АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 1

УДК 551.463.26

ОБ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ ЗВУКА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ЗАТЕНЕНИЯ

И. Б. Андреева, Н. Н. Галыбин, Л. И. Шатова

Задача решена в рамках представления морской поверхности в виде двухмасштабной модели. Подстилающая поверхность выбрана цилиндрической со случайными профилями, соответствующими рельефу реального волнения. Рассеивающая рябь принята изотропной и описывается пространственным спектром по волновым числам. На ЭВМ вычислялись относительные изменения коэффициента обратного поверхностного рассеяния, связанные с затенением. Установлено, что при угле скольжения порядка характерного угла наклона неровностей затенение увеличивает коэффициент рассеяния, а при меньших углах – уменьшает.

Ветровое волнение и зыбь делают поверхность моря статистически случайной поверхностью с широким и сплошным спектром неровностей. В спектре волнения одновременно присутствуют как длинные волны высотой в один-два и более метров, так и мелкая рябь с амплитудами в несколько сантиметров и меньше. Наклоны элементов морской поверхности невелики и редко выходят за пределы 10—15°.

При пологом падении достаточно высокочастотного звука на морскую поверхность часть участков оказывается в «тени» — звуковые волны не падают на эти участки. Затенение является геометрическим эффектом и может оказывать влияние на рассеяние лишь высокочастотного звука. Под термином «высокочастотный» мы подразумеваем звук, для которого параметр Релея велик:

$$2k\sigma \sin\chi \gg 1. \tag{1}$$

Здесь k — волновое число звука, χ — угол скольжения звуковой волны относительно горизонта, σ — среднеквадратичная величина высоты морских волн.

При пологом падении звука на морскую поверхность направление обратного рассеяния отклонено от зеркального направления почти на 180°. Эффект обратного рассеяния при этом создается мелкомасштабными компонентами волнения — рябью. Крупномасштабные длинные волны приводят, во-первых, к изменению локальных углов наклона участков рассеивающей ряби, а во-вторых, к затенению некоторых из этих участков.

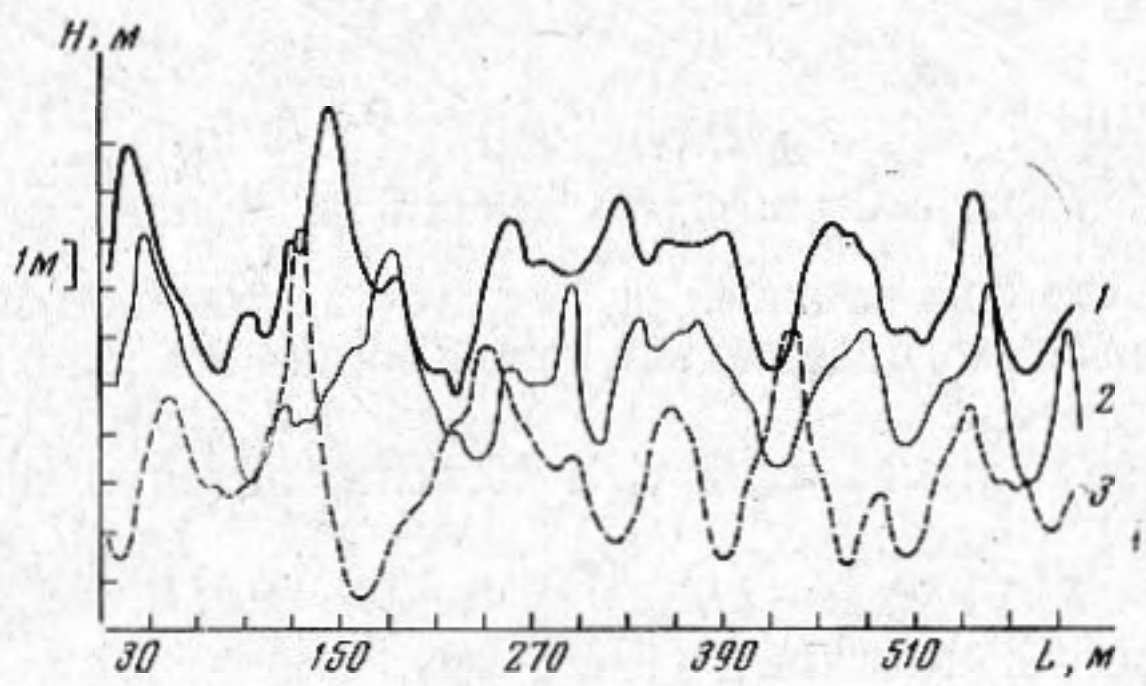
Теория затенения, разработанная для одномасштабных неровных поверхностей с относительно узким спектром неровностей [1—3], неприменима для расчета обратного рассеяния звука морской поверхностью. В условиях затенения такая задача может быть решена при использовании модели двухмасштабной неровной поверхности [4], развитой применительно к сплошному спектру волнения [5, 6]. Подобная модель в расчетах обратного рассеяния впервые была рассмотрена в работе [7]; однако автор не учел связанных с затенением изменений статистических характеристик углов наклона рассеивающих участков ряби. Ниже показано, что эти изменения весьма существенны и пренебрежение ими может привести к ошибочным выводам.

Мы попытались устранить этот недостаток и выбрали иной подход к решению задачи, частично использовав методы машинного эксперимента. В двухмасштабной модели для формирования подстилающей поверхности был использован рельеф реальной морской поверхности; высокочастотный участок спектра волнения («рябь») описывается теоретическим выражением. Влияние затенения на обратное рассеяние звука было рассчитано на ЭВМ в предположении, что физический механизм рассеяния звука рябью определяется пространственным резонансом акустических волн и волн ряби.

Величина коэффициента обратного рассеяния при двухмасштабной модели поверхности может быть написана в виде

$$m_s = \langle m_{\text{лок}} \rangle_S = \langle 4k^4 \sin^4 \chi_{\text{лок}} G(\varkappa_{\text{рез}}) \rangle_S, \tag{2}$$

где $m_{\text{лок}}$ — локальное значение коэффициента обратного рассеяния на участке подстилающей поверхности S, имеющем примерно постоянный



Фиг. 1. Профили сечений рельефа поверхности плоскостями, перпендикулярными линиям гребней

угол наклона, $\chi_{\text{лок}}$ — угол скольжения звуковой волны относительно касательной к этому участку, знак $\langle\ \rangle$ означает усреднение по поверхности S, $G(\varkappa)$ — пространственный спектр ряби, $\varkappa_{\text{рез}} = 2k \cos \chi_{\text{лок}}$ — волновое число резонансной (рассеивающей) компоненты ряби. Усреднение по поверхности S сводится к усреднению по всем возможным значениям углов наклона озвученных элементов этой поверхности. Это позволяет написать выражение (2) как

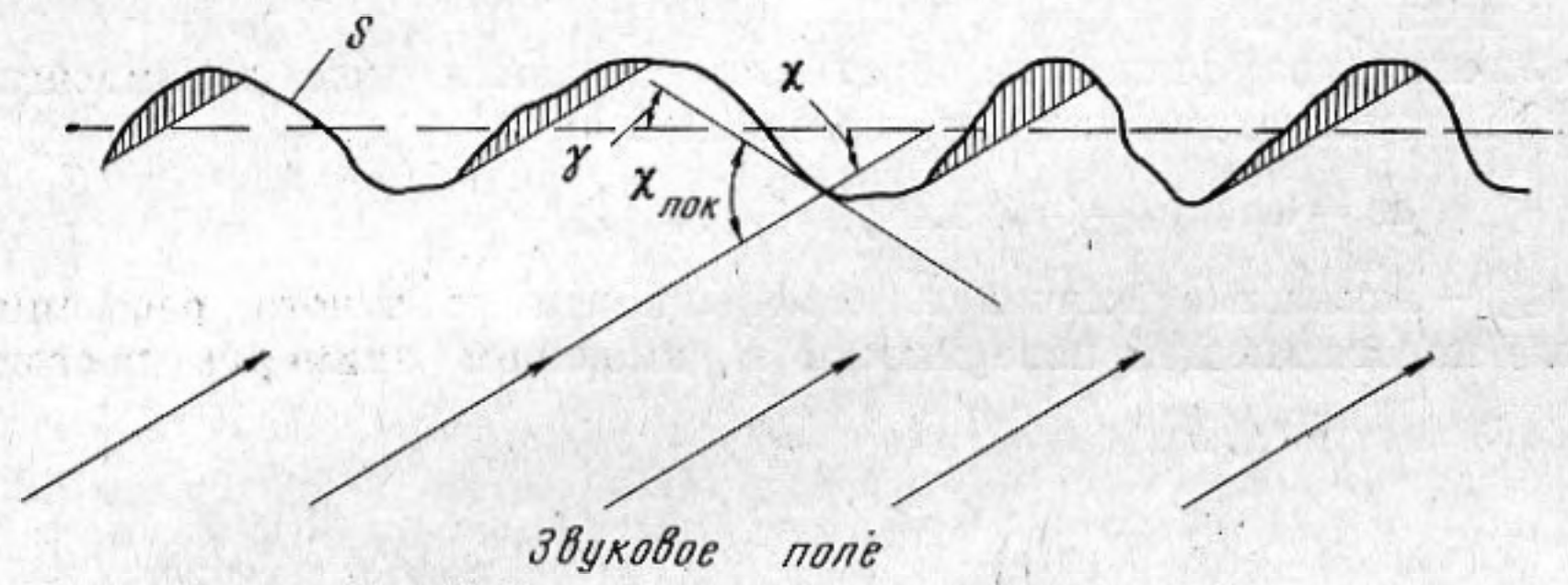
$$m_s = 4k^4 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sin^4 \chi_{\text{лок}} G(\varkappa_{\text{рез}})\, w(\gamma, \beta)\, d\gamma\, d\beta, \tag{3}$$

где γ и β — углы наклона поверхности S в двух перпендикулярных плоскостях, а $w(\gamma, \beta)$ — совместное распределение величин γ и β на озвученных участках поверхности.

Для формирования подстилающей поверхности S в модели, принятой в наших расчетах, был использован реальный рельеф поверхности океана, полученный стереофотосъемкой *. Аналогичный рельеф приведен в работе [8] (стр. 32). Съемка сделана в Баренцевом море при скорости ветра около 20 *м/сек*. Метод съемки и обработки волнения обеспечил возможность регистрации только низкочастотных компонент с длинами волн 12 *м* и более. Это соответствует максимальным частотам примерно 0,2—0,4 *гц*. Размер рельефа ~640×430 *м*; на рельефе видна система волн с отчетливо выраженным направлением гребней. Высота волн (расстоя-

* Материалы по рельефу поверхности были любезно предоставлены авторам сотрудником Ленинградского отделения Государственного океанографического института И. Н. Давиданом.

ние от подошвы до гребня) на некоторых участках рельефа превышает 8—9 *м*. Для усиления эффекта затенения длина гребней на модельной поверхности S была принятой равной бесконечности. На фиг. 1 изображены выборочные профили, полученные в результате сечения рельефа поверхности плоскостями, примерно перпендикулярными линиям гребней. По оси абсцисс отложена длина сечения, по оси ординат — высота волны. Для удобства рассмотрения эти три реализации взволнованной поверхности смещены между собой по вертикали. При расчетах было



Фиг. 2. Схема опыта, принятая в расчетах

использовано несколько сечений рельефа с расстоянием между ними от 6 до 400 *м*. Направление падения звуковой волны выбрано перпендикулярным к линиям гребней.

Для описания рассеивающей ряби использовался спектр вида

$$G(\varkappa)=A_1\varkappa^{-4}, \tag{4}$$

где A_1 — постоянный множитель [9].

Принятая для расчета модель показана схематически на фиг. 2; собственно рассеивающая рябь на фигуре не изображена, но следует иметь в виду, что она покрывает всю поверхность S. В выбранной модели величина локального угла скольжения равна $\chi_{лок}=\chi+\gamma$, где γ — текущий угол наклона профиля волны. Подставим спектр (4) в выражение (3), помня, что $\varkappa_{рез}=2k\cos(\chi+\gamma)$.

Тогда

$$m_s(\chi)=A_2\int\limits_{-\pi/2}^{\pi/2}\operatorname{tg}^4(\chi+\gamma)\,w(\gamma)\,d\gamma, \tag{5}$$

где A_2 — множитель, не зависящий от условий затенения.

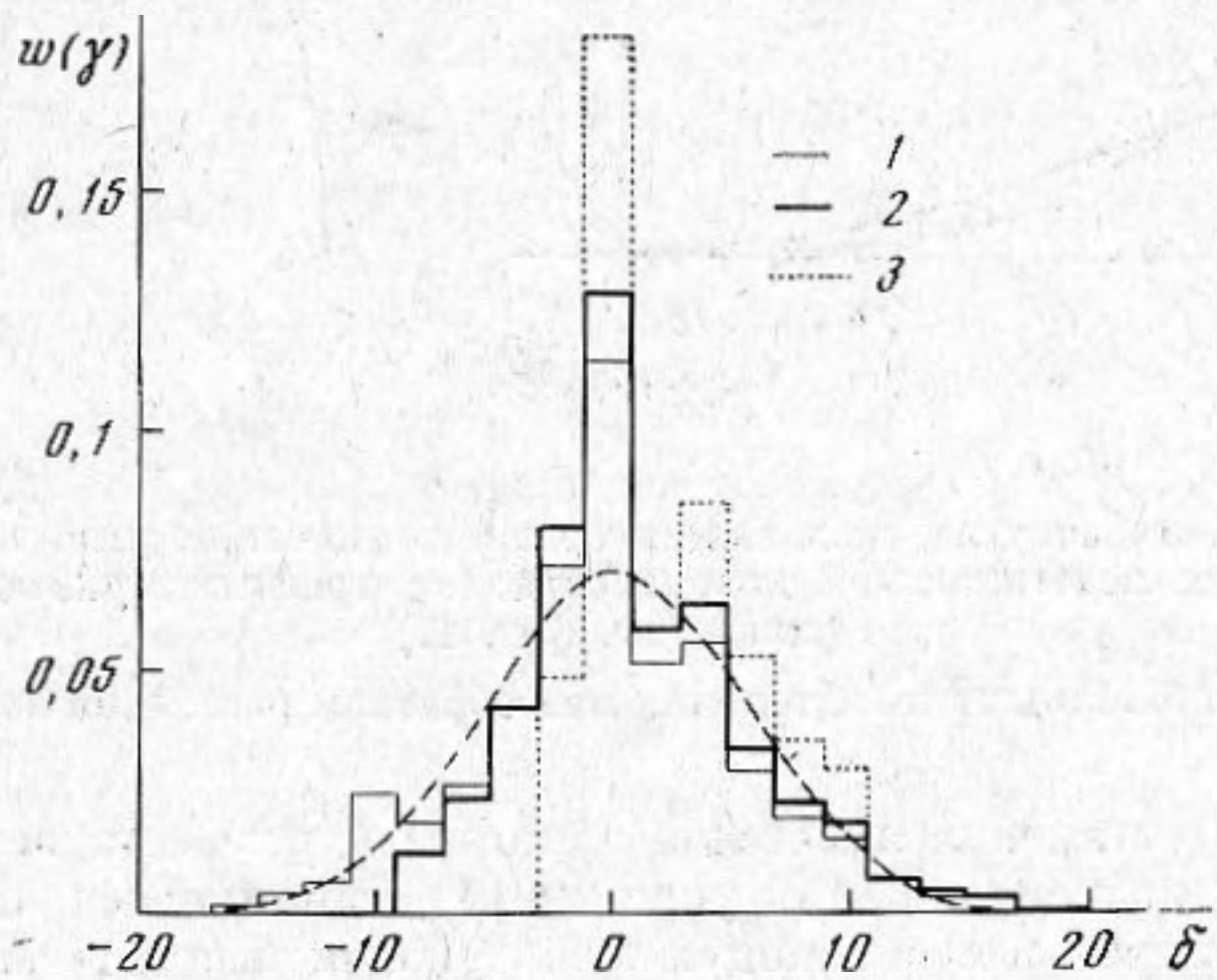
При затенении поверхности изменяется распределение $w(\gamma)$ и соответственно величина интеграла в выражении (5); количественной мерой влияния затенения на величину коэффициента рассеяния m_s мы приняли отношение

$$\eta(\chi)=\frac{m_s(\chi)}{m_{s0}(\chi)}=\frac{\int\limits_{-\pi/2}^{\pi/2}\operatorname{tg}^4(\chi+\gamma)\,w(\gamma)\,d\gamma}{\int\limits_{-\pi/2}^{\pi/2}\operatorname{tg}^4(\chi+\gamma)\,w_0(\gamma)\,d\gamma}. \tag{6}$$

Здесь приняты следующие обозначения. Функция $w(\gamma)$ описывает распределение угла наклона на освещенных участках поверхности; $w_0(\gamma)$ — то же в отсутствие затенения. Таким образом, числитель в формуле (6) пропорционален коэффициенту обратного рассеяния m_s, вычисленному при угле скольжения χ с учетом затенения части поверхности, а знаменатель — вычислению при том же значении χ, но без учета эффекта затенения (коэффициент m_{s0}). Отношение $\eta(\chi)$ мы будем называть множителем затенения, так как величину коэффициента m_s можно вычислить как

$m_s(\chi)=\eta(\chi)(m_{s0})$. Оценки показали, что расчеты по формуле (6) при выбранной модели поверхности справедливы (выполняется условие $k\rho\sin^3\chi\gg1$, ρ — радиус кривизны) для частот около 3—5 *кгц* и выше.

Расчеты выполнялись на ЭВМ, в которую вводились ординаты каждого из выбранных профилей поверхности S. Среднеквадратичная величина угла наклона элементов поверхности S при разных профилях варьировалась от 5,5 до 6,5° и в среднем была равна $\gamma_0\cong6°$. Следует напомнить, что эта величина соответствует низкочастотной части истинного волнения

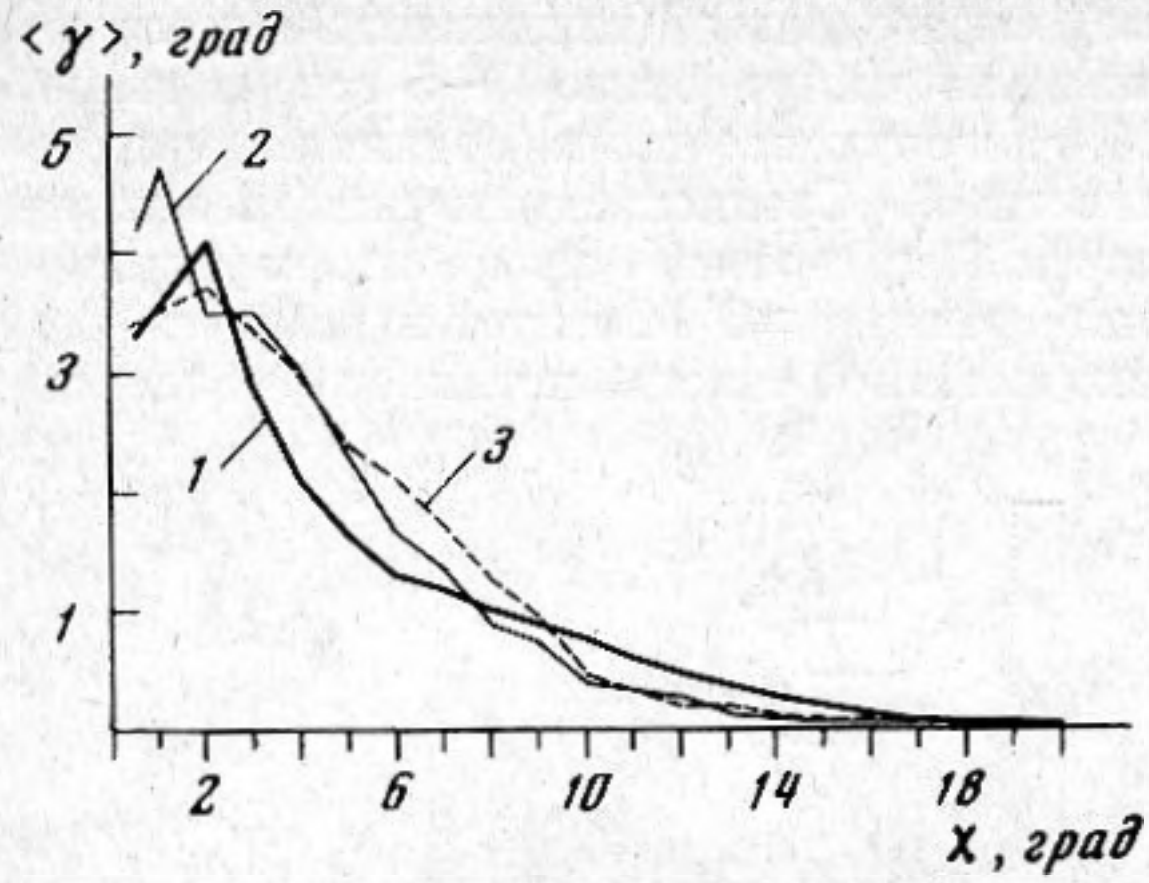


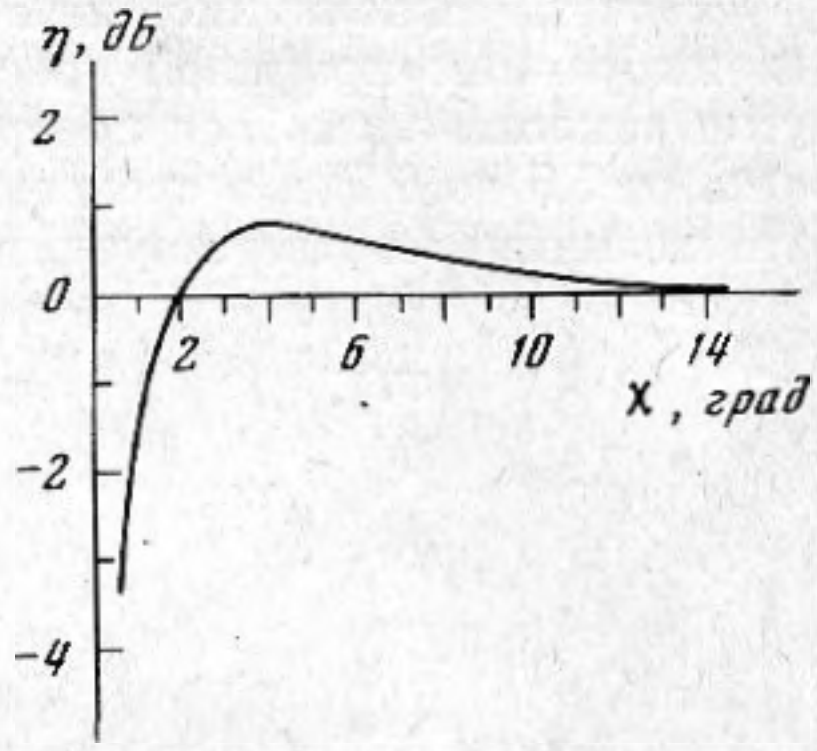
Фиг. 3. Гистограммы распределений угла наклона на освещенных участках подстилающей поверхности при разных значениях угла скольжения: *1* — $\chi=90°$, *2* — $\chi=10°$, *3* — $\chi=2°$

(см. выше о методе регистрации рельефа поверхности). На фиг. 3 приведены гистограммы распределений $w(\gamma)$, полученные при трех значениях угла χ: 90° (затенений нет), 10° (относительно слабое затенение) и 2° (сильное затенение). На графиках видно сильное влияние затенения на форму распределения. На полностью озвученной поверхности закон $w_0(\gamma)$ практически симметричен и близок к нормальному закону (штриховая линия на фигуре). Уже при слабых затенениях он деформируется и становится несимметричным — в первую очередь исчезают большие значения отрицательных углов наклона. При сильном затенении ($\chi=2°$) отрицательные значения почти полностью исчезают и начинают выпадать уже и большие положительные углы; при этом значительно увеличивается вероятность малых значений γ. При $\chi\to0$ распределение $w(\gamma)$ вырождается в δ-функцию вблизи $\gamma=0°$.

Соответственным образом изменяется и среднее значение угла наклона освещенных участков подстилающей поверхности (фиг. 4). При $\chi\gg\gamma_0\cong6°$, величина $\langle\gamma\rangle\cong0$, а при уменьшении угла она становится заметно больше нуля. При $\chi=1-2°$ средний угол наклона достигает максимума около 4°, а при дальнейшем уменьшении угла χ вновь начинает уменьшаться, приближаясь к нулю при очень малых углах скольжения.

Фигуры 3 и 4 позволяют предполагать, что учет затенения приведет к замедлению спадания обратного рассеяния и, следовательно, множитель затенения $\eta(\chi)$, вычисленный по формуле (6), будет больше единицы. Выполненный расчет подтвердил это предположение. На фиг. 5 приведена выраженная в *дб* зависимость $\eta(\chi)$, усредненная по семи экземплярам поверхности S. Эти экземпляры получены сечениями рельефа поверхности на расстоянии ~60 *м* друг от друга. В области углов скольжения $\chi\cong2-12°$ множитель $\eta(\chi)$ больше единицы и достигает максимума, равного примерно +1 *дб*. При дальнейшем уменьшении угла χ множитель





Фиг. 4 Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость от угла скольжения среднего значения угла наклона на освещенных участках подстилающей поверхности (на графиках указаны номера профилей (см. фиг. 1))

Фиг. 5. Множитель затенения при обратном рассеянии звука

затенения $\eta(\chi)$ становится меньше единицы и резко падает. Однако при столь малых углах скольжения условие (1) выполняется лишь для столь высоких частот, что рассеивающую рябь уже нельзя описывать спектром вида (4). На поверхности остаются озвученными лишь небольшие участки во впадинах волн, и геометрическая теория затенения перестает быть справедливой для частот в единицы и даже десятки *кгц*.

Полученные результаты показывают, что при расчете обратного рассеяния звуковых волн морской поверхностью можно пренебрегать эффектами затенения. Это утверждение становится особенно убедительным, если учесть, что при расчете мы стремились максимально усилить рассматриваемый эффект и считали гребни волн бесконечно длинными.

Авторы благодарят Е. А. Копыла за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Басс Ф. Г., Фукс И. М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М., «Наука», 1972.
2. *Фукс И. М.* Эффекты усиления обратного рассеяния при затенениях шероховатой поверхности. Радиотехника и электроника, 1976, *21*, 3, 625–628.
3. *Wagner R. J.* Shadowing of randomly rough surfaces. J. Acoust. Soc. America, 1967, *41*, 1, 138–147.
4. *Курьянов Б. Ф.* Рассеяние звука на шероховатой поверхности с двумя типами неровностей. Акуст. ж., 1962, *8*, 3, 325–333.
5. *Фукс И. М.* О ширине спектра сигналов, рассеянных на взволнованной поверхности моря. Акуст. ж., 1974, *20*, 2, 458–468.
6. *Галыбин Н. Н.* Обратное рассеяние звука взволнованной поверхностью океана. Акуст. ж., 1976, *22*, 3, 443–450.
7. *Bachmann W.* A theoretical model for the backscattering strenght of a composite-roughness sea surface. J. Acoust. Soc. America, 1973, *54*, 3, 712–716.
8. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные, Л., «Транспорт», 1974.
9. *Филлипс О. М.* Динамика верхнего слоя океана. Пер. с англ. М., «Мир», 1969.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
12 августа 1976 г.
После исправления
31 мая 1977 г.