АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2006, том 52, № 6, с. 753–759

УДК 551.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕВЕРБЕРАЦИОННОГО СИГНАЛА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ АНТЕННЕ ПРИ ТОНАЛЬНОЙ ЗАСВЕТКЕ МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ

© 2006 г. Е. Л. Бородина, Б. М. Салин

Институт прикладной физики РАН

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46

E-mail: bel@hydro.appl.sci-nnov.ru, salin@hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 23.05.05 г.

Проведены исследования спектрально-угловых характеристик реверберационного сигнала, принимаемого вертикальными антеннами на стационарных трассах при тональной подсветке акватории. Выбор рассматриваемого диапазона частот $F \sim 200$–300 Гц обусловлен, с одной стороны, малыми потерями при распространении и наличием для данного поддиапазона мощных акустических преобразователей, с другой стороны – возможностью проведения исследований эффектов рассеяния звука на поверхностном волнении при сопоставимых длинах звуковой и поверхностной волн. Рассмотрены данные двух экспериментов, выполненных в условиях однородного по трассе волновода в акватории Баренцева моря с глубинами $H \sim 110$–120 м и сильно неоднородного по трассе волновода в акватории Белого моря с перепадами глубин от 30 м до 250 м.

PACS: 43.30.Hw, 43.30.Re, 43.30.Zk

В последние годы, в ряде работ [1, 2] были опубликованы исследования эффектов когерентного рассеяния низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении. В частности, в работе [2] была продемонстрирована возможность расчета спектра реверберации тонального сигнала на основе характеристик поверхностного волнения и получено для малых χ_* выражение для нормированной спектральной плотности мощности реверберации $G^2(\omega)$:

$$G^2(\omega) = \frac{P^2(\omega)}{P_0^2} = \frac{8\pi^2 R\chi_*^5 S(\omega)}{9\lambda^2 H}, \qquad (1)$$

где $P^2(\omega)$ – спектральная плотность мощности сигнала звукового давления в точке приема при тональном сигнале подсветки, P_0^2 – средний квадрат звукового давления, создаваемого излучателем в точке приема, F_0 – рабочая частота излучателя, $\omega/2\pi = f = F_0 - F$ – частота гетеродинированного сигнала (разность частот сигнала тонального источника и принятого сигнала), R – дистанция между источником и приемником, λ – длина звуковой волны, H – средняя глубина акватории, χ_* – угол захвата акустической энергии волноводом, отсчитываемый относительно горизонтали (полный угол, в котором распространяется акустическое поле $2\chi_*$), $S(\omega)$ – спектральная плотность мощности поверхностного волнения.

Из (1) следует высокая (пятая) степень зависимости мощности реверберации от угла захвата χ_*. При наличии на приеме вертикальной антенны и однородного по трассе волновода, теоретическую зависимость уровня спектральной плотности мощности $G^2(\omega)$ от угла захвата χ_* удается проверить.

Первоначально рассмотрим данные эксперимента на стационарной и относительно однородной трассе 1 в Баренцевом море. Параметры трассы: глубина $H \approx 110$ м, дистанция $R = 21.6$ км, частота сигнала тонального акустического источника $F_0 = 244$ Гц, $\lambda = 6$ м. Прикрепленная к дну приемная эквидистантная вертикальная антенная решетка имела длину 93 м (между концевыми гидрофонами) и состояла из 32 независимых приемников. Расстояние от верхнего гидрофона до поверхности моря составляло ~10 м[1].

На рис. 1 в полосе частот -10 Гц $\le f \le 10$ Гц, в децибельном масштабе представлены результаты измерения на трассе 1 нормированной спектральной плотности мощности $G^2(\omega)$ реверберационного сигнала. Разрешение по частоте спектрального анализа (с учетом весового множителя) – 0.0075 Гц, время накопления – 1800 с. При проведении спек-

[1] Более полное описание эксперимента представлено в работе [3].

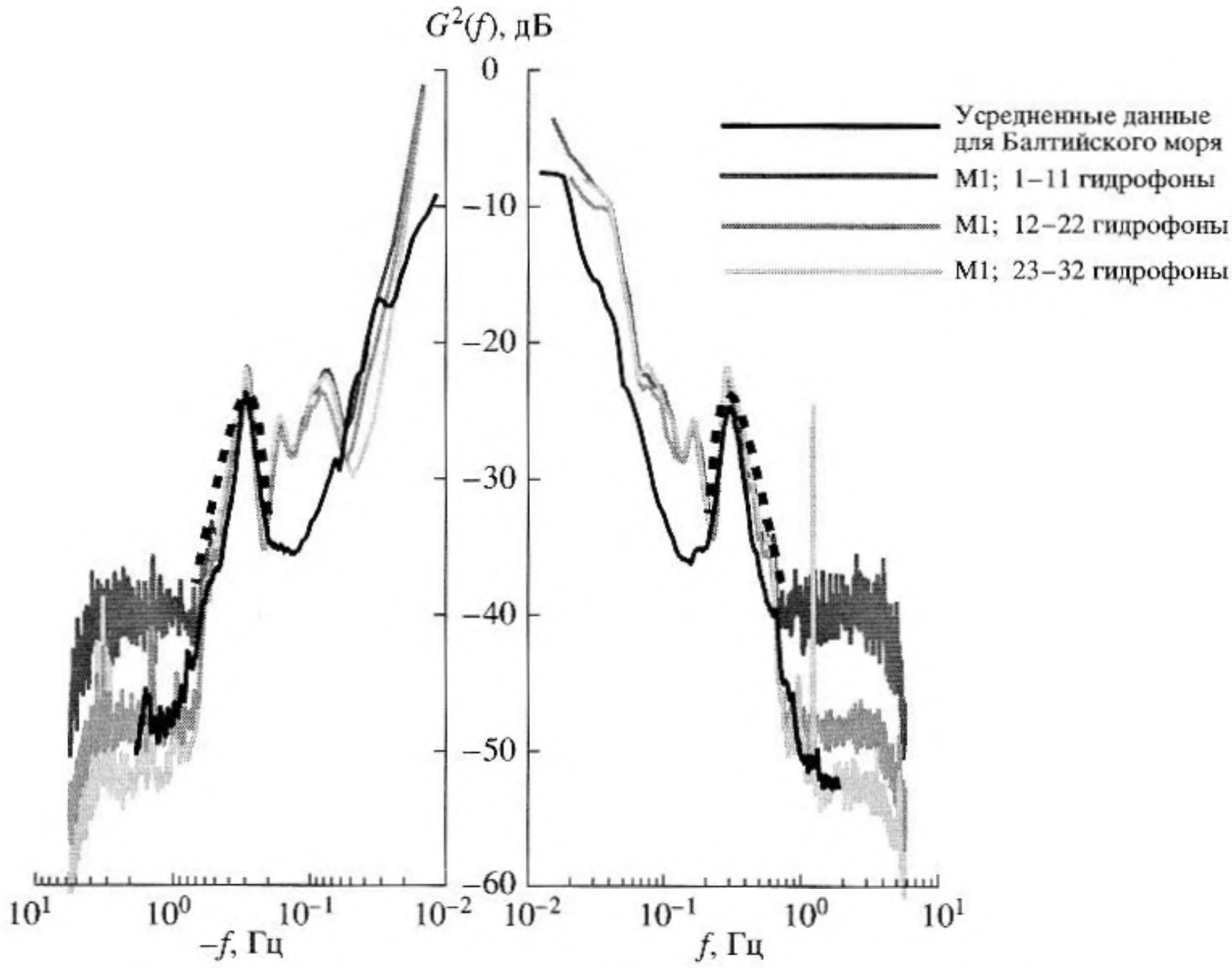

Рис. 1. Нормированная спектральная плотность мощности $G^2(f)$ реверберационного сигнала, измеренная на вертикальной антенне на трассе 1 (некогерентное накопление). Нумерация гидрофонов – от поверхности моря, пунктирная линия – расчет, темная линия – эксперимент в Балтийском море.

трального анализа использовалось окно Хеннинга[2], применение которого было обусловлено наличием в спектре флуктуаций резкого (более 10 дБ на октаву) спада уровня сигнала вблизи нулевой частоты (при использовании прямоугольного окна с разрешением по частоте ~0.005 Гц отклик на постоянную составляющую искажает форму спектра).

Помимо временнóго усреднения было выполнено усреднение спектров флуктуаций по 11 верхним, 11 средним и 10 нижним гидрофонам (см. рис. 1). Черной линией обозначен усредненный спектр флуктуаций, измеренный ранее в аналогичных условиях на Балтийском море. Величина нормированной спектральной плотности мощности на нулевой частоте $G^2(0)$ в данном случае определяется только разрешением спектрального анализа, поэтому значение спектра на нулевой частоте, равное ~+21 дБ, на графиках не приводится. Уровень реверберационной помехи становится сопоставимым с уровнем фона вблизи частот $f \sim \pm 1$ Гц, при этом в полосе частот $\Delta f = 0.01$ Гц величина порогового значения уровня фоновой помехи для придонных гидрофонов составляет −70 дБ относительно уровня прямого сигнала.

Как видно из графиков, представленных на рис. 1, в диапазоне частот $f = \pm(0.2–0.4)$ Гц спектральная плотность мощности флуктуаций имеет подъем с локальным максимумом на частоте $f_{пик} = \omega_{пик}/2\pi = 0.3$ Гц. Этот подъем связан с наличием ветрового волнения на акватории измерений, что также отмечено в работе [3] при анализе спектра реверберации, измеренного на указанной трассе. Для проверки нами был выполнен расчет спектрального уровня реверберации согласно выражению (1). При расчете в качестве спектральной плотности мощности поверхностного волнения $S(\omega)$ использовался спектр Пирсона–Московитца [1, 4].

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5}\exp[-\beta(g/V\omega)^4] = \frac{\alpha g^2}{\omega^5}\exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_{пик}}{\omega}\right)^4\right], \quad (2)$$

где ω – циклическая частота поверхностного волнения, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, $g = 9.8$ м/с^2 –ускорение свободного падения, V – скорость ветра на

[2] Окно Хеннинга $H(n) = 1 - \cos(2\pi n/N)$, где n – номер отсчета, а N – число отсчетов в окне анализа.

стандартной высоте (19.8 м) над уровнем моря, $\omega_{пик} = \frac{\sqrt[4]{4\beta/5}g}{V}$ – значение частоты, при котором наблюдается пик ветрового волнения для фиксированного значения скорости ветра[3].

Подставляя (2) в (1), получаем итоговое выражение для расчета спектра реверберации, обусловленной когерентным рассеянием акустических волн на поверхностном волнении,

$$G^2(\omega) = \frac{8\pi^2 R\chi_*^5 \alpha g^2}{9\lambda^2 H\omega^5}\exp\left[-\frac{5}{4}(\omega_{пик}/\omega)^4\right]. \quad (3)$$

В выражение (3) кроме параметров с известными значениями входит характеристика акустических свойств трассы распространения χ_* – угол захвата волноводом лучей, выходящих из источника. Для вычисления угла χ_* была построена, путем выполнения операций (4)–(6), двумерная (зависящая от частоты ω и синуса угла χ) нормированная спектральная плотность мощности реверберационного сигнала $G^2(\omega, k_z)$:

$$\xi(\omega, k_z, t_j) = \frac{1}{NM}\times$$
$$\times\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} H(n)H(m)p_m(t_j + n\Delta t)e^{i(\omega(t_j+n\Delta t)+k_z m\Delta z)}, \quad (4)$$

$$G^2(\omega, k_z, t_j) = \frac{|\xi(\omega, k_z, t_j)|^2}{\sum\limits_{\omega}\sum\limits_{k_z}|\xi(\omega, k_z, t_j)|^2\Delta f\lambda/D\cos\chi}, \quad (5)$$

$$G^2(\omega, k_z) = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J} G^2(\omega, k_z, t_j). \quad (6)$$

Здесь: $p_m(t_n)$ принятый гидрофоном с номером m в момент времени t_n сигнал, представленный (после выполнения операции гетеродинирования) в комплексной форме; $M = 32$ – общее число гидрофонов в антенне; $\Delta z = 3$ м – расстояние между соседними гидрофонами; $N \sim 400$ – общее число точек во временно́м окне спектрального анализа; $\Delta t \approx 0.08$ с – интервал между временны́ми отсчетами, $T \approx 32$ с – длительность окна спектрального анализа; $H(n)$ и $H(m)$ – весовые множители, $\xi(\omega, k_z, t_j)$ – реализация пространственно-временно́го спектра, измеренная на интервале времени от t_j до $t_j + N\Delta t$; $k_z = k\sin\chi = 2\pi\sin\chi/\lambda$ – пространственная частота, $D = 93$ м – размер апертуры вертикальной антенны; χ – угол, отсчитываемый относительно нормали к антенне, однозначно связан с пространственной частотой k_z.

Операция (4) определяет текущий двумерный спектр, (5) выполняет нормировку спектра (4) на значение уровня сигнала и величину полосы анализа по частотной и угловой координатам, (6) выполняет операцию некогерентного усреднения текущих значений.

В выражении (5) суммирование выполнялось с шагом $\Delta f = 1/T$ по частоте и $\Delta k_z = 2\pi/D$ по координате пространственного спектра[4]. Суммирование в (6) выполнялось со сдвигом по времени $t_j - t_{j-1} = T/2 = 16$ с, общее время накопления составило 30 мин. Нормировка спектров на ширину полосы спектрального анализа $\Delta f = 0.03$ Гц и угловое разрешение антенны $\Delta\chi = \lambda/D\cos\chi$ выполнена для получения оценки плотности мощности уровня реверберации по частотной и угловой координатам.

Измеренная для трассы 1 зависимость $G^2(\omega, k_z)$ представлена в плотностном виде на рис. 2. На рис. 3 для дискретного набора пространственных частот $k_z = \frac{2\pi}{D}q$, где $q \in [-16; +16]$ – номера пространственных частот, построены сечения двумерного спектра (рис. 2) на частотах $f = 0$ Гц и $f = \pm 0.3$ Гц. Как видно из формы сечения спектра на нулевой ($f = 0$ Гц) частоте, основная энергия акустического поля приходится на пространственные частоты с номерами q от –6 до +6, что соответствует угловому сектору по $\chi_* = \pm\arcsin(q\lambda/D) = \pm 22.5°$ или ± 0.39 рад.

Подставляя недостающее значение χ_* в (3), получаем искомое для трассы 1 выражение для расчета спектра реверберации в области характерных частот поверхностного волнения

$$G^2(\omega) = \frac{0.336}{\omega^5}\exp(-15.8/\omega^4). \quad (7)$$

Построенные согласно (7) графики нанесены на экспериментальные зависимости рис. 1 пунктирной линией. Как видно из рисунка, совпадение теоретических и экспериментальных кривых по уровню очень хорошее. Так, расчетное значение максимума спектра реверберации на частоте $f_{пик} = 0.3$ Гц составило –23.7 дБ, а экспериментальные данные по максимальным значениям находились

[3] В работе [5] приводится несколько иное соотношение между скоростью ветра V и пиковым значением $\omega_{пик}$, частоты ветрового волнения ($V = \frac{\sqrt[4]{2\beta/3}g}{\sqrt{K_{пик}g}} = \frac{\sqrt[4]{2\beta/3}g}{\omega_{пик}}$).

[4] Вообще говоря, при использовании весовой функции разрешение по частоте (равно как и по угловой координате) будет определяться эффективным значением временного окна $T_{эфф}$, поэтому шаг при суммировании спектров должен быть $\Delta f = 1/T_{эфф}$, а не $1/T$. Однако поскольку полоса анализа входит и в количество членов суммы, и в виде нормирующего множителя, то ошибка в определении ширины полосы анализа практически не сказывается на конечном результате.

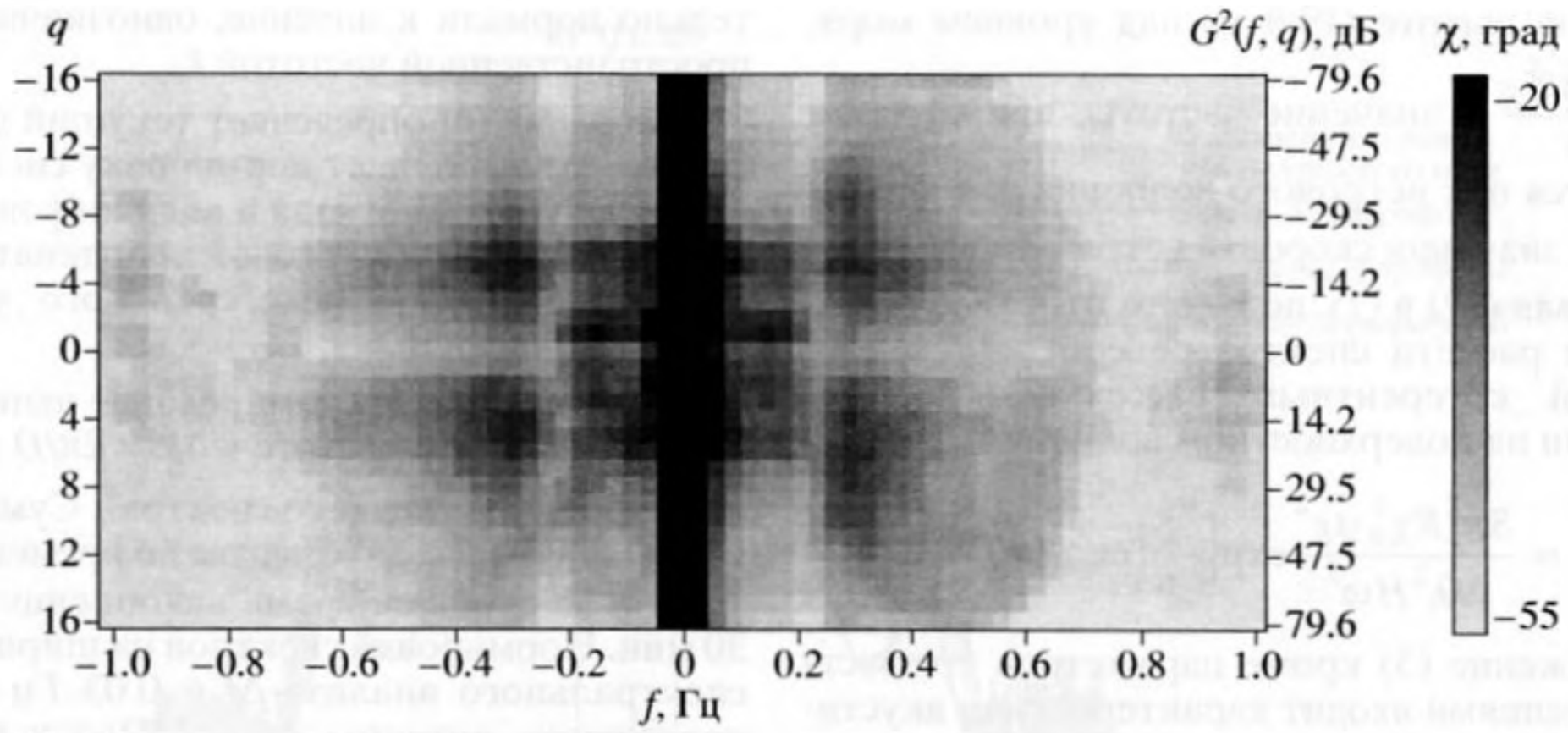

Рис. 2. Нормированная спектральная плотность мощности $G^2(f, q)$ принятого сигнала, построенная в плотностном виде в координатах: f – временна́я частота, q – пространственная частота.

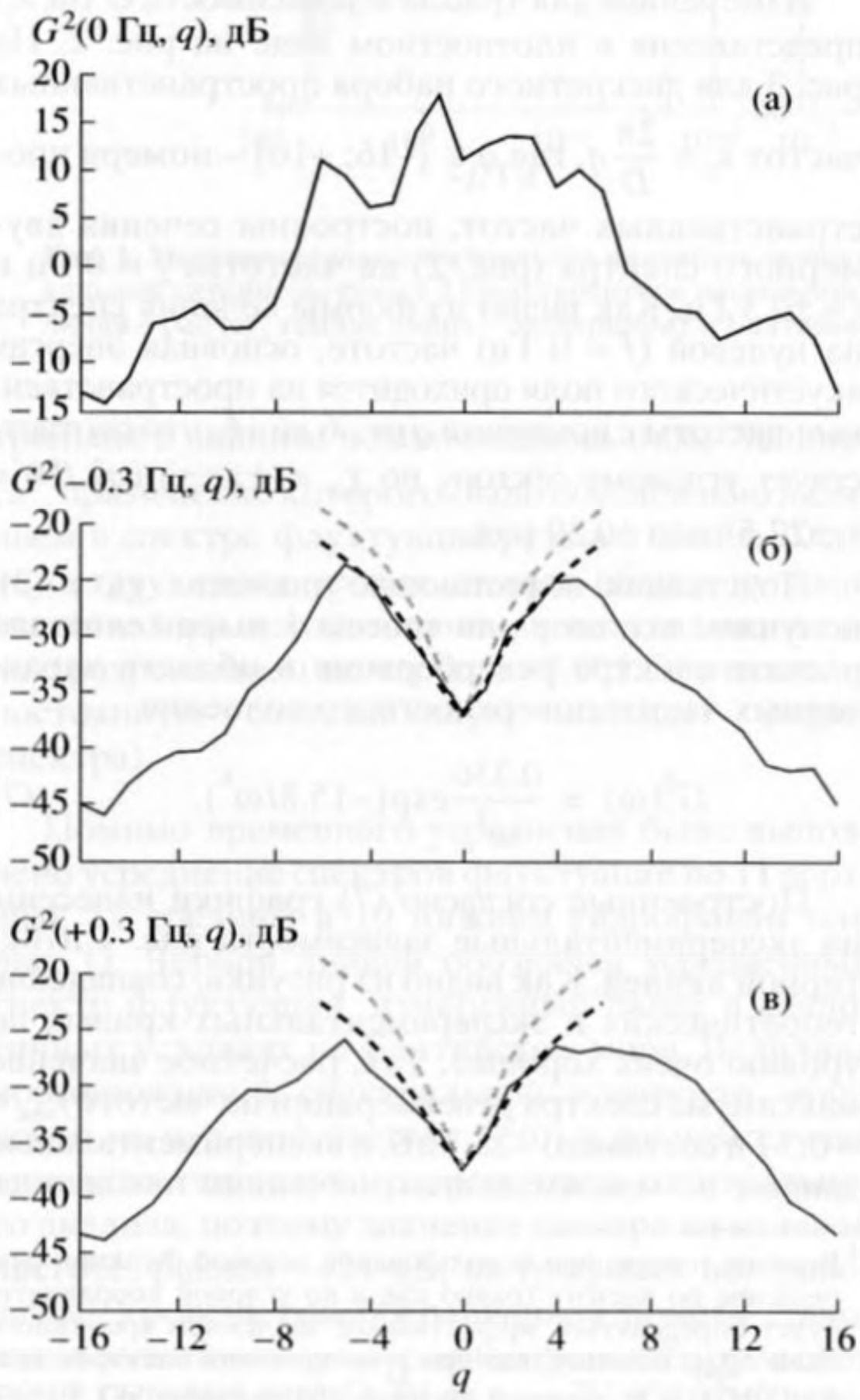

Рис. 3. Сечения двумерного распределения спектральной плотности мощности $G^2(f, q)$ на частотах $f = 0$ Гц, $f = -0.3$ Гц и $f = +0.3$ Гц (рис. 3а–3в, соответственно). Светлый пунктир – расчет по формуле (10).

в пределах ~–22…–24 дБ. Однако формы спектров несколько отличаются. Экспериментальные пики оказались более узкими. Это обусловлено, по-видимому, тем фактом, что в (1) подставлялся одномерный (измеренный "в точке") спектр поверхностного волнения, в то время как необходимо подставлять спектр волнения, измеренный в относительно узком секторе углов вблизи от основного направления распространения поверхностных волн. Так как достоверными данными по пространственно-временному спектру поверхностного волнения для широкого диапазона значений силы ветра V мы не располагаем, то в качестве $S(\omega)$ нами использовалась известная зависимость – спектр Пирсона–Московитца (2).

Как было отмечено в начале статьи, наличие вертикальной приемной решетки позволяет проверить степенную зависимость уровня реверберации от вертикального угла.

Выражение (1) для уровня реверберации было получено путем интегрирования рассеянного на поверхности сигнала в секторе углов захвата волновода $0 - \chi_*$. Если такое интегрирование не производить, то можно получить выражение для частотно-угловой зависимости спектральной плотности рассеянного сигнала в точке приема вида

$$G^2(\omega, k_z) = \frac{4\pi^2 R}{3H\lambda^2} S(\omega)\chi_*^2 \sin^2(\chi), \qquad (8)$$

где, как и ранее, $k_z = 2\pi/\lambda\sin(\chi)$. Легко показать, что при малых величинах сектора углов $\pm\chi_*$, интегрируя (8) по χ в пределах углового сектора $\pm\chi_*$, мы получим одномерную спектральную плотность мощности (1).

Таким образом, если представленный механизм рассеяния работает, то выражение для спектральной плотности должно иметь вид квадра-

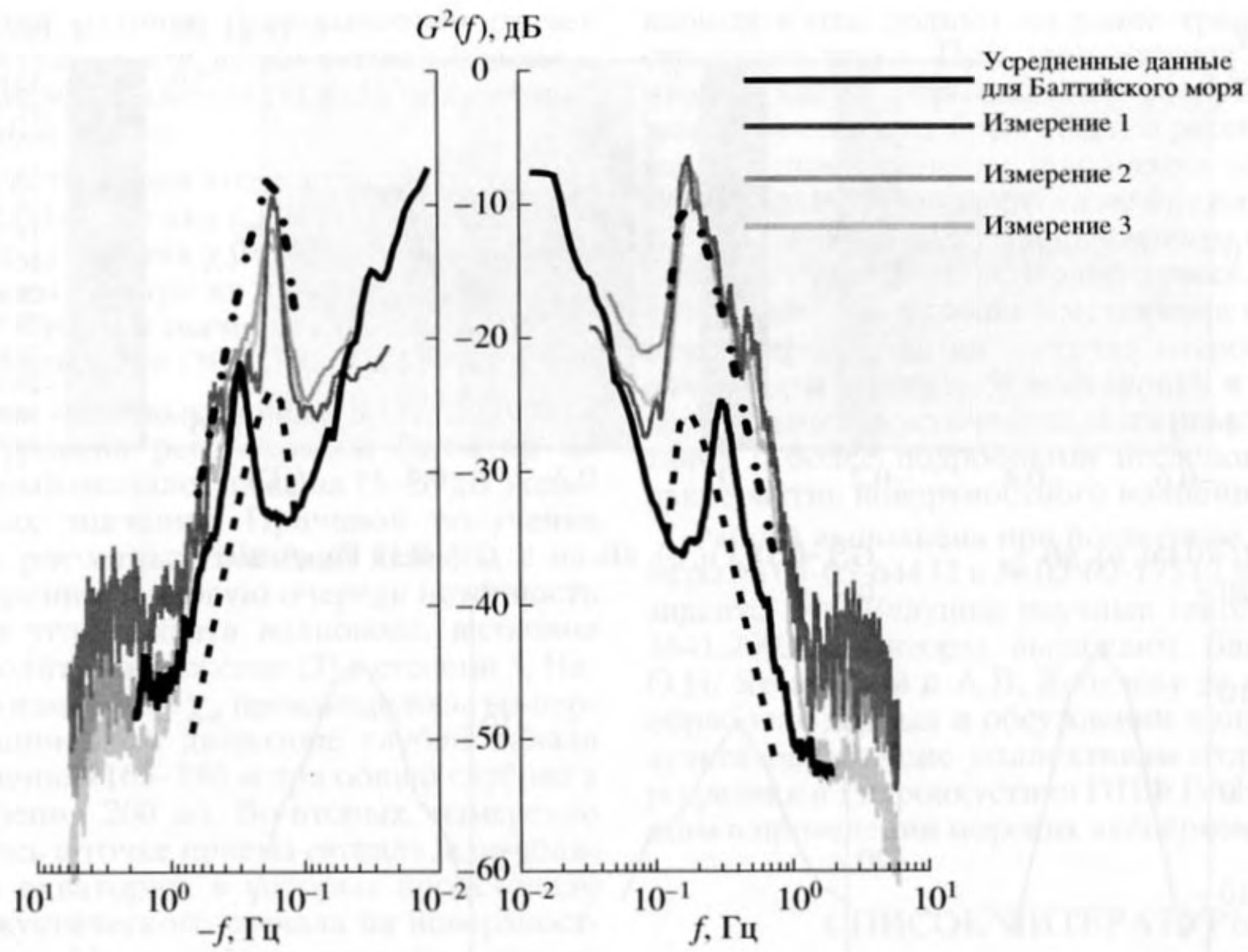

Рис. 4. Нормированная спектральная плотность мощности $G^2(f)$ реверберационного сигнала, измеренная на вертикальной антенне на трассе 2 (некогерентное накопление). Интервал времени между измерениями $G^2(f)$ составляет 1 ч, пунктир – расчет для $\chi_* = 14.3°$, штрих-пунктир – для $\chi_* = 30°$.

тичной зависимости от пространственной частоты k_z:

$$G^2(\omega, k_z) = C_1(\omega)\left(\frac{\lambda}{2\pi}k_z\right)^2 + C_2, \qquad (9)$$

где $C_1(\omega) = \dfrac{4\pi^2 R}{3H\lambda^2}S(\omega)\chi_*^2$; C_2 – нормированная спектральная плотность помехи. Для частоты поверхностного волнения $f_{пик} = 0.3$ Гц, дискретного набора пространственных частот q и реальных значений входящих параметров, выражение (9) преобразуется к виду

$$G^2(\omega_{пик}, q) = 0.1\left(\frac{\lambda}{D}q\right)^2 + 2\times 10^{-4}. \qquad (10)$$

На рис. 3б, 3в в децибельном масштабе ($10\lg(G^2(\omega, q))$) представлены экспериментальные данные по угловым зависимостям спектральной плотности мощности рассеянного сигнала на частотах $f = -0.3$ Гц и $f = +0.3$ Гц и теоретическая зависимость (10) – светлый пунктир.

Из рисунка явно видно, что в пределах угла захвата волновода $\chi_* = \pm 22°$ (что соответствует номерам пространственных гармоник $q = \pm 6$) мощность рассеянного сигнала (сплошная кривая) растает с увеличением угла χ и достигает максимума вблизи предельного значения угла захвата. Видно, что расчетная зависимость (верхняя пунктирная линия) близка к экспериментальной кривой, однако имеет отличие на ~3 дБ в диапазоне пространственных частот $q = \pm(4–6)$. Нижняя пунктирная линия хорошо совпадает с экспериментом и соответствует теоретической зависимости (10), где коэффициент $C_1(\omega) = 0.1$ уменьшен в два раза. То есть теория (выражение (8)) дает несколько завышенное значение угловой зависимости уровня реверберации и точное значение интегральной характеристики (3)[5].

В целом, полученные выражения (3), (8) хорошо описывают спектральные характеристики уровня реверберации тонального акустического сигнала на ветровом волнении для однородной по трассе акватории и при умеренных значениях ветрового волнения.

Рассмотрим результаты измерения на второй сильно неоднородной трассе и при большем вет-

[5] В интеграле совпадение теории и эксперимента лучше за счет того, что теоретические значения, превышающие на 3 дБ эксперимент, суммируются в ограниченной полосе углов захвата $-22° < \chi < +22°$, а экспериментальные данные, как и положено для получения оценки мощности сигнала в точке, суммируются по всем пространственным частотам в секторе углов ±90°.

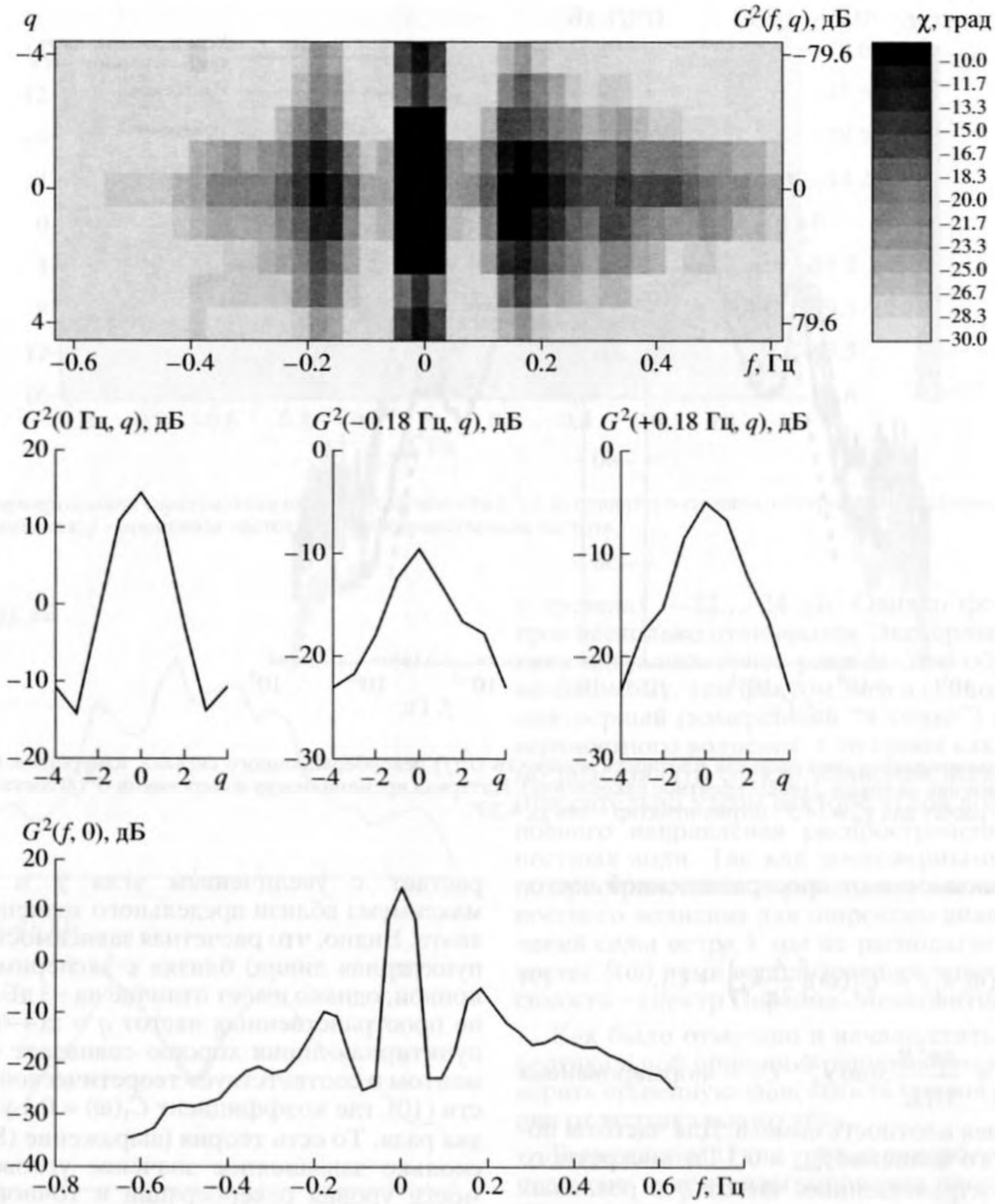

Рис. 5. Нормированная спектральная плотность мощности $G^2(f, q)$ принятого сигнала, построенная в плотностном виде в координатах f, q, и ее сечения на частотах $f = 0$ Гц, $f = \pm 0.18$ Гц и $q = 0$.

ровом волнении. Параметры трассы: глубина H изменялась от 30 м в месте расположения излучателя до 260 м в месте постановки приемной антенны, дистанция R = 14.6 км, частота сигнала тонального акустического источника F_0 = 244 Гц, λ = 6 м. Прикрепленная к дну приемная эквидистантная вертикальная антенна решетка имела длину 21 м и состояла из 8 независимых гидрофонов. Расстояние от верхнего гидрофона до поверхности составляло ~165 м.

На рис. 4 и 5 для указанной трассы представлены спектральные одномерные (рис. 4) и двумерные (рис. 5) характеристики уровней реверберации, аналогичные рис. 1–3. Основные отличия реверберационных характеристик для однородной и неоднородной трасс заключаются а) в значительно большем (на ~15 дБ) уровне реверберации на ветровом волнении для одномерной спектральной плотности, б) отсутствии роста и даже заметном спаде уровня реверберации при увеличении угла прихода лучей χ (это видно из сравнения рис. 3 и рис. 5) и в) значительной несимметричности (~5 дБ) откликов для положительных и отрицательных доплеровских частот. Для более

точной оценки отличий был выполнен расчет уровня флуктуаций для неоднородной трассы с использованием выражений (1) и (3), полученных для однородной трассы.

Скорость ветра V для второй трассы, исходя из частоты локального пика $f_{пик} = 0.18$ Гц, составляла 7.5 м/с. Угол захвата χ_* был получен из сечения двумерного спектра на нулевой частоте $\chi_* = \lambda/D = 14.3°$. Среднее значение глубины волновода примем равным $H = (30 + 260)/2 \cong 150$ м.

Подставляя исходные данные в (3), получаем расчетный уровень реверберации (пунктир на рис. 4), который оказался ниже на 15–20 дБ экспериментальных значений. Причиной получения заниженных расчетных значений явилась, с нашей точки зрения, в первую очередь неточность определения угла захвата волновода, величина которого входит в выражение (3) в степени 5. Напомним, что измерение χ_* производилось, во-первых, в ограниченном диапазоне глубин канала распространения (165–186 м при общей глубине в точке измерения 260 м). Во-вторых, измерение производилось в точке приема сигнала, а не вблизи областей акватории, в которых происходило рассеяние акустического сигнала на поверхностном волнении. На рис. 4 представлена штрихпунктиром вторая расчетная кривая, построенная для гипотетического значения $\chi_* = 30°$, при котором теория хорошо согласуется с экспериментом.

Нельзя исключить из рассмотрения также возможность того, что приближение брегговского рассеяния, на основе которого построена теоретическая модель, в данном случае не работает из-за малости отношения длин звуковой и ветровой волн ($\lambda/\Lambda \cong 0.1$).

В заключение отметим, что развитые в работе [2] методы расчета оказались вполне применимыми и достаточно точными для оценки реальных спектральных и угловых характеристик реверберации, возникающей при распространении низкочастотного тонального сигнала на стационарных и однородных по длине трассах распространения звука. При этом авторы допускают, что механизм формирования реверберации может отличаться от брегговского рассеяния на поверхностном волнении при малом соотношении λ/Λ и малых значениях угла между направлением ветрового волнения и направлением распространения звука на стационарной трассе. Для более детального исследования механизма формирования реверберации на частотах ветрового волнения авторы планируют постановку и проведение специальных акустических экспериментов в сочетании с более подробными исследованиями характеристик поверхностного волнения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ проекты № 05-05-64432 и № 05-02-17512 и гранта президента РФ "Ведущие научные школы" № НШ-1641.2003.2. Авторы выражают благодарность О.Н. Кемарской и А.В. Лебедеву за помощь при обработке данных и обсуждении полученных результатов, а также коллективам отделения Гидрофизики и Гидроакустики ИПФ РАН, участвующим в проведении морских экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gragg Robert F.* Doppler sidebands in the cross-spectral density of narrow-band reverberation from a dynamic sea surface // J. Acoust. Soc. Amer. 2003. V. 114. P. 1387–1394.
2. *Лебедев А.В., Салин Б.М.* Исследование эффектов локализации областей рассеяния на взволнованной поверхности // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 6. С. 813–826.
3. *Лучинин А.Г., Хилько А.И.* Низкочастотная акустическая томография мелкого моря с использованием маломодовых импульсов // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 2. С. 228–241.
4. *Ньюмен Дж.* Морская гидродинамика. Л.: Судостроение, 1985. 296 с.
5. *Thorsos Eric I.* Acoustic scattering from a "Pierson–Moskovitz" sea surface // J. Acoust. Soc. Amer. 1990. V. 88. № 1. P. 335–349.

Characteristics of the Reverberation Signal at a Vertical Array with Tonal Insonification of a Shallow-Water Basin

E. L. Borodina and B. M. Salin

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhnii Novgorod, 603600 Russia
e-mail: bel@hydro.appl.sci-nnov.ru

Abstract—The angular and spectral characteristics of reverberation signals on a fixed path are studied by using vertical receiving arrays with a tonal insonification of the basin. The choice of the frequency range $F \sim 200$–300 Hz is caused, first, by the low propagation loss and the availability of high-power acoustic transducers for this range and, second, by the possibility to study the phenomena of sound scattering by the sea surface for comparable wavelengths of surface and acoustic waves. The data of experiments on two paths are considered: the first path is in the Barents Sea with propagation conditions corresponding to a uniform waveguide with sea depths $H \sim 110$–120 m, whereas the second path is in the White Sea with propagation conditions corresponding to a nonuniform waveguide where the sea depths varies from 30 to 250 m.