

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕВЕРБЕРАЦИОННОЙ ПОМЕХИ ПО ЧАСТОТАМ ДОПЛЕРА В БИСТАТИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ В ГЛУБОКОМ МОРЕ

© 2019 г. М. Б. Салин<sup>а, \*</sup>, О. А. Потапов<sup>а</sup>, А. В. Стуленков<sup>а</sup>, Д. Д. Разумов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной физики РАН  
Россия, 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

\*e-mail: mikesalin@ipfran.ru

Поступила в редакцию 16.04.2018 г.

После доработки 27.08.2018 г.

Принята к публикации 28.08.2018 г.

Описаны результаты эксперимента по исследованию дальней поверхностной реверберации в глубоководной части Черного моря. В опыте излучались тональные импульсы с частотой заполнения 2 кГц и длительностью, достаточной для проведения узкополосного спектрального анализа. Источник и приемник акустических сигналов были разнесены по акватории, поэтому направленный прием и стробирование по времени позволили изучать различные ситуации: просветное рассеяние, бистатическое рассеяние, моностатическое (обратное) рассеяние. В работе анализируются доплеровские спектры рассеяния при различных значениях бистатического угла рассеяния.

*Ключевые слова:* морская реверберация, обратное рассеяние, глубокий океан, объемные неоднородности, ветровое волнение, параметры реверберации, расчет спектра реверберации

DOI: 10.1134/S0320791919010106

### ВВЕДЕНИЕ

Ветровое волнение на поверхности моря является одним из явлений, которое существенно влияет на характеристики распространения акустических сигналов в море. “Лакмусовой бумагой”, свидетельствующей о влиянии поверхностного волнения на распространение звука, можно назвать изменение спектра принятого активного сигнала. Очевидно, что данное явление наблюдается, когда ширина спектра сигнала при его излучении активной системой не превосходит характерных частот ветрового волнения – это непрерывное излучение или достаточно длительный тональный импульс.

Если рассматривать прямой сигнал (импульс, прошедший от источника до приемника с минимальной задержкой<sup>1</sup>), то исследование искажения спектра прямого сигнала интересно для оценки эффективности работы звукоподводной связи [1, 2] или с точки зрения ряда научных задач, связанных с формированием когерентного распределения акустического поля [3]. Ширина и амплитуда спектра реверберационного сигнала,

принимаемого после окончания прямого сигнала, определяют уровень помехи для доплеровского гидролокатора. Поэтому исследование реверберации, в том числе бистатической реверберации (реверберации “вне плоскости”), является актуальной задачей [4, 5].

Для теоретического описания рассеяния звука на ветровом волнении в низкочастотном диапазоне частот используется метод малых возмущений (ММВ), и задача сводится к брэгговскому резонансу [6]. Согласно теоретическим представлениям, при брэгговском рассеянии в спектре реверберации должны возникать боковые полосы. При моностатическом рассеянии их частоты относительно несущей частоты составляют

$$2\pi f_{\text{Bragg}} = \pm \sqrt{2kg}, \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число акустической волны  $g$  – ускорение свободного падения. Здесь использован закон дисперсии линейных поверхностно-гравитационных волн на воде в виде:  $\Omega = \sqrt{gK}$ , где  $\Omega$  и  $K$  – циклическая частота и волновое число поверхностной волны соответственно. Для большей точности может быть введена поправка, вызванная ненулевой проекцией волнового вектора на вертикальную ось. В работе [7] Маршем и Шулкиным была сделана оценка силы рассеяния на взволнованной поверхности исходя из ММВ и спектра Филиппа для поверхностных волн. Если

<sup>1</sup> Акустический сигнал, который попадает в первое окно анализа и который будем называть прямым сигналом, на самом деле содержит в себе приходы множества мод или лучей, которые невозможно разделить при типичных значениях длительности и разрешающей способности сигналов, используемых в дальней акустической связи.



Рис. 1. (а) Геометрия эксперимента (вид сверху), (б) обозначение углов при фазировании антенны.

речь идет о бистатическом рассеянии [8], которое характеризуется углом  $\beta$  в горизонтальной плоскости (см. рис. 1а), то частоты доплеровского сдвига рассеянного сигнала будут определяться выражением

$$2\pi f_{\text{Bragg}} = \pm \sqrt{kg^4} \sqrt{2(1 + \cos \beta)}. \quad (2)$$

Далее следует заметить, что в эксперименте Critical Sea Test [9] было обнаружено, что при скоростях ветра более 5 м/с сила поверхностного рассеяния соответствует эмпирической зависимости Чапмана–Харриса и превосходит по своей величине оценку ММВ. При этом в Critical Sea Test исследовались частоты ниже 1 кГц, и значения параметра Рэля для неровной поверхности формально позволяли применять ММВ. Авторы работы [10] объясняли результаты данного эксперимента наличием воздушных полостей и пузырьков в приповерхностном слое моря, и назвали это явление “аномальным низкочастотным рассеянием”. О наличии существенного количества приповерхностных рассеивателей свидетельствуют, например, результаты работы [12], где с помощью эхолота пузырьки обнаруживались до глубины 3 м при скорости ветра 6–8 м/с.

В Critical Sea Test применялись широкополосные сигналы, и поэтому не исследовались узкополосные спектры рассеяния. В [11] обращается внимание на то, что эти пузырьки должны совершать круговые движения в поле орбитальных течений поверхностных волн. Тогда эхо-сигнал от объемных рассеивателей в приповерхностном слое также должен содержать частоты Доплера, но меньшие по величине, чем при рассеянии на гребнях волн. Развитая в [11] теория показывает, что спектр рассеяния в этом случае должен иметь гауссообразную форму около несущей частоты. Исследование тонкой структуры доплеровского спектра эхосигнала предполагает использование активных сигналов с достаточно большим временем когерентности.

Простейшая схема эксперимента с когерентными сигналами заключается в излучении не-

прерывного тонального сигнала и приеме на некотором удалении (так называемый “просветный эксперимент”). Ненаправленный приемник регистрирует интегральный рассеянный сигнал со всех точек акватории внутри довольно большого радиуса, и при этом различные зоны рассеяния описываются различными значениями  $\beta$ . Так, при некотором  $\beta$ , близком к  $180^\circ$ , согласно (2) реализуется рассеяние звука на длинных и высоких по амплитуде поверхностных волнах. Такое рассеяние ( $\beta \approx 180^\circ$ ) преобладает по амплитуде над обратным рассеянием ( $\beta = 0^\circ$ ). Общим правилом является то, что спектр сигнала, принятого на частотах Доплера в просветном эксперименте на ненаправленный гидрофон, повторяет с определенным множителем [13] непосредственно спектр волнения. При этом соотношение (1) определяет частоту отсечки доплеровского спектра, что явно наблюдалось в эксперименте [14].

Стробирование по времени совместно с формированием диаграммы направленности приемной системы в горизонтальной плоскости позволяет принимать сигнал, рассеянный ограниченной в пространстве областью, как показано на рис. 1а. Можно добиться такого размера области рассеяния, внутри которой угол  $\beta$  и параметры распространения звука меняются в небольших пределах. Дальняя реверберация от тональных импульсов с частотами 200–600 Гц исследовалась в уникальной серии экспериментов в северной части Тихого океана вблизи п-ова Камчатка [11, 15, 16], где применялись мощные когерентные источники звука. Результаты опытов показали, что для случая  $\beta = 0^\circ$  в спектре реверберационного сигнала наблюдается узкий локальный максимум на брэгговской частоте (1) и плавное уширение спектра на центральной частоте. Последнее связывается с наличием приповерхностных пузырьков, *перемещающихся под воздействием* ветрового волнения.

В настоящей работе описываются результаты эксперимента, проведенного в 2016 г. в глубоководной части Черного моря, в которой измерялись характеристики дальней реверберации на частоте 2 кГц. В экспериментах применялись длинные тональные импульсы, что позволило проводить спектральный анализ принятого сигнала с высоким разрешением по частоте. Целью исследования являлось повторение результатов ранних камчатских экспериментов в другом диапазоне частот и углов рассеяния и при более тщательном измерении гидрофизических параметров. Также целью было опробовать предложенный в [17] метод измерения бистатических характеристик силы рассеяния среды.

## 1. СХЕМА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент на Черном море был построен по бистатической схеме, когда излучатель и приемная система находились на двух судах, дрейфующих на расстоянии порядка 6 км друг от друга.

С помощью ненаправленного излучателя с борта первого судна производилось излучение импульсных сигналов с частотой заполнения 2 кГц и длительностью 2 и 8 с, а также непрерывных сигналов. Период повторения импульсной посылки составлял порядка 90 с, чтобы при начале очередного импульса заканчивалась реверберация от предыдущего.

Многоэлементная приемная система была развернута с борта второго судна и состояла из двух ортогональных приемных линеек в форме буквы Г (см. рис. 1б), расположенных в горизонтальной плоскости. Каждая приемная линейка имела длину 3 м и включала 16 гидрофонов. Все гидрофоны были объединены общим блоком ввода данных (“сборщиком”), который входил в подводную часть аппаратуры и передавал данные на борт по кабелю с использованием стандартов связи Ethernet. Чтобы снизить влияние качки судна, антенный кабель-трос был снабжен эластичной вставкой, а сами антенны располагались на горизонтальной пластине, которая играла роль гидродинамического демпфера. Глубина расположения приемной системы составляла 33 м, излучателя — 50 м, глубина места — около километра.

Для измерения характеристик волнения на верхней палубе судна была установлена видеокамера. С ее помощью были измерены спектральные характеристики яркостной картины поверхностного волнения, выраженные в относительных единицах. На основе этих величин были подобраны параметры спектра Пирсона–Московица, который наиболее близко соответствовал ветровому волнению, измеренному с использованием оптической схемы, описанной в [18]. Полученная в результате такого подхода оценка спектра волнения приведена на рис. 2. Из графиков были найдены существенная высота волнения  $H_s = 4\sigma = 0.45$  м (здесь  $\sigma$  — среднеквадратичное смещение поверхности) и частота спектрального максимума 0.2–0.3 Гц (изменялась в ходе проведения эксперимента). Скорость ветра при измерениях составляла ~6 м/с.

Измерения профилей скорости звука и последующее моделирование показали, что на акватории сформировался “закрытый” к поверхности звуковой канал с осью на глубине 80 м. Численное моделирование (которое выходит за рамки данной работы) показало, что только одно семейство лучей достигает поверхности вблизи точки приема. Это семейство лучей однократно отражается от дна и выходит на поверхность под углом 20°. Также с помощью высокочастотного эхолота фиксировались звукорассеивающие слои на глубинах от 5 до 30 м.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Принятые прямые и реверберационные сигналы обрабатывались следующим образом. В первую очередь выполнялось гетеродинирование на несущей частоте. Далее производилось фазирование

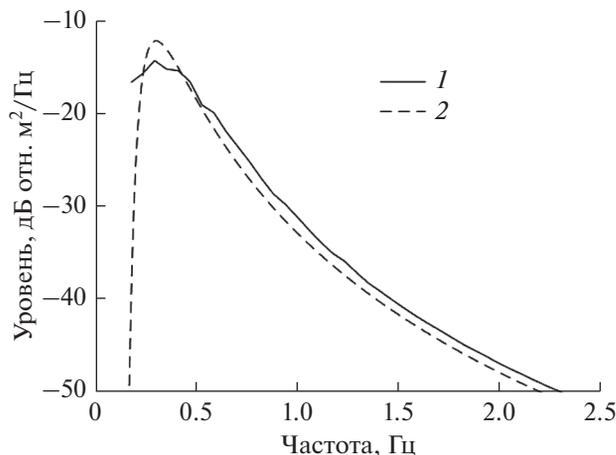


Рис. 2. Спектр волнения: 1 — экспериментальный результат, полученный путем умножения временного спектра яркости поверхности на калибровочную функцию, приводящую спектральные характеристики яркости к характеристикам распределения высот; 2 — теоретический спектр Пирсона–Московица с частотой спектрального пика, выбранной исходя из максимума кривой 1.

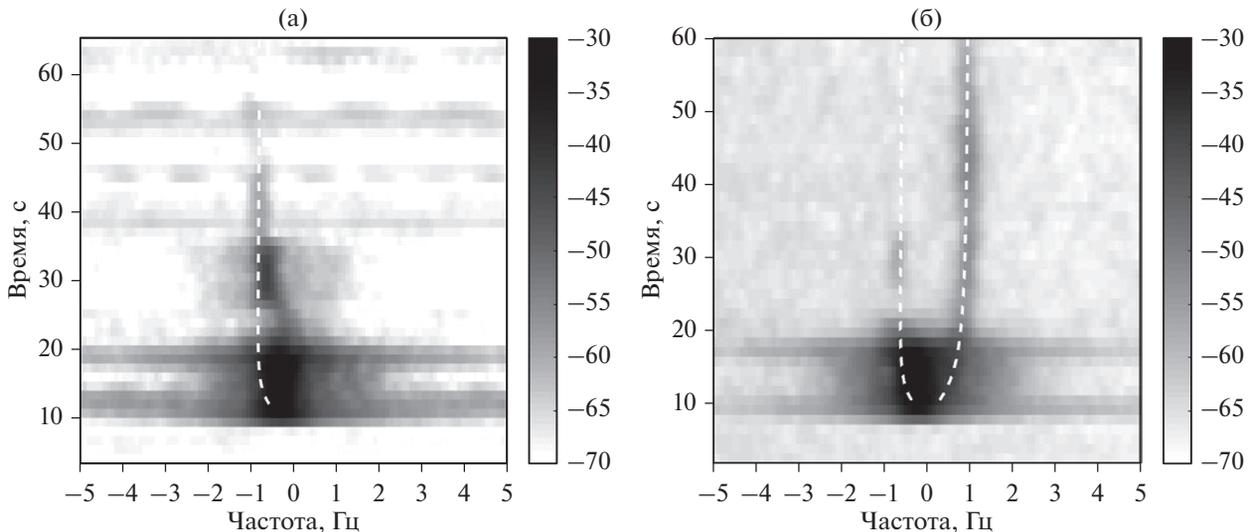
антенны по набору пеленгов путем умножения сигналов с гидрофонов на фазовые множители и последующего сложения. Каждая из антенных линеек обрабатывалась независимо. Затем по каждому направлению производилось вычисление текущих (скользящих) спектров с длиной окна равной длине исходного импульса с перекрытием окон 75%. Определялся момент прихода очередного импульса для синхронизации времени отсчета реверберации. В итоге данные были представлены в виде распределения интенсивности  $p^2(\tau_j, f_k, n, \theta_m)$  по переменным:  $\tau_j$  — задержка от момента прихода прямого сигнала,  $f_k$  — частота Доплера,  $n$  — порядковый номер импульса и  $\theta_m$  — пеленг (отсчитывается от нормали к соответствующей антенной линии). Пеленг на источник составил примерно  $\theta = 0^\circ$  для антенной линии 1 и примерно  $90^\circ$  для линии 2 (см. рис. 1а).

Для примера на рис. 3 для антенн 1 и 2 построены усредненные по ансамблю импульсов текущие спектры сигналов, принятых по выбранным пеленгам  $\theta^*$ :

$$P(f_k, \tau_j) = \left\langle p^2(\tau_j, f_k, n, \theta^*) \right\rangle_n. \quad (3)$$

На графике явно наблюдается момент прихода прямого сигнала и дальнейший сигнал реверберации. Особенности на графике наблюдаются в тот момент, когда в окно анализа попадает передний или задний фронт импульса.

Усреднение в формуле (3) и далее по тексту проводится по 40 импульсам, переданным в течение часа. За это время уровень принятого сигнала изменялся в пределах не более  $\pm 3$  дБ. Можно заключить, что эксперимент проводился при достаточно стационарных условиях.



**Рис. 3.** Текущий спектр реверберационного сигнала, принятого по пеленгу  $\theta^* = -90^\circ$  антенной 1 (а), по пеленгу  $\theta^* = 0^\circ$  антенной 2 (б). Длительность импульса 8 с. Штриховая линия – расчетная частота эхо-сигнала от неподвижных рассеивателей. Шкала интенсивности – уровни текущего спектра в децибелах относительно условной единицы.

Перед началом анализа характеристик рассеяния звука необходимо обсудить следующий эффект. На приведенных графиках спектральный максимум реверберационного сигнала смещается (рис. 3а) или раздваивается (рис. 3б). Этот эффект происходит из-за ветрового дрейфа судов излучения и приема. Данные GPS-навигации показали, что центр системы из двух судов движется со скоростью порядка 0.4 м/с, что значительно превышает скорость взаимного сближения или расхождения судов. Реверберационный сигнал приходит с положительным доплеровским смещением частоты из одной области пространства (в сторону которой движется гидроакустическая система) и с отрицательным доплеровским смещением – из противоположной области. Другими словами, гидроакустическая система, разнесенная на два судна, работает наподобие доплеровского лага. Линейная антенна, фазированная по нормали, имеет диаграммы направленности в форме двух лепестков<sup>2</sup> в плоскости горизонта. Оказалось, что в случае антенны линии 2 (рис. 3б) эти два противоположных лепестка направлены в сторону “положительной” и “отрицательной” областей, и поэтому спектр суммарного принятого сигнала раздваивается. Линия 1, сфазированная как антенна бегущей волны, не имеет бокового лепестка и принимает сигнал только с одной стороны, с одним знаком сдвига частоты (рис. 3а).

Более наглядно обсуждаемый эффект демонстрируется на примере частотного углового распределения интенсивности, построенного на рис. 4:

$$U(f_k, \theta_m) = \left\langle p^2(\tau^*, f_k, n, \theta_m) \right\rangle_n, \quad (4)$$

<sup>2</sup> Заметим, что применение векторных приемников могло бы помочь разрешить данную неоднозначность, но здесь таковые не применялись.

где  $\tau^*$  – некоторое фиксированное значение задержки ( $\tau^* \sim 12$  с для рис. 4а и 4б, и  $\tau^* = 0$  – прямой сигнал для рис. 4б).

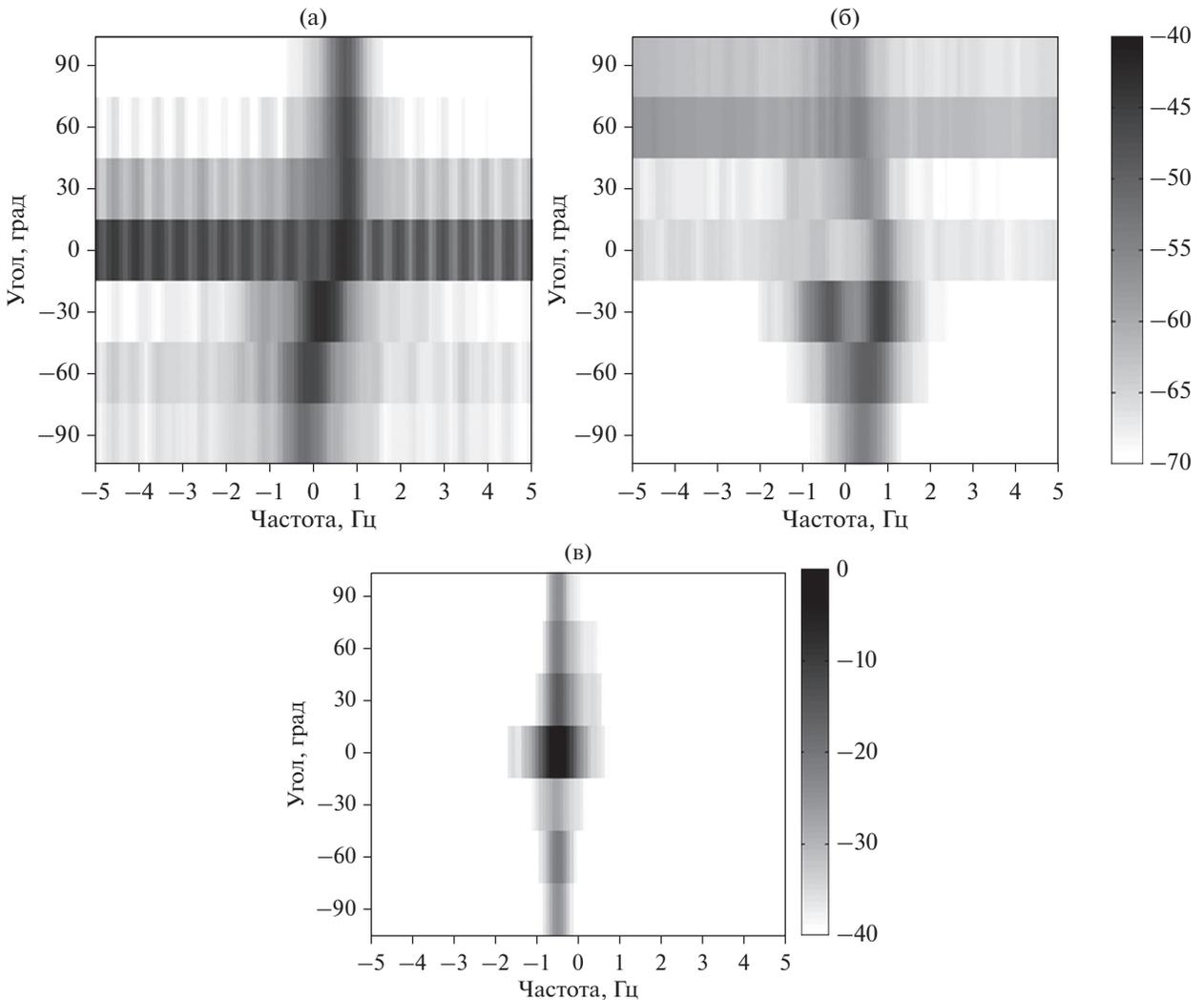
Из анализа рис. 4 можно заключить следующее. Система источник–приемник движется почти вдоль линии 1 и перпендикулярно линии 2. Это видно исходя из того, при каких значениях угловой координаты достигается максимальное значение доплеровской частоты. Для второй антенны наблюдается две спектральные линии, максимально разнесенные по частоте при углах  $\theta \sim 0^\circ$ , а для первой антенны спектральный максимум доплеровской частоты при  $\theta \sim \pm 90^\circ$  определяется однозначно. Далее при оценках ширины спектра рассеяния будут выбираться такие пеленги, где не возникает дополнительного уширения за счет движения гидроакустической системы.

На рис. 5а–5в для фиксированных значений  $\tau^*$  и  $\theta^*$  построены спектры рассеяния, которые являются горизонтальными сечениями графиков, аналогичных рис. 3:

$$S(f_k) = \left\langle p^2(\tau^*, f_k, n, \theta^*) \right\rangle_n. \quad (5)$$

Штриховой линией нанесен спектр прямого сигнала. Каждая из зависимостей нормирована на свой максимум, и кроме этого, максимумы совмещены по частоте. Круглые маркеры нанесены с шагом, равным разрешению спектрального анализа.

Дополнительно на рис. 5г построен спектр сигнала при непрерывном режиме излучения. Эксперимент с непрерывным режимом излучения был проведен на той же акватории в другой день работ. Благодаря высокому частотному разрешению на рис. 5г можно наблюдать два боковых лепестка на частотах  $\pm 0.2$  Гц от несущей, которые соответствуют спектральному максимуму волнения. Такая форма спектра рассеяния соответствует ре-



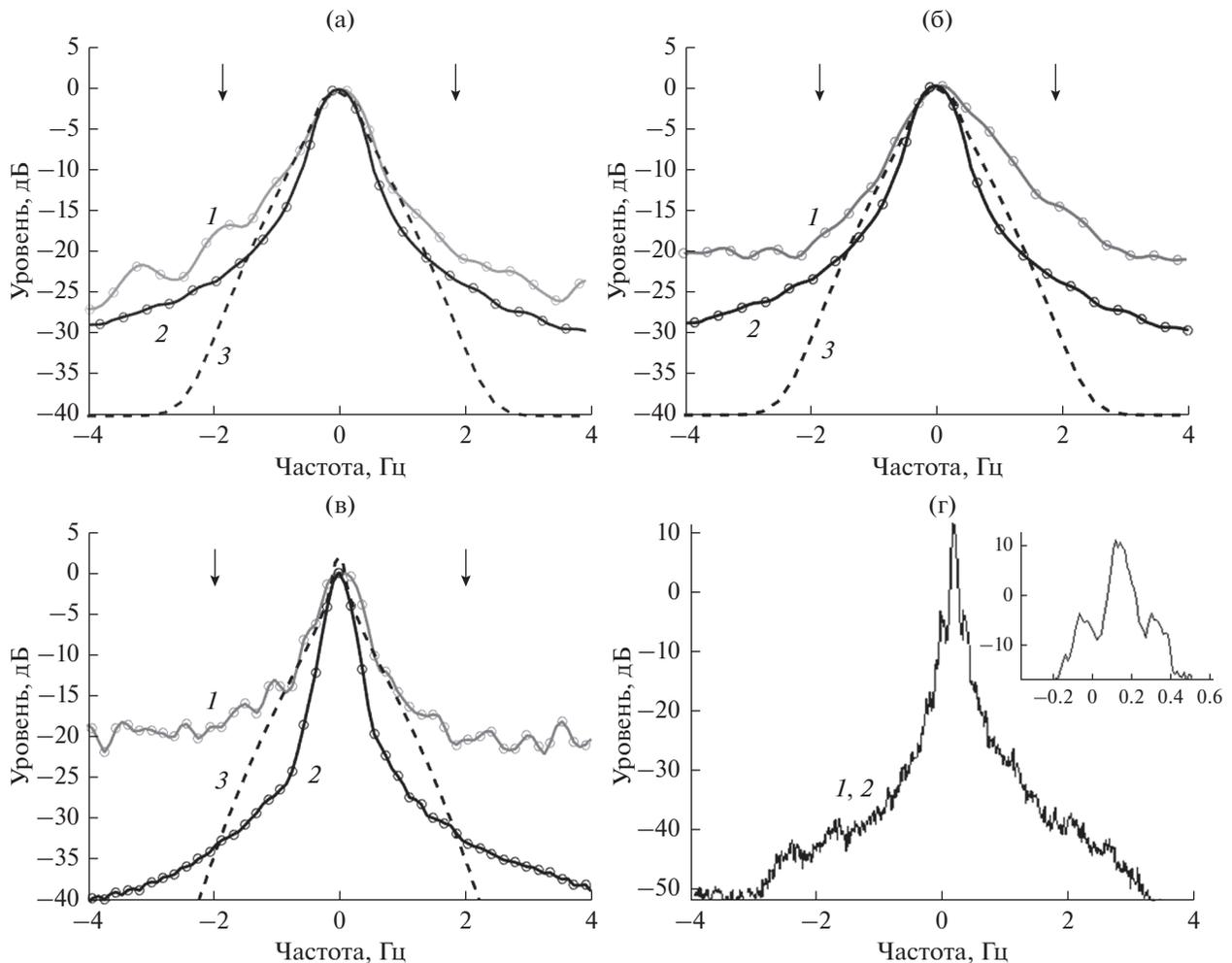
**Рис. 4.** Частотно-угловое распределение интенсивности принятого сигнала в стробе с задержкой  $\tau^* = 12$  с: (а) антенная линия 1, (б) антенная линия 2. На графике (в) изображен прямой сигнал с антенной линии 1,  $\tau = 0, 0^\circ$  для линии 1 соответствует пеленгу на источник. Длительность импульса 8 с. Шкала интенсивности отображает децибелы относительно условной единицы. Шум по пеленгу  $0^\circ$  на графиках (а) и (б) вызван работой механизмов на судне обеспечения, и он приходит на антенну под близким к вертикали углом.

зультатам более ранних исследований [2, 13]. Далее будем обсуждать импульсные сигналы.

Сравнение кривых на рис. 5а–5в, описывающих прямой и рассеянный сигналы, показывает, что спектр сигнала действительно уширяется при рассеянии в среде. Стрелки на рис. 5 указывают на частоты (2), которые должны соответствовать брэгговскому рассеянию на ветровом волнении при соответствующих значениях  $\beta$  ( $\beta = 60^\circ$  для рис. 5а, 5б и  $\beta = 0^\circ$  для рис. 5в). На данных участках графиков не наблюдается явно выраженных экстремумов. Однако заметим, что здесь параметр Рэлея для задачи рассеяния звуковой волны на неровной поверхности моря составляет 0.3 (с учетом частоты звука 2 кГц и угла скольжения  $\sim 20^\circ$ ). Результаты ранее проведенного численного исследования показали [19], что при таких высоких значениях параметра Рэлея спектральный максимум,

отвечающий обратному рассеянию, уширяется до 1 Гц и сохраняет тот же интегральный уровень. Примененные в эксперименте импульсные сигналы обеспечивают разрешение по частоте от 0.125 до 0.5 Гц. Поэтому плавное уширение по краям спектра, незначительно превышающее фон в области стрелок, может быть отнесено к рассеянию на ветровом волнении.

Кроме этого, был проведен расчет формы спектра с помощью развитой в [11] теории рассеяния звука на движущихся приповерхностных неоднородностях. Результаты такого расчета построены пунктирной кривой на рис. 5 с учетом разрешения по доплеровской частоте применяемых импульсов. Необходимые для расчета параметры были взяты из гидрофизических измерений: частота энергонесущих волн 0.2 Гц, среднеквадратичное значение скорости осциллирующего тече-



**Рис. 5.** (а–в) Спектры сигналов, нормированные на максимум. Антенная линия 1, импульсный сигнал с несущей частотой 2 кГц и длительностью  $T$ . Кривая 1 – сигнал в стробе с задержкой  $\tau^*$  по пеленгу  $\theta^*$ , кривая 2 – прямой сигнал без задержки по пеленгу на источник  $\theta = 0$ , кривая 3 – расчет с использованием модели движущихся приповерхностных неоднородностей. Значения параметров сигналов: (а)  $T = 2$  с,  $\tau^* = 5.4$  с,  $\theta^* = 60^\circ$ ; (б)  $T = 2$  с,  $\tau^* = 5.4$  с,  $\theta^* = -60^\circ$ ; (в)  $T = 8$  с,  $\tau^* = 9.4$  с,  $\theta^* = -60^\circ$ . (г) График одиночного приемника, непрерывный сигнал с частотой 2 кГц, на врезке то же с увеличением. 1 и 2 – сливающиеся кривые.

ния у поверхности 0.3 м/с, толщина слоя рассеивателей (глубина экспоненциального спада концентрации) 15 м. Сила рассеяния, приходящаяся на  $1 \text{ м}^3$  неоднородной среды, будет определена ниже, а на данном этапе построенные зависимости нормируются на максимум. Из графиков следует, что модель рассеяния на движущихся неоднородностях действительно может описать уширение центрального спектрального пика в интервале от  $-1$  до  $1$  Гц. Брэгговское рассеяние не включено в модель, по которой построена штриховая линия, и, по видимому, именно оно приводит к отклонению эксперимента от модели на частотах выше 1 Гц. Подобная форма спектрального пика наблюдалась в ряде предшествующих независимых экспериментов на других акваториях [2, 11, 16] (где на самом деле из-за лучшего технического оснащения спектры рассеяния были получены более отчетливые графики).

### 3. ОЦЕНКА СИЛЫ РАССЕЯНИЯ

Пересчитаем интенсивность реверберации в значения силы рассеяния, определяемой как интенсивность сигнала, рассеянного на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, приведенная к дистанции 1 м. Не прибегая к расчетным методам для определения интенсивности падающего сигнала на различных дистанциях, которые требуют учета гидрологии, можно использовать тот факт, что когда источник, приемник и зона рассеяния образуют равнобедренный треугольник ( $\beta = 60^\circ$  на рис. 1а), допустима нормировка следующего вида. Пусть интенсивность рассеянного сигнала, измеренная в точке приема для значений пеленга и задержки, соответствующих этому случаю, имеет значение  $p_{\text{scatt}}^2$ . Используем данные вспомогательного измерения, когда приемная система располагалась вертикально в интервале глубин 0–10 м, и в таком со-

Таблица 1

Исходные данные* (рис №)	Сила рассеяния 20 lgσ, дБ	
	в интервале –2.5...2.5 Гц	в интервалах –2.5...–1.5 и 1.5...2.5 Гц
5а	–46.4	–60.7
5б	–47.3	–61.3

\*Указанные рисунки в статье нормированы на максимум. Естественно, для расчета использовались аналогичные кривые, выраженные в абсолютных единицах, которые авторы здесь для экономии места не приводят.

стоянии был измерен средний квадрат амплитуд давления на элементах приемной системы  $2p_{\text{surf}}^2$ . В этом случае можно вычислить эмпирическое значение функции Грина (потери на распространение по амплитуде сигнала) в виде

$$G_{\text{emp}} = \frac{p_{\text{surf}} r_{\text{ref}}}{p_{\text{ref}}}, \quad (6)$$

где  $p_{\text{ref}}$  – амплитуда на контрольном расстоянии  $r_{\text{ref}} = 5$  м от источника звука. В предположении, что среда однородна по горизонтали, можно использовать это же значение функции Грина для распространения звука от источника до участка поверхности  $\Delta s$  в зоне рассеяния и от поверхности в зоне рассеяния до приемной системы (последнее справедливо в силу взаимности и в силу того, что приемная система и излучатель находятся на близких горизонтах).

Как показано в [17], при бистатической локации величина условной площади поверхности, на которой приходит рассеяние сигнала в течение одного строба, приближенного составляет

$$\Delta s = \frac{CTr_s \Delta \theta}{1 + \cos \beta}, \quad (7)$$

где  $r_s$  – расстояние от приемной системы до центра зоны рассеяния,  $\Delta \theta$  – угловое разрешение приемной системы.

В итоге сила рассеяния выражается через измеряемые величины следующим образом:

$$\sigma^2 = \left( \frac{p_{\text{scat}}}{p_{\text{surf}} G_{\text{emp}}} \right)^2 \frac{1}{\Delta s}. \quad (8)$$

Спектры рассеяния, измеренные для таких значений пеленга и задержки, для которых реализуется ситуация равностороннего треугольника, построены на рис. 5а и 5б. Для оценки силы рассеяния экспериментальный спектр интегрировался в двух диапазонах. Первое интегрирование в пределах от –2.5 до 2.5 Гц приводит к значению силы рассеяния –47 дБ. Второе, интеграл в сумме по двум участкам: от –2.5 до –1.5 Гц и от 1.5 до 2.5 Гц приводит к значению силы рассеяния –61 дБ. Заметим, что во втором случае выбраны полосы, где можно ожидать брэгговское рассеяние. Данные также приведены в табл. 1.

Для сравнения приведем следующие известные оценки силы рассеяния (следует отметить, что таковые имеются только для обратного рассе-

яния). Типичные значения силы рассеяния составляют от –45 до –55 дБ для частоты 2 кГц (на основе обзора [20]). Однако такие же уровни может иметь сила донного рассеяния для глубоководного дна с относительно ровным рельефом. Эмпирическая формула Чапмана–Харриса [7, 9] дает оценку силы поверхностного рассеяния –42 дБ.

Сила рассеяния, измеренная в эксперименте в широкой полосе (–2.5...2.5 Гц), совпадает с обозначенными выше оценками по порядку величины. Напоминаем, что найденное в настоящей работе значение относится к бистатическому углу  $60^\circ$ , угол отсчитывается в горизонтальной плоскости.

Тот факт, что наиболее интенсивный сигнал принимается с незначительным сдвигом частоты, можно объяснить двумя способами. Первое, преобладает донная реверберация. Второе, преобладает объемная реверберация, вызванная рассеянием на приповерхностных неоднородностях, например, на пузырьках воздуха от обрушающихся волн. Авторы склоняются ко второй версии. В ее пользу говорит совпадение формы спектра рассеяния с модельной зависимостью, рассчитанной для неоднородностей, движущихся в поле течений поверхностных волн (см. рис. 5). Чтобы получить наблюдаемые уровни реверберации, сила объемного рассеяния в модели должна составлять  $SR = -63$  дБ вблизи поверхности, и концентрация рассеивателей должна уменьшаться в  $e$  раз на глубине  $z_0 = 15$  м. В работе [11] были получены близкие значения  $SR = -60$  дБ у поверхности и  $z_0 = 20...30$  м, что говорит о повторяемости эффекта в различных условиях акваториях.

Продолжим сравнение экспериментальных и теоретических результатов и обратимся к формуле Марша–Шулкина [7], которая выведена в рамках ММВ исходя из спектра волнения в виде зависимости Филиппса. Для условий эксперимента с помощью данной формулы<sup>3</sup> может быть получена оценка поверхностного рассеяния –53 дБ. Интегрирование экспериментальных спектров по полосам частот Доплера, характерным для брэгговского рассеяния (от –2.5 до –1.5 Гц и от 1.5 до 2.5 Гц), привело, как и в [11], к более низким уровням, чем ожидалось исходя из теории.

<sup>3</sup> Резонансной является не поверхностная волна с частотой (1), а волна с частотой (2) при  $\beta = 60^\circ$ , и этот факт приводит к поправке 1.5 дБ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны результаты эксперимента по исследованию дальней поверхностной бистатической реверберации в глубоководной части Черного моря с использованием направленных приемных систем. Значение силы рассеяния для бистатического угла  $60^\circ$  совпадает по порядку величины с известными средними значениями силы обратного рассеяния. Данный вывод относится к значению, полученному интегрально по всем частотам Доплера, включая нулевую. Однако после выделения в спектре рассеяния частот Доплера, характерных для брэгговского рассеяния на ветровых волнах, уровень сигнала оказывается ниже, чем ожидается в рамках линейной теории рассеяния.

В целом можно заключить, что в условиях эксперимента (частота сигнала 2 кГц, сила ветра 6 м/с) наиболее интенсивный сигнал дальней реверберации принимался с незначительным уширением полосы сигнала и был порожден, по-видимому, рассеянием на приповерхностных неоднородностях в виде воздушных полостей и пузырьков от обрушающихся волн. Развитая ранее теория, описывающая такой механизм формирования реверберационного сигнала, позволила объяснить наблюдаемые в эксперименте форму и уровни спектров рассеяния. Также подобная форма спектра рассеяния наблюдалась в ряде предшествующих независимых экспериментов, выполненных на других акваториях и на более низких частотах.

Авторы благодарят В.В. Баханова, О.С. Большакова, В.В. Горбатского и Д.А. Никитина за помощь в проведении экспериментальных исследований; также авторы благодарят А.Ю. Казарову, П.И. Коротина и Б.М. Салина за ценные обсуждения. Экспериментальные исследования были организованы Фондом перспективных исследований. Оборудование для проведения исследований разработано в рамках программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг., раздел № 12.18 “Разработка физических основ акустических систем нового поколения”. Исследования по разделам 2 и 3 статьи поддержаны Российским научным фондом (грант № 14-17-00667).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Badiey M., Song A., Smith K.B.* Coherent reflection from surface gravity water waves during reciprocal acoustic transmissions // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. V. 132. № 4. P. EL290–EL295.
2. *Walree P.A., Jenserud T., Otnes R.* Stretched-exponential Doppler spectra in underwater acoustic communication channels // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. V. 128. № 5. P. 329–334.
3. *Луньков А.А., Переселков С.А., Петников В.Г.* Поверхностная реверберация в мелком море при использовании сфокусированного излучения // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 6. С. 971–980.
4. *Луньков А.А.* Интерференционная структура низкочастотных реверберационных сигналов в мелком море // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 5. С. 596–604.
5. *Jenserud T., Ivansson S.* Measurements and modeling of effects of out-of-plane reverberation on the power delay profile for underwater acoustic channels // *IEEE J. Ocean. Eng.* 2015. V. 40. № 4. P. 807–821.
6. *Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П.* Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. С. 249–306.
7. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. С. 278–279.
8. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Методы расчета низкочастотной поверхностной реверберации при известных характеристиках морского волнения // *Акуст. журн.* 2011. Т. 57. № 6. С. 818–827.
9. *Ogden P.M., Erskine F.T.* Surface scattering measurements using broadband explosive charges in the Critical Sea Test experiments // *J. Acoust. Soc. Am.* 1994. V. 95. № 2. P. 746–761.
10. *Neighbors T.H., Bjerne L.* Anomalous low frequency sea surface reverberation // *Hydroacoustics.* 2001. V. 4. P. 181–192.
11. *Салин Б.М., Кемарская О.Н., Молчанов П.А., Салин М.Б.* Исследование механизма уширения спектра низкочастотного реверберационного сигнала при рассеянии звука на приповерхностных неоднородностях в условиях интенсивного ветрового волнения // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 3. С. 314–322.
12. *Thorpe S.A.* On the clouds of bubbles formed by breaking wind-waves in deep water, and their role in air-sea gas transfer // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1982. V. 304. P. 155–210.
13. *Лебедев А.В., Салин Б.М.* Исследование эффектов локализации областей рассеяния звука на ветровом волнении // *Акуст. журн.* 2004. Т. 50. № 6. С. 813–826.
14. *Салин Б.М., Бородина Е.Л., Салин М.Б.* Оценка поверхностной реверберации и характеристик ветрового волнения, выполненные на основе анализа видеозаписей морской поверхности // *Сб. тр. XXII сессии Российского акустического общества.* Москва. Т. 2. М.: ГЕОС, 2010. С. 305–308.
15. *Авербах В.С., Бондарь Л.Ф., Голубев В.Н., Гольдблат В.Ю., Долин Л.С., Нечаев А.Г., Пигалов К.Е., Смирнов Г.Е., Тумаева Е.И.* Дальняя поверхностная реверберация звука в океане // *Акуст. журн.* 1990. Т. 36. № 6. С. 1119–1121.
16. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Механизмы формирования спектральных характеристик низкочастотной реверберации и прогнозные оценки // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 2. С. 197–206.
17. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Методы измерения бистатических характеристик рассеяния звука дном и поверхностью // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 5. С. 573–581.
18. *Салин Б.М., Салин М.Б.* Комбинированный метод измерения трехмерных спектров волнения. II. Примеры использования основных схем измерений и анализ полученных результатов // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2015. Т. 58. № 3. С. 200–213.
19. *Салин М.Б., Досаев А.С., Коньков А.И., Салин Б.М.* Численное моделирование брэгговского рассеяния звука на поверхностном волнении при различных значениях параметра Рэлея // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 4. С. 413–425.
20. *Андреева И.Б.* Сравнительные оценки поверхностного, донного и объемного рассеяния звука в океане // *Акуст. журн.* 1995. Т. 41. № 5. С. 699–705.