

## МЕЛКОВОДНЫЕ ЗОНЫ ПУЗЫРЬКОВОЙ РАЗГРУЗКИ МЕТАНА В ОХОТСКОМ МОРЕ

**Саломатин А.С., Черных Д.В., Доманюк А.В.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток  
salomatin@poi.dvo.ru*

В основу работы легли данные полученные в рейсах №№ 29, 31, 32, 36, 39, 43, 44, 47, 50, 54, 56, 57, 59, 62 и 74 НИС “Академик М.А. Лаврентьев”. Гидроакустические наблюдения проводились с помощью комплекса, основу которого составляли модернизированные судовые эхолоты Сарган-ЭМ, ELAC LAZ-72, два гидролокатора Сарган-ГМ и многоканальная система цифровой регистрации гидролокационных сигналов [1]. Небольшое количество данных было получено с помощью эхолота для научных исследований Simrad EK-60. Поисковым гидроакустическим признаком зон пузырьковой разгрузки метана (ЗПРМ) служили так называемые «газовые факелы» (ГФ), протяженные области выходящих из морского дна и всплывающих в водной толще пузырьков газа. В выше упомянутых экспедициях в Охотском море у о. Сахалин было обнаружено около 1400 ГФ в интервале глубин от 46 до 3330 метров. В том числе 270 мелководных ГФ, расположенных на шельфе и его бровке (рис. 1).

Большинство мелководных ГФ обнаружено у северной оконечности о. Сахалин в интервале широт  $53^{\circ}$  -  $55^{\circ}$  с.ш. и у южной оконечности о. Сахалин в заливе Терпения, несколько ГФ найдено в проливе Лаперуза. Примеры регистраций мелководных ГФ в заливе Терпения показаны на рис. 2. При этом судно двигалось перпендикулярно (рис. 2а) и параллельно (рис. 2б) к бровке шельфа, находящейся на глубине 165 метров. На эхограмме (рис. 2а) хорошо видны многочисленные ГФ, большинство из которых, а именно 10 ГФ, сосредоточены на участке шельфа длиной 1685 метров и глубиной  $H \approx 145$  метров. Ширина обследуемой эхолотом области водной толщи равна:

$$S = 2\sin(\varphi) \cdot (H - H_a) + \operatorname{tg}(\beta_{\perp}) \cdot H_{\text{ГФ}} + D, \quad (1)$$

Рис. 1. Карта-схема положения ГФ в Охотском море у побережья о. Сахалин. Красными кружками отмечено положение мелководных ГФ, желтыми глубоководных ГФ

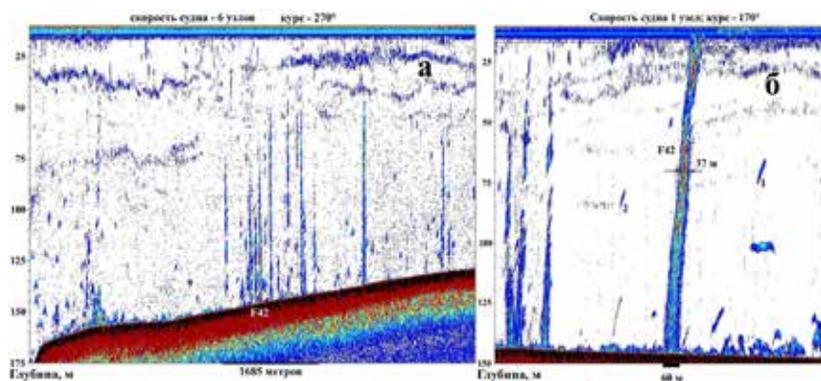
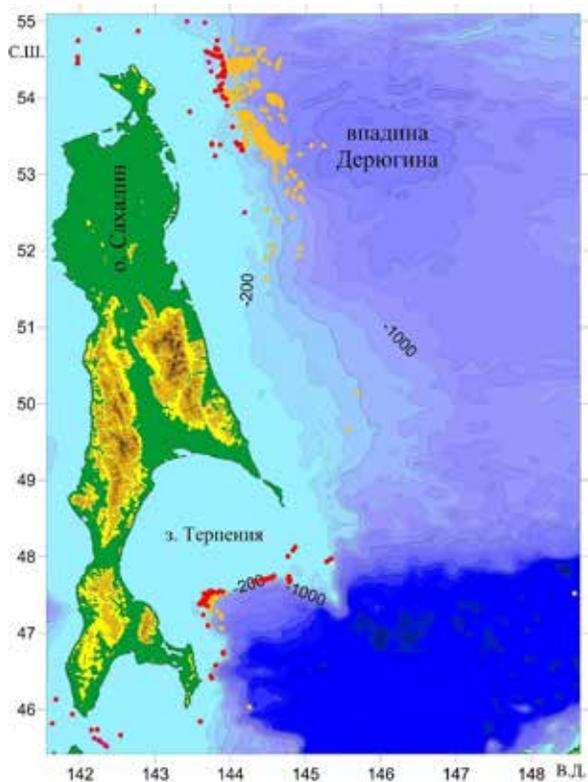


Рис. 2. Эхограммы мелководных ГФ в заливе Терпения, цифрами 1 и 2 обозначены одиночные всплывающие пузырьки

где  $\varphi$  – эффективная полуширина диаграммы направленности (ЭПШДН) эхолота;  $H_a$  – глубина его приемоизлучающей антенны;  $\beta_{\perp}$  – угол наклона оси ГФ в проекции на плоскость перпендикулярную к направлению движения судна;  $D$  – ширина ГФ;  $H_{гф}$  – высота ГФ над дном.

Под ЭПШДН эхолота  $\varphi$ , будем принимать максимальный угол в диаграмме направленности (ДН) эхолота, при котором ГФ еще выделяется на эхограмме. В нашем случае  $\varphi \approx 10^\circ$ . Из рисунка 2б следует, что ширина ГФ F42  $D \approx 10$  м, а его ось наклонена в плоскости движения судна на угол  $\beta_{\parallel} = 30^\circ$ . Предполагая, что ГФ на рисунке 2а обладают схожими характеристиками, с помощью (1), получим, что ширина обследуемой эхолотом области равна  $S \approx 50$  м. Следовательно, на участке шельфа площадью 82000 м<sup>2</sup> находится 10 ГФ, а средняя плотность равна 55 ГФ на квадратном километре.

Для оценки количества метана переносимого выходящими из дна пузырьками воспользуемся простейшей моделью, при которой источник ГФ на дне выделяет пузырьки одного радиуса. Размеры источника малы по сравнению с размером озвученной эхолотом зоны, радиусы пузырьков больше резонансного и меньше длины звуковой волны в воде. При этих условиях количество молей газа, выходящего из дна в единицу времени в виде пузырьков,  $F_{и}$  определяется выражением [1]:

$$F_{и} \approx \frac{8\pi R_{эф} V_{спп\sigma}}{3V_M l} \quad (2)$$

где  $l$  – длина излученного импульса;  $\sigma$  – сечение обратного рассеяния ГФ у дна;  $V_M$  – молярный объем газа у дна;  $R_{эф}$  – эффективный радиус пузырька у дна;  $V_{п}$  – скорость всплытия пузырька.

Покажем, как по акустическим данным можно определить скорость всплытия пузырька  $V_{п}$ . Эхолоты регистрируют не глубинную цели, а расстояние от цели до его приемоизлучающей антенны  $S_{п}$ . Связь глубины пузырька на эхограмме  $S_{п}$  с его реальной глубиной  $H_{п}$  описывается простым выражением:

$$S_{п} = \sqrt{(H_0 - V_{п}t)^2 + (L_0 - V_{с}t)^2}, \quad (3)$$

где  $V_{с}$  – горизонтальная скорость судна по направлению к пузырьку,  $H_0$  – глубина пузырька в начальный момент времени  $t$ ,  $L_0$  – рас-

стояние пузырька от оси ДН эхолота в начальный момент времени. Производная по времени выражения (2) описывает связь кажущейся скорости всплытия пузырька  $V_k$  с его реальной скоростью всплытия, скоростью судна и углом наблюдения  $\alpha$  в ДН эхолота:

$$V_k = -\frac{dS_{II}}{dt} = \frac{(H_0 V_{II} t) V_{II} + (L_0 - V_C t) V_C}{S_{II}} = V_{II} \cos \alpha + V_C \sin \alpha.$$

Далее для реальной скорости всплытия пузырька получим:

$$V_{II} = \frac{V_k}{\cos \alpha} - V_C \tan \alpha. \quad (4)$$

В морских условиях и при использовании узконаправленных эхолотов основную погрешность вносит второй член в выражении (4). Так в случае пузырьков на рисунке 2б ошибка, вносимая вторым членом, достигает 45%. Замечательно, что в случаях, когда выполняется неравенство:

$$V_C > V_{II} \tan \varphi \quad (5)$$

можно существенно уменьшить погрешность измерения средней скорости всплытия пузырька  $V_{II}$  равной:

$$V_{II} = \frac{S_{II1} \cos \alpha_1 - S_{II2} \cos \alpha_2}{t_2 - t_1},$$

где  $S_{II1}$  и  $S_{II2}$  – расстояние от пузырька до приемоизлучающей антенны эхолота а  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  углы наблюдения пузырька в ДН эхолота в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Для эхолотов с круговой симметрией ДН в пределах главного лепестка ДН выполняется условие равенства углов наблюдения одного пузырька в разных положениях относительно приемоизлучающей антенны эхолота, если его сила цели в этих положениях одинакова. Целесообразно за моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  выбирать время появления и исчезновения пузырька на эхограмме. В этом случае углы наблюдения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  равны ЭПШДН эхолота  $\varphi$  и выражение (5) принимает вид:

$$V_{II} = \frac{(S_{II1} - S_{II2}) \cos \varphi}{t_2 - t_1}. \quad (5)$$

Расчёт с помощью выражения (5) для пузырьков на эхограмме (рис. 2б) дает для пузырька №1 на глубине 70 м скорость всплытия

18 см/с, для пузырька № 2 на глубине 80 м скорость всплытия 19 см/с. Таким скоростям всплытия соответствуют эффективные радиусы пузырька  $R_{эф}$  для пузырька №1 -  $R_{эф} = 2,25$  мм, для пузырька №2 -  $R_{эф} = 3,4$  мм [2]. Расчет с помощью программы [3] показывает, что такие размеры достигает пузырек, выходящий из дна на глубине 145 м, с эффективным радиусом  $R_{эф} \approx 5,5$  мм. Расчет с помощью этой программы показывает, что пузырек такого размера доставляет непосредственно в атмосферу 2,5%, а на глубину слоя скачка 30% от количества метана в пузырьке у дна. Согласно [2] скорость всплытия пузырька такого размера у дна равна 22 см/с. Подставляя размер и скорость всплытия пузырька в выражение (2) получим, что в области ГФ F42 из морского дна в виде пузырьков выходит около 15 ммоль/с метана. Таким образом, для выделенного на рис. 2а участка длиной 1685 метров получим средний поток метана из морского дна около 250 ммоль/км<sup>2</sup>с.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы 124022100074-9 и проекта РНФ № 22-67-00025.

### Литература

1. Саломатин А.С., Юсупов В.И. Акустические исследования газовых «факелов» Охотского моря // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 911-919.
2. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, Drops, and Particles / N.Y.: Academic Press Inc., 1978. 380 p.
3. Greinert J., McGinnis D.F. Single Bubble Dissolution Model: The Graphical User Interface SiBu-GUI // Environmental Modelling & Software. 2009. Vol. 24. Issue 8. P. 1012-1013. DOI:10.1016/j.envsoft.2008.12.011.