

Выражение (20) позволяет строить линии тока (уравнение которых $2\pi f = C^2$ или $r^2 = C^2/f(\varphi, t)$) на той стадии их эволюции, когда образуется участок с крутым фронтом по координате φ . С течением времени, как следует из (20), «амплитуда» этого разрыва уменьшается, стремясь к нулю.

Рисунок 2 иллюстрирует процесс трансформации линии тока на «разрывной» стадии. Видно, что одновременно происходят два процесса: равномерное вращение вихря с угловой скоростью $\omega = \tau^{-1}$ и его нелинейная трансформация, определяемая безразмерным значением времени $z = 2\varepsilon t/\tau$. Нелинейные искажения проявляются тем сильнее, чем больше параметр ε угловой модуляции формы исходного вихря и чем больше угловая скорость ω его «закрутки». С течением времени модулированные по φ линии превращаются в идеально круговые $r^2 = C^2$.

Можно показать, что описанные стадии эволюции квазикругового течения — искажение линий тока, образование разрывных участков с их последующим «затуханием» — характерны и для угловой модуляции иных (по сравнению с (11)) форм. Описанные явления иллюстрируют также факт нелинейной устойчивости кругового течения по отношению к рассмотренному классу пространственных возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М., 1975. [2] Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. М., 1979. [3] Гусев В. Э., Руденко О. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1978. 19, № 4. С. 117. [4] Бетчелор Д. Введение в динамику жидкости. М., 1973.

Поступила в редакцию
12.02.90

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1990. Т. 31, № 5

УДК 536.6:534.231

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ГРУНТА В МЕЛКОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЕМНИКА ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ

Б. И. Гончаренко, В. А. Гордиенко, Е. О. Ермолаева

(кафедра акустики)

Обсуждаются методы исследования отражающих свойств грунта на низких частотах с помощью комбинированных приемных устройств. Сравниваются значения коэффициента отражения звукового сигнала от дна, полученные путем формирования однонаправленных характеристик приемной системы и интерференционным методом. Отмечается, что уменьшение погрешности может быть достигнуто за счет одновременного использования данных о разрезах поля давления и вертикальной компоненты поля колебательной скорости.

Изучение акустических параметров грунта является важной составной частью работ по исследованию распространения звука в мелком море. Известно, что вариации затухания звука при изменении свойств дна достигают в отдельных случаях 30—40 дБ [1, 2].

Исследование акустических характеристик подводного грунта и построение его акустической модели проводится в основном двумя методами: путем изучения поля отраженного от дна сигнала [1, 3—6] или изучения физических параметров донных осадков [2, 7, 8].

Существенные трудности при построении акустической модели грунта возникают из-за наличия слоев в грунте, в которых имеются частотозависимые потери. Это не позволяет распространить экспериментальные результаты, полученные в высокочастотной области, в низкочастотный диапазон.

Акустические свойства границы вода—дно можно характеризовать посредством входного импеданса [1]

$$Z_{in}^n = \frac{Z_{in}^{(n-1)} - jZ_n \operatorname{tg} \varphi_n}{Z_n - jZ_{in}^{(n-1)} \operatorname{tg} \varphi_n} Z_n, \quad (1)$$

где $j = \sqrt{-1}$; $Z_n = \rho_n c_n / \cos \varphi_n$; $\varphi_n = \omega \cos \vartheta_n (h_n / c_n)$; ρ_n , c_n — плотность слоя грунта с номером n и скорость звука в нем; h_n — толщина этого слоя; $Z_{in}^{(n-1)}$ — входной импеданс $(n-1)$ нижележащих слоев; $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота; угол ϑ_n определяется из соотношений $c_0 \sin \vartheta = c_n \sin \vartheta_n = \dots = c_1 \sin \vartheta_1$; c_0 и ϑ — скорость звука в воде и угол падения акустической волны на дно водоема.

Поскольку величина входного импеданса зависит не только от угла падения, частоты, параметров грунта, но и от выбора горизонта измерений, исследование дна по измеренным значениям импеданса в связи с неопределенностью выбора вертикальной координаты границы вода—грунт будет затруднительно. Однако можно ограничиться вычислением модуля коэффициента отражения $|V|$ по известному соотношению, которое связывает величину импеданса и коэффициент отражения [1], поскольку $|V|$ полностью определяется соотношением между импедансом воды и входным импедансом грунта.

Следует отметить, что в настоящее время исследование акустических характеристик грунта на частотах, когда справедливы приближения лучевой акустики, путем определения коэффициента отражения с использованием интерференционной методики хорошо отработано и успешно применяется [3—5].

На низких частотах, когда длина звуковой волны соизмерима с глубиной места, для исследования отражающих свойств грунта используются методы, базирующиеся на теории нормальных волн [9—14].

Измерение наряду со звуковым давлением в волне его градиента позволило расширить возможности методов исследования отражающих свойств грунта на предельно низких частотах за счет одновременного использования полученных амплитудных и разностнофазовых соотношений между давлением и колебательной скоростью. Например, отношение звукового давления P к вертикальной компоненте колебательной скорости v_z при определенных условиях дает значение входного импеданса грунта. Известен также способ классификации структуры подводного грунта, основанный на измерении частотной зависимости разности фаз между P и v . Исследования могут быть осуществлены на основании результатов измерения разности фаз между звуковым давлением и горизонтальными [12] или вертикальной [13, 15] компонентами колебательной скорости.

Следует также отметить метод, заключающийся в одновременной регистрации P и v_z с последующим определением $|V|$ при падении звуковой волны на грунт под углом ϑ по формуле [16]

$$|V(\vartheta)| = \frac{P \cos \vartheta - v_z}{P \cos \vartheta + v_z}. \quad (2)$$

Суть метода заключается в формировании характеристики направленности приемной системы (ПС) с минимумом в направлении на поверх-

ность (числитель) и на дно (знаменатель). Отсутствие необходимости перемещения ПС по вертикали во время измерений существенно сокращает время проведения измерений. Кроме того, имеется возможность изучения тонкой (по частоте) структуры модуля коэффициента отражения путем использования широкополосного излучателя с последующим узкополосным анализом сигнала для всех частот спектра одновременно.

Проведенные нами исследования показали, что метод, основанный на расчетах по формуле (2), позволяет получить более низкую граничную частоту рабочего диапазона, но требует весьма тщательной настройки амплитудно-фазовых трактов ПС. Так, различие в коэффициентах усиления каналов приемника давления (ПД) и приемника градиента давления (ПГД) в 1 дБ приводит к систематической погрешности определения модуля коэффициента отражения $\sim 0,25$.

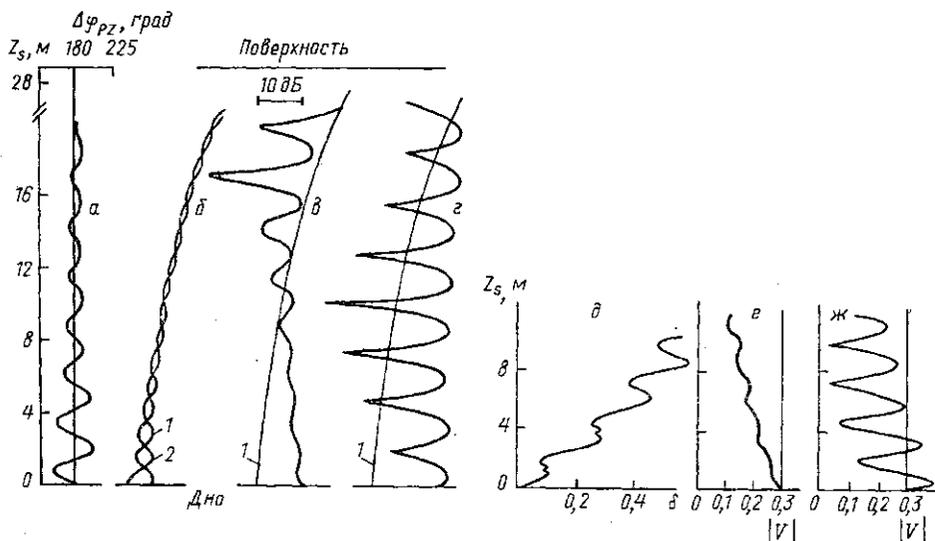


Рис. 1. Расчетные значения компонент звукового поля сосредоточенного источника при $f = 250$ Гц в слое с импедансной нижней границей: разность фаз $\Delta\varphi_{pz}$ между давлением P и вертикальной компонентой колебательной скорости v_z (а); глубинные разрезы компонент поля (б): P (1) и v_z (2); глубинные разрезы компонент поля, входящих в формулу (2), при совмещенных фазовых центрах ПД и ПГД (в) и при разнесении фазовых центров по вертикали на величину $\Delta Z = 0,3$ м (г): $P + v_z$ (1) и $P - v_z$ (2); относительная погрешность определения $|V|$ при совмещенных фазовых центрах приемников (д); значение $|V|$ в зависимости от координаты ПС при совмещенных фазовых центрах ПД и ПГД (е) и при разнесении фазовых центров по вертикали на величину $\Delta Z = 0,3$ м (ж)

При возбуждении в слое плоской звуковой волны работоспособность большинства перечисленных методов не вызывает сомнений. Однако на практике при исследовании отражающих свойств грунта в качестве излучателя используют, как правило, сосредоточенный источник звука. В этом случае интерференционная картина, возникающая за счет взаимодействия с дном и поверхностью водоема, будет носить сложный характер, и результат определения $|V|$ в общем случае может зависеть от местоположения ПС. С целью выяснения возможностей метода определения $|V|$ по формуле (2) были проведены расчеты на ЭВМ в модельных условиях для однородного волновода с импе-

данной нижней границей и тональным источником сигнала частотой f , расположенным под поверхностью, при различной геометрии расположения ПС и излучателя и варьировании отражающих свойств грунта в широких пределах.

На рис. 1 приведены некоторые результаты расчетов на примере плоского волновода глубиной $H=28,6$ м и тонального источника звука частотой $f=250$ Гц. Значение $|V|$ задавалось равным 0,3 при нормальном падении и далее возрастало до единицы при $\vartheta=90^\circ$. Фаза ψ сигнала, отраженного от поверхности, считалась равной π , фаза отраженного от дна варьировалась от 0 до π . Из рис. 1 видно, что как отношение P/v_z , так и разность фаз $\Delta\varphi_{Pz}$ между P и v_z не являются постоянными по глубине и зависят от расстояния между источником и ПС (рис. 1, а, б). Числитель формулы (2) имеет осциллирующий по глубине (с периодом $\lambda/2$), а знаменатель — монотонный характер (рис. 1, в). Последнее обстоятельство связано прежде всего со сферичностью волн. Если рассмотреть лучевое представление распространения энергии при удалении ПС от дна, то можно сделать вывод, что вклад сигнала, проходящего сверху, растет, а снизу — уменьшается тем в большей степени, чем мельче водоем, что приводит к отклонению $|V|$ от истинного значения (рис. 1, д, е). Изменение в широких пределах фазы ψ показывает, что при $\psi=0, \pi$ погрешность $\delta=|\Delta V/V|$ определения $|V|$ по формуле (2) близка к нулю, если ПС расположена в непосредственной близости от отражающей плоской границы водоема. При удалении ПС от дна на расстояние Z_s погрешность растет, достигая при $Z_s=H/15, H/9$ и $H/3$ соответственно 12%, 20 и 50%. Если $0 < \psi < \pi$, размещение ПС в непосредственной близости от отражающей границы раздела двух сред уже не обеспечивает точного измерения $|V|$ ни при каких значениях $Z_s \gg 0$. Разнесение фазовых центров ПД и ПГД по вертикали приводит к увеличению амплитуды осцилляций числителя формулы (2) (рис. 1, з), так что для уменьшения величины погрешности определения $|V|$ (рис. 1, ж) необходимо при обработке компенсировать набег разности фаз между сигналами P и v_z .

Изложенный метод определения $|V|$ был проверен в прибрежной акватории Черного моря с борта научно-исследовательского судна, закоренного с носа и кормы. Погружение ПС осуществлялось с помощью судовой лебедки. К рамке на амортизаторах, выполняющей роль обтекателя, были прикреплены ПД и ПГД, а также контейнер с предварительными усилителями. Акустические сигналы с приемников по экранированному кабелю подавались на входы предварительных усилителей и далее в лабораторное помещение на анализирующую и записывающую аппаратуру.

Описанная установка позволяла регистрировать вертикальные разрезы звукового поля при различных, дискретно изменяемых горизонтальных расстояниях между ПС и излучателем. Во время проведения работ волнение моря не превышало 1—3 балла.

При использовании интерференционного метода дважды на каждой частоте записывались вертикальные разрезы давления вблизи дна (при спуске и подъеме ПС). Затем излучатель передвигали в другое положение по горизонтали и запись вертикальных разрезов давления в исследуемом диапазоне частот повторялась.

Для определения $|V|$ по формуле (2) измерения были проведены в двух режимах (ПС находилась на дне и на расстоянии $Z_s=2$ м от дна) в диапазоне частот 90—600 Гц. На рис. 2,а приведены значения $|V|$ в функции частоты при значении угла падения $\vartheta \approx 2^\circ$. Точками отмечены данные, полученные по разрезам звукового давления, крести-

ками — по формуле (2), когда ПС находилась на дне. Результаты отдельных измерений на одной и той же частоте не усреднялись. Видно относительно хорошее соответствие значений коэффициентов, определенных двумя методами. На высоких частотах формула (2) дает завышенные значения $|V|$. Значения $|V|$, полученные при $Z_s=2$ м, согласуются с приведенными на рис. 2, а, только на низких частотах, т. е. когда это расстояние невелико по сравнению с длиной волны.

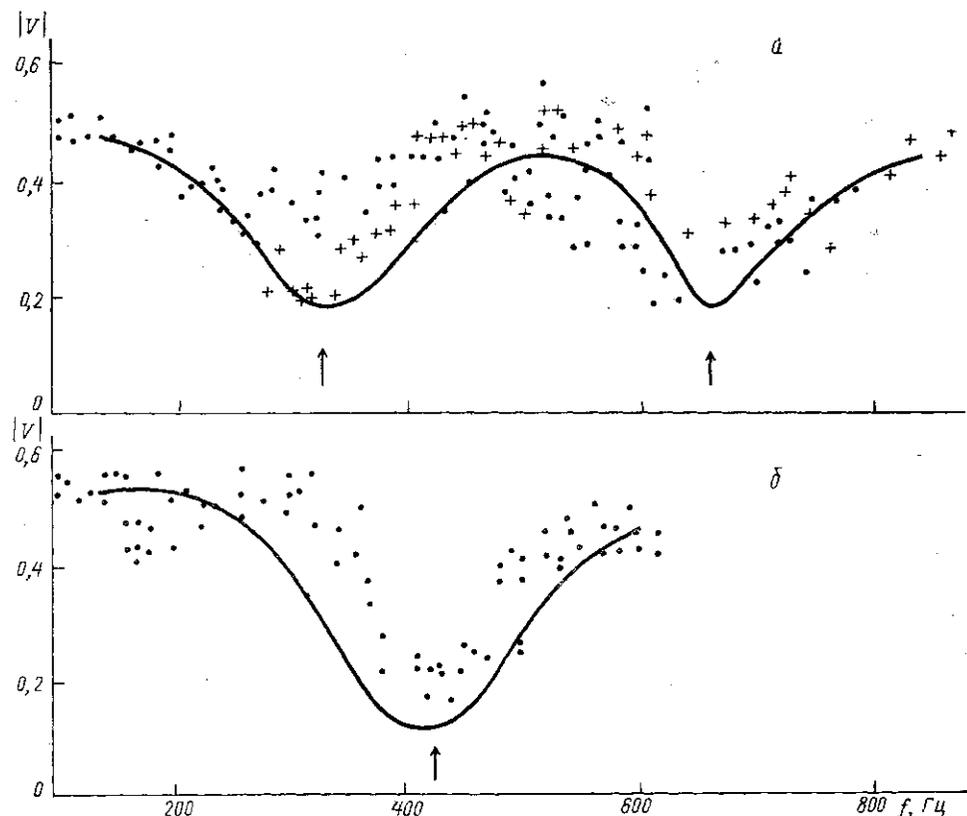


Рис. 2. Значения модуля коэффициента отражения в первой точке измерений: $\vartheta=2^\circ$ (а) и 30° (б)

Наличие ярко выраженных минимумов на частотной зависимости свидетельствует о слоистой структуре дна. Для интерпретации полученных экспериментальных значений $|V|$ ограничимся моделью двухслойного грунта. Пусть верхний слой имеет импеданс $Z_2=\rho_2 c_2/\cos \vartheta_2$ и толщину h_2 , нижнее полупространство — $Z_1=\rho_1 c_1/\cos \vartheta_1$, вода — $Z_0=\rho_0 c_0/\cos \vartheta$.

В соответствии с работой [5] существует связь между положениями минимумов f_i на частотной характеристике $|V|$ и акустическими параметрами слоя:

$$f_2 [1 - (c_2/c_0 - \sin \vartheta_2)^2]^{1/2} - f_1 [1 - (c_1/c_0 - \sin \vartheta_1)^2]^{1/2} = c_2 m / 2h_2, \quad (3)$$

где $m=1, 2, 3, \dots$. Причем если $c_2 \gg c_0$, наблюдается зависимость положения минимумов от угла падения; если $c_2 \ll c_0$, эта зависимость выражена слабо.

Из выражения (3) нетрудно получить значение основных физических параметров слоя, исходя из данных о положении соседних минимумов на частотной зависимости при двух значениях углов θ_1 и θ_2 . В частности, при $\theta_1=0$ и $\theta_2 \neq 0$ имеем

$$c_2/h_2=2(f_2-f_1), \quad (4)$$

$$c_2=(c_0/\sin \theta_2) \sqrt{1-(f_1/f_1')^2}. \quad (5)$$

В (4) и (5) f_1, f_2 — частоты, соответствующие соседним минимумам на частотной зависимости модуля $|V|$; f_1' — положение минимума на частотной зависимости при $\theta \neq 0$, находившегося при $\theta=0$ на частоте f_1 .

На рис. 2,б приведена частотная зависимость $|V|$ при значении $\theta \approx 30^\circ$. Видно смещение минимумов примерно на 100 Гц. На основании частотно-угловых зависимостей $|V|$ с использованием выражений (3) — (5) и результатов работ [1, 5] были определены параметры грунта в точке измерений: $h \approx 1,5$ м, $\rho_1=1,8$ г/см³, $c_1=2500$ м/с, $\rho_2 \approx 1,6$ г/см³, $c_2 \approx 2000$ м/с.

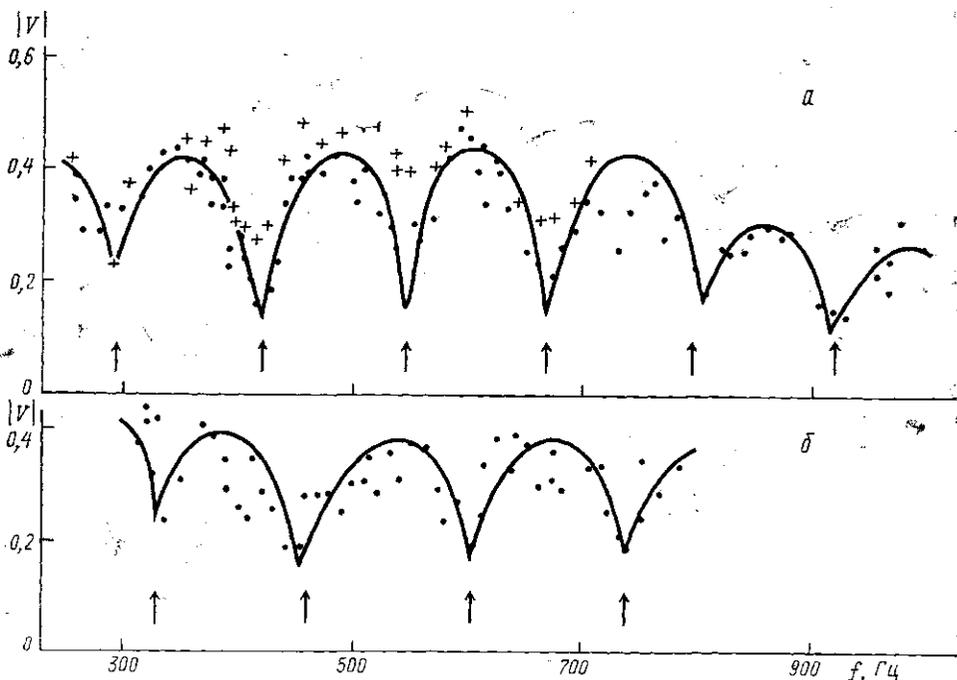


Рис. 3. Значения модуля коэффициента отражения во второй точке измерений: $\theta=2^\circ$ (а) и 18° (б)

Наличие большого разброса значений $|V|$ на рис. 2 может свидетельствовать о неоднородности структуры грунта в месте проведения измерений. Возможно также, что модель грунта в данном районе носит более сложный характер. На рис. 3 приведены результаты измерения $|V|$ в том же районе, но в точке, отстоящей от первой, на расстояние около 150 м.

Обращает на себя внимание факт уменьшения интервала между соседними минимумами от 320 (рис. 2, а) до 100 Гц (рис. 3, а) при $\theta \approx 2^\circ$. Проведенные расчеты показали, что для второй точки толщина слоя увеличилась до 8 м примерно при тех же значениях ρ и c . Стрелками на рис. 2 и 3 показаны рассчитанные значения положения минимумов $|V|$.

Измерения частотных зависимостей $|V|$ на соседних с рассмотренными выше участках обнаружили вариации толщины промежуточного слоя грунта в районе проведения исследований от 1,5 до 9 м. Последнее весьма характерно для мелководных шельфовых зон, когда чередование участков дна с различными неоднородностями образует характерную мозаику [17].

Отметим, что при определении $|V|$ интерференционным методом по вертикальным разрезам звукового давления P на низких частотах (при длине волны, сравнимой с H) также возникает погрешность, обусловленная эффектом ближнего поля. В целях уменьшения систематической погрешности метода желательно выбирать точки, в которых происходят отсчеты, как можно ближе друг к другу. В связи с этим заслуживает внимания использование наряду с глубинными разрезами поля давления поля вертикальной компоненты колебательной скорости v_z . Расчет $|V|$ при этом производится по формулам

$$|V| = \frac{P_{\max} - v_{\min}}{P_{\max} + v_{\min}} \quad \text{или} \quad |V| = \frac{v_{\max} - P_{\min}}{v_{\max} + P_{\min}}, \quad (6)$$

где P_{\max} , P_{\min} , v_{\max} , v_{\min} — значения компонент поля, соответствующие максимумам и минимумам интерференционной картины, расположенным в непосредственной близости от дна водоема. Систематическая погрешность определения $|V|$ по формулам (6), как показали расчеты, уменьшается примерно в два-три раза по сравнению с интерференционным методом, использующим только глубинные разрезы поля давления.

Сравнение результатов определения $|V|$ двумя независимыми методами показывает, что оба метода позволяют не только исследовать акустические параметры грунта в широкой частотной области, но и выявить его неоднородную структуру по горизонтали.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., 1973. [2] Биаб Дж. Х., Макденнел С. Г. // Акустика дна океана. М., 1984. С. 321—337. [3] Воловов В. И., Житковский Ю. Ю. // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1977. 8. С. 126. [4] Грубник Н. А. // Акуст. журн. 1960. 6, № 4. С. 446. [5] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Иванов В. Е., Кирилов В. А. // Акуст. журн. 1976. 22, № 3. С. 351. [6] Воловов В. И., Краснобородько В. В., Лысанов Ю. П., Сечкин В. А. // Акуст. журн. 1977. 23, № 5. С. 687. [7] Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М., 1980. С. 272. [8] Акустика морских осадков/Под ред. Л. Хемптона. М., 1977. [9] Пекерис К. // Распространение звука в океане. М., 1951. С. 48. [10] Кряжев Ф. И. // Акуст. журн. 1960. 6, № 1. С. 65. [11] Кряжев Ф. И., Петров Н. А. // Акуст. журн. 1960. 6, № 2. С. 229. [12] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н. // Акуст. журн. 1974. 20, № 4. С. 531. [13] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н. // Тез. 9-й Акуст. конф. М. (Изд. АКИН), 1977. С. 21. [14] Агеева Н. С., Крутин В. Д. // Акуст. журн. 1980. 26, № 2. С. 161. [15] Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н. Способ классификации структуры подводного грунта: А. с. 794475 СССР. 1981. Бюл. № 1. [16] Бойко Г. М., Гриценко Н. В. // Тез. 1-й Всесоюз. конф. «Метрология гидрофизических измерений». М. (Изд. ВНИИФТРИ), 1980. С. 115. [17] Ильин А. В. // Акустические волны в океане. М., 1987. С. 130.

Поступила в редакцию
21.02.90