АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 6, с. 835–843

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.231

ПРИЗНАКИ КОМПЕНСАЦИИ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ ОКЕАНА

© 2010 г. **В. А. Щуров, В. П. Кулешов, Е. С. Ткаченко, Е. Н. Иванов***

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43
Тел.:(4232)312-101; E-mail: shchurov@poi.dvo.ru
**Центр акустических подводных исследований*
Морского государственного университета им. адмирала Г.И. Невельского
690059 Владивосток, ул. Верхнепортовая 50 а

Поступила в редакцию 30.01.09 г.

На примере суперпозиции акустических полей движущегося судна и поверхностного шума тропического ливня проведены исследования явления компенсации встречных потоков энергии этих акустических полей. Исследования проводились с помощью комбинированных приемников, расположенных на глубинах 150 м и 500 м. Показано, что для однозначного определения процесса компенсации достаточно сопоставить z-компоненту спектра функции простой одноточечной когерентности или z-компоненту взаимного спектра со спектром разности фаз между акустическим давлением и z-компонентой колебательной скорости. Критерием являются "провалы" функции когерентности в полосе частот, общих для этих полей, которым соответствуют "скачки" разности фаз на $\pm(\pi/2)$.

ВВЕДЕНИЕ

В 1979 г. были проведены первые на Тихом океане векторно-фазовые исследования подводного окружающего шума в районе Курило-Камчатской гряды. Эксперимент был организован лабораторией акустических шумов океана Тихоокеанского океанологического института АН СССР и кафедрой акустики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. На первых полученных взаимных спектрах реального подводного окружающего шума, а именно, реальной части модуля z-компоненты взаимного спектра, были обнаружены на нескольких кратных частотах "провалы" на 10–15 дБ ниже относительно максимального уровня спектра. Причем на автоспектрах акустического давления подводного шума на этих же частотах наблюдались дискретные составляющие с небольшим превышением уровня. Объяснение этому явлению в то время дано не было. Результаты этих исследований представлены в работе [1]. Потребовалось более 10 лет для осмысления данного механизма [2, 3].

Данная работа является развитием ранних работ и посвящена установлению критерия существования этого явления. Исследование проведено на примере суперпозиции полей двух источников: движущегося локального поверхностного источника (судна) и поверхностного динамического шума тропического ливня.

В экспериментах использовались свободно дрейфующие телеметрические комбинированные восьмиканальные измерительные системы, созданные в ТОИ ДВО АН СССР в лаборатории акустических шумов океана [4]. Эксперимент был проведен в Филиппинском море в точке с координатами $\varphi = 18°53.4'$ N, $\lambda = 126°38.5'$ E. Два комбинированных приемника телеметрической системы располагались на глубинах 150 м и 500 м. Магнитная запись акустических данных восьми информационных каналов синхронизирована. Обработка экспериментальных результатов основана на взаимном Фурье-преобразовании реализаций случайных величин акустического давления $p(t)$ и ортогональных компонент вектора колебательной скорости $\vec{V}(t)\{V_x(t),\ V_y(t),\ V_z(t)\}$ или компонент градиента давления $\operatorname{grad} p(t)$. Взаимные спектры мощности $S_{PV_i}(f)$ и соответствующие им разностно-фазовые спектры $\Delta\varphi_i(f) = \varphi_P(f) - \varphi_i(f)$, спектры компонент функции простой одноточечной когерентности $\gamma_i^2(f)$ вычисляются по следующим формулам [4]:

$$S_{PV_i}(f) = \left|S_{PV_i}(f)\right| e^{-j\Delta\varphi_i(f)},$$

$$\Delta\varphi_i(f) = \operatorname{arctg}\frac{\operatorname{Im} S_{PV_i}}{\operatorname{Re} S_{PV_i}}, \qquad (1)$$

$$\gamma_i^2(f) = \frac{\left|S_{PV_i}(f)\right|^2}{S_{P^2}(f) S_{V_i^2}(f)}, \quad i = x,\ y,\ z.$$

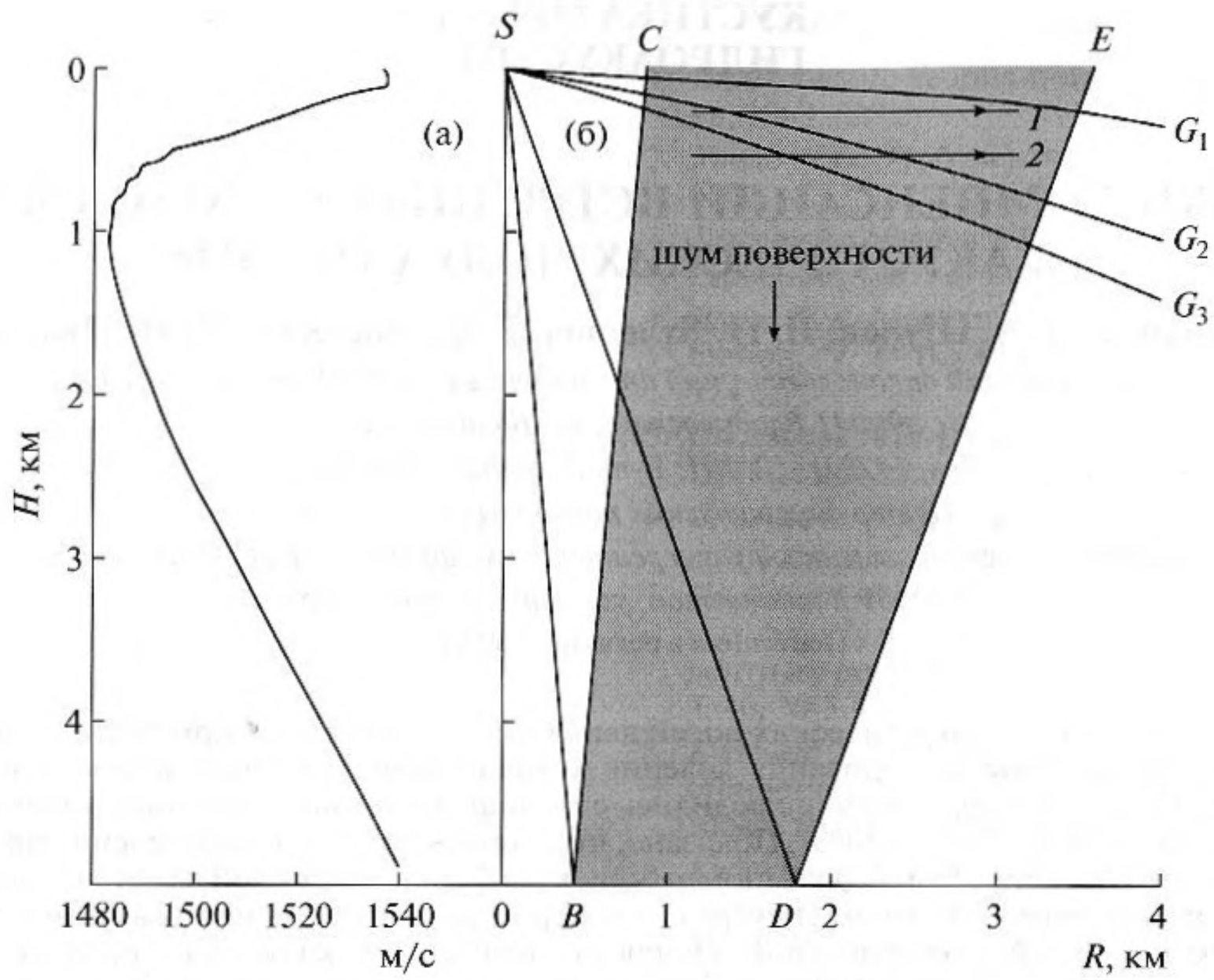

Рис. 1. Условие эксперимента: а) – зависимость скорости звука от глубины; б) – схема расположения комбинированных приемников 1 и 2 относительно лучевой картины шумящего источника, расположенного на глубине 5 м.

На основе спектров $S_{PV_i}(f)$, $\Delta\varphi_i(f)$, $\gamma_i^2(f)$ (1) строятся соответствующие сонограммы в координатах частота-время $S_{PV_i}(f, t)$, $\Delta\varphi_i(f, t)$, $\gamma_i^2(f, t)$.

Акустические измерения с помощью комбинированных приемников являются технически более сложными по сравнению с измерениями на основе гидрофонов. Компенсация потоков энергии является весьма тонким эффектом, требующим совершенную технику векторных измерений, видимо, поэтому данное явление до настоящего времени не наблюдалось другими авторами. В отечественных научных источниках эта проблема также не обсуждается [5–7]. В некоторых современных зарубежных работах во взаимных спектрах акустического давления и колебательной скорости видны "следы" компенсации, но они не комментируются (см., например, рис. 6в [8]). Это, по-видимому, можно объяснить тем, что нет критерия точного определения данного явления. Цель данной работы состоит в определении этого критерия на основе натурного эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Условия эксперимента. Глубина океана в точке измерения составляла ~4900 м. Скорость приводного ветра ~7 м/с. Развитое ветровое поверхностное волнение. Приповерхностный однородный слой со значениями скорости звука ~1536.8 м/с распространяется до глубины 100 м; минимальное значение скорости звука на оси подводного звукового канала на глубине 1000 м имело величину 1482.7 м/с; значение скорости звука вблизи дна составляло 1542.0 м/с, что превышает скорость звука у поверхности. При данной гидрометеорологической обстановки с учетом умеренного дождя спектральный уровень z-компоненты потока энергии окружающего шума $S_{PV_z}(f)$ в диапазоне частот 50–800 Гц находился на уровне 60–68 дБ (далее уровень шума в дБ приводится относительно 1 мкПа^2/Гц). На глубине 150 м уровень спектральной плотности мощности z-компоненты локального источника идущего от дна к поверхности, был сравним с уровнем окружающего шума или ниже в зависимости от максимума или минимума интерференции на данной частоте. На глубине 500 м уровень z-компоненты спектральной плотности мощности шумоподобного сигнала от локального источника превышает в сплошной части спектра спектральную плотность мощности вертикальной компоненты, отраженного от дна сигнала на величину до 10 дБ. На этой глубине направление рефрагированых потоков энергии шумоподобного сигнала от судна и поверхностного шума совпадают.

На рис. 1 приведены зависимость скорости звука от глубины и лучевая картина для рефрагированных лучей SG_1, SG_2, SG_3 и отраженного от дна пучка лучей ограниченного лучами SBC и

SDE. Положения во время эксперимента двух комбинированных приемников телеметрической свободно дрейфующей измерительной системы обозначены горизонтальными линиями: *1* – (глубина 150 м) и *2* – (глубина 500 м). Расположение системы координат комбинированного приемника: оси x, y расположены в горизонтальной плоскости; ось z направлена от поверхности ко дну океана. Из рис. 1 видно, что комбинированные приемники в продолжение всего эксперимента находились в ближней зоне освещенности. Предельный рефрагируемый луч SG_1, ограничивающий ближнюю зону освещенности, имеет угол выхода из источника 3°, SG_2 – 10°, SG_3 – 15°. Потоки энергии от источника S на глубине измерения 150 м будут распределяться следующим образом: в горизонтальные каналы x и y комбинированного приемника попадают, в основном, рефрагируемые лучи с углами скольжения 3°–6°; в вертикальный канал z – однократно отраженные от дна лучи с углами скольжения 70°–85°. Вклад в вертикальный поток энергии рефрагирующих лучей 3°–6° составляет менее 0.5% от энергии этих лучей. Второй приемник, расположенный на глубине 500 м, находится в потоке энергии лучей G_2 и G_3 с углами скольжения ~20°. Вклад этих лучей в вертикальную компоненту составляет ~2%. Вертикальные z-каналы комбинированных приемников регистрируют также и потоки энергии поверхностного динамического шума, обозначенные на рис. 1б вертикальной стрелкой, направленной вниз.

Маневрирование судна, как шумящего источника, было следующим. В начале эксперимента судно находилось в дрейфе на расстоянии ~1.5 км от телеметрической системы в режиме "тишина". Затем на судне завели двигатель и шумящее судно, пройдя мимо системы с траверзным расстоянием ~1.2 км, удалилось на расстояние ~2.5 км и легло в дрейф. Время записи информации при движении судна составляет ~7 минут. Во время эксперимента в течение ~10 минут над телеметрической измерительной системой шел сильный тропический ливень, который ко времени прохода судна перешел в дождь.

Результаты измерений на глубине, равной 150 м. Общая картина зависимости скалярных и векторных характеристик акустического поля приведена на сонограммах рис. 2. В координатах частота–время представлены спектры акустического давления $S_{p^2}(f, t)$, z-компоненты функции когерентности $\gamma_z^2(f, t)$ и разности фаз $\Delta\varphi_z(f, t)$ между акустическим давлением и z-компонентой градиента акустического давления. На сонограмме автоспектра $S_{p^2}(f, t)$ наблюдаются шумы дальнего судоходства в диапазоне частот 10–70 Гц по всей длине записи с уровнем ~90 дБ. При 200 с $< t <$ 500 с в автоспектре $S_{p^2}(f, t)$ наблюдается слабое проявление тропического ливня. Проявление ливня в z-канале функции когерентности выглядит, по сравнению с p-каналом, гораздо контрастнее. При движении судна ($t >$ 570 с) на рис. 2а) виден широкополосный спектр шума судна с дискретными линиями. Интерференционных явлений в автоспектре $S_{p^2}(f, t)$ не наблюдается, поскольку источник поверхностный, но океан глубокий. Мощности излучения судна в сплошной части спектра недостаточно, чтобы в канале давления зарегистрировать отраженный от дна широкополосный сигнал, который мог бы интерферировать с рефрагированных прямым сигналом. Однако на сонограммах $\gamma_z^2(f, t)$ и $\Delta\varphi_z(f, t)$ при $t >$ 570 с видны периодические изменения когерентности и разности фаз. Исследование векторных свойств результирующего потока энергии, вызванного суперпозицией полей поверхностного локального источника и поверхностного шума тропического ливня, и есть предмет данной работы.

Рассмотрим отдельные спектральные кривые, взятые из массива сонограмм (рис. 2б,в). На рис. 3 представлены спектры $\gamma_z^2(f)$ и $\Delta\varphi_z(f)$ подводного окружающего шума, взятые при t = 560 с. В это время судно находилось в режиме "тишина" и ливень перешел в умеренный дождь. Функция когерентности на высоких частотах достигает ~0.8. Среднее значение $\Delta\varphi_z(f)$ равно ~(–90°), что соответствует направлению движения потока энергии поверхностного динамического шума от поверхности к дну [4]. На рис. 4 приведены спектры $\gamma_z^2(f)$ и $\Delta\varphi_z(f)$ с сонограмм рис. 2б,в при t = 890 с. К этому времени равномерно движущееся судно удалилось от приемной системы на расстояние ~2 км.

Рассмотрим взаимосвязь частот, при которых $\gamma_z^2(f)$ достигают минимальных значений (рис. 4). Приведем значения этих частот: 14.0; 19.0; 58.0; 63.3; 120.2; 161.9; 205.7; 249.7; 326.5; 403.5; 473.0; 564.5; 600.0; 634.2; 758.7 Гц. На рис. 4а они отмечены точками. На этих частотах отклонения $\Delta\varphi_z(f)$ находятся в пределах ±90° (рис. 4б). Если эти частоты пронормировать на частоту f_0 = 758.7 Гц, то получаем линейную зависимость $K_i = f_i/f_0$ (i принимает значение от 1 до 15) (рис. 4а). Если предположить, что на этих частотах относительное расположение источника и приемника соответствует максимуму интерференции лучей, отраженных от дна, то на этих частотах минимальные значения $\gamma_z^2(f)$ объясняются компенсацией двух встречных потоков энергии: потока энергии поверхностного шума, идущего вниз, и потока энергии широкополосного сигнала, отраженного от дна, идущего вверх. Частотный интервал, в кото-

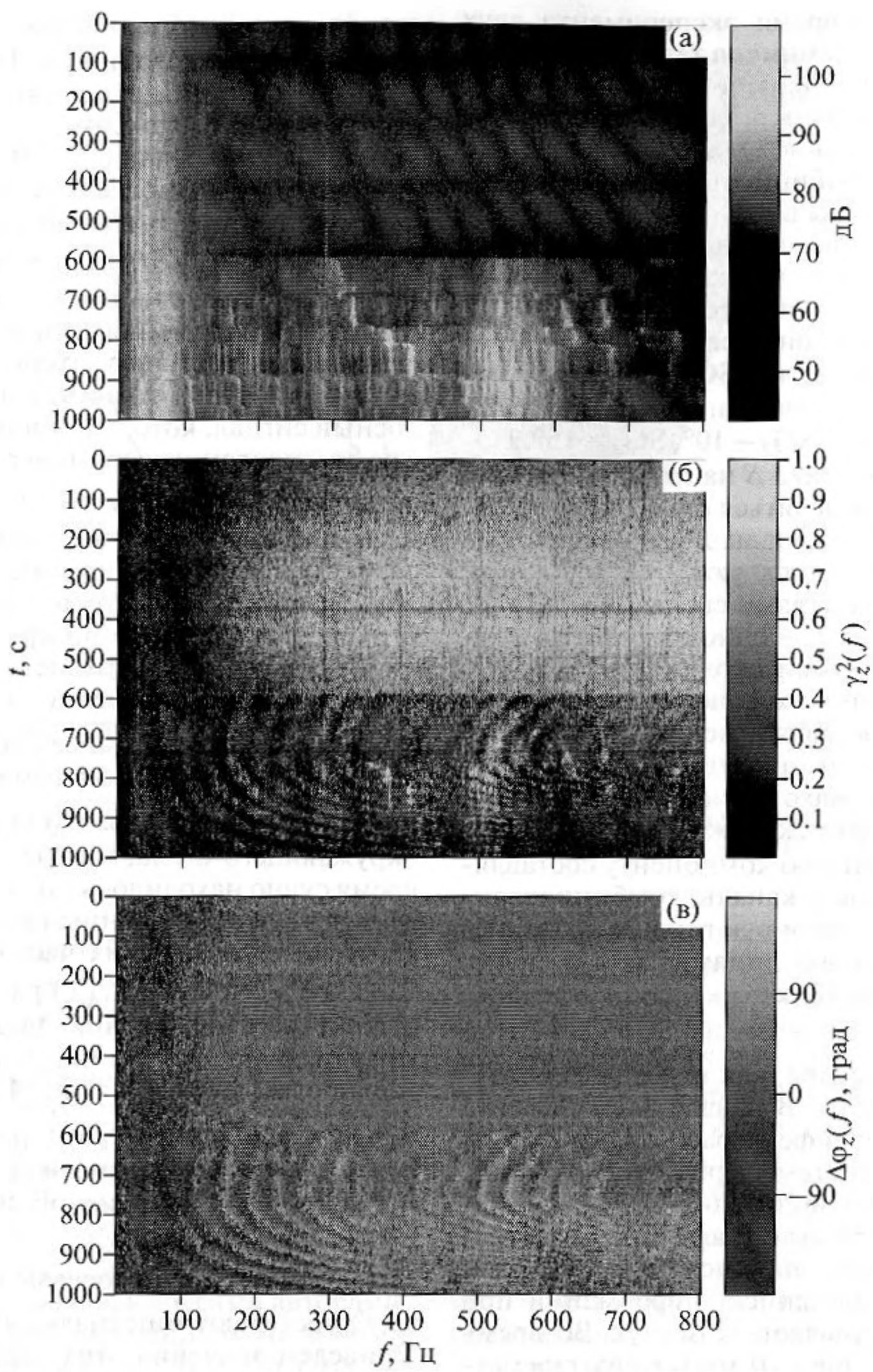

Рис. 2. Сонограммы движущегося поверхностного источника: а) – автоспектр давления $S_{p^2}(f,t)$; б) – z-компонента функции когерентности $\gamma_z^2(f,t)$; в) – разность фаз между акустическим давлением и z-компонентой градиента давления $\Delta\varphi_z(f,t)$. Время усреднения 10 с, полоса анализа 1.2 Гц, усреднение экспоненциальное. Глубина комбинированного приемника 150 м. Время начала движения судна $t = 570$ с.

ром наблюдается интерференция лучей, на каждой частоте составляет не более 3 Гц.

На рис. 5 приведены взятые с сонограмм рис. 2б, в зависимости от времени $\Delta\varphi_z(t)$ и $\gamma_z^2(t)$ для частоты 326 Гц во временном интервале от 400 с до 1000 с. В отличие от предыдущих рис. 3б, 4б, на рис. 5а зависимость $\Delta\varphi_z(t)$ есть разность фаз между акустическим давлением и z-компонентой колебательной скорости. На рис. 5а на интервале времени 400–510 с величина $\Delta\varphi_z(t) = 0°$, что соответствует поверхностному шуму ливня; на интервале 510–570 с судно готовилось к движению с работающим двигателем; при $t > 570$ с судно двигалось по прямой с постоянной скоростью. "Скачки" $\Delta\varphi_z(t)$ при $t > 570$ с соответствуют изменению на-

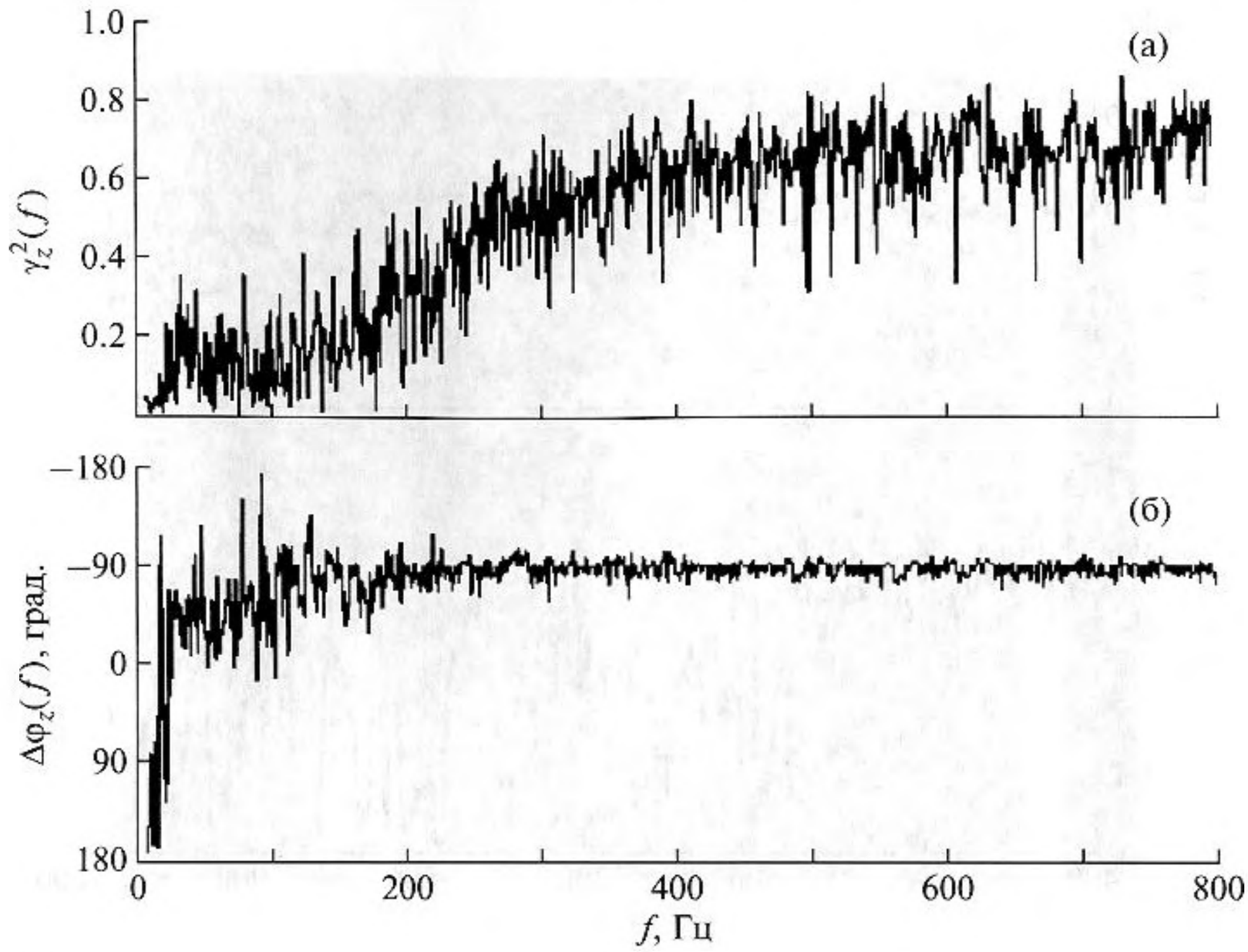

Рис. 3. Спектры z-компонент функции когерентности (а) и фазового спектра (б) подводного окружающего шума. Спектры взяты с рис. 2б,в при $t = 560$ с. Условия те же, что и на рис. 2.

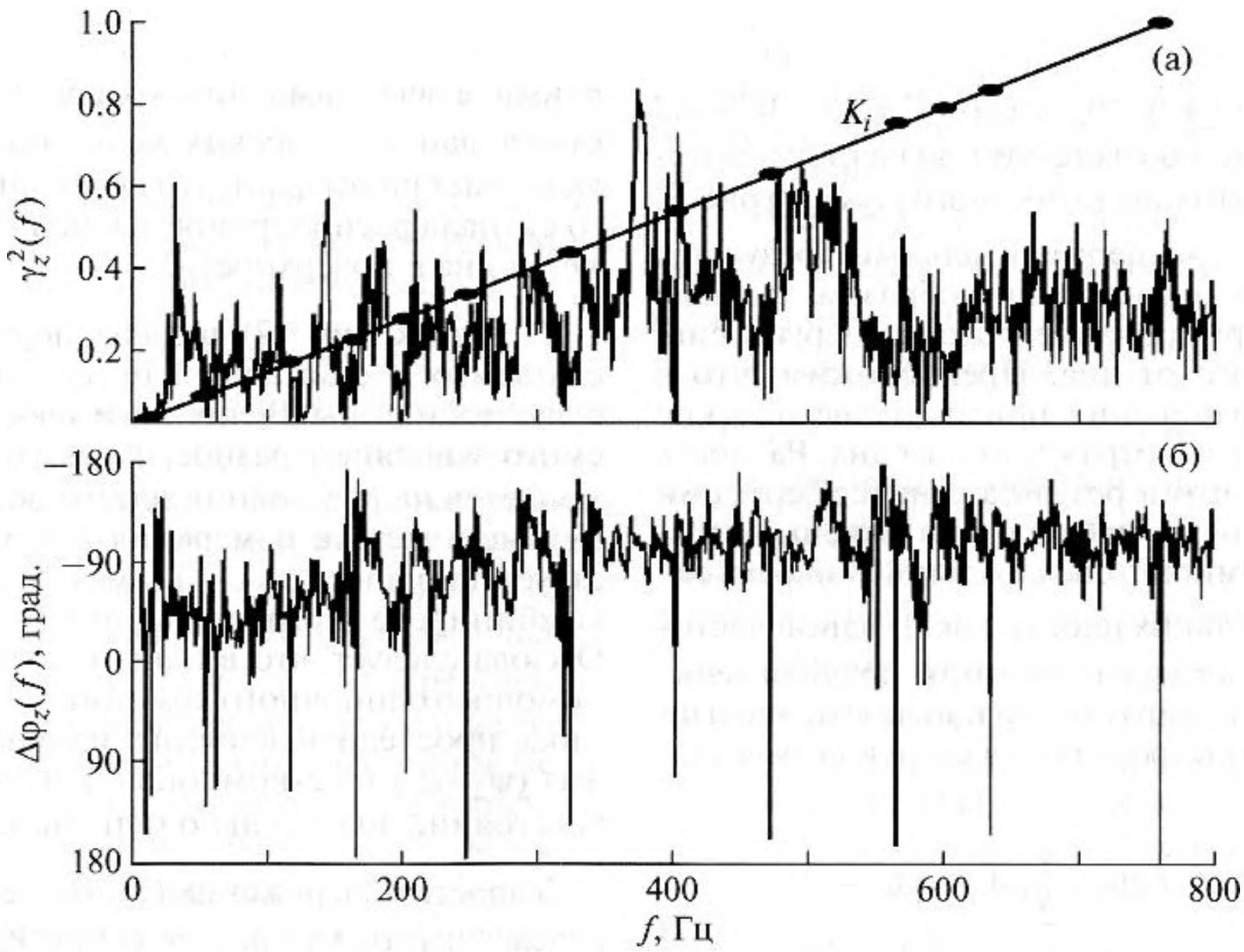

Рис. 4. Спектры z-компонент функции когерентности (а) и фазового спектра (б) при движении поверхностного источника. Взяты с рис. 2б,в при $t = 990$ с. $K_i = f_i/f_0$, $f_0 = 758.7$ Гц. Условия те же, что и на рис. 2.

правления движения потоков энергии в вертикальной плоскости. При значениях $\Delta\varphi_z(t) \approx \pm 90°$ (рис. 5а) происходит полная компенсация встречных потоков энергии (рис. 5б). На рис. 5 указано шесть (отмеченных стрелками) наиболее очевидных "провалов" соответствующих, $\gamma_z^2(t) \sim 0.1$.

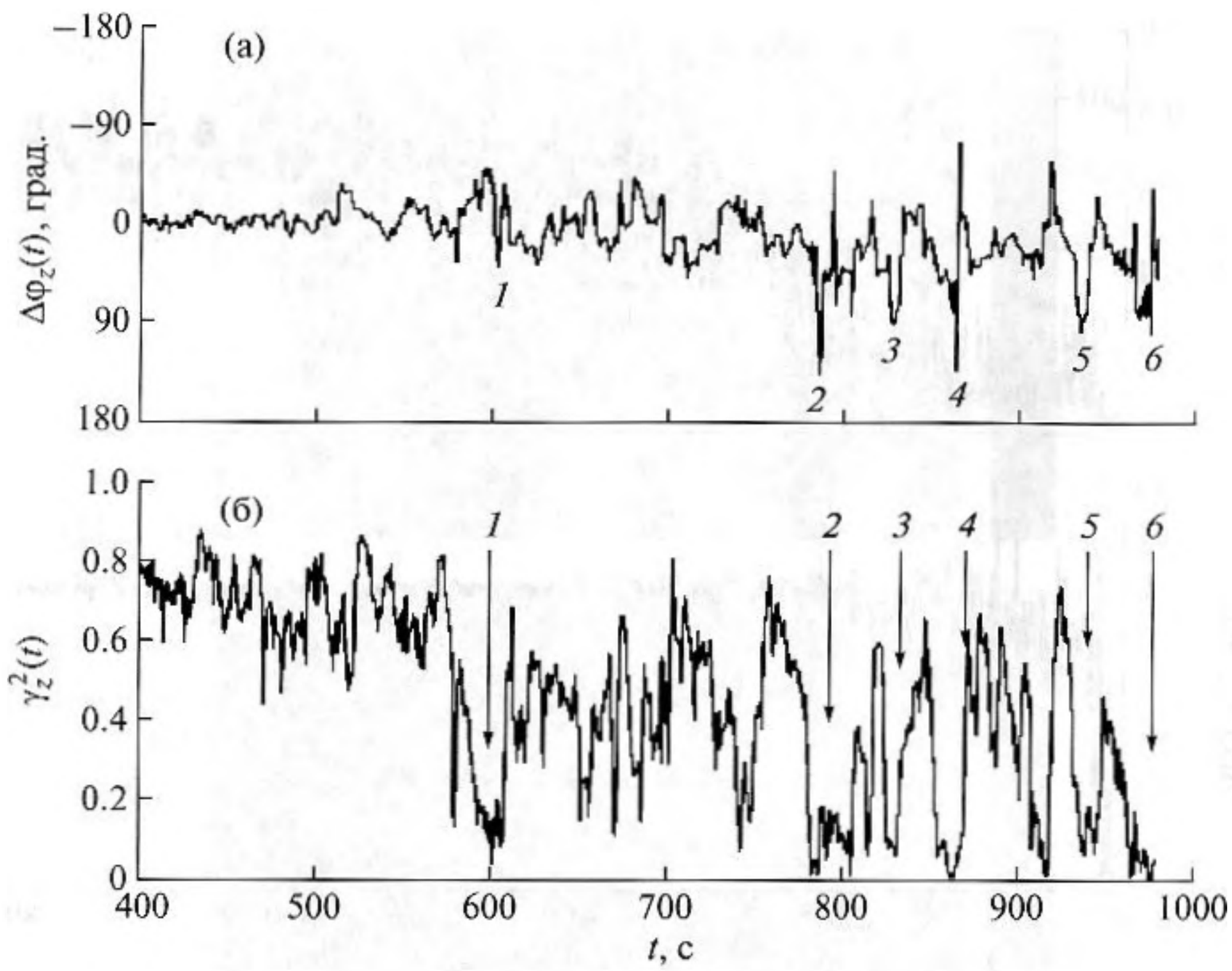

Рис. 5. Зависимости от времени на интервале от 400 с до 1000 с на частоте $f_0 = 326$ Гц: (а) – $\Delta\varphi_z(f_0,t)$ разность фаз между акустическим давлением и z-компонентой колебательной скорости; (б) – $\gamma_z^2(f_0,t)$. Полоса анализа 1.2 Гц. Время усреднения 10 с.

В промежутках между "провалами" $\gamma_z^2(t) \sim 0.7$–0.8 и $\Delta\varphi_z(t) \sim 0°$, что соответствует значениям функции когерентности поверхностного шума на рис. 3.

Полученный экспериментальный результат может быть описан следующим образом. Вначале рассмотрим формирование потока энергии сигнала отраженного от дна. Предположим, что в данную точку измерения приходят две плоские когерентные волны, отраженные от дна. Разность хода их такова, что в результате интерференции для ряда частот будет наблюдаться максимум или минимум взаимной спектральной плотности $S_{PV_z}(f)$. Для двух таких плоских волн одной частоты, пришедших в точку измерения, средняя величина результирующего потока плотности энергии вдоль оси z будет определяться следующим выражением [9]:

$$I_{-z,S} = \frac{1}{2}p_1V_1\cos\theta_1 + \frac{1}{2}p_2V_2\cos\theta_2 + \\ + \frac{1}{2}[p_1V_2\cos\theta_2 + p_2V_1\cos\theta_1]\cos(\psi_2 - \psi_1), \quad (2)$$

где p_1, p_2, V_1, V_2 – амплитудные значения давления и колебательной скорости первой и второй волн соответственно; θ_1, θ_2 – углы, которые образуют с осью z волновые векторы первой и второй волн; $(\psi_2 - \psi_1)$ – разность фаз между акустическими давлениями или колебательными скоростями данных плоских волн; обозначение $I_{-z,S}$ указывает на тот факт, что поток широкополосного сигнала распространяется по направлению $-z$, т.е. от дна к поверхности.

В выражении (2) вклады первого и второго слагаемых в суммарный поток энергии сигнала будут постоянны. Величина и знак третьего слагаемого зависят от разности фаз $(\psi_2-\psi_1)$, которая меняется на расстоянии длины волны от 0 до 2π. Верхней частоте измерения $f = 800$ Гц соответствует длина волны $\lambda \sim 1.9$ м. Поскольку диаметр комбинированного приемника $d \sim 0.2$ м, то $d < \lambda$. Отсюда следует, что в нашем случае возможно с помощью одиночного комбинированного приемника проследить влияние изменения разности фаз $(\psi_2-\psi_1)$ на z-компоненту интенсивности на расстоянии значительно меньшем, чем ~1.9 м.

Упростим выражение (2). Не теряя общности, будем считать, что $p_1 = p_2$ и $V_2 = V_1$. Угол θ_2 представим как сумму $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$. Считаем $\Delta\theta$ малым, $\sin\Delta\theta \to 0$ и $\cos\Delta\theta \to 1$. В данном приближении $\cos\theta_2 \approx \cos\theta_1 \sim 1$. Поскольку углы $\theta \sim 70°$–$85°$ (рис. 1б), то $\cos\theta_1 \sim 1$. Тогда выражение (2) приводится к виду

$$I_{-z,S} = p_1V_1[1 + \cos(\psi_2 - \psi_1)].$$

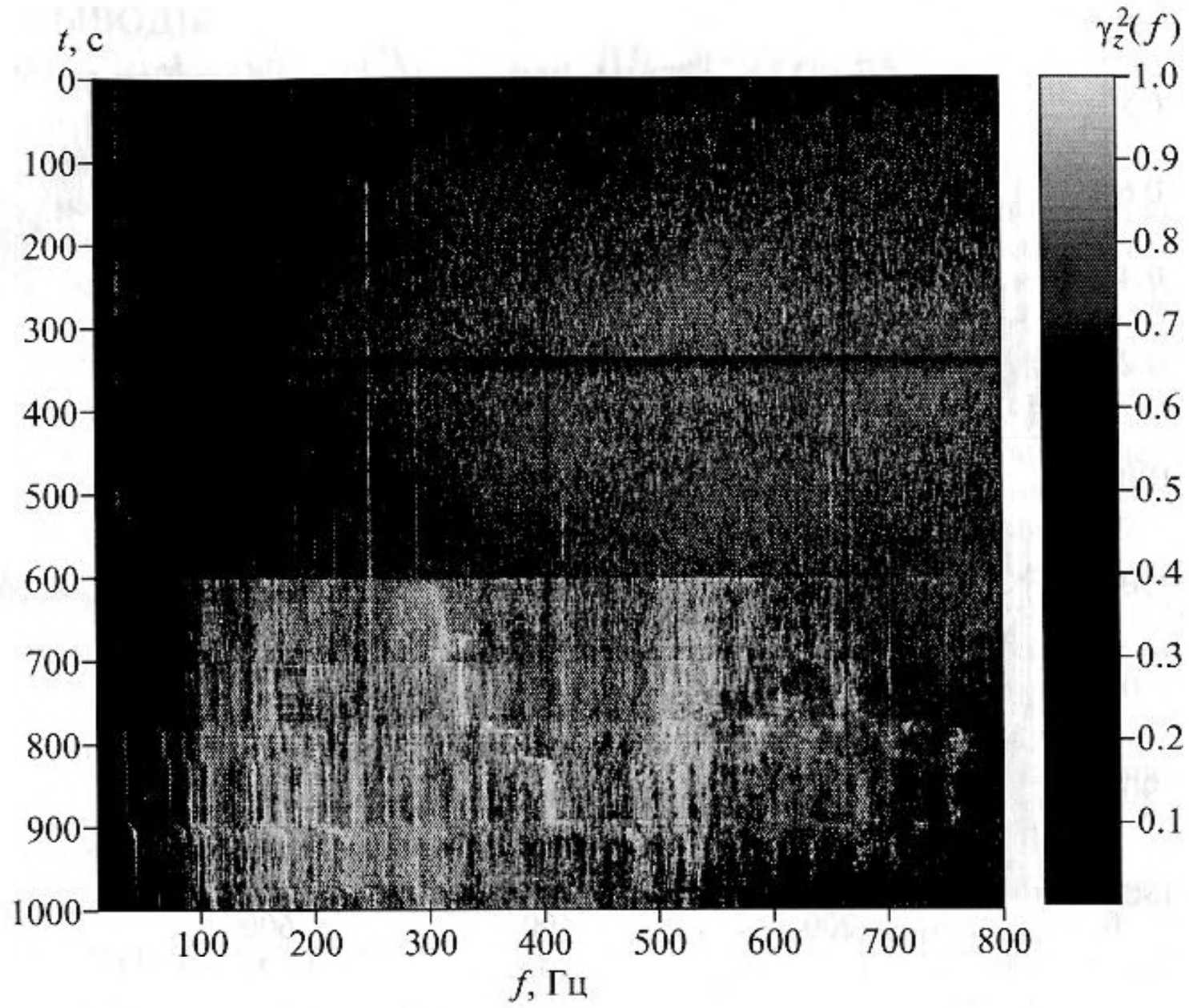

Рис. 6. Сонограмма $\gamma_z^2(f,t)$. Глубина измерения 500 м. Условия те же, что и на рис. 2.

В реальном эксперименте комбинированным приемником измеряется разность $I_z(f)$ двух встречных потоков энергии $I_{+z,N}(f)$ и $I_{z,S}(f)$, где $I_{+z,N}(f)$ – поток энергии поверхностного динамического шума, совпадающий по направлению с осью z комбинированного приемника:

$$I_z(f) = I_{+z,N}(f) - I_{-z,S}(f).$$

Считаем, что осредненный поток энергии поверхностного шума $I_{+z,N}(f_0)$ на данной частоте f_0 есть величина постоянная. Для поверхностного шума на частотах $f_0 > 100$ Гц (рис. 3б) фазовый спектр $\Delta\varphi_z(f_0) = 0°$ (в этом случае $\Delta\varphi_z(f_0)$ есть разность фаз между давлением и колебательной скоростью). Поток энергии $I_{-z,S}(f_0)$ в результате интерференции отраженных от дна лучей меняется по величине в зависимости от расстояния между излучателем и приемником. Мерой изменения его величины является разность фаз $\delta = (\psi_2 - \psi_1)$. Связь между δ и разностью фаз $\Delta\varphi_z$ между давлением и колебательной скоростью в результирующем суммарном потоке энергии $I_z(f)$ имеет вид:

$$\cos\Delta\varphi_z(f) = \frac{1}{2}(1 - \cos\delta),$$

откуда следует, что при $\delta = \pi$ (минимум интерференции шумоподобного сигнала) $\cos\Delta\varphi_z(f) = 1$, $\Delta\varphi_z(f) = 0°$, что непосредственно наблюдается на рис. 3б и 4б. На рис. 3б это справедливо при всех $f > 100$ Гц; на рис. 4б – для тех частот, на которых наблюдается минимум интерференции и преобладает поток энергии поверхностного шума. При $\delta = 0$ (максимум интерференции) $\cos\Delta\varphi_z(f) = 0$, $\Delta\varphi_z(f) = \pi/2$. На рис. 4 на этих частотах наблюдается минимум $\gamma_z^2(f)$ и соответствующие им скачки разности фаз $\Delta\varphi_z(f)$.

На рис. 5а, б приведены изменения $\Delta\varphi_z(t)$ и $\gamma_z^2(t)$ от времени на одной из частот $f_0 = 326$ Гц. В данном случае $\Delta\varphi_z(f_0,t)$ есть разность фаз между давлением и z-компонентой колебательной скорости. Для нескольких значений $\Delta\varphi_z(t)$, отмеченных цифрами 1–5, $\Delta\varphi_z(f_0,t) \to \pm(\pi/2)$, функция когерентности $\gamma_z^2(f_0,t) \to 0$. Такая же закономерность следует из рис. 4. В промежуточном случае для суммы сигнала и шума результирующая разность фаз $\Delta\varphi_z(f)$ флуктуируют вблизи 0°. Отметим, что условие $\Delta\varphi_z(f) = 0°$ соответствует потоку энергии поверхностного шума.

Таким образом, в случае компенсации встречных потоков энергии разность фаз между акустическим давлением и колебательной скоростью в результирующем поле стремится к значению $\pm(\pi/2)$, как и в случае детерминированной стоячей волны. Этот результат соответствует данным, полученным из эксперимента для частоты 326 Гц

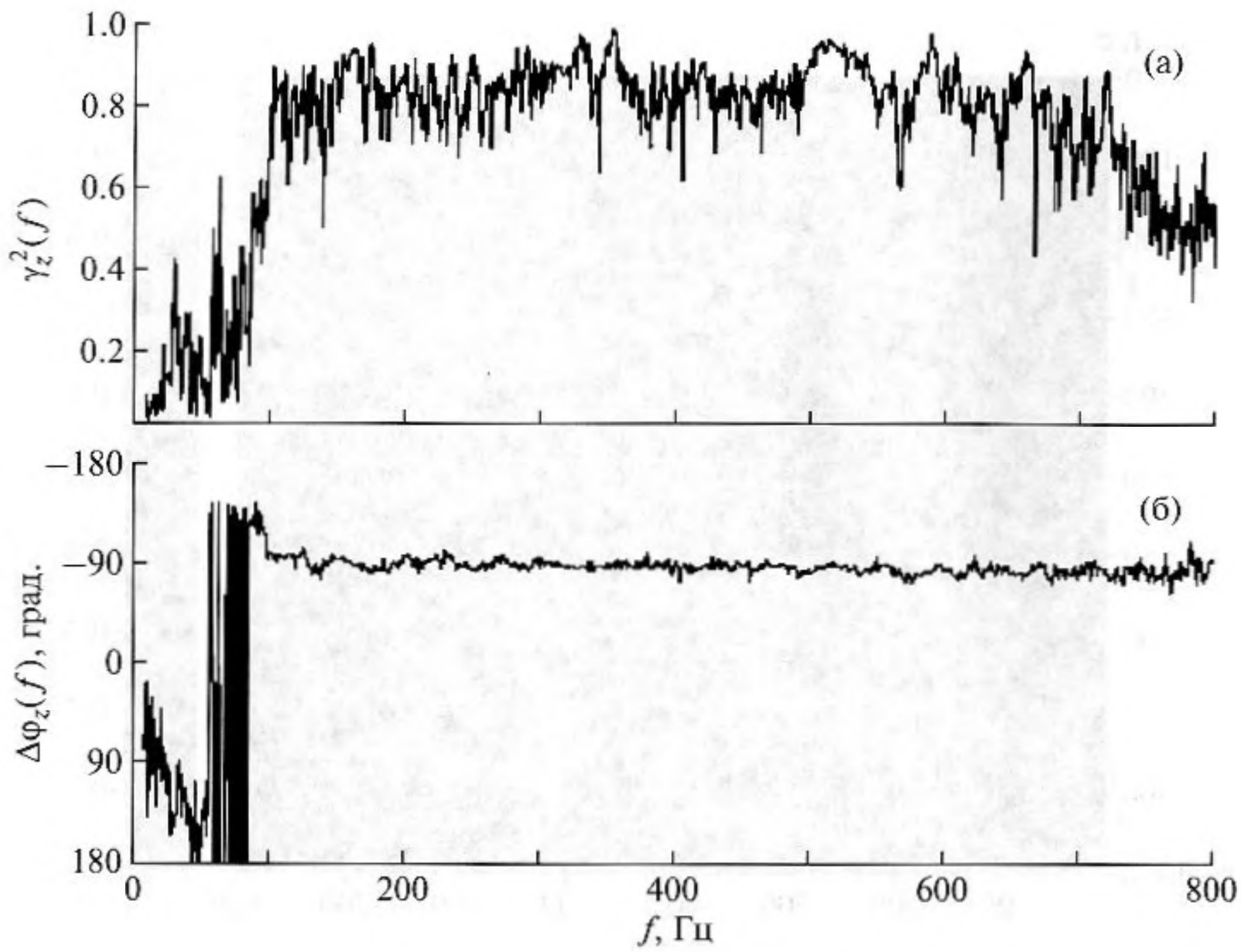

Рис. 7. Спектры: (а) – $\gamma_z^2(f)$; (б) – $\Delta\varphi_z(f)$. Глубина измерения 500 м, $t = 990$ с. Условия те же, что и на рис. 2.

(рис. 4 и 5). Знак "±" возникает в силу того, что при компенсации происходит случайный процесс "переключения" направления результирующего потока энергии, отличающийся на 180°. Условие $\Delta\varphi_z(f) = \pi/2$ отвечает случаю, когда в результирующем осредненном потоке энергии изменение колебательной скорости частиц среды опережает изменение давления на $\pi/2$. При $\Delta\varphi_z(f) = -(\pi/2)$ изменение колебательной скорости отстает от изменения акустического давления на $-(\pi/2)$. Аналогично функции когерентности в z-компоненте взаимного спектра также наблюдаются "провалы" в спектре. Функция когерентности удобна в использовании тем, что это есть нормированная величина квадрата взаимного спектра.

Измерения на глубине, равной 500 м. На рис. 6 приведена сонограмма $\gamma_z^2(f,t)$ для приемника 2, находящегося на глубине 500 м. Сонограммы для глубины 150 м и 500 м (рис. 2, 6) синхронизированы. При $t < 570$ с на сонограмме хорошо видна область высокой когерентности, обусловленная дождем. Спектры окружающего шума для $\gamma_z^2(f)$ и $\Delta\varphi_z(f)$ на глубине 500 м совпадают со спектрами для глубины 150 м, приведенные на рис. 3. Однако при $t > 570$ с (при движении судна) периодических изменений на сонограмме рис. 6 нет. Спектры $\gamma_z^2(f)$ и $\Delta\varphi_z(f)$ на рис. 7 скорее похожи на спектры поверхностного шума (рис. 3). Объясняется это тем, что на глубине 500 м лучи SG_2, SG_3 имеют углы скольжения большие (рис. 1б), чем на глубине 150 м. Их вклад в вертикальную компоненту потока энергии, направленную от поверхности к дну на некоторых частотах соизмерим, на других частотах превышает поверхностный шум. Например, на частотах 500–550 Гц превышение составляет ~10 дБ. Из рис. 7 следует, что $\gamma_z^2(f)$ на некоторых частотах достигает своего наибольшего значения ~1.0. Фазовый спектр $\Delta\varphi_z(f)$ (рис. 7б) указывает, что направление потока в полосе частот 50–800 Гц совпадает с положительным направлением оси z, т.е. от поверхности ко дну. В данном случае поток энергии, идущий от судна, и отраженный от дна не может составить конкуренцию сумме потоков поверхностного шума и шумоподобного сигнала, идущих в направлении поверхность-дно. Таким образом, в случае отсутствия компенсации встречных соизмеримых потоков энергии на спектрах потоков $\gamma_z^2(f)$ и $\Delta\varphi_z(f)$ (рис. 7) отсутствуют те признаки, которые указывают на существование компенсации на рис. 4, 5. Когда встречные потоки энергии наблюдаются по осям x и y, описанное выше явление справедливо для этих компонент. В этом случае необходимо сопоставлять функции когерентности (или взаимные спектры) с соответствующими фазовыми спектрами.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты работ [1–4], и на основе проведенного в данной работе анализа, можно сформулировать следующие основные признаки существования (при определенных условиях) в подводных акустических полях явления компенсации встречных потоков энергии.

1. Наличие во взаимных спектрах $S_{PV_x}(f)$, $S_{PV_y}(f)$, $S_{PV_z}(f)$ или в соответствующих им компонентах функции простой одноточечной когерентности $\gamma_x^2(f)$, $\gamma_y^2(f)$, $\gamma_z^2(f)$ "провалов" относительно основного спектрального уровня шума величиной до 30 дБ. В автоспектрах акустического давления $S_{p^2}(f)$ на этих частотах возможно наблюдать превышение сигнала над шумом до 3–6 дБ.

2. В соответствующих фазовых спектрах $\Delta\varphi_x(f)$, $\Delta\varphi_y(f)$, $\Delta\varphi_z(f)$ на тех же частотах наблюдаются "скачки" разности фаз в пределах $\pm(\pi/2)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров Л.Н., Ильичев В.И., Ильин С.А., Щуров В.А.* Векторно-фазовые измерения в акустике океана // Проблемы акустики океана. М.: Наука, 1984. С. 192–204.
2. *Ильичев В.И., Кулешов В.И., Куянова М.В., Щуров В.А.* Взаимодействие потоков мощности подводных окружающих шумов и локального источника // Акуст. журн. 1991. Т. 37. № 1. С. 99–103.
3. *Shchurov V.A., Ilyichev V.I., Kuleshov V.P., Kuyanova M.V.* The interaction of energy flows of underwater ambient noise and local source // J. Acoust. Soc. Am. 1991. V. 90. (2), pt 1. P. 1002–1004.
4. *Щуров В.А.* Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
5. *Воробьев С.Д., Сизов В.И.* Векторно-фазовая структура и векторно-фазовый метод описания и анализа случайных акустических полей // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 4. С. 654–659.
6. *Клячкин В.И.* Статистический анализ векторно-фазовых характеристик акустических полей и алгоритмы их регистрации // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 21–25.
7. *Баскин В.В., Смарышев М.Д.* Помехоустойчивость плоской антенны, состоящей из комбинированных приемников // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 629–636.
8. *Bruce M.A.* Ambient noise measurements with vector acoustic hydrophones // Conf. Proc. IEEE Oceans-2006 18–21 Sept. 2006. Boston, MA. ISBN: 1-4222-0115-1. DOI: 10.1109/OCEANS.2006.306989. 2007-02-12. P. 1–7.
9. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 495 с.