

## ДИСТАНЦИОННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОДУКТИВНОСТИ МЕТАНОВЫХ СИПОВ НА МОРСКОМ ДНЕ ПО ФЛУКТУАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭХО-СИГНАЛОВ: МЕТОДОЛОГИЯ

А. А. ЛЮБИЦКИЙ<sup>1</sup>, А. В. ОМЕЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков*

<sup>2</sup>*Харьковский национальный университет радиоэлектроники*

Развит метод определения продуктивности газовых сипов, основанный на измерении параметров вероятностного распределения эхо-сигналов от ГФ при конечном числе пузырьков газа в элементе разрешения акустической системы. Получены инверсионные соотношения, связывающие среднее количество пузырьков в элементе разрешения эхолота  $\langle n \rangle$  с коэффициентом эксцесса. Даны оценки объемов выборок эхо-сигналов для достижения заданной точности определения  $\langle n \rangle$ . Приводятся результаты имитационных компьютерных экспериментов с использованием дискретной модели объемной реверберации, подтверждающие справедливость полученных инверсионных соотношений при широком варьировании условий экспериментов.

### ВВЕДЕНИЕ

Продуктивность газовыделяющих источников является комбинированным параметром, характеризующим частоту эмиссии пузырьков газа (преимущественно метана) в водную толщу и численно равным их количеству в придонном слое газового факела (ГФ) над сипом. С помощью акустических методов и средств этот параметр обычно определяется путем измерения одночастотными эхолотами основной энергетической характеристики - силы объемного рассеяния с привлечением данных о среднем значении сечения обратного рассеяния  $\langle \sigma_{BS} \rangle$  пузырьков газа, формирующих факелы. Поскольку в интенсивных ГФ отдельные пузырьки не «разрешаются» эхолотами, то  $\langle \sigma_{BS} \rangle$  оценивается по данным зондирования одиночных пузырьков газа, наблюдаемых вне таких факелов [1], что может приводить к большим ошибкам в оценках продуктивности индивидуальных сипов и газоотдачи дна акватории в целом.

Целью работы является обоснование метода определения продуктивности газовых сипов, основанного на измерении параметров вероятностного распределения эхо-сигналов от ГФ при конечном числе пузырьков газа в элементе разрешения акустической системы.

### 1. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ МЕТАНОВЫХ СИПОВ ПО ФЛУКТУАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЭХО-СИГНАЛОВ

В рамках дискретной модели однократного рассеяния звука в ГФ, широко используемой для интерпретации данных акустического зондирования активных газовыделений из морского дна, принятый эхо-сигнал является суммой элементарных сигналов, рассеянных в обратном направлении пузырьками, формирующими факел. В этом случае простейший способ оценки продуктивности сипа заключается в определении среднего числа элементарных сигналов, приходящих одновременно в точку излучения-приема по относительной дисперсии объемной реверберации звука в факеле.

$$\langle n(t) \rangle = D_s(t)/D_I(t),$$

где  $D_s(t)$  – дисперсия суммарного реверберационного сигнала из элемента разрешения, отстоящего от точки излучения-приема на расстоянии  $R = ct/2$  (здесь  $c$  – скорость звука);  $D_I(t)$  – дисперсия реверберации, когда в точку приема приходит сигнал только от одного рассеивателя (т.е. при  $n(t)=1$ ). Однако, практическая реализации этого способа применительно к зондированию ГФ затруднена ввиду необходимости принятия при расчетах  $D_I(t)$  ряда гипотез относительно свойств единичного рассеивателя. Природные ГФ, как правило, формируются газовыми пузырьками разных размеров, для которых характерна выраженная аллометрия (зависимость формы от размера), а также сильные осцилляции их формы и траекторий движения при всплытии. Поэтому рассмотрим иной метод определения величины  $\langle n(t) \rangle$ , основанный на анализе распределений вероятностей эхо-сигналов при конечном (относительно небольшом) числе пузырьков в элементе разрешения. Такие условия, в частности, имеют место в ГФ над сипами с низкой продуктивностью, а также при использовании узконаправленных акустических антенн и зондирующих импульсов малой длительности, обеспечивающих небольшие размеры рассеивающего объема.

В работе [2] было показано, что при небольшом числе элементарных рассеянных сигналов распределение вероятностей суммарного эхо- сигнала отлично от гауссова. При этом, мерой такого отличия может служить коэффициент эксцесса  $\gamma_3(t)$  распределения мгновенных значений эхо-сигнала, определяемый соотношением

$$\gamma_3 = AC / \langle n(t) \rangle, \quad (1)$$

$$\text{где параметры } A = \langle a^4 \rangle / \langle a^2 \rangle^2; \quad C = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C^4(t') dt'}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} C^2(t') dt' \right]^2}. \quad (2)$$

определяются моментами распределения случайных амплитуд  $a$  элементарных рассеянных сигналов и видом зондирующего сигнала  $C(t)$ .

Из выражений (1, 2) следует инверсионное соотношение, связывающее среднее число  $\langle n(t) \rangle$  элементарных сигналов, приходящих в точку приема в момент времени  $t$  (т.е. количества пузырьков в элементе разрешения эхолота) с коэффициент эксцесса  $\gamma_3(t)$

$$\langle n(t) \rangle = AC / \gamma_3(t), \quad (3)$$

в котором коэффициент  $\gamma_3(t)$  должен быть измерен, а величины  $A$  и  $C$  – рассчитаны.

Отметим, что выражение (1) справедливо для случая, когда число рассеивателей распределено по закону Пуассона и отсутствует когерентная составляющая в суммарном сигнале обратного рассеяния. Получим также соотношения, связывающие величины  $\gamma$  и  $\langle n \rangle$  для узкополосных эхо-сигналов в более общем случае, не вводя указанных ограничений.

Сигнал, рассеянный одним пузырьком, опишем выражением

$$x(t) = a \cdot s(t - t_0) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi],$$

где  $a$  и  $\varphi$  – статистически независимые амплитуда и фаза сигнала. Фаза  $\varphi$  полагается равномерно распределенной в интервале  $[-\pi, \pi]$ . Сомножитель  $s(t - t_0)$  описывает огибающую зондирующего сигнала, а  $t_0$  – задержка сигнала от пузырька.

Очевидно, что при попадании данного пузырька в текущий элемент разрешения вероятностные характеристики одномерного распределения сигнала  $x(t)$  совпадают с вероятностными характеристиками статистики

$$\xi = a \cdot s(\tau) \cdot \cos \varphi,$$

где величина  $\tau$  характеризует смещение задержки сигнала от заданного рассеивателя относительно центра элемента разрешения.

Коэффициент эксцесса суммарного эхо- сигнала определим в результате нахождения кумулянтов второго и четвертого порядков статистики  $\xi$  с учетом известной их связи с моментами распределения и свойства аддитивности кумулянтов для суммы независимых случайных величин. В результате получим соотношение, связывающие величины  $\gamma$  и  $\langle n \rangle$  для случая, когда число пузырьков в объеме разрешения имеет произвольное распределение

$$\gamma = AC/\langle n \rangle + 3(V^2 - \langle n \rangle^{-1}), \quad (3)$$

где  $V = (\langle [n - \langle n \rangle]^2 \rangle)^{1/2} / \langle n \rangle$  - коэффициент вариации числа рассеивателей.

Если число отражателей  $n$  распределено по закону Пуассона, для которого дисперсия равна математическому ожиданию, то  $V^2 = 1/\langle n \rangle$  и выражение для коэффициента эксцесса (3) примет известный вид (1). В случае же, когда число рассеивателей в объеме разрешения постоянно (распределение является дельта-функцией), то коэффициент вариации  $V = 0$ , и  $\gamma = (AC - 3)/n$ .

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С целью верификации формул (1,3) для коэффициента эксцесса объемной реверберации в ГФ и определения условий применимости представленного метода было выполнено численное моделирование с помощью дискретной имитационной модели при приеме ‘эхо- сигналов на антенну «расщепленный луч» (split-beam) [3]. Для оценок эксцесса в данном случае использовался суммарный сигнал от всех четырех сегментов антенны.

При моделировании полагалось, что корабль с эхолотом на борту медленно движется со скоростью 0.005 узла, практически позиционируясь над цилиндрическим ГФ с радиусом 1 метр. Расстояние до дна составляет 100 м. Эхолот излучает вертикально вниз последовательность тонально - импульсных сигналов с прямоугольной огибающей. Рабочие характеристики эхолота аналогичны типовым характеристикам исследовательских эхолотов норвежской фирмы SIMRAD (модели EK-500, EK-60), широко используемых при исследованиях природных ГФ: несущая частота  $f_0 = 38$  кГц, длительность импульсов  $T = 0,3-0,5$ мс, период их повторения  $T_n = 0,15-0,5$ с, полуширина диаграммы направленности антенны  $\psi = 3,35^\circ$ . Для оценивания эксцесса использовался массив некоррелированных отсчетов мгновенных значений эхо-сигнала в пределах придонного слоя толщиной 1 метр.

На первом этапе модельные оценки эксцесса проводились для наиболее простого случая, когда пузырьковые ансамбли в факелах содержат пузырьки одинакового размера (с эквивалентным радиусом  $r = 2,3$  мм) и, соответственно, всплывающих с одинаковой скоростью  $W = 0,22$  м/с. Эхо-сигналы от пузырьков полагались нефлуктуирующими.

Полученные результаты представлены на рис. 1, где точками приведены данные имитационного моделирования для объемов выборки  $K=500$  реализаций эхо-сигнала (а) и  $K=5000$  (б). Сплошной линией показана теоретическая зависимость (1) с параметрами  $A=1$  и  $C=1,5$ , отвечающими условиям проведения эксперимента.

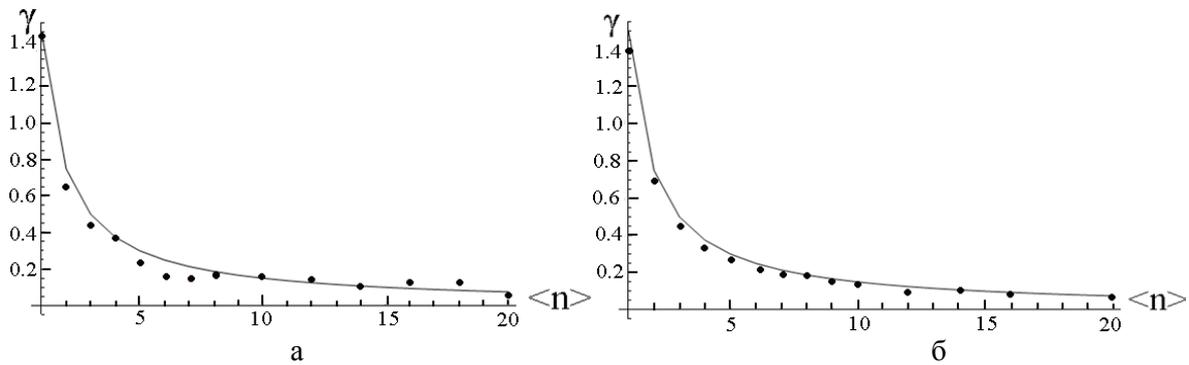


Рис. 1.

Из представленных результатов эксперимента следует, что при качественном их соответствии теоретической зависимости  $\gamma(\langle n \rangle)$  объем выборки  $K=500$  мгновенных значений эхо-сигнала недостаточен для оценок коэффициента эксцесса (и, соответственно, среднего числа пузырьков в элементе разрешения), поскольку имеют место значительные (до 30 %) относительные отклонения данных модельного эксперимента от теоретических значений. В то же время, при  $K=5000$  обеспечивается хорошее соответствие результатов моделирования с теоретической зависимостью (1).

На следующих этапах моделирования исследовались различные сценарии для иных условий, представляющих практический интерес. В частности полагалось, что факел над сипом формируется газовыми пузырьками с разными размерами и скоростями всплытия при наличии флуктуаций амплитуды элементарных эхо-сигналов от каждого пузырька.

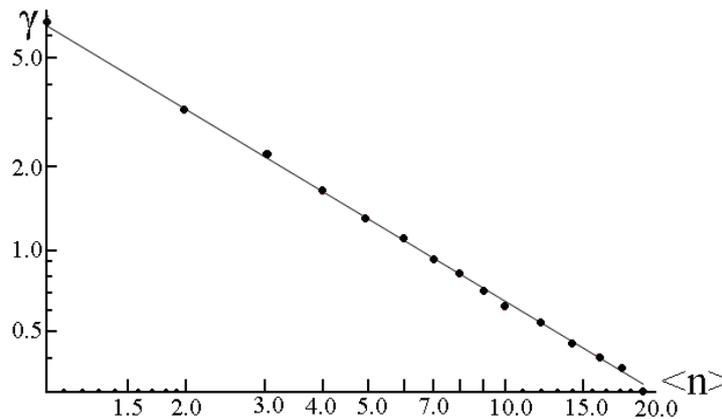


Рис. 2

На рис.2 приведены (в логарифмическом масштабе) результаты моделирования для случая, когда эквивалентные радиусы  $r$  выбирались согласно гамма-распределению пузырьков по размерам (с параметрами формы  $\alpha=3,8$  и масштаба  $\theta=1/1700$ ;  $[r] = \text{м}$ ), которое подтверждается данными натурных исследований газовых факелов в Черном море [4].

Скорости всплытия пузырьков задавались в соответствии с известной зависимостью  $W(r)$  для «чистых» пузырьков [5]. В отличие от вышеописанного эксперимента полагалось, что амплитуды эхо-сигналов от пузырьков флуктуируют в соответствии с распределением Рэлея, а средние значения амплитуд пропорциональны радиусу пузырьков. Объем выборки  $K$  составлял 2000 реализаций эхо-сигнала.

Как видно из рисунка, приведенные здесь данные также свидетельствуют о хорошем количественном соответствии результатов модельного эксперимента (представленных точками) и теоретических расчетов (сплошная линия).

Известно, что на величину коэффициента эксцесса может влиять когерентное рассеяние, если оно существует. В ходе имитационного моделирования влияние регулярной компоненты в обратнорассеянном сигнале исследовалось путем введения в пузырьковый ансамбль аномального рассеивателя с постоянной амплитудой эхо-сигналов, равной  $b$ . Полагалось, что основные рассеиватели – газовые пузырьки, размеры которых распределены согласно гамма-распределению, амплитуда эхо-сигнала от каждого из них распределена по закону Рэлея, а относительный уровень регулярной компоненты характеризуется параметром  $q=b^2/2\sigma^2$  (здесь  $\sigma^2$  – дисперсия реверберации от пузырьков в элементе разрешения). В результате моделирования установлено, что при  $q < 0,1$  влиянием когерентного рассеяния на оценку числа пузырьков можно пренебречь. Отметим в этой связи, что, во-первых, заметный относительный уровень когерентной составляющей рассеяния в природных ГФ наблюдается достаточно редко [4], а во-вторых, он может быть определен на основе анализа характеристики подобия зондирующего и обратнорассеянного сигналов [6].

В целом, результаты моделирования позволяют сделать вывод, что соотношение (1), связывающее коэффициент эксцесса узкополосной объемной реверберации с числом рассеивателей в элементе разрешения, остается справедливым при широком варьировании условий экспериментов и указывают на необходимость обоснования объемов выборки исходных данных, обеспечивающих заданную точность оценки  $\langle n \rangle$ .

### 3 ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕМА ВЫБОРКИ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЧИСЛА РАССЕИВАТЕЛЕЙ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЭКСЦЕССА

Для обоснования необходимого объема выборки воспользуемся тем, что для величин с симметричными распределениями дисперсия выборочного коэффициента эксцесса [7]

$$D_\gamma = (\beta_6 - 4\beta_2\beta_4 + 4\beta_2^3 - \beta_2^2) / K, \quad (4)$$

где  $K$  – число статистически независимых выборок, а коэффициенты  $\beta_2, \beta_4, \beta_6$  определяются на основе моментов распределений наблюдаемых величин согласно формуле

$$\beta_{2r} = m_{2r+2} / m_2^{r+1}. \quad (5)$$

В случае нормального закона распределения, которому физически соответствует большое количество отражателей в рассеянном сигнале, выражение для дисперсии (4) принимает простой вид  $D_\gamma = 24 / K$ .

Выражения (4, 5) позволяют определять дисперсии выборочного коэффициента эксцесса по моментам 2-го, 4-го, 6-го и 8-го порядков.

Поскольку, согласно разработанному методу, оценка числа пузырьков  $\hat{n}$  обратно пропорциональна выборочному коэффициенту эксцесса  $\hat{\gamma}$ , то при малых значениях  $\chi$  можно считать, что

$$\sigma_n / \langle n \rangle \approx \sigma_\gamma / \gamma = \chi, \quad (6)$$

где  $\sigma_n$  - среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки числа пузырьков; величина  $\chi < 1$  определяет точность оценки  $\gamma$  (чем меньше величина  $\chi$ , тем точнее оценка). Соотношения (4-6) позволяют определить объем выборки, необходимой для оценивания числа рассеивателей по коэффициенту эксцесса.

В результате исследований было установлено, что метод оценивания среднего числа пузырьков в элементе разрешения по коэффициенту эксцесса обладает следующими возможностями:

- при  $K=10000$  независимых выборках сигналов обеспечивает СКО оценки  $\sigma_n \leq 0,15 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 10$ ,  $\sigma_n \leq 0,2 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 16$ ,  $\sigma_n \leq 0,25 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 24$  ;
- при  $K=5000$  обеспечивает СКО оценки  $\sigma_n \leq 0,2 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 10$  и  $\sigma_n \leq 0,25 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 14$  ;
- при  $K=3000$  обеспечивает СКО оценки  $\sigma_n \leq 0,25 \langle n \rangle$  при  $\langle n \rangle \leq 9$  ;

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод определения продуктивности газовых сипов, основанный на измерении параметров вероятностного распределения эхо-сигналов от газовых факелов при конечном числе пузырьков газа в элементе разрешения акустической системы. Обобщено соотношение, связывающее среднее количество пузырьков в элементе разрешения с коэффициентом эксцесса. В результате имитационного моделирования с использованием дискретной модели рассеяния звука в газовых факелах установлено, что инверсионное соотношение остается справедливым при широком варьировании условий модельного эксперимента и может служить основой для решения обратной задачи – определения продуктивности сипов по флуктуационным характеристикам эхо-сигналов. Разработан метод и получены оценки объемов выборки мгновенных значений эхо-сигналов, необходимых для достижения заданной точности определения количества пузырьков в элементе разрешения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011.– 407 с.
2. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации.– М: Наука, 1966.– 202 с.
3. Любичкий А.А, Омельченко А.В. О потенциальных возможностях определения координатгазовых факелов с помощью эхолотов с расщепленным лучом // Сборник

- трудов акустического симпозиума «Консонанс-2015».– Киев: Институт гидромеханики НАНУ, 2015.– С. 140–145,
4. Любицкий А. А, Бережная Н. Д. Обратное рассеяние звука в газовых факелах Черного моря // Сб. «Акустика океана», – М: «ГЕОС».– 2013.– С. 138–141.
  5. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops and particles – Elsevier New York, 1978, – 380 p.
  6. Ольшевский, В. В. Статистические методы в гидролокации (модели, алгоритмы, решения) – 2-е издание, исправленное, переработанное и дополненное.– Л.: Судостроение, 1983.– 280 с.
  7. Кендалл, М. Теория распределений / М. Кендалл, А. Стьюарт. М.– Наука.– 1966. 566 с.