

УДК 534.6 : 534.24

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ
ВОЛНУЮЩЕЙСЯ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

В. И. Зельдис, А. Д. Розенберг, В. Г. Рускевич

Приводятся результаты экспериментального исследования в бассейне и на море амплитудных и фазовых флуктуаций рассеянного в обратном направлении гидроакустического сигнала в диапазоне частот от 15 до 60 кГц для углов скольжения от 10 до 50°. Акустическим измерениям сопутствовали измерения двумерных спектров рассеивающей поверхности. Полученные результаты хорошо объясняются в рамках теории рассеяния на «двухмасштабной» поверхности.

В работах [1, 2] были исследованы средние характеристики — коэффициент обратного рассеяния и центральная частота спектров флуктуаций фазы гидроакустических сигналов, рассеянных волнующейся поверхностью моря. Было показано, что рассеяние носит избирательный характер; при этом связь между характеристиками рассеянного сигнала и параметрами рассеивающей поверхности определяется как [3]

$$(1) \quad \mathcal{G}(F) = 16\pi k^4 \sin^4 \psi s \sum_{\pm} S_{\theta_{\pm}, \kappa_0}(F),$$

где $\mathcal{G}(F)$ — «медленный» энергетический спектр рассеянного сигнала, s — площадь рассеивающего участка поверхности, $S_{\theta_{\pm}, \kappa_0}(F)$ — сечения трехмерного спектра волнения $S(\theta, \kappa, F)$ поверхностями θ_{\pm}, κ_0 , а θ_{\pm} и κ_0 удовлетворяют условию резонанса

$$(2) \quad \begin{cases} \kappa_0 = 2k \cos \psi \text{ или } \Lambda_0 = \lambda/2 \cos \psi, \\ \theta_+ = \theta_0, \\ \theta_- = \theta_0 + \pi, \end{cases}$$

где ψ и θ_0 — углы облучения в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно, $\kappa_0 = 2\pi / \Lambda_0$ и $k = 2\pi / \lambda$ — волновые числа поверхности и звукового поля соответственно. В работах [1, 2] показано, что в исследуемом диапазоне частот облучения и углов скольжения ответственной за рассеяние является высокочастотная часть спектра морской поверхности — рябь.

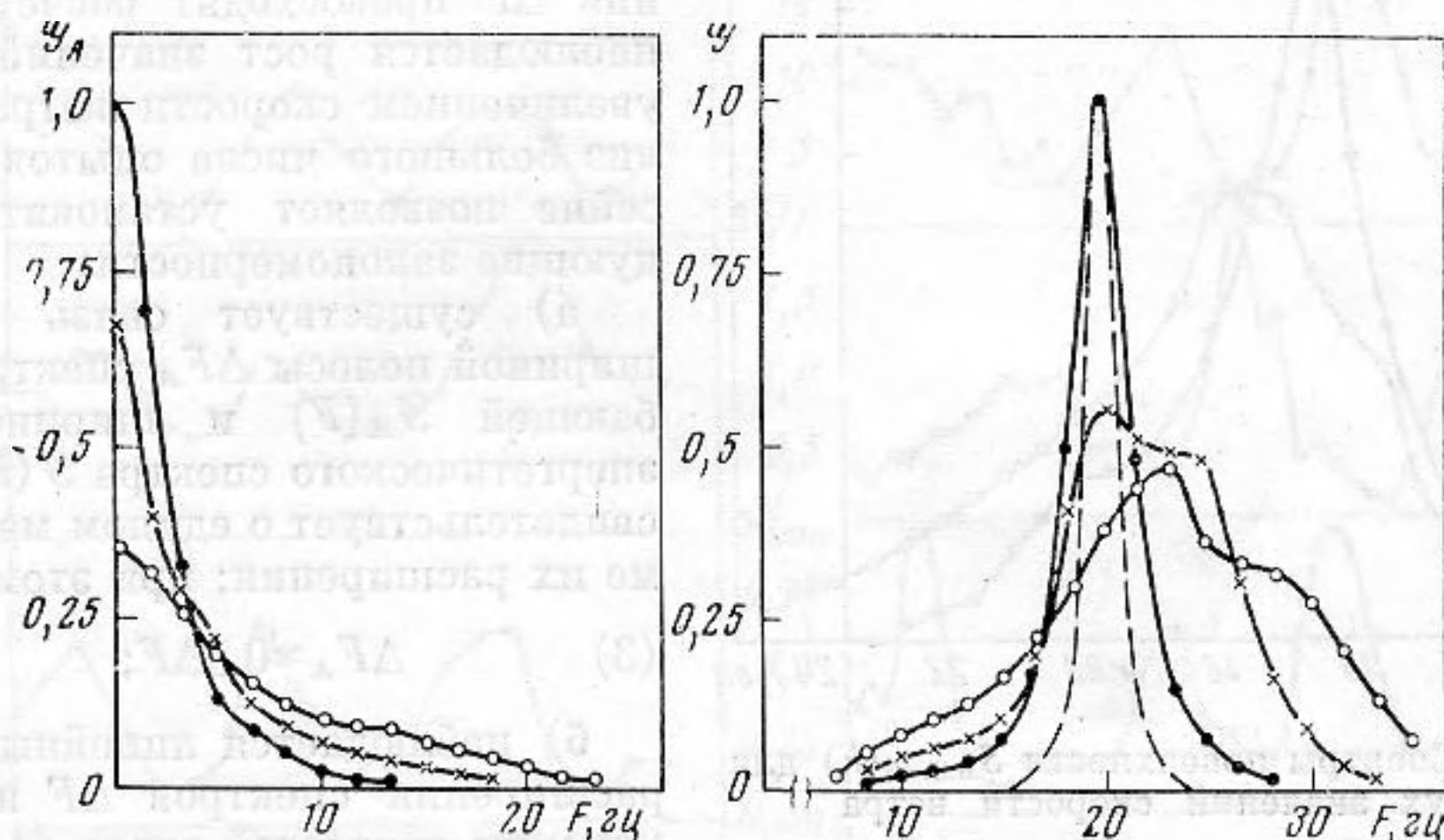
Ниже будут рассмотрены флуктуационные характеристики рассеянного сигнала, обусловленные изменчивостью пространственно-временной структуры ряби. Условно они могут быть разделены на «некогерентные», связанные со случайным характером образования волн ряби, и «когерентные», определяемые наличием крупных волн.

Флуктуационные характеристики сигнала, связанные со специфическими особенностями механизма рассеяния (учет геометрии рассеяния, влияния долей высших гармоник, изменение локальных углов скольже-

ния и пр.) подробно исследованы в работе [4] и здесь не рассматриваются.

Опыты по измерению флуктуационных характеристик рассеянного сигнала проводились в течение 1968—1971 гг. в условиях искусственных бассейнов (Харьков, Кацивели) и в прибрежной зоне Черного моря с использованием макета когерентного импульсного гидролокатора ($f=15-60$ кГц) с высоким разрешением по пространству.

Суммарная ширина диаграмм направленности приемно-передающей установки составляла 4 и 12° на верхней и нижней границах рабочего



Фиг. 1. Энергетические спектры (справа) и спектры огибающей (слева) гидроакустических сигналов для разных скоростей ветра

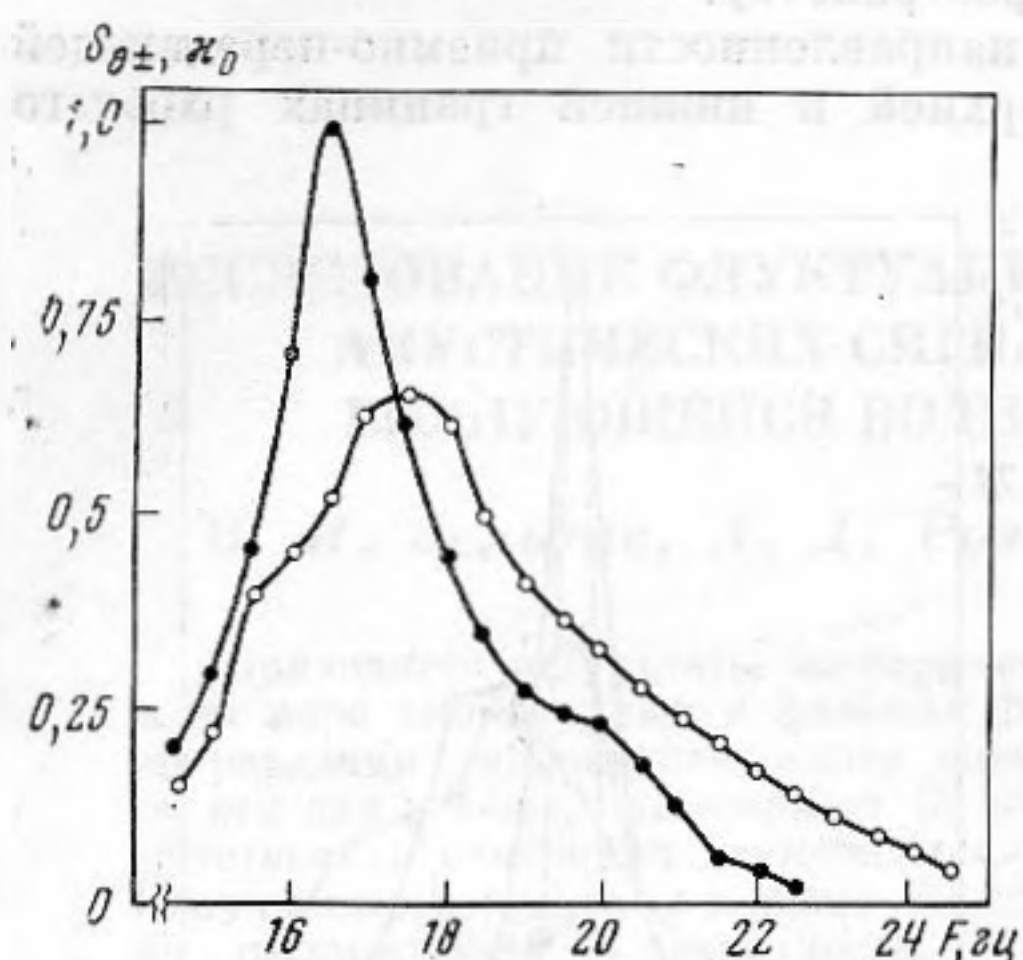
диапазона частот соответственно, продольный размер облучаемой площадки составлял 10÷15 см. При измерениях в бассейнах глубина погружения антенной системы установки составляла 0,3—1,5 м, при измерениях в море — 4÷10 м. Подробно состав аппаратуры и методика эксперимента описаны в работе [1]: измерительная процедура заключалась в записи на магнитную ленту в течение двух минут полного сигнала $u=Ae^{-\alpha t}$ при фиксированных частотах и углах облучения в обеих плоскостях θ и ψ .

Одновременно с сигналом в непосредственной близости от рассеивающего участка поверхности производилось измерение ее характеристик с помощью специальных интерференционных систем датчиков волнения. Применение резонансного волномера [5], обладающего избирательностью по волновому числу k_0 и направлению прихода волн θ , позволяло измерять соответствующие сечения $S_{\theta \pm, k_0}(F)$ трехмерного спектра волнения. Использование профилометра [6], состоящего из 30 линейных решеток, расположенных с шагом $\Delta=3$ см, позволяло получать набор мгновенных профилей ряби (частота регистрации профилей — 13 гц); синхронная запись крупных волн служила для определения принадлежности мгновенных профилей ряби тому или иному элементу крупных волн.

Статистическая обработка результатов измерения заключалась в вычислении средних спектров рассеянных сигналов и поверхности (погрешность вычисления спектров не хуже 30%), а также в вычислении «мгновенных» спектров сигналов и поверхности применительно к отдельным элементам крупных волн (гребень, впадина).

В качестве флуктуационных характеристик рассеянного сигнала рассматривались изменения огибающей и относительное расширение $\Delta F / \bar{F}$ спектра рассеянного сигнала (ΔF — ширина «медленного» энергетического спектра по уровню половинной мощности, \bar{F} — его центральная частота).

На фиг. 1 в качестве примера расширения спектров рассеянного сигнала приведены «медленные» энергетические спектры $\mathcal{G}(F)$ (справа) и спектры огибающей $\mathcal{G}_A(F)$ (слева), полученные для опытов в бассейне на частоте 58 кгц при угле скольжения $\psi=45^\circ$ для различной скорости ветра V (точки — $V=2$ м/сек, крестики — $V=4$ м/сек, кружки — $V=6 \div 7$ м/сек). На правой фигуре штриховой кривой показан спектр, рассчитанный с учетом расширения, обусловленного геометрией опыта



Фиг. 2 Спектры поверхности $S_{\theta_{\pm}, \kappa_0}(F)$ для двух значений скорости ветра

ширина полосы $\Delta F / \bar{F}$ может достигать значительных величин ($\Delta F / \bar{F} \geq 1$ при $V=7$ м/сек);

в) относительная ширина полосы $\Delta F / \bar{F}$ не зависит от частоты измеренного сигнала для значений частот излучения 15–60 кгц и скоростей ветра $V \leq 7$ м/сек.

Полученные результаты находятся в согласии с результатами других измерений в бассейне (см., например, работу [8]); для объяснения наблюдаемого расширения спектров $\mathcal{G}(F)$ с ростом скорости ветра рассмотрим в соответствии с формулой (1) спектры поверхности $S_{\theta_{\pm}, \kappa_0}(F)$, измеренные для разных скоростей ветра. На фиг. 2 в качестве иллюстрации приведены такие спектры, полученные с помощью резонансного волномера ($\kappa_0=4,21$ /см; $\Delta\kappa_0/\kappa_0=0,1$; $\Delta\theta_{0,5}=10^\circ$); спектры нормированы по площади. Из фигуры видно, что с ростом скорости ветра с 2 (точки) до 3 м/сек (кружки) ширина спектра $\Delta F / \bar{F}$ увеличивается приблизительно в 2 раза; центральные частоты спектров соответствуют значениям, рассчитанным по уравнению дисперсии поверхностных волн

$$(4) \quad F = \frac{V_n \kappa_0 \cos \varphi \pm (g\kappa + \alpha/\rho\kappa^3)^{1/2}}{2\pi}$$

где g — постоянная тяготения, α и ρ — коэффициенты поверхностного натяжения и плотность воды, V_n — скорость сноса поверхностного слоя воды, φ — угол между направлением ветра и волн.

Наблюдаемый эффект расширения спектров связан, по-видимому, с действием ветра. Рябь на поверхности воды возникает в виде отдельных нерегулярных цугов, затухающих на расстояниях порядка длины волны. При этом спектральная плотность мощности $S(\kappa, F)$ распределена в некоторой области пространства κ, F вблизи кривой (4); величину уширения реального спектра $S(\kappa, F)$ будем называть мерой «некогерентности» ряби. Следует отметить, что уширение спектров волнения, увеличиваю-

танный с учетом расширения, обусловленного геометрией опыта [7]; видно, что измеренные значения ΔF превосходят расчетные и наблюдается рост значений ΔF с увеличением скорости ветра. Анализ большого числа опытов в бассейне позволяет установить следующие закономерности:

а) существует связь между шириной полосы ΔF_A спектра огибающей $\mathcal{G}_A(F)$ и шириной ΔF энергетического спектра $\mathcal{G}(F)$, что свидетельствует о едином механизме их расширения; при этом

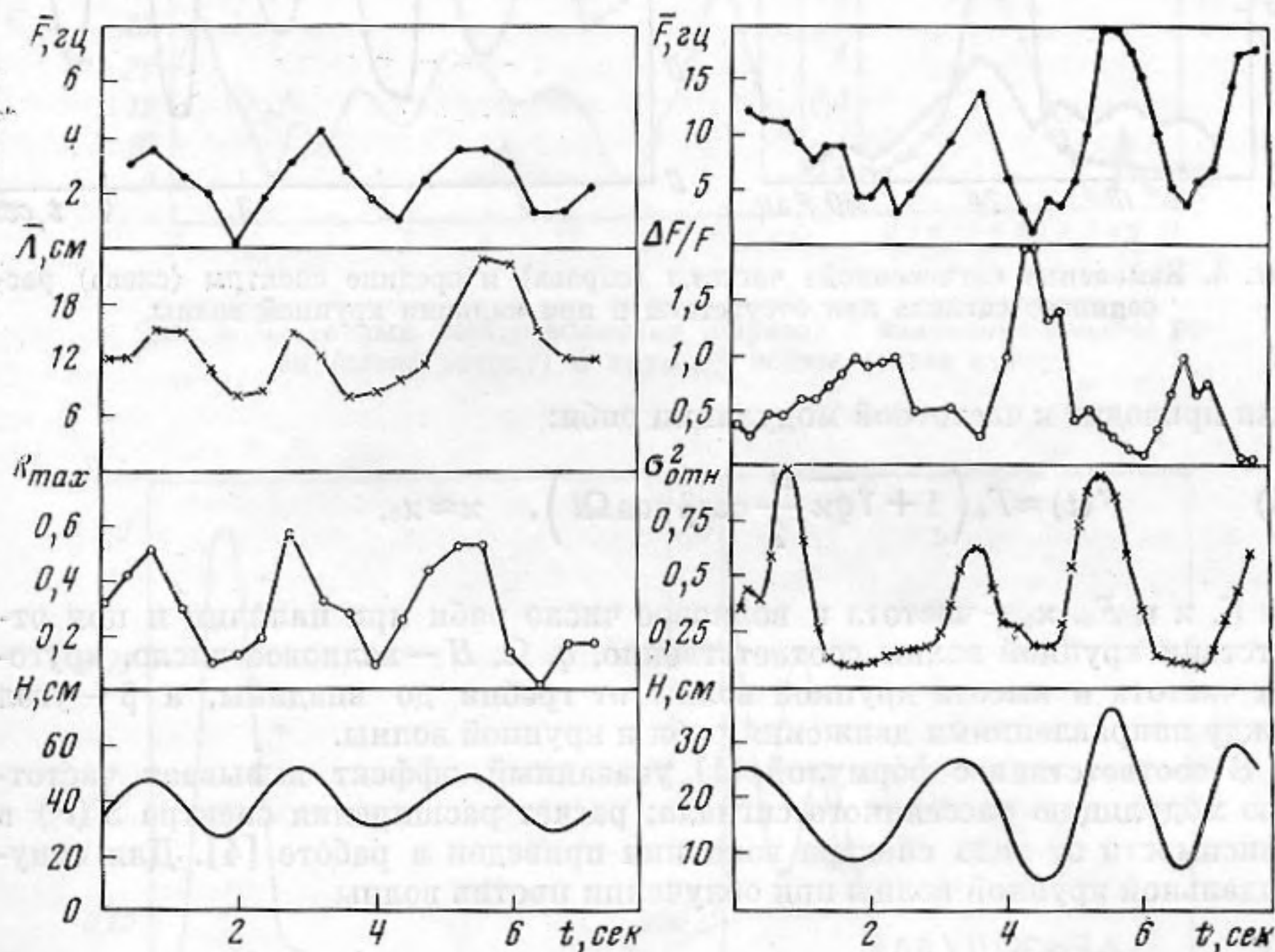
$$(3) \quad \Delta F_A \approx 0,5 \Delta F;$$

б) наблюдается линейный рост расширения спектров ΔF при изменении скоростей ветра от 0,5 до 7 м/сек; при этом относительная

щееся с ростом скорости ветра V и волнового числа k , совпадает с уширением спектров сигналов в соответствии с (1).

Рассмотрим теперь флуктуационные характеристики сигнала, обусловленные изменением пространственно-временной структуры ряби из-за наличия крупных волн («когерентные» флуктуации).

В качестве примера наличия таких флуктуаций на фиг. 3 приведены записи различных параметров ряби (слева) и рассеянного сигнала (справа)

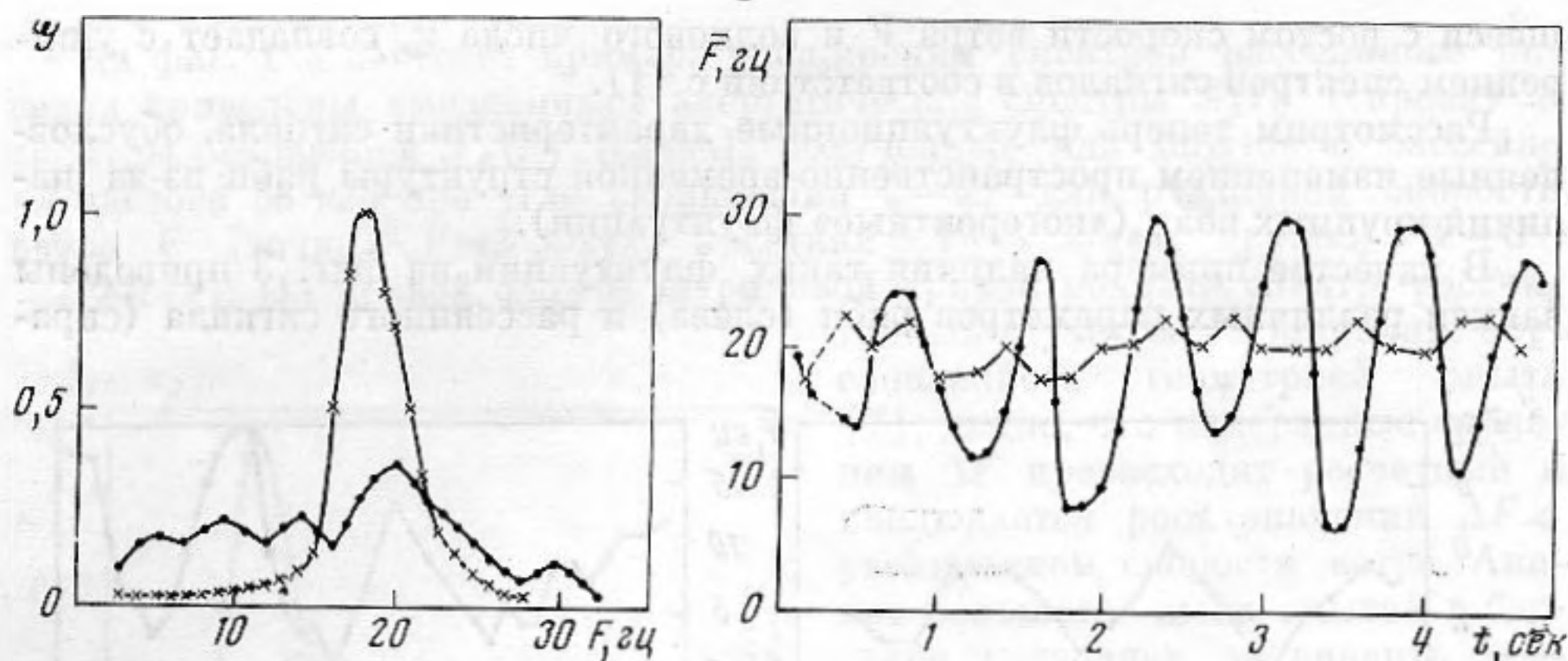


Фиг. 3. Изменение параметров гидроакустического сигнала (справа) и ряби (слева) с крупной волной

ва). Параметры ряби были получены из обработки мгновенных профилей волнения для опыта в шторм-бассейне в Кацевели (рябь на крупной волне, скорость ветра $V=3$ м/сек, средняя высота и период крупных волн $\bar{H}=20$ см, $\bar{T}=2,5$ сек). Слева на фиг. 3 дано изменение во времени следующих параметров ряби: частоты \bar{F} (точки), длины волн $\bar{\Lambda}$ (крестики), максимального коэффициента корреляции R_{\max} для двух профилей, сдвинутых друг относительно друга на $\tau=0,15$ сек (кружки); интервал усреднения составлял $0,4$ сек. Видно хорошее соответствие между изменениями приведенных параметров ряби и крупной волной (сплошная линия). Справа показано изменение центральной частоты \bar{F} (точки), относительной ширины $\Delta F / \bar{F}$ спектров (кружки) и энергии сигнала (в относительных единицах) σ^2 (крестики) «мгновенных» спектров рассеянного сигнала (интервал усреднения $0,2$ сек) для случая облучения на частоте $f=15$ кгц и угле скольжения $\psi=30^\circ$. Видно, что с изменением крупной волны (сплошная линия) параметры рассеянного сигнала существенно изменяются.

Таким образом, кривые фиг. 3 иллюстрируют сложные изменения структуры ряби, вызванные крупной волной, что приводит к частотной и амплитудной модуляции сигнала; рассмотрим их отдельно.

а) Частотная модуляция. В работе [9] были рассмотрены характеристики ветровой ряби от стороннего источника, наложенной на плоскую монохроматическую крупную волну; было показано, что наличие крупных



Фиг. 4. Изменение «мгновенной» частоты (справа) и средние спектры (слева) рассеянного сигнала при отсутствии и при наличии крупной волны

волн приводит к частотной модуляции ряби:

$$(5) \quad F(t) \approx F_0 \left(1 + \sqrt{q\kappa} \frac{H}{2} \cos\beta \cos \Omega t \right), \quad \kappa \approx \kappa_0,$$

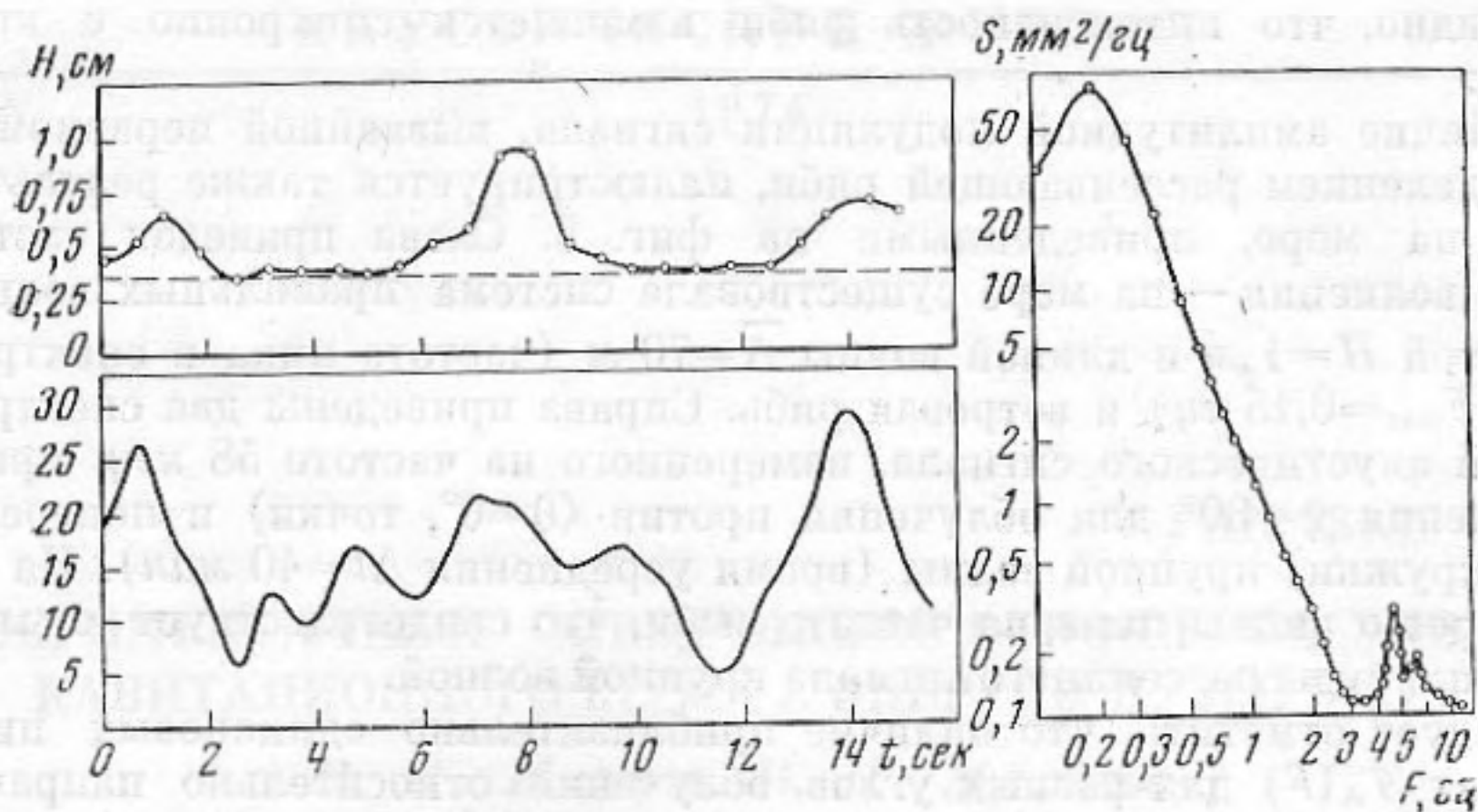
где F , κ и F_0 , κ_0 — частота и волновое число ряби при наличии и при отсутствии крупной волны соответственно, q , Ω , H — волновое число, круговая частота и высота крупной волны от гребня до впадины, а β — угол между направлениями движения ряби и крупной волны.

В соответствии с формулой (1) указанный эффект вызывает частотную модуляцию рассеянного сигнала; расчет расширения спектра $\mathcal{G}(F)$ в зависимости от вида спектра волнения приведен в работе [4]. Для синусоидальной крупной волны при облучении против волны

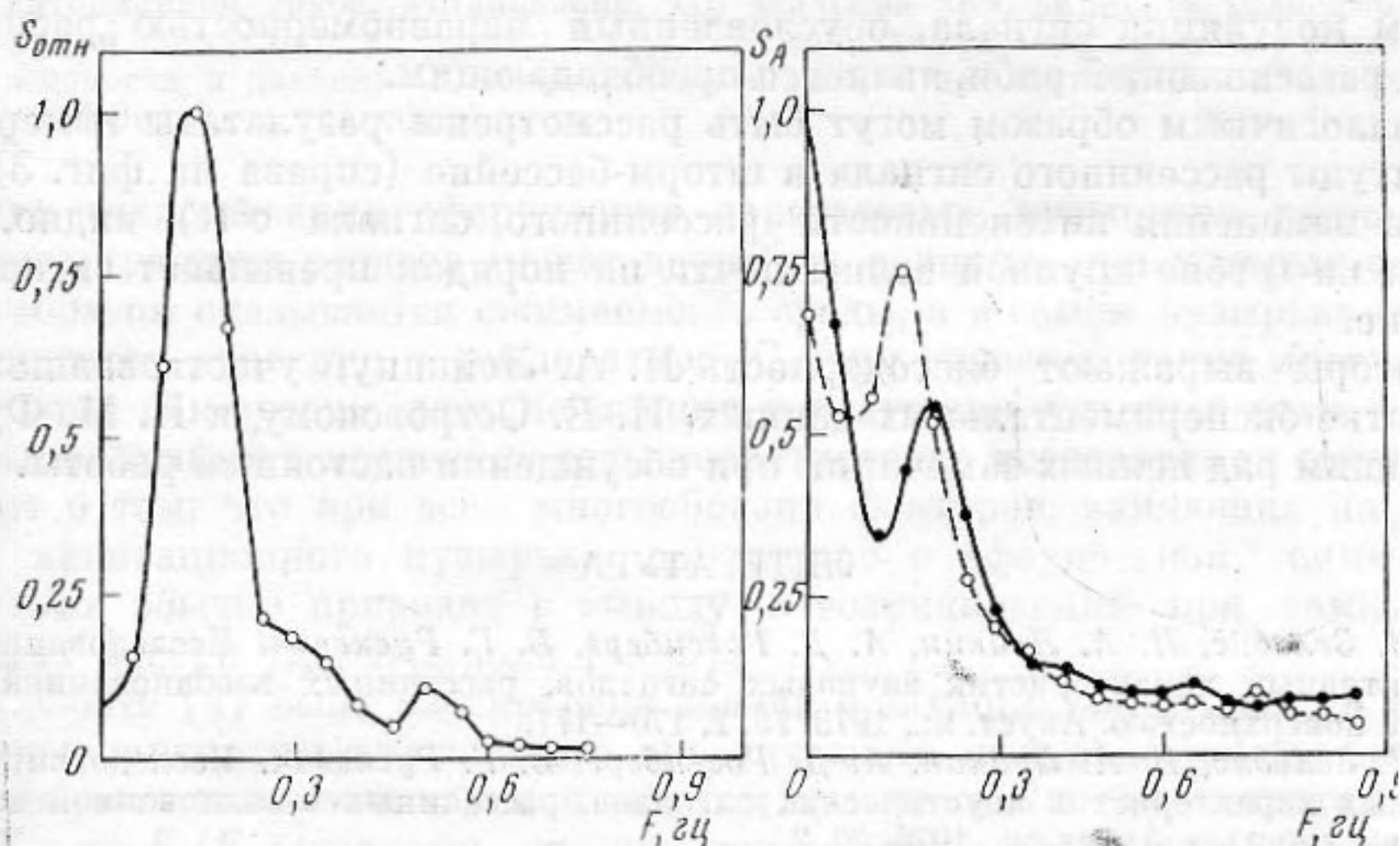
$$(6) \quad \Delta F \approx 3\Omega H / 4\Lambda_0.$$

Для проверки формулы (6) в бассейне был поставлен опыт, результаты которого приведены на фиг. 4. При слабом ветре ($V=2$ м/сек) на частоте 58 кгц и $\psi=20^\circ$ был измерен спектр $\mathcal{G}(F)$ (крестики на левой фигуре): $\bar{F}=18$ гц, $\Delta F / \bar{F}=0,25$. Затем с помощью поршневого волнопродуктора на ветровую рябь была наложена крупная волна с параметрами $H=5$ см, $T=2\pi / \Omega=0,9$ сек; спектр $\mathcal{G}(F)$, соответствующий этому случаю, приведен точками на левой фигуре. Видно, что спектр резко расширился: $\Delta F=20$ гц, $\Delta F / \bar{F}=1,1$; измеренное значение $\Delta F / \bar{F}$ хорошо совпадает с рассчитанным по формуле (6). Для наглядности справа на фиг. 4 приведено изменение во времени текущей частоты рассеянного сигнала для того же опыта, полученное из обработки «мгновенных» спектров (время усреднения $0,2$ сек) при наличии (точки) и при отсутствии (крестики) крупной волны; хорошо видно изменение частоты с периодом крупной волны ($T \approx 0,9$ сек).

Аналогичный эффект частотной модуляции можно наблюдать для опыта в шторм-бассейне ($V=4$ м/сек) — см. правую часть фиг. 3: наличие крупной волны ($\bar{H}=25$ см, $\bar{T}=2$ сек) вызывает «синхронное» изменение частоты рассеянного сигнала ($f=15$ кгц, $\psi=30^\circ$, $F_0=8$ гц) от 1 гц (впадина) до 20 гц (гребень). Из фигуры видно также изменение относительной ширины $\Delta F / \bar{F}$ мгновенных спектров с периодом крупной волны: на гребнях ширина спектров в несколько раз уже, чем во впадинах. Наблюдаемый эффект можно объяснить тем, что «когерентность» ряби на гребнях больше, чем во впадинах, что связано, по-видимому, с различным действием ветра на рябь на гребнях и впадинах. Из рассмотрения кривой $R_{\max}(t)$ (фиг. 3, слева) видно, что максимальный коэффициент взаимной



Фиг. 5. Частотный спектр волнения (справа) и изменение высоты ряби (слева вверху) и крупной волны (слева внизу)



Фиг. 6. Частотный спектр волнения (слева) и спектры огибающей сигнала (справа) для двух направлений облучения относительно фронта крупных волн

корреляции двух средних профилей поверхности, сдвинутых во времени на 0,15 сек, меняется от 0,6 на гребне до 0 во впадине.

б) Амплитудная модуляция. Изменение амплитуды рассеянного сигнала также уместно связать с изменчивостью ряби на различных элементах крупной волны. Такая изменчивость иллюстрируется фиг. 5, где приведены результаты опыта по измерению частотного спектра волнения на море с помощью струнного волномера.

Наличие четкой системы двух волн (ветровая рябь, наложенная на плоские волны зыби) позволило наблюдать распределение энергии ряби по элементам крупных волн. Справа на фиг. 5 приведен измеренный частотный спектр волнения: спектр имеет два пика, частота максимума зыби — 0,2 гц, ряби — 4,5 гц.

Слева на фиг. 5 вверху приведено изменение во времени эффективной высоты ряби (энергии высокочастотных составляющих для $F \geq 3$ гц), рассчитанное для элементов крупной волны (интервал усреднения 0,6 сек); штриховой линией показано предельное значение измеряемой высоты ряби. Внизу приведена синхронная запись низкочастотной части волне-

ния: видно, что интенсивность ряби изменяется синхронно с крупной волной.

Наличие амплитудной модуляции сигнала, вызванной неравномерным распределением рассеивающей ряби, иллюстрируется также результатами опыта на море, приведенными на фиг. 6. Слева приведен частотный спектр волнения — на море существовала система правильных волн зыби с высотой $\bar{H}=1$ м и длиной волны $\bar{\Lambda}=70$ м (частота пика в спектре волнения $F_{\max}=0,15$ гц) и ветровая рябь. Справа приведены два спектра огибающей акустического сигнала, измеренного на частоте 58 кгц при угле скольжения $\psi=30^\circ$ для облучения против ($\theta=0^\circ$, точки) и поперек ($\theta=90^\circ$, кружки) крупной волны (время усреднения $\Delta t=40$ мин). На спектрах хорошо видны пики на частоте зыби, что свидетельствует о модуляции амплитуды рассеянного сигнала крупной волной.

Следует отметить, что наличие приблизительно одинаковых пиков в спектрах $\mathcal{S}_A(F)$ для разных углов облучения относительно направления распространения крупной волны исключает возможность объяснения модуляции изменением локального угла скольжения, так как в рамках этого механизма модуляции при $\theta=90^\circ$ вообще отсутствует. Таким образом, в рассматриваемом случае (угол скольжения достаточно велик: $\psi=30^\circ$) механизм модуляции сигнала, обусловленный неравномерностью распределения рассеивающей ряби, является преобладающим.

Аналогичным образом могут быть рассмотрены результаты измерения амплитуды рассеянного сигнала в шторм-бассейне (справа на фиг. 3). Из записи изменения интенсивности рассеянного сигнала $\sigma^2(t)$ видно, что сигнал на гребне крупной волны почти на порядок превышает сигнал во впадине.

Авторы выражают благодарность И. А. Лейкину, участвовавшему в обработке экспериментальных данных, И. Е. Островскому и И. М. Фуксу, сделавшим ряд ценных замечаний при обсуждении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Зельдис, И. А. Лейкин, А. Д. Розенберг, В. Г. Рускевич. Исследование амплитудных характеристик звуковых сигналов, рассеянных взволнованной водной поверхностью. Акуст. ж., 1973, 19, 2, 170—177.
2. В. И. Зельдис, И. А. Лейкин, А. Д. Розенберг, В. Г. Рускевич. Исследование фазовых характеристик акустических сигналов, рассеянных взволнованной водной поверхностью. Акуст. ж., 1974, 20, 2.
3. Ф. Г. Басс. К теории комбинационного рассеяния волн на неровной поверхности. Изв. вузов, Радиофизика, 1961, 4, 1, 58.
4. И. М. Фукс. О ширине спектра сигналов, рассеянных на взволнованной поверхности моря. Акуст. ж., 1974, 20, 3.
5. И. А. Лейкин, А. Д. Розенберг. Измерение угловых спектров высокочастотной части волнения. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1971, 7, 1, 102.
6. В. Г. Рускевич, И. А. Лейкин, А. Д. Розенберг. Многоэлементная волноизмерительная система для исследования пространственно-временной структуры волнения в высокочастотной части спектра. Океанология, 1973, 13, 2, 357—361.
7. А. Д. Розенберг, А. И. Калмыков, В. И. Зельдис. Обратное рассеяние звуковых волн на правильной ряби. Изв. вузов, Радиофизика, 1967, 10, 6, 769.
8. R. H. Mellen. Doppler Shift of Sonar Backscatter from Sea Surface. JASA, 1964, 36, 7, 1395.
9. Ю. А. Силицын, И. А. Лейкин, А. Д. Розенберг. О пространственно-временных характеристиках ряби в присутствии длинных волн. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1973, 9, 5, 511—519.

Институт радиофизики и электроники
Академии наук УССР

Поступила
26 июля 1972 г.