимо многочастотного лучевого зондирования необходимо использование низкочастотных сигналов при неразделяющихся во времени сигналах лучей [8].

Выводы. Донные газовыделения поддаются обнаружению и оцениванию при глубинах моря от 70 до 100 м на расстояниях от 8 до 15 км. Лучшими возможностями акустического мониторинга будут в условиях ПЗК с малой глубиной оси. В таком канале ($H_m = 100$ м) достигаемые дальности наблюдения $r = 15 - 25$ км, а различаемая аномальность газовыделения $L\delta c = 80 - 150$ м²/с, что позволяет выявлять и оценивать большинство характерных газовыделений. С увеличением глубины моря возможные дальности мониторинга газовыделений увеличиваются, достигая 150 км при $H_m \geq 200$ м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П., Волошин А.Н., Алябьев А.Я. Сейсмоакустические исследования газовыделяющих структур дна северо-западной части Чёрного моря // Геофизический журнал.– 1998.– т.20, № 5.– С.110-117.
2. Москаленко В.Н., Питман У., Райан Б.Ф. Выделение газонасыщенных осадков на сейсмоакустических разрезах в северо-западной части Чёрного моря // Океанология.– 1996.– т.36, № 3.– С.462-469.
3. Любичкий А.А. Гидроакустические исследования явлений активного газовыделения в северо-западной части Чёрного моря // Экологическая безопасность

- прибрежных и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.9.– С.226-240.
4. *Artemov Yu.G., Greinert J., McGinnis D., De Batist M., Egorov V.N.* Acoustic observations of gas bubble streams in the NW Black Sea as a method for estimation of gas flux from vent sites // *Geophysical Research Abstracts*.– 2003.– v.5.– P.09421.
 5. *Егоров В.Н. и др.* Современные представления о средообразующей и экологической роли струйных метановых газовыделений со дна Черного моря // *Морський екологічний журнал*.– 2003.– т.11, № 3.– С.5-26.
 6. *Скучик Е.* Основы акустики. Т.2.– М.: Иностранная литература, 1959.– 336 с.
 7. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Выявление и оценка газовыделений из дна системами акустического горизонтального лучевого зондирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.546-553.
 8. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Возможности выявления и оценок метановых газовыделений на шельфе Черного моря методами акустического лучевого зондирования // *Акустичний симпозіум «Консонанс-2007»*. 25-27 вересня 2007 р.– Київ: Інститут гідромеханіки, 2008.– С.56-62.
 9. *Гончаров В.В., Куртенов В.М.* Успехи и проблемы акустической томографии океана // *Акустические волны в океане*. Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б.– М.: Наука, 1987.– С.15-24.
 10. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* О возможностях акустического лучевого зондирования неоднородностей морской среды // *Акустичний симпозіум «Консонанс-2005»*. 27-29 вересня 2005 р.– Київ: Інститут гідромеханіки, 2005.– С.90-96.
 11. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* Повышение эффективности экологического и ресурсного мониторинга морской среды за счёт применения метода акустического горизонтального лучевого зондирования // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.349-357.
 12. *Распространение звука во флуктуирующем океане* / Под ред. С.Флатте.– М.: Мир, 1982.– 462 с.
 13. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* О рассеянии звука, френелевских размерах и «толщине» лучей в задачах акустического лучевого зондирования // *Актуальні аспекти фізико-механічних досліджень. Акустика і хвилі*.– Київ: Наукова думка, 2007.– С.44-55.
 14. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* О «толщине» лучей и возможностях акустического лучевого зондирования в условиях мелкого моря // *Акустичний симпозіум «Консонанс-2007»*. 25-27 вересня 2007 р.– Київ: Інститут гідромеханіки, 2008.– С.63-68.
 15. *Агеева Н.С., Андреева И.Б. и др.* Океанологические характеристики, важные для акустики океана // *Акустика океана. Часть I*.– М.: Наука, 1974.– С.5-78.
 16. *Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И.* О спектре интервалов времени между двумя последовательно приходящими сигналами в подводном звуковом канале // *Акустичний симпозіум «Консонанс-2005»*. 27-29 вересня 2005 р.– Київ: Інститут гідромеханіки, 2005.– С.97-102.

Материал поступил в редакцию 08.10.2008 г.
После доработки 11.12.2008 г.