

УДК 534.24'534.87

## ВЕРТИКАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ НА НЕРОВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В. И. Воловов, Ю. П. Лысанов, В. А. Сечкин*

Приведены экспериментальные данные о корреляционных характеристиках флуктуаций амплитуды огибающей тонально-импульсных сигналов, рассеянных на дне или взволнованной поверхности океана и принятых на вертикальную базу из четырех гидрофонов при максимальном расстоянии между ними 10 м. Эксперименты проводились на частотах 3—30 кгц при нормальном падении звука на неровную поверхность. Отмечено хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов. Указаны новые акустические способы оценки статистических параметров неровностей.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию статистических характеристик флуктуаций звуковых сигналов, рассеянных на дне или взволнованной поверхности океана. Повышенный интерес к этой проблеме объясняется в первую очередь ее большим практическим значением: анализ различных характеристик флуктуаций рассеянных сигналов позволяет получить данные о физических и геометрических параметрах неровной границы раздела сред. Развитие и совершенствование таких неконтактных методов, обладающих высокой информативностью, относительной простотой и большой оперативностью, является необходимым шагом в построении общей акустической модели океана — кардинальной проблемы акустики океана [1].

В настоящее время довольно полно исследованы спектральные и корреляционные характеристики флуктуаций рассеянных сигналов при горизонтальном движении приемно-излучающей системы или при использовании частотно-модулированного (ЧМ) излучения [2—17]. Основные выводы развитой приближенной теории флуктуаций такого рода проверены на большом экспериментальном материале, полученном в натуральных условиях в океане [5, 8—10, 13, 16]. Отмечено хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными данными.

В значительно меньшей степени изучен вопрос о вертикальной корреляции флуктуаций рассеянных сигналов. Практически отсутствуют данные одновременных измерений вертикальной и горизонтальной корреляции. Между тем изучение вертикальной корреляции флуктуаций представляет значительный интерес, поскольку именно для этого случая удастся предложить наиболее простые способы определения статистических параметров неровностей на дне или взволнованной поверхности океана.

Проведение натуральных экспериментов по исследованию вертикальной корреляции в океане связано с большими техническими трудностями, главной из которых является необходимость установки строго вертикальной приемной базы достаточно большой длины. Приведенные в работе [13] экспериментальные данные о вертикальной корреляции были получены в 1970 г. в отдельных опытах на научно-исследовательском судне

«Петр Лебедев»; длина использовавшейся при этом базы (3,5 м) была явно недостаточной для получения подробных и надежных результатов в диапазоне частот 3—15 кГц.

В связи с этим в 1972 г. на судне «Петр Лебедев» в Баренцевом и Средиземном морях были проведены дополнительные исследования. Длина вертикальной базы была увеличена до 10 м. Эксперименты проводились на частотах от 3 до 30 кГц при нормальном падении звука на дно или поверхность моря. Схема опыта представлена на фиг. 1. Приемная система состояла из четырех ненаправленных гидрофонов 1—4, закрепленных с использованием акустических развязок на жесткой металлической штанге; расстояния между гидрофонами в процессе опыта не менялись. Приемная система опускалась с борта судна, лежащего в дрейфе, и принимала вертикальное положение благодаря тяжелому грузу, прикрепленному к штанге. При проведении опытов, за исключением отдельных случаев, о которых будет сказано ниже, акустический сигнал с излучателя 5, расположенного вблизи приемной системы и питаемого от генератора 6, распространялся через толщу воды, отражался от дна или поверхности и принимался системой гидрофонов. Для предварительного усиления сигналов и согласования с кабелем гидрофоны были снабжены предварительными усилителями, помещенными в герметизированный контейнер 7. После усиления сигналы по многожильному кабелю подавались на бортовую аппаратуру, где они дополнительно усиливались четырехканальным усилителем 8 и фильтровались полосовыми фильтрами 9. Регистрация сигналов производилась на пятиканальный магнитофон «Берег» 10 для последующей обработки и на восьмиканальный фоторегистратор 11 для визуального анализа и контроля.

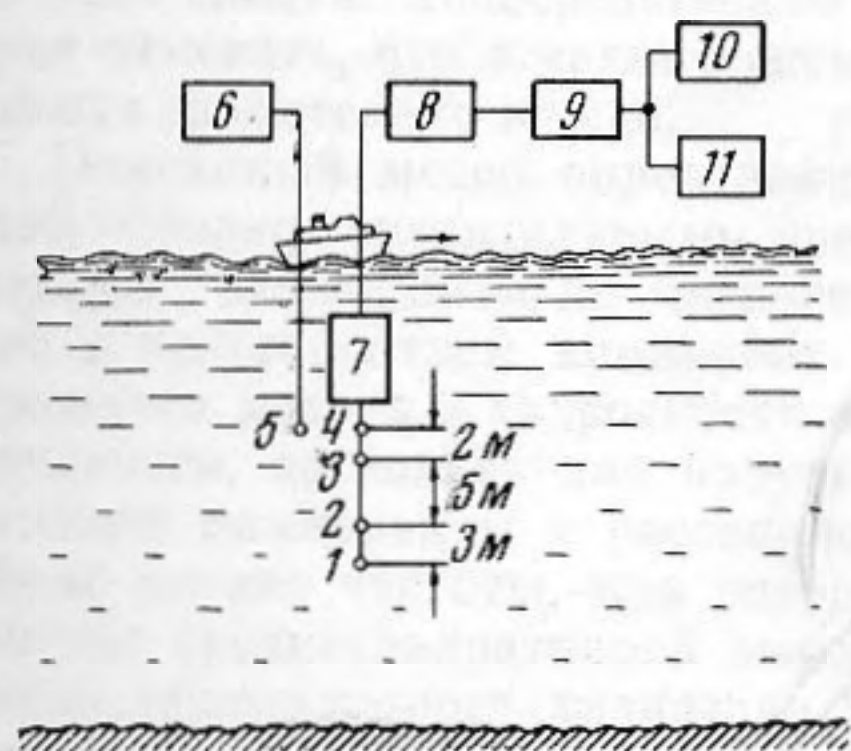
В некоторых экспериментах наряду с вертикальной корреляцией рассеянных сигналов была измерена и горизонтальная корреляция, поскольку на каждом из приемников амплитуда сигнала флуктуировала вследствие горизонтального перемещения приемно-излучающей системы, вызванного дрейфом судна. Длительность посылок и интервал между ними выбирались такими, чтобы полученный ряд амплитуд удовлетворял теореме Котельникова, как это делалось и в более ранних опытах по изучению горизонтальной корреляции [15].

Полученные экспериментальные данные показывают, что в зависимости от района и условий опыта характер вертикальной корреляции изменяется в широких пределах. В одних случаях корреляция сигналов оставалась весьма высокой в пределах всей длины базы (10 м), в других — практически исчезала уже при наименьшем расстоянии между гидрофонами (2 м) и в дальнейшем оставалась на уровне «корреляционного шума»; в промежуточном случае в пределах базы наблюдалось монотонное спадание корреляции. Все три типичных случая показаны на фиг. 2, где приведены экспериментальные значения коэффициента взаимной корреляции  $b(\Delta h)$  в зависимости от расстояния между гидрофонами  $\Delta h$ . Экспериментальные точки на графике для наглядности соединены пунктирными линиями. Различные кривые соответствуют разным опытам, номера которых отмечены цифрами 1—3. Сплошной линией показана гауссова функция, аппроксимирующая данные опыта 3. Расчеты коэффициента корреляции по экспериментальным данным проведены на ЭВМ «БЭСМ-6».

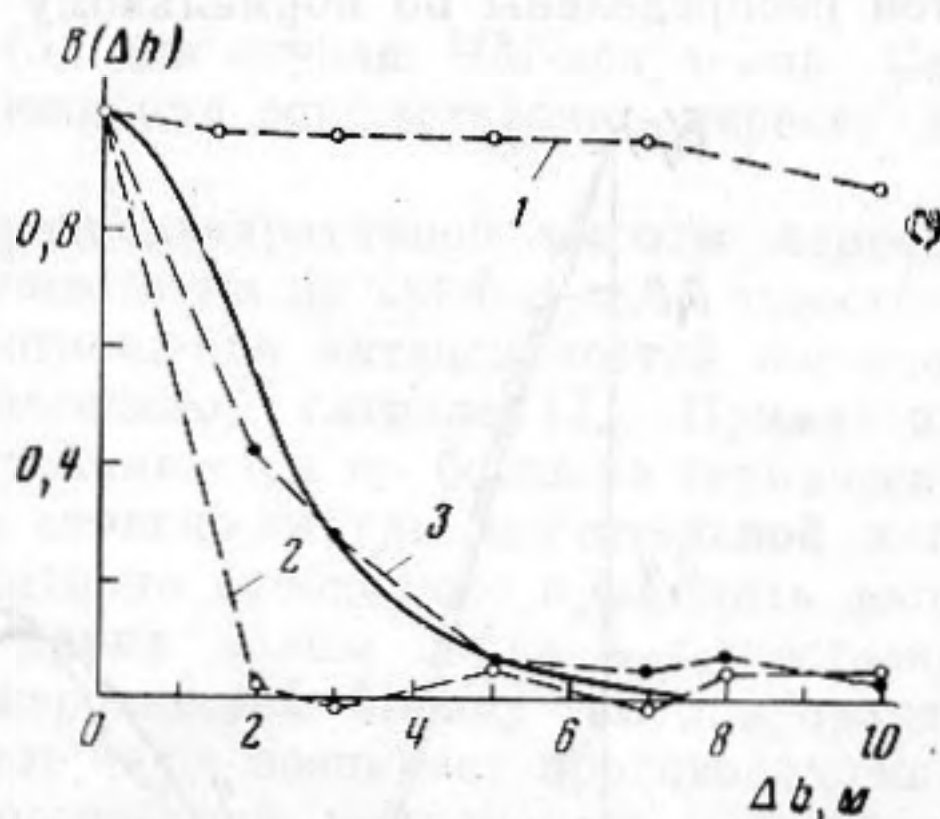
Опыт 1 был проведен в Средиземном море в районе с выровненным дном при глубине места около 2400 м. Частота излучения составляла 3,2 кГц. Опыт 2 был проведен в Баренцевом море и относился к случаю рассеяния звука поверхностью моря. Частота излучения была 20 кГц, заглубление базы — около 140 м. Опыт 3 был проведен с частотой 30 кГц в том же районе, что и опыт 2, но относился к рассеянию звука дном моря при расположении базы гидрофонов на расстоянии 160 м от него.

Анализ экспериментальных данных показал, что статистические характеристики флуктуаций рассеянных сигналов, принятых на разные гидро-

фоны, весьма близки друг другу. Это подтверждается двумя фактами: во-первых, значения коэффициента вариации амплитуды огибающей рассеянных сигналов, полученных с разных приемников, находились в пределах от 49 до 52% в опыте 1 и в пределах от 48 до 53% в опыте 2 (небольшие расхождения в значениях коэффициента вариации для одного и того же опыта объясняются в основном погрешностями при отсчете амплитуд с записей); во-вторых, коэффициенты автокорреляции, полученные с разных



Фиг. 1



Фиг. 2

гидрофонов, также очень близки между собой. Так, например, приведенные на фиг. 3 коэффициенты автокорреляции  $b(\rho)$  для двух крайних гидрофонов базы практически совпадают между собой на начальном участке кривых (временной сдвиг  $\tau$  в этом случае был пересчитан в пространственный  $\rho = v\tau$  по известной скорости дрейфа судна  $v = 0,5$  м/сек). Заметим, что в опыте 1 горизонтальная и вертикальная корреляции были измерены одновременно.

Результаты, полученные при анализе вертикальной корреляции флуктуаций рассеянных сигналов, могут быть положены в основу акустических методов определения статистических характеристик неровностей на дне или взволнованной поверхности океана — среднеквадратичных значений высоты, угла наклона неровностей, а также их радиуса корреляции.

Интерпретация полученных экспериментальных данных может быть выполнена в рамках приближенной теории, развитой в работах [5, 8, 9, 13, 16]. Приведем некоторые теоретические соотношения, которые понадобятся в дальнейшем. Согласно [13], вещественная часть коэффициента корреляции комплексной огибающей рассеянных сигналов в приближении Кирхгофа для больших параметров Рэля при нормальном падении звука на неровную поверхность и при малых относительных изменениях частоты излучения, горизонтального перемещения и глубины приемно-излучающей системы равна

$$(1) \quad b(\tau) = \frac{4}{\pi \Phi^2(q_2)} e^{-2(\Delta k \sigma)^2} \int_0^{q_2} \int_0^{q_2} e^{-r^2} \cos[(q_4 - q_3)r^2] \cos(2q_1 x) dx dy,$$

где

$$(2) \quad r^2 = x^2 + y^2; \quad q_1 = \sqrt{2} \omega_0 \tau (v_x / c) \operatorname{tg} \delta; \quad q_2 = \operatorname{tg} \theta / \sqrt{2} \operatorname{tg} \delta;$$

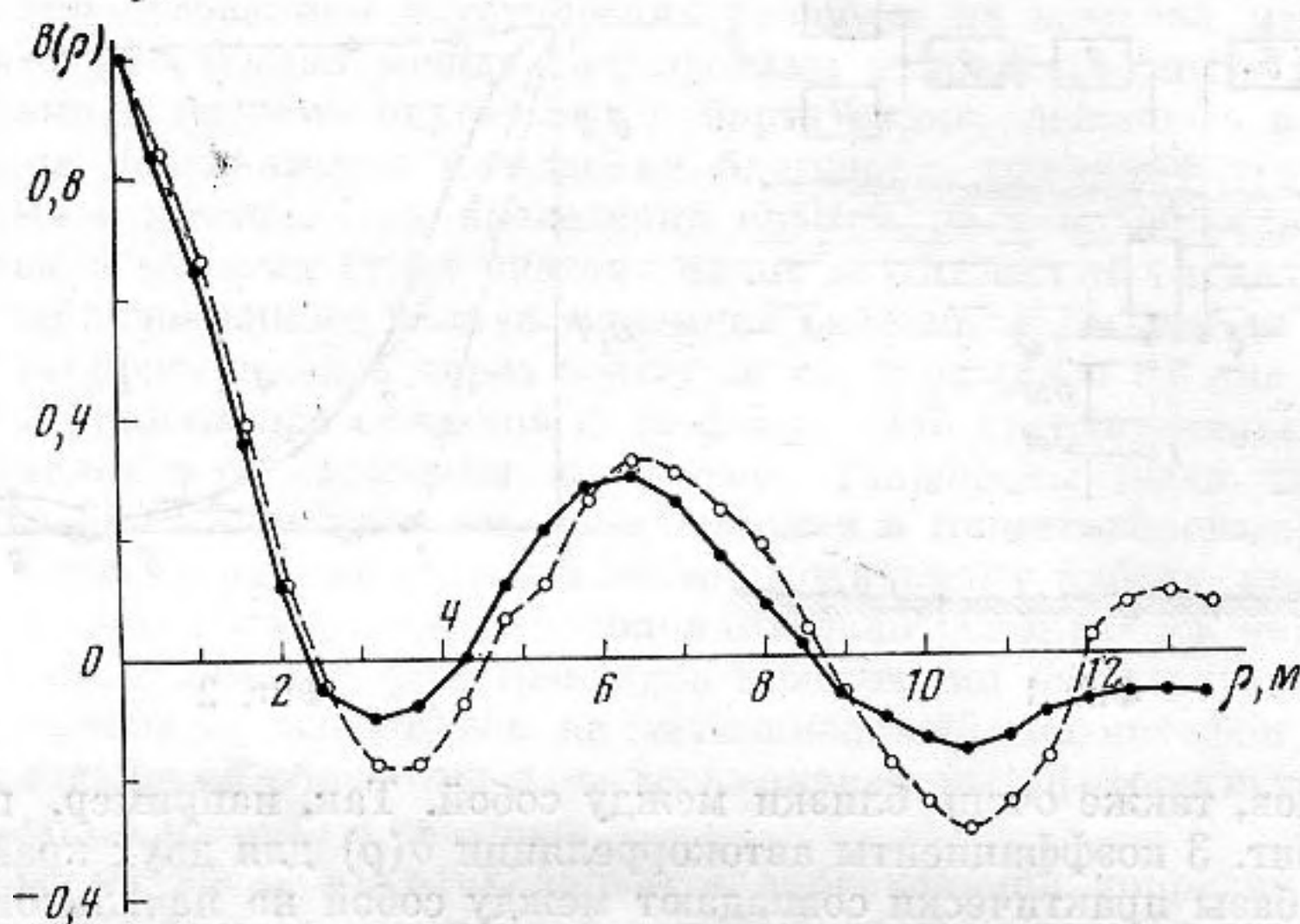
$$(3) \quad q_3 = 2 \Delta k H \operatorname{tg}^2 \delta; \quad q_4 = 2 k \Delta H \operatorname{tg}^2 \delta; \quad \Delta H = v_z \tau; \quad \Delta k = (2\pi / c) \Delta f;$$

$$(4) \quad \text{и } \Phi(u) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^u \exp(-t^2) dt \text{ — интеграл Френеля. Здесь } \sigma \text{ и } \delta \text{ — сред-$$

неквадратичные значения высоты и угла наклона неровностей,  $v_x$ ,  $v_z$  — компоненты скорости приемно-излучающей системы в горизонтальном и

вертикальном направлениях соответственно;  $\Delta f = f_1 - f_2$  при одновременном излучении двух разных частот  $f_1$  и  $f_2$  и  $\Delta f = \Omega\tau$ , где  $\Omega$  — скорость изменения частоты при ЧМ-излучении,  $f_0 = \omega_0 / 2\pi = (f_1 + f_2) / 2$ ,  $c$  — скорость звука,  $k$  — волновое число,  $H$  — расстояние приемно-излучающей системы от средней плоскости неровной поверхности,  $2\theta$  — угловой размер рассеивающего участка.

При выводе формулы (1) предполагалось, что углы наклона неровностей распределены по нормальному закону. Это предположение хорошо



Фиг. 3

оправдывается как для ветрового волнения на поверхности моря при не слишком большой скорости ветра, так и для неровностей на дне океана в районах равнин и холмов.

При исследовании вертикальной корреляции можно положить в формуле (1)  $q_1 = 0$  и, кроме того, выбрать условия проведения опыта такими, чтобы выполнялось равенство

$$q_3 = q_4,$$

которое с учетом соотношений (3) можно представить в виде

$$(5) \quad \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta H}{H}.$$

При выполнении указанных условий коэффициент корреляции равен\*

$$(6) \quad b(\Delta f) = \exp[-2(\Delta k\sigma)^2].$$

Измерив коэффициент взаимной корреляции  $b(\Delta f)$  при заданном значении  $\Delta f$ , из (6) находим среднеквадратичную высоту неровностей [18]

$$(7) \quad \sigma = \frac{c}{2\pi\Delta f} \sqrt{-\frac{1}{2} \ln b(\Delta f)}.$$

Условию (5) удовлетворяют две различные схемы эксперимента. В первом варианте применяются две приемно-излучающие системы, одна из которых расположена на расстоянии  $H$  от неровной границы и излучает сигналы на частоте  $f$ , а другая находится на расстоянии  $H - \Delta H$  и из-

\* В этом случае аргументом функции  $b$  является  $\Delta f$ , а не  $\tau$ .

лучает на частоте  $f - \Delta f$ . Частоты излучения и глубины расположения систем выбираются так, чтобы выполнялось соотношение (5). Во втором варианте одна приемно-излучающая система перемещается по глубине и излучает ЧМ-сигналы, причем значения  $v_z$  и  $\Omega$  выбираются такими, чтобы выполнялось условие

$$fv_z = \Omega H,$$

которое следует непосредственно из (5) для случая ЧМ-излучения. Следует отметить, что в техническом отношении осуществление первого варианта значительно проще.

Описанный метод определения среднеквадратичной высоты неровностей обладает значительными преимуществами по сравнению с известным методом, основанным на измерении отношения интенсивностей когерентной и некогерентной компонент в рассеянном сигнале [7]. Применение прежнего метода в гидроакустике наталкивается на большие технические трудности, поскольку для получения сколько-нибудь значительной когерентной компоненты в рассеянном сигнале необходимо применять достаточно низкие частоты, при которых длина волны звука  $\lambda$  существенно больше среднеквадратичной высоты неровностей. Между тем для практически используемого диапазона частот чаще возникает противоположная ситуация. Так как интенсивность когерентной компоненты рассеянного поля убывает с ростом  $k\sigma$  чрезвычайно быстро, а именно как  $\exp[-(2k\sigma)^2]$ , то уже при  $\sigma/\lambda = 0,5$  интенсивность когерентной компоненты составляет лишь  $10^{-35}$  от своего максимального значения. Измерение столь малых величин, естественно, является весьма сложной задачей. Описанный здесь способ определения  $\sigma$  свободен от указанного недостатка, годится при больших неровностях, когда рассеянный сигнал полностью некогерентен, и легко может быть реализован в гидроакустике.

Изменения среднеквадратичной высоты неровностей дна проводились в опыте 3. Для этого использовались два излучателя, расположенных вблизи приемников 1 и 2. Чтобы избежать применения двух излучающих трактов, на оба приемника подавался один и тот же сигнал, но не чисто тональный, а модулированный, вида

$$P = P_0 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Такой сигнал содержит две равные спектральные компоненты с циклическими частотами  $\omega_0 - \omega_1$  и  $\omega_0 + \omega_1$ . Несущая частота  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  в опытах составляла около 30 кГц, а величина  $\omega_1$  выбиралась так, чтобы разность частот  $\Delta f = \omega_1 / \pi$  удовлетворяла соотношению (5); в условиях данного опыта значение  $\Delta f$  составляло 560 Гц. Сигнал, рассеянный дном, принимался приемниками 1 и 2 и после усиления подвергался фильтрации радиотехническими средствами, причем на ближайшем от дна приемнике выделялась низкочастотная компонента, а на более удаленном — высокочастотная. Измеренное значение  $b(\Delta f)$  в опыте 3 равнялось 0,3; расчет по формуле (7) дает при этом  $\sigma = 0,3$  м.

Для нахождения среднеквадратичного значения угла наклона неровностей  $\delta$  достаточно определить из экспериментальных данных величину горизонтального  $\rho_r$  и вертикального  $\rho_v$  радиусов корреляции. Величину  $\rho_r$  для опыта 1 можно оценить по спаду коэффициента корреляции в «е» раз, что дает  $\rho_r = 1,6$  м (фиг. 3). Коэффициент вертикальной корреляции в опыте 1 при максимальном разnose гидрофонов на 10 м уменьшается всего лишь до 0,88, вследствие чего в рассматриваемом случае определить величину радиуса корреляции непосредственно из графика не удастся. Однако если считать, что коэффициент вертикальной корреляции описывается гауссовой функцией (см. [13]) и учесть его значение при  $\Delta h = 10$  м, то получим  $\rho_v = 29$  м. Тогда

$$(8) \quad \rho_r / \rho_v = 0,055.$$

Для широких диаграмм направленности приемно-излучающей системы (относительно угловой ширины индикатрисы рассеяния неровной поверхности) имеем [13]:

$$(9) \quad \rho_r / \rho_n = \sqrt{2} \operatorname{tg} \delta.$$

Из сопоставления (8) и (9) находим

$$\operatorname{tg} \delta \simeq 0,039, \quad \delta \simeq 2,3^\circ.$$

Заметим, что величина среднеквадратичного угла наклона неровностей порядка нескольких градусов характерна для районов океана с выровненным и холмистым рельефом дна [19] и хорошо согласуется с данными, полученными другими акустическими методами.

По известным значениям  $\sigma$  и  $\operatorname{tg} \delta$  можно оценить порядок величины пространственного радиуса корреляции  $\rho_0$  неровностей на дне океана:

$$\rho_0 \sim \sigma / \operatorname{tg} \delta,$$

что дает в рассматриваемом случае  $\rho_0 \simeq 7,5$  м.

Хотя произведенные оценки не были подтверждены прямыми измерениями величины параметров неровностей дна, они не противоречат имеющимся геологическим данным о характере микрорельефа дна в районе проведения экспериментов. Найденное экспериментальное значение  $\sigma$  для диапазона частот 3—30 кГц соответствует большим значениям параметра Рэля и тем самым подтверждает одно из основных предположений теории.

В заключение сделаем одно замечание. При оценке параметров неровностей дна предполагалось, что оно представляет собой статистически неровную границу раздела сред, однородных в горизонтальном направлении. В ряде случаев это предположение хорошо оправдывается. Но в некоторых районах Мирового океана подводный грунт является средой неоднородной и, следовательно, рассеянный сигнал может формироваться не только на самой неровной границе раздела сред, но и в пределах некоторого слоя конечной толщины. Вследствие этого определяемые параметры неровностей в известной мере являются «эффективными». Однако чем выше частота излучения, тем меньше глубина проникновения звука в грунт и тем ближе эффективные значения параметров неровностей к истинным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Бреховский, Ю. Ю. Житковский, С. Д. Чупров, Р. Ф. Швачко. Об акустической модели океана. Доклады VIII Всес. акуст. конф. М., 1973.
2. В. К. Gazeu. Sea bed echo amplitude fluctuations arising from ship motion. Rad. Electron. Engr., 1963, 26, 125—134.
3. В. G. Hurdle, R. H. Ferris, K. D. Flowers. Effect of transducer velocity on the structure of signals scattered from the ocean bottom. J. Acoust. Soc. America, 1964, 36, 10, 1936—1942.
4. Ю. П. Лысанов. О временных флуктуациях звуковых сигналов, рассеянных на дне океана. Акуст. ж., 1967, 13, 3, 401—405.
5. Ю. П. Лысанов. О рассеянии звука на неровной поверхности при движении приемно-излучающей системы. Тр. АКИН, 1967, 2, 141—149.
6. Э. П. Гулин. О рассеянии волн на неровной поверхности при движении излучателя и приемника. Доклады VI Всес. акуст. конф., М., 1968.
7. С. Г. Зубкович. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М., «Сов. радио», 1968.
8. В. И. Воловов, Ю. П. Лысанов. Корреляция флуктуаций звуковых сигналов, отраженных от дна океана. Акуст. ж., 1969, 15, 2, 205—210.
9. Yu. P. Lysanov, V. I. Volovov. Fluctuations of sound signals reflected from the ocean bottom. Proc. 7th Internat. Congr. Acoust. Budapest, 1971.
10. В. И. Воловов. О частоте флуктуаций огибающих звуковых сигналов, отраженных от дна океана. Акуст. ж., 1971, 17, 3, 466—467.
11. А. Б. Шмелев. О частотной корреляции звукового поля, рассеянного статистически неровной поверхностью при падении направленной сферической волны. Тр. РТИ АН СССР, 1971, 5, 48—53.

12. В. И. Воловов, Ю. П. Лысанов, В. А. Сечкин. Статистические свойства звуковых сигналов, многократно отраженных от дна и поверхности океана. Морское приборостроение. Акустика, 1972, 1, 62—68.
13. Ю. П. Лысанов, В. И. Воловов. Исследование флуктуаций звуковых сигналов при рассеянии их на дне океана. Морское приборостроение. Акустика, 1972, 2, 25—43.
14. Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности, М., «Наука», 1972.
15. В. И. Воловов, Ю. П. Лысанов, В. А. Сечкин. О пространственной корреляции звуковых сигналов, отраженных от дна океана. Акуст. ж., 1973, 19, 1, 16—20.
16. В. И. Воловов, В. В. Краснобородько, Ю. П. Лысанов. Корреляция флуктуаций звуковых сигналов, отраженных от дна океана, при изменении частоты излучения. Акуст. ж., 1973, 19, 3, 327—333.
17. А. Б. Шмелев. К вопросу о частотном спектре звукового поля, рассеянного равномерно движущейся шероховатой поверхностью. Изв. вузов. Радиофизика, 1973, 16, 1, 54—61.
18. В. И. Воловов, В. В. Краснобородько, Ю. П. Лысанов. Акустический способ определения высоты морских волн. Заявка № 1705438/1810 с приоритетом от 13.10.1971.
19. Л. А. Воловова, Ю. Ю. Житковский. Определение некоторых параметров дна акустическими методами. Океанология, 1966, 6, 6, 1087—1092.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
21 января 1974 г.