

УДК 542.34

АКУСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ В ЗАДАЧАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА, ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ И МОНИТОРИНГА ОКЕАНИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

© 2020 г. С. А. Пересёлков^{1,2,*}, В. М. Кузькин², Г. Н. Кузнецов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Воронежский государственный университет”, Воронеж, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: pereselkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Изложены физико-математические принципы инновационного голографического метода обработки гидроакустической информации. Результаты апробации метода проиллюстрированы на данных натуральных и вычислительных экспериментов в задачах локализации и разрешения шумовых источников, подводной звуковой связи и диагностики гидродинамических возмущений океанической среды.

DOI: 10.31857/S0367676520060198

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] теоретически и экспериментально показано, что при изменении расстояния между приемником и широкополосным источником возможно образование интерференционной картины (интерферограммы), обусловленной волноводной дисперсией и многомодовым характером распространения. Основываясь на данном механизме, мы разработали интерферометрическую обработку гидроакустической информации, основанную на двукратном преобразовании Фурье интерферограммы, которая позволяет в пространстве частота–время когерентно накапливать спектральные максимумы вдоль локализованных полос [3–7]. Двукратное преобразование Фурье интерферограммы назовем голограммой, поскольку оно осуществляет запись и восстановление волнового поля источника.

По отношению к согласованной со средой обработкой [8] интерферометрическая обработка позволяет обнаружить и идентифицировать источник на больших расстояниях и при малом входном отношении сигнал/помеха (с/п) в отсутствие информации о гидрофизических характеристиках акваторий [3–7, 9, 10]. Сочетание обработки с алгоритмом оценки глубины [11] с высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к вариациям параметров океанического волновода поз-

воляет решать комплексную задачу локализации малозумного источника.

Обратное преобразование Фурье после очистки голограммы от помехи реконструирует интерферограмму источника на фоне большого отношения с/п. Это позволяет разрешать шумовые источники [12] и восстанавливать передаточную функцию невозмущенного канала и временную изменчивость океанической среды [13].

Предложения о применении интерферометрической обработки в акустике океана высказывались и ранее [2, 14], однако использование ее для решения обратных задач впервые реализовано в работах [3–7, 9, 10, 12, 13]. В обзоре изложены физические основы интерферометрической обработки с использованием одиночных векторно-скалярных приемников (ВСП) и ее применения для локализации источника звука, подводной связи и мониторинга океанических неоднородностей.

ГОЛОГРАММА ИСТОЧНИКА

В основе интерферометрической обработки лежит двукратное фурье-преобразование интерферограммы, формируемой источником

$$F(\nu, \tau) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} I(\omega, t) \exp[i(\nu t - \omega\tau)] dt d\omega, \quad (1)$$

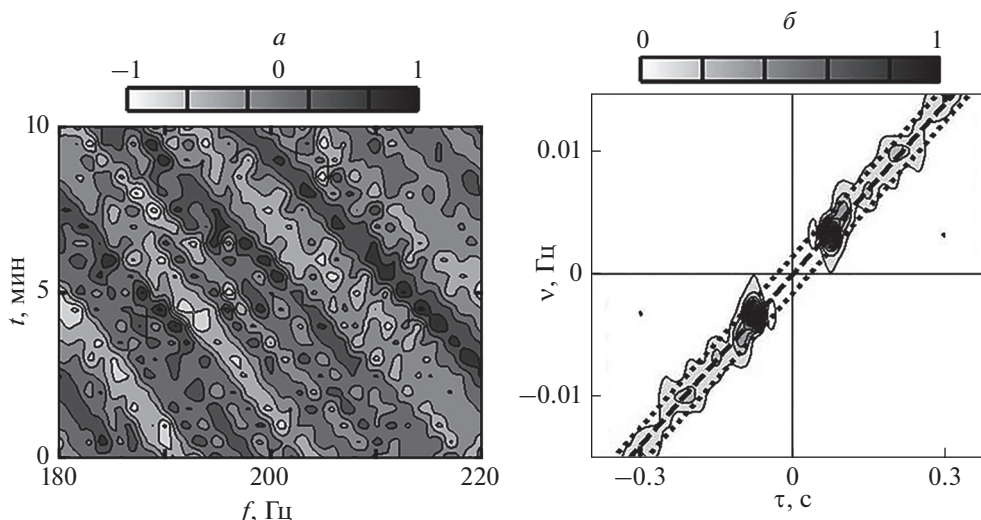


Рис. 1. Нормированные интерферограмма (а) и голограмма (б), измеренные в натурном эксперименте при входном отношении c/p $q = 25.5$ [5].

где $F(\nu, \tau)$ и $I(\omega, t)$ – голограмма и интерферограмма одной из компонент векторно-скалярного поля; ν и τ – круговая частота и время голограммы; $\omega = 2\pi f$ и t – круговая частота и время интерферограммы; Δt и $\Delta\omega$ – время наблюдения и ширина спектра, ω_0 – средняя частота спектра. Спектральная плотность (1) локализована в форме фокальных пятен. Они расположены в первом и третьем квадрантах голограммы, если источник приближается к приемнику ($w < 0$), и во втором и четвертом квадрантах, когда источник удаляется от него ($w > 0$), w – радиальная скорость источника. Область локализации содержит $(M - 1)$ основных максимумов с координатами (τ_μ, ν_μ) , расположенными на прямой $\nu = \varepsilon\tau$, где M – число мод, формирующих поле, $\mu = 1, M - 1$ – номер фокального пятна. Ближайший к началу координат пик обусловлен интерференцией соседних мод и расположен в точке (τ_1, ν_1) . Координаты пика, вызванного интерференцией мод номеров $(m, m + 2)$, – (τ_2, ν_2) . Координаты пика, обусловленного интерференцией крайних мод, – (τ_{M-1}, ν_{M-1}) . Интерферограммы и голограммы, получаемые при обработке натуральных данных и моделирования, обсуждались в [3–7]. На рис. 1 приведены результаты обработки одного из натуральных экспериментов.

Положения максимумов фокальных пятен пропорциональны радиальной скорости w и начальному удалению r источника от приемника

$$\dot{w} = -\kappa_{\nu\mu} \nu_\mu, \dot{r} + \dot{w}t' = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \quad (2)$$

$$\kappa_{\nu\mu} = \left[h_{m(m+\mu)}(\omega_0) \right]^{-1}, \kappa_{r\mu} = \left[dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)/d\omega \right]^{-1} \quad (3)$$

– коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы передаточной функции волновода. Здесь $h_{mn} = h_m - h_n$, h_m – горизонтальное волновое число m -й моды; $0 < t' < \Delta t$. Оценки параметров, получаемые при анализе наблюдаемого процесса, в отличие от их истинных значений, обозначены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Неизвестные величины (3) могут быть определены по данным акустической калибровки акватории.

Обнаружение источника

В качестве критерия обнаружения источника принимаем наличие выделяемого над уровнем помех пика функции обнаружения

$$G[\varepsilon_*(q)] = \int_0^{\Delta\tau} |F[\tau(q), \nu(\tau(q))]| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2(q)} \quad (4)$$

на прямой $\nu = \varepsilon\tau$ расположения максимумов фокальных пятен при входном отношении c/p q [5, 6]. Здесь $\Delta\tau$ – линейный размер области локализации по оси времени τ ; ε_* – варьируемое значение углового коэффициента. За оценку $\dot{\varepsilon}(q)$ принимается положение максимального пика, $\max[G[\varepsilon_*(q)]] = G[\dot{\varepsilon}(q)]$. Информация о гидроакустических параметрах акватории не требуется.

Формирование интерферограммы

Если частотный масштаб изменения модуля квадрата спектра сигнала много больше масштаба квадрата модуля передаточной функции волновода, то особенности спектров излучения источника не сказываются на деталях формирования

интерферограммы [3, 6]. Интерферограмма остается такой же, как и в случае постоянного спектра и определяется только передаточной функцией волновода. Голограммы скалярной и векторных компонент поля, а также их комбинаций когерентны. В случае шумового источника под спектром следует понимать его среднее значение.

Пеленгование источника

Итерационный алгоритм пеленгования с использованием двух ВСП и его апробация рассмотрены в работах [7, 9, 12]. На первом шаге определяется отношение максимумов функций обнаружения

$$|\operatorname{tg}\theta(q)| = \frac{G_L[\hat{\epsilon}(q)]}{G_R[\hat{\epsilon}(q)]}. \quad (5)$$

Здесь G_R и G_L – функции обнаружения интерферограмм $R = V_x V_x^*$ и $L = V_x V_y^*$, где $V_{x,y}$ – горизонтальные составляющие колебательной скорости. На втором шаге области голограмм F_R и F_L за пределами зоны локализации очищаются от помех и выполняется двукратное обратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограмм источника. Анализируется корреляция между интерферограммами $R(f)$ и $L(f)$ в фиксированный момент времени. Если корреляция положительная, то пеленг расположен в первом или третьем квадрантах горизонтальной плоскости ВСП, если корреляция отрицательная, – во втором или четвертом квадрантах. На третьем шаге однозначно определяется квадрант горизонтальной плоскости ВСП, в котором расположен пеленг. Регистрируется знак частотного сдвига \tilde{f} между спектрами $u_R(Q_1, f)$ и $u_R(Q_2, f + \tilde{f})$, принимаемыми ВСП $Q_{1,2}$. Если $\tilde{f} > 0$, то источник расположен в первом квадранте ($\operatorname{tg}\theta > 0$) или в четвертом ($\operatorname{tg}\theta < 0$), и наоборот. Данные о передаточной функции волновода не нужны.

Адаптивность обработки

Под адаптацией понимается возможность определения коэффициентов (3) посредством измерения связанных с ними величин на фоне малого входного отношения с/п в отсутствие знания передаточной функции волновода. В работе [10] предложены два варианта адаптации, реализуемые на основе измерений пеленга [9] и частотных сдвигов интерференционных максимумов волнового поля [15] между двумя ВСП Q_1 и Q_2 , разнесенными на горизонтальное расстояние d .

Согласно первому варианту коэффициенты $\kappa_{r\mu}$ и $\kappa_{v\mu}$ оцениваются как

$$\kappa_{r\mu} = \frac{d \cos \theta}{\Delta \tau_\mu}, \quad \kappa_{v\mu} = -\frac{d \cos \theta}{\Omega_0 \tau_{\mu 1}}, \quad (6)$$

где $\Delta \tau_\mu = \tau_{\mu 1} - \tau_{\mu 2}$ и Ω_0 – разность положений максимума μ -го фокального пятна и частотный сдвиг интерференционного максимума в начальный момент времени в точках наблюдения. Вариант применим, если $|\Omega_0| \leq \Delta f$ и $|\Delta \tau_\mu| \Delta f \geq 1$.

Согласно второму варианту

$$\begin{aligned} \kappa_{r\mu} &= \frac{d \cos \theta}{d(\Delta \varphi_\mu(v))/dv} \frac{\Omega_0 \Delta t}{\Delta \Omega \tau_{\mu 1}}, \\ \kappa_{v\mu} &= -\frac{d \cos \theta}{d(\Delta \varphi_\mu(v))/dv} \frac{1}{v_{\mu 1}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $\Delta \varphi_\mu(v)$ и $\Delta \Omega$ – разность фаз голограмм в окрестности максимума μ -го фокального пятна и изменение частотного сдвига за время наблюдения Δt между точками наблюдения. Этот вариант, в отличие от первого варианта, позволяет также оценивать радиальную скорость и удаление источника, не прибегая к определению коэффициентов (3)

$$\dot{w} = \frac{d \cos \theta}{d(\Delta \varphi_\mu(v))/dv}, \quad \dot{r} = \left| \frac{\Omega_0}{\Delta \Omega} \dot{w} \Delta t \right|. \quad (8)$$

РАЗРЕШЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ

Алгоритм отдельного наблюдения нескольких шумовых источников и его апробация рассмотрены в [12]. Голограмма нескольких источников приближенно является линейной суперпозицией голограмм отдельных источников. На суммарной голограмме выделяется область локализации спектральной плотности поля наиболее мощного источника. Она вырезается и по отношению к ней применяется обратное двукратное преобразование Фурье по восстановлению интерферограммы. Эта итерация повторяется до тех пор, пока не останется изображение одного малозащумного источника. Выделяя последовательно на суммарных голограммах области локализации отдельных источников и вырезая их, получаем голограммы, интерферограммы и функции обнаружения менее интенсивных источников. Очистка не требует предварительных данных о характере сигнала и помехи. Разрешение и идентификация источников могут быть всегда осуществлены, если их области спектральных плотностей голограмм полностью не перекрываются и входное отношение с/п по отношению к фоновой помехе превышает предельно допустимое значение. Координаты разрешенных источников измеряются с такой же точностью, как если бы другие источники отсутствовали. Возможность идентификации источников на фоне распределенной помехи

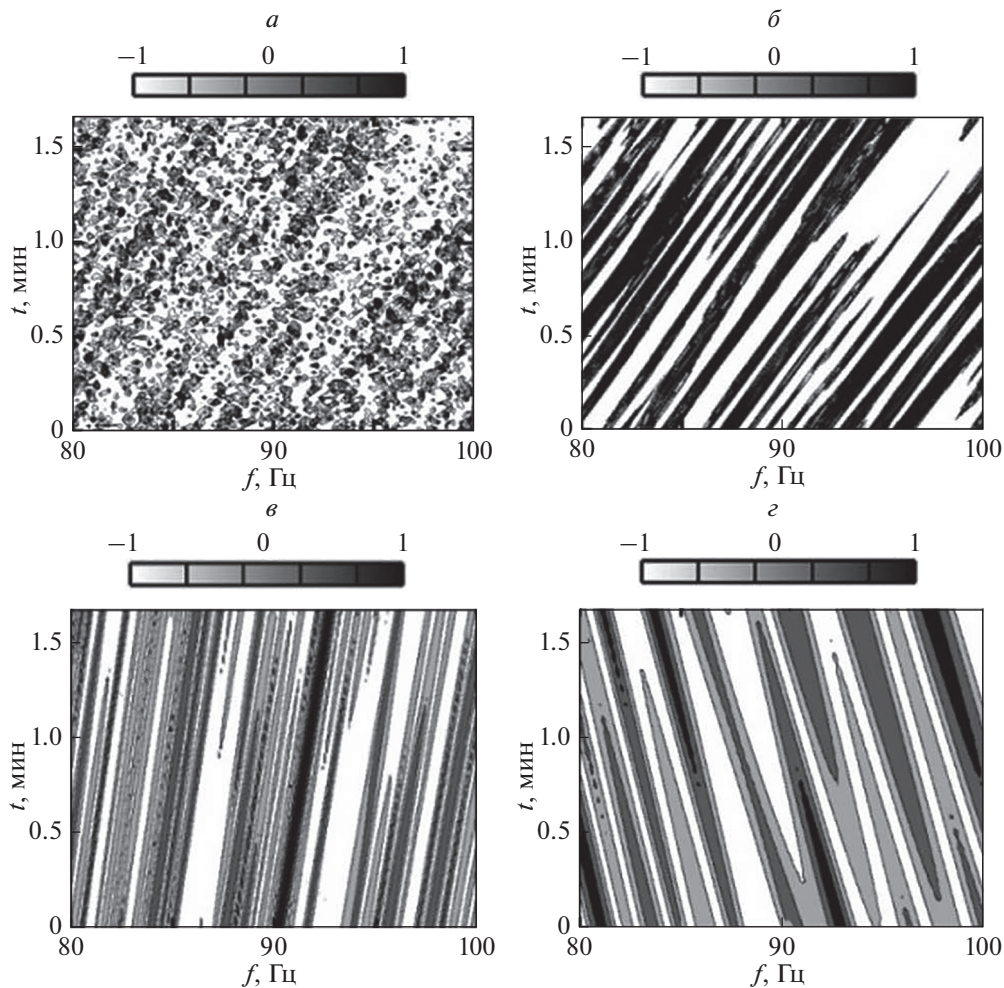


Рис. 2. Суммарная нормированная интерферограмма трех шумовых источников на фоне помехи (а); восстановленные нормированные интерферограммы источников (б, в, з) [12].

и интенсивных локализованных помех определяется только уровнем фоновой помехи. На рис. 2 представлены результаты численного эксперимента восстановления интерферограмм трех шумовых источников различной интенсивности на фоне изотропной помехи.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ОБРАБОТКИ

Помехоустойчивость интерферометрической обработки удобно характеризовать предельным входным отношением с/п q_{lim} , когда для значений $q \geq q_{lim}$ обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки параметров источника близки реальным [5]. В случае изотропной внешней помехи для скалярной компоненты поля шумового источника $q_{lim} \approx 1.5/J^2$, где J – число временных интервалов при регистрации интерферограммы [3]. Использование комбинационных составляющих векторно-скалярного поля позволяет значение q_{lim} уменьшить в 4–5 раз [4, 6].

Пусть на входе одиночного приемника отношение с/п равно q . Тогда адекватные оценки параметров шумового источника реализуются, если

$$qJ^2 \geq 1.5. \tag{9}$$

Число интервалов определяется временем наблюдения Δt и длительностью T шумовой реализации. Условие (9) реализуется при выполнении неравенства

$$T \geq T_{min} = 3r |dh_M(\omega_0)/d\omega|, \tag{10}$$

так что число интервалов сверху ограничено условием [10]

$$J \leq J_{max} = \frac{\Delta t}{3r |dh_M(\omega_0)/d\omega|}. \tag{11}$$

Для входного отношения с/п q удаления r шумового источника при сохранении работоспособности обработки оцениваются как

$$r \leq r_{max} = \sqrt{\frac{q}{1.53}} \frac{\Delta t}{|dh_M(\omega_0)/d\omega|}. \tag{12}$$

Характерной чертой соотношения (12) является то обстоятельство, что в него входят параметры передаточной функции волновода. В мелководных акваториях для низкочастотного диапазона ($f_0 \sim 90$ Гц), если задаться значениями $\Delta t = 90$ с, $q = 10^{-3}$, получаем $r_{max} \approx 11$ км [10].

ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНУЮ СРЕДУ

Интерферометрическая обработка открывает также исключительные возможности получения неискаженных изображений при наличии гидродинамических возмущений среды и их диагностики [13]. Качественно это можно пояснить следующим образом. Вариации показателя преломления, вызванные океаническими неоднородностями, инициируют изменения горизонтальных волновых чисел (в широком смысле и амплитуд мод) по отношению к невозмущенным значениям. Это приводит к тому, что результирующая интерферограмма, определяемая разностью горизонтальных волновых чисел, представляет собой линейную суперпозицию двух независимых интерферограмм, порожденных невозмущенным и рассеянным полями. Поэтому двукратное преобразование Фурье интерферограммы, в силу линейности, формирует на голограмме две независимые локализованные спектральные области. Одна из них, обусловленная невозмущенным полем, концентрируется в форме фокальных пятен преимущественно в направлении оси времени, а вторая, вызванная гидродинамическим возмущением, — в направлении оси частоты. Фильтрация областей локализации реализует получение отдельных голограмм невозмущенного и рассеянного полей. Применение к ним обратного двукратного преобразования Фурье позволяет реконструировать их интерферограммы. В первом случае интерферограмма формируется интерференцией мод невозмущенной среды, во втором случае — гидродинамической изменчивостью среды. Это дает возможность восстановления передаточной функции невозмущенного волновода и диагностирования временной изменчивости среды. Результаты апробации такой обработки эксперимента на двух стационарных трассах, когда интенсивные внутренние волны приводили к горизонтальной рефракции (первая трасса) и взаимодействию мод акустического поля источника (вторая трасса) [16], приведены в работе [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивное внедрение в течение последних нескольких лет интерферометрической обработки в акустику океана уже позволило получить ряд новых результатов, описанных выше. Ее применение в идентификации малощумных источников позволяет достичь помехоустойчивости и дальности

в условиях отсутствия знаний о характеристиках среды распространения, не доступной для известных видов обработки. Другое представляющее интерес применение интерферометрической обработки связано с передачей неискаженного изображения через случайно-неоднородную океаническую среду и возможностью диагностирования гидродинамических возмущений. Таким образом, предложенная обработка гидроакустической информации позволяет по-новому осмыслить те направления в акустике океана, где играет роль интерференция волн, обусловленная широкополосным сигналом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 19-29-06075 и 19-08-00941).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане. М.: Наука, 1982. С. 71.
2. Орлов Е.Ф., Шаронов Г.А. Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 195 с.
3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V. // Phys. Wave Phenom. 2017. V. 25. № 2. P. 156.
4. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. et al. // Phys. Wave Phenom. 2017. V. 25. № 4. P. 299.
5. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 4. С. 406; Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. // Acoust. Phys. 2017. V. 63. № 4. P. 449.
6. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 33; Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. // Acoust. Phys. 2018. V. 64. № 1. P. 37.
7. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kuznetsov G.N., Kaznacheev I.V. // Phys. Wave Phenom. 2018. V. 26. № 1. P. 63.
8. Сазонтов А.Г., Малеханов А.И. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 2. С. 233; Sazontov A.G., Malekhanov A.I. // Acoust. Phys. 2015. V. 61. № 2. P. 213.
9. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Казначеев И.В., Ткаченко С.А. // Вест. ВГУ. Сер. Физ. Матем. 2018. № 2. С. 53.
10. Kaznacheeva E.S., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M. et al. // Phys. Wave Phenom. 2019. V. 27. № 1. P. 73.
11. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Prosovetskiy D.Yu. // Phys. Wave Phenom. 2016. V. 24. № 4. P. 310.
12. Kuz'kin V.M., Kuznetsov G.N., Pereselkov S.A., Grigor'ev V.A. // Phys. Wave Phenom. 2018. V. 26. № 2. P. 150.
13. Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Кузнецов Г.Н. и др. // Вест. ВГУ. Сер. Физ. Матем. 2019. № 1. С. 39.
14. Kuperman W.A., D'Spain G.L. Ocean acoustic interference phenomena and signal processing. N.Y.: Melville, 2002.
15. Кузькин В.М., Куцов М.В., Пересёлков С.А. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 376; Kuz'kin V.M., Kutsov V.M., Pereselkov S.A. // Acoust. Phys. 2014. V. 60. № 4. P. 405.
16. Apel J.R., Badiay M., Chiu C.-S. et al. // IEEE J. Ocean. Engin. 1997. V. 22. P. 465.