АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1996, том 42, № 1, с. 25 - 31

УДК 534.231

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ФАЗЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА МЕЛКОВОДНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ТРАССАХ

**© 1996 г. Л. Ф. Бондарь, С. В. Борисов, В. Н. Жирко, Н. Ф. Кабанов, С. В. Калинин, Ю. Н. Моргунов, А. Н. Рутенко, А. И. Чудаков, А. Н. Швырев**

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН*
*690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43*

Поступила в редакцию 08.11.94 г.

Обсуждаются результаты пространственно-временных исследований флуктуаций интенсивности и фазы гидроакустических сигналов с частотами 32, 315 и 330 Гц, измеренных в условиях стационарного акустико-гидрофизического полигона на шельфе Японского моря.

Одним из важных и наиболее изученным источником короткопериодных флуктуаций интенсивности ($I$) и фазы ($\varphi$) гидроакустических сигналов являются внутренние волны (ВВ). В работе [1] приводятся результаты аналитических расчетов флуктуаций $I$ и $\varphi$, обусловленных $BB$, спектр которых соответствует модели, предложенной Гарретом и Манком, а вертикальное распределение частоты Брента–Вяйсяля описывается экспоненциальной функцией. Для такой модели спектры флуктуаций $I$ и $\varphi$ в диапазоне частот, ограниченном инерционной частотой и частотой плавучести, должны спадать с ростом частоты пропорционально $\omega^{-3}$. В этой же работе обсуждаются результаты эксперимента, проведенного на относительно глубоководной стационарной трассе протяженностью 17.2 км с акустическими сигналами частоты 4 и 8 кГц, который показал, что спектр флуктуаций $\varphi$ действительно спадает пропорционально $\omega^{-3}$, а спектр флуктуаций $I$ – пропорционально $\omega^{-1}$. Авторы работы [2] также получили пропорциональное $\omega^{-1}$ спадание спектра флуктуаций $I$ на стационарных мелководных трассах с придонным звуковым каналом (ПЗК). Многосуточные измерения флуктуаций $I$ и $\varphi$ гидроакустических сигналов с частотами 32 и 315 Гц, проведенные осенью 1992 г. на специально организованном в шельфовой зоне Японского моря акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН [3 - 6] в условиях хорошо выраженного сезонного термоклина и ПЗК (стационарные трассы протяженностью 3.7, 23 и 25 км), показали, что спектры флуктуаций $\varphi$, независимо от частоты сигналов и длины трассы спадают пропорционально $\omega^{-2}$. В то же время, спектры флуктуаций $I$ на трассе длиной 3.7 км спадают пропорционально $\omega^{-1}$, а на более протяженных трассах закон спадания графики зависит от среднего по трассе значения частоты Брента–Вяйсяля в слое термоклина. Спектры более низкочастотных флуктуаций $I$ спадают медленнее, чем $\omega^{-1}$, а более короткопериодных – пропорционально $\omega^{-2}$.

В 1993 г. в исследованиях на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН был сделан акцент на изучение пространственных характеристик флуктуаций $I$ и $\varphi$. Для этого на полигоне (рис. 1а) в точке Т.3 был установлен еще один стационарный излучатель пьезокерамического типа и исследовались параметры акустических сигналов, измеряемых в двух пространственно разнесенных на 5 км точках шельфа. Карта полигона представлена на рис. 1а с указанием мест установки излучателей и двух автономных радиогидроакустических приемных систем Б.1 (Е.4) и Б.2 (Т.5), обеспечивающих измерение акустических сигналов на глубине 120 м с помощью донных гидрофонов. Точки приема разделял глубоководный Гамовский каньон, который играет очень важную роль в формировании гидродинамических процессов на шельфе, генерируемых приливными течениями. Кроме того, если в работе [5] исследовались оценки спектров флуктуаций $I$ и $\varphi$, характеризующие их вариации, усредненные за несколько суток, то в настоящей статье анализируются статистические характеристики короткопериодных флуктуаций $I$ и $\varphi$ с периодами от 20 с до 100 мин, измеренных на стационарных трассах: ТОН-315 – Б.1 (22 км), Б.2 (23.5 км), ТОН-330 – Б.1 (18 км), Б.2 (19 км) и ТОН-32 – Б.1 (16 км), Б.2 (18 км). Расстояние между излучателями сигналов ТОН-315 (Т.1, глубина 26 м) и ТОН-330 (Т.3, глубина 38 м) было равно 4.6 км. Тональный сигнал частоты 32 Гц излучался на горизонте 30 м с помощью излучателя электромагнитного типа, свешенного с борта НИС "Гидронавт", стоящего на якоре в точке Т.2, с глубиной места 50 м.

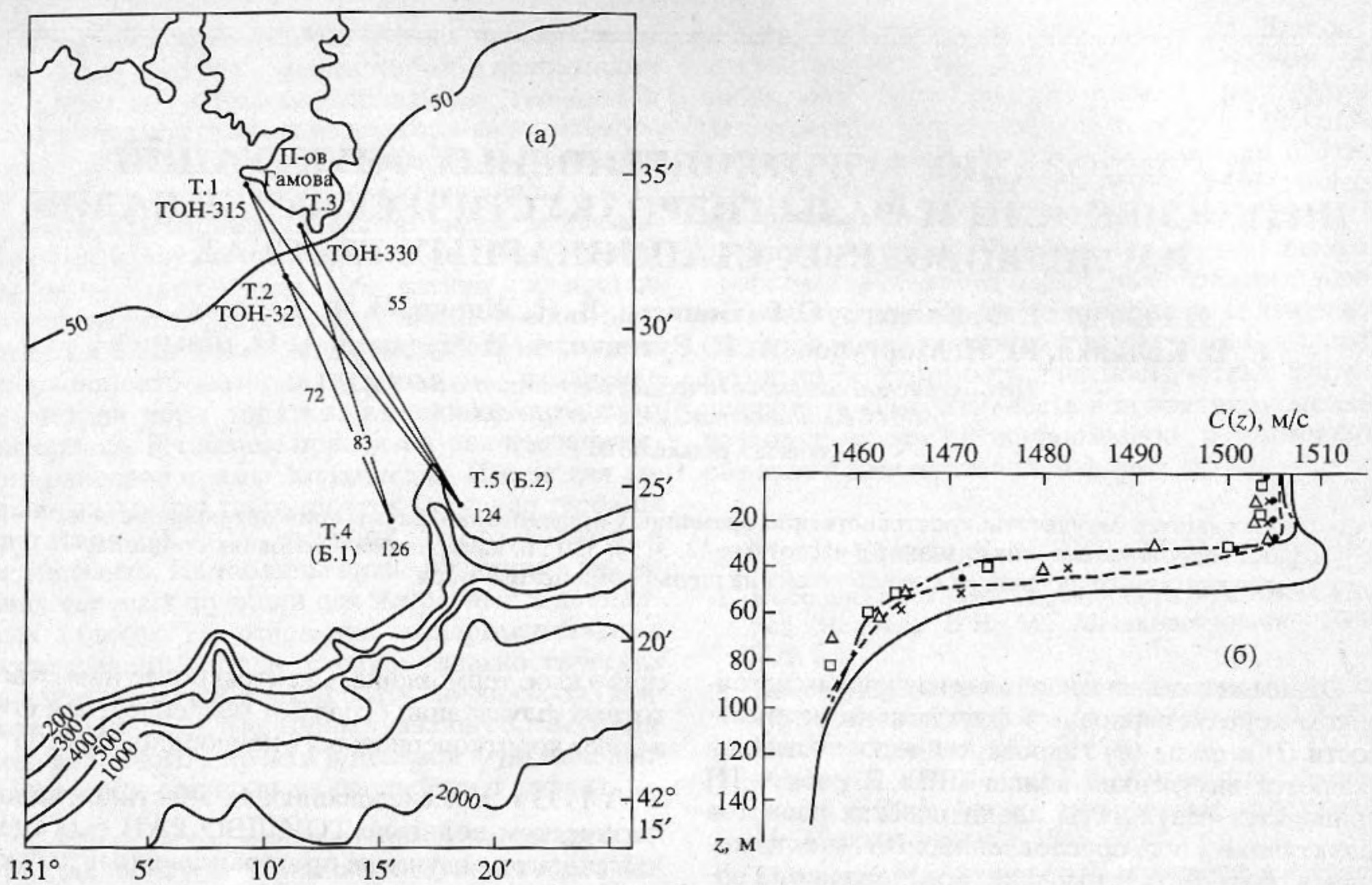


**Рис. 1.** Карта района исследований с обозначением стационарных гидроакустических трасс (а). Т.1, Т.2, Т.3 – точки излучения тональных акустических сигналов с частотами 315, 32 и 330 Гц соответственно. В точках Т.4 и Т.5 с помощью донных гидрофонов приемных радиогидроакустических систем Б.1 и Б.2 проводились измерения акустических сигналов. Экспериментальные профили $C(z)$ (б), рельеф дна и траектории лучей звука частоты 315 Гц вдоль трассы (в).

На рис. 2 приведены графики $I(t)$ и $\varphi(t)$ акустических сигналов с разными частотами, синхронно измеренных гидрофонами Б.1 и Б.2. К сожалению, во время эксперимента в ЭВМ был неправильно заведен опорный сигнал, соответствующий излучаемому гидроакустическому сигналу ТОН-32, поэтому мы можем представить надежные данные только по вариациям разности фаз $\Delta\varphi(t)$ между сигналами ТОН-32 – Б.1 и ТОН-32 – Б.2 (график $\Delta\varphi(t)$, Б.1 - Б.2, 32 Гц на рис. 2). Из этого

графика видны периодические вариации $\Delta\varphi$, очевидно, обусловленные пространственными перемещениями излучателя, свешенного с борта НИС, стоявшего лишь на одном якоре.

Обсудим результаты измерений, представленные на рис. 2, опираясь на априорные сведения о характере гидродинамических процессов, протекающих на полигоне в условиях осенней стратификации и воспользуемся результатами гидрологических измерений, а также аналитических расчетов, приведенных на рис. 1б, 1в. На рис. 1б представлены экспериментальные профили $C(z)$, измеренные в разных точках трассы ТОН-315 – Б.1, а на рис. 1в показаны рельеф дна и траектории лучей, выходящих от источника ТОН-315, расположенного в Т.1 на расстоянии 1 м от дна, под углами –13°, –7°, –1° и 5° к горизонтальной плоскости (ось $Z$ направлена в дно). Из рис. 1б видно, что во время эксперимента в море был хорошо выражен сезонный пикноклин и, соответственно, сформирован ПЗК, но из-за осеннего охлаждения поверхности моря уже началось формирование приповерхностного звукового канала (ППЗК) и, как видно из рис. 1в, часть энергии сигналов ТОН-315, 330 могла быть им захвачена и, следовательно, рассеиваться поверхностными волнами. Следует также учесть, что границей между ППЗК и ПЗК является сезонный пикноклин, а он постоянно подвержен возмущениям с пространственно-временны́ми характеристиками, определяемыми полем ВВ, активно генерируемых приливными течениями, взаимодействующими с материковым склоном и распространяющимися по пикноклину в направлении к берегу.

Необходимо отметить, что во время обсуждаемого эксперимента интенсивность поверхностных волн из-за усиления ветра северо-западного направления изменилась от 2 баллов в начале измерений до 3 - 4 баллов в конце, а уровни принимаемых акустических сигналов на всех трех частотах постоянно превышали уровень шумов более чем на 15 дБ.

На всех графиках $\varphi(t)$, представленных на рис. 2, хорошо выражены вариации с периодом полусуточного прилива, причем между графиками для ТОН-330 и ТОН-315 заметен временно́й сдвиг. При этом изменение условий распространения звука на полигоне (после 5 ч), обусловленное внутренним приливом, синхронно проявилось на всех частотах. Интересно проследить за вариациями $I$ и $\varphi$, наблюдаемыми в первые 1.5 ч измерений (рис. 2). Вариация фазы сигнала ТОН-315 – Б.1 ступенчатого типа с порогом 120° проявилась на гидрофоне Б.2 в виде флуктуации $\varphi(t)$, по величине также равной 120°, а в вариациях $\varphi(t)$ сигналов ТОН-330 – Б.1, Б.2 эта аномалия не выражена, хотя примерно через час фаза сигнала ТОН-330 – Б.1 плавно изменилась почти на ту же величину. Интенсивности сигналов ТОН-315, 330 – Б.2 в этот интервал времени претерпели противофазные изменения (по форме – ступенчатого типа) с величиной порога около 10 дБ. Аномальная флуктуация наблюдается и в графике $I(t)$ сигнала ТОН-32 – Б.1. Ее величина достигает 5 дБ. После нее до 5 ч в этом сигнале наблюдается устойчивый стабильный уровень $I(t)$. В сигнале ТОН-32 – Б.2 эта вариация проявилась в виде двух продолжительных колебаний, заканчивающихся резким возрастанием уровня сигнала на величину 6 дБ; далее, как и для сигнала ТОН-32 – Б.1, его уровень относительно стабилен.

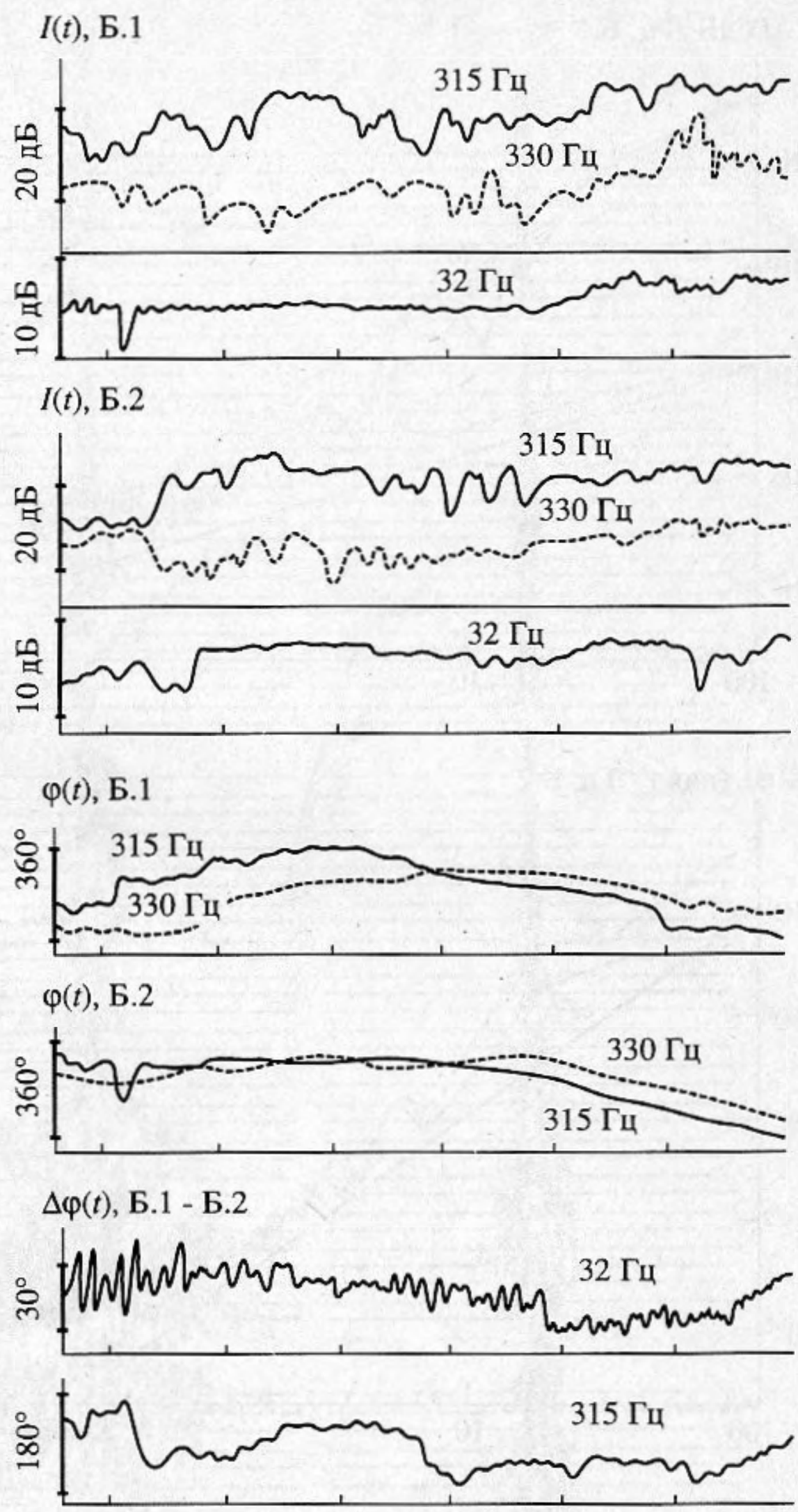


**Рис. 2.** Вариации интенсивности $I(t)$, фазы $\varphi(t)$ и разности фаз $\Delta\varphi(t)$ акустических сигналов частоты 32, 315 и 330 Гц, измеренных с помощью донных гидрофонов приемных систем Б.1 и Б.2.

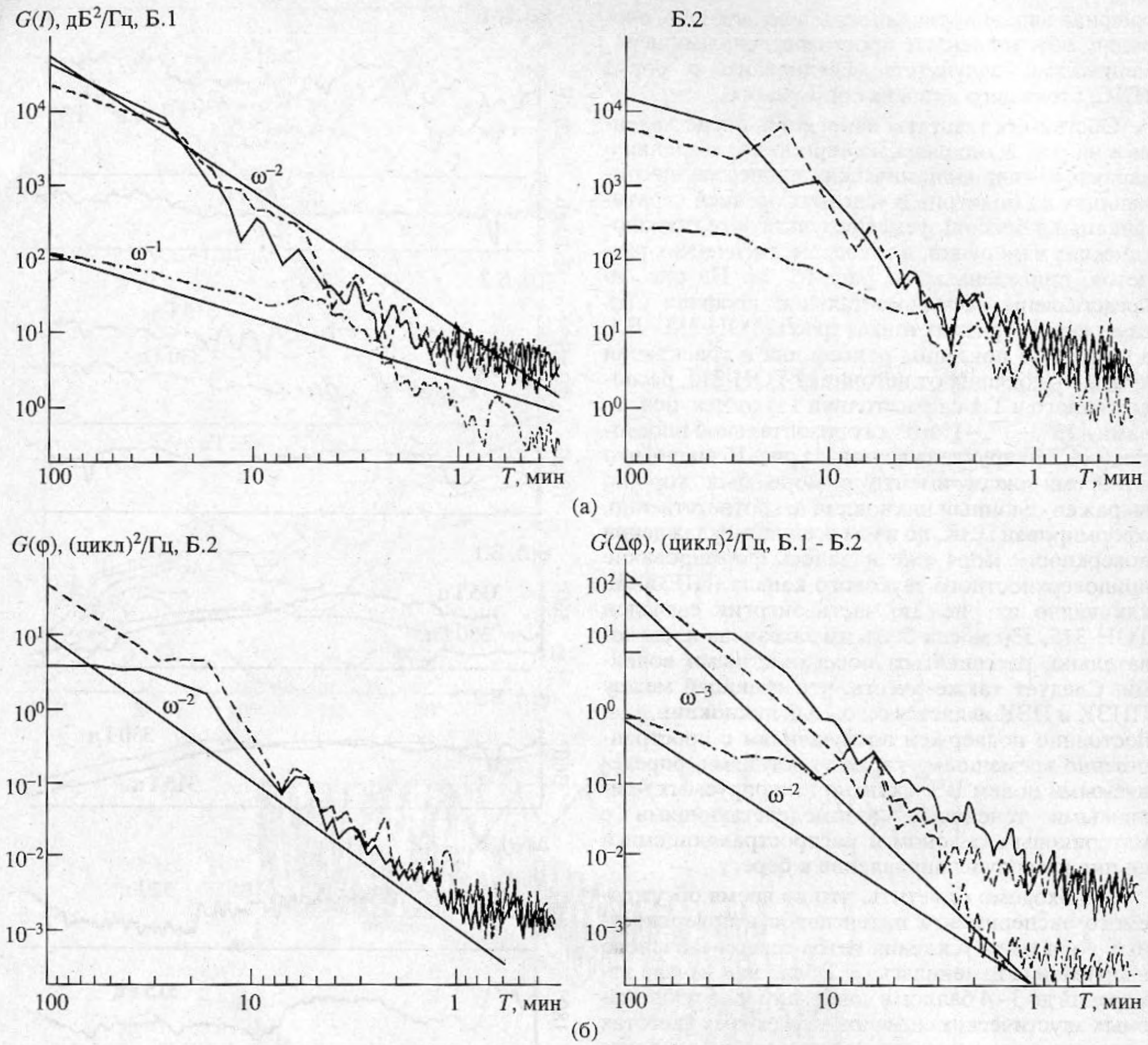


**Рис. 3.** Оценки спектров мощности флуктуаций логарифма интенсивности $G(I)$, фазы $G(\varphi)$ и разности фаз $G(\Delta\varphi)$ гидроакустических сигналов частоты 315 Гц (сплошная линия), 330 Гц (пунктирная линия) и 32 Гц (штрихпунктирная линия), принятых системами Б.1 и Б.2.

Перейдем к результатам статистического анализа флуктуаций $I(t)$ и $\varphi(t)$, представленным на рис. 3 в виде графиков оценок спектров мощности $G$. Спектры флуктуаций логарифма $I$ сигналов ТОН-315, 330 практически во всем диапазоне исследуемых частот спадают с ростом частоты пропорционально $\omega^{-2}$, а сигналов ТОН-32 – пропорционально $\omega^{-1}$, но в графике $G(I)$, соответствующем сигналу ТОН-32 – Б.1, можно отметить точку перегиба ≈6 мин. Спектральная мощность более низкочастотных флуктуаций спадает с ростом частоты медленнее, чем $\omega^{-1}$, а более короткопериодных – быстрее. Спектральная мощность флуктуаций логарифма интенсивности сигналов ТОН-32 почти на два порядка меньше мощности флуктуаций сигналов ТОН-315, 330. На графиках $G(I)$, соответствующих измерениям, проведенным системой Б.2, можно отметить хорошо выраженный на всех трех частотах пик мощности на периодах 2 мин. Оценки спектров флуктуаций фазы $G(\varphi)$ сигналов ТОН-315, 330, представленные на рис. 3б, плавно спадают с ростом частоты пропорционально $\omega^{-2}$, а графики спектров флуктуаций разности фаз $G(\Delta\varphi)$ сигналов ТОН-315, 330 спадают

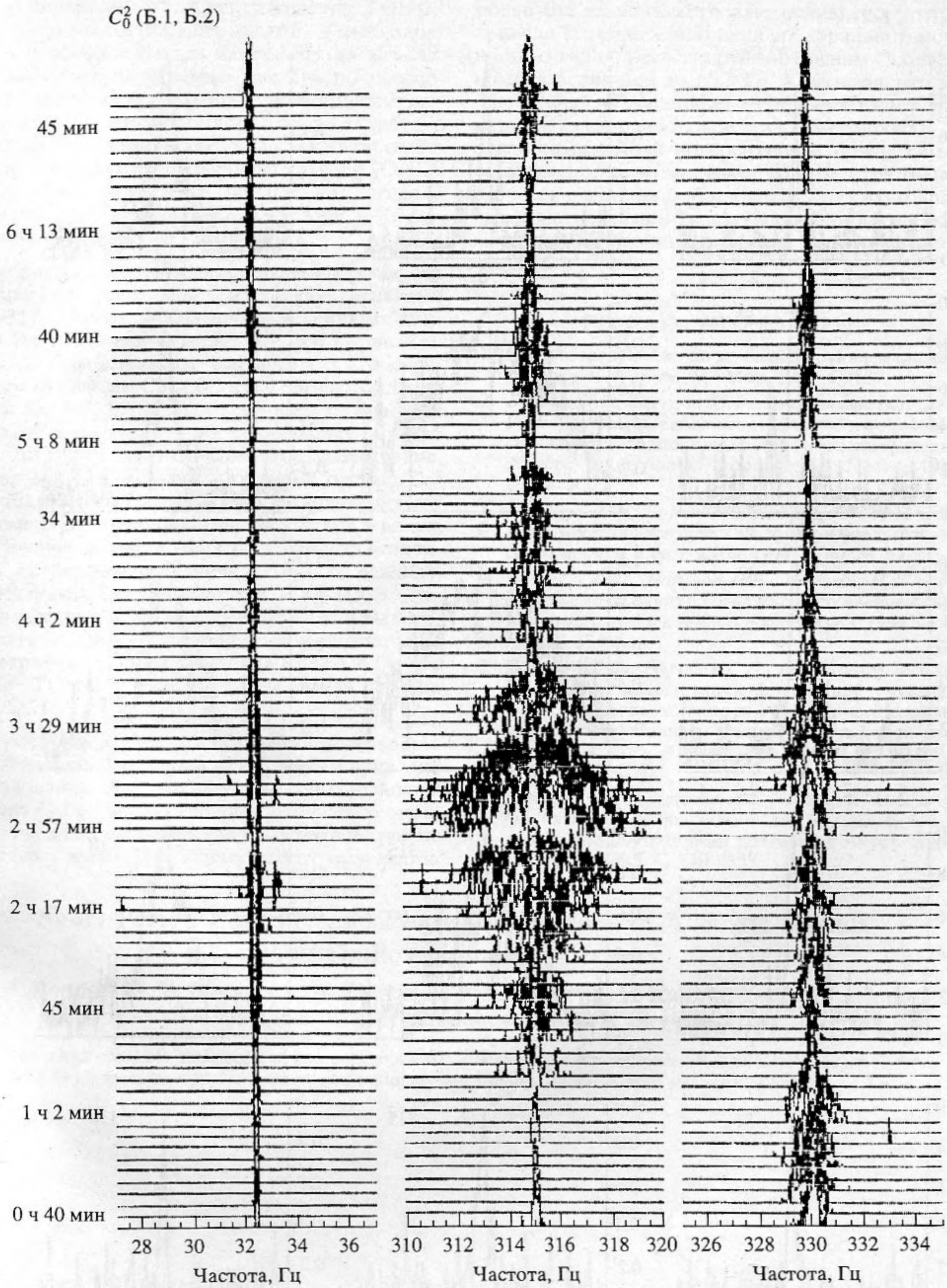


**Рис. 4.** Сонограммы квадрата функций когерентности $Co^2$ между гидроакустическими сигналами частоты 32, 315 и 330 Гц, синхронно измеренными донными гидрофонами приемных систем Б.1 и Б.2.

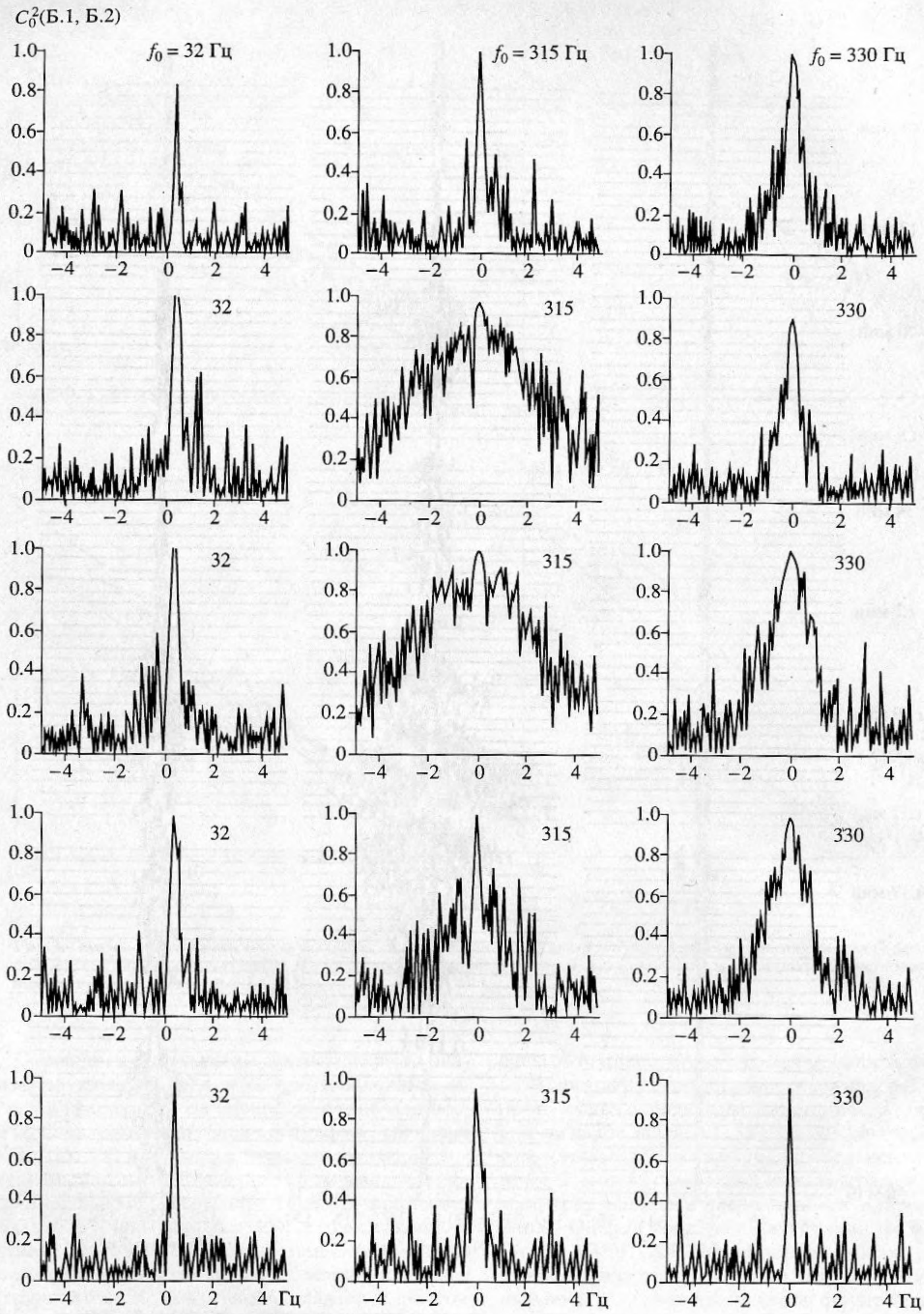


**Рис. 5.** Графики $Co^2$, соответствующие разным интервалам времени эксперимента.

пропорционально $\omega^{-3}$. Спектр сигнала ТОН-32 имеет пик мощности на периодах 6 - 9 мин. Вариации с примерно такими же периодами хорошо выражены и в графике $\Delta\varphi(t)$ (рис. 2) и, по-видимому, обусловлены пространственными перемещениями излучателя, свешенного с борта стоявшего только на одном якоре НИС. По величине спектральная мощность вариаций $G(\Delta\varphi)$ сигнала ТОН-32 примерно на два порядка меньше, чем сигналов ТОН-315, 330, но в интервале периодов 3 - 10 минут они равны.

На рис. 4 приведены сонограммы квадрата функции когерентности $Co^2$ между сигналами ТОН-315, 330, 32, синхронно измеренными донными гидрофонами станций Б.1 и Б.2 (рис. 1а). Графики соответствуют статистически обеспеченным значениям $Co^2 \geq 0.5$ в полосе частот $\pm 5$ Гц от $f_0$ = 32, 315, 330 Гц соответственно. Графики оценок $Co^2$ получены по реализациям длиной 217.6 секунд и имеют частотное разрешение, равное 0.05 Гц. На рис. 5 графики оценок $Co^2$ представлены более подробно и характеризуют их временну́ю изменчивость. Из рис. 4 и 5 видно, что в течение всего времени эксперимента величина $Co^2$ на частотах излучения $f_0$ близка к единице, но в графиках $Co^2$ для сигналов ТОН-315, 330 на отдельных, относительно продолжительных интервалах времени, наблюдается значительное симметричное расширение пика $Co^2$ до 2 Гц для сигнала ТОН-330 и почти до 10 Гц для сигнала ТОН-315.

Хорошо известно, что поверхностные волны рассеивают энергию падающего звука и приводят к образованию боковых частотных полос вокруг несущей $f_0$, причем модуляционный спектр определяется спектром поверхностных волн и зависит от частоты звука. Для наших частот модуляцию могли бы вызвать ветровые волны, но это бы привело к расширению пика спектральной мощности сигнала, регистрируемого одним гидрофоном, не более чем до $\pm 0.5$ Гц. Учитывая, что наблюдаемый в эксперименте эффект имеет временну́ю изменчивость и зарегистрирован в функции взаимной когерентности между сигналами, распространявшимися по пространственно разнесенным трассам (см. рис. 1а), то в настоящее время мы не можем указать какой-либо гидродинамический источник, который мог бы вызвать подобный эффект.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. С. Флатте. М.: Мир, 1982. С. 160.
2. *Бункин Ф.В., Кравцов Ю.Ф., Омельченко Н.Н. и др.* Результаты исследования стабильности звуковых сигналов на стационарных акустических трассах // Акустические волны в океане. М.: Наука, 1987. С. 84 - 91.
3. *Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Гриценко А.В. и др.* Акустико-гидрофизический полигон (шельф Японского моря) // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 333.
4. *Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Борисов Н.Г. и др.* Влияние внутренних волн на распространение низкочастотного звука в море // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 334.
5. *Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Гриценко А.В. и др.* Результаты исследования флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных акустических сигналов на стационарных трассах в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 561 - 570.
6. *Борисов Н.Г., Гриценко А.В., Козицкий С.Б. и др.* Флуктуации гидроакустических сигналов, обусловленные внутренними волнами // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 749 - 755.


# Short-Period Intensity and Phase Fluctuations of Acoustic Signals along Shallow Stationary Tracks

**L. F. Bondar', S. V. Borisov, V. N. Zhirko, N. F. Kabanov, S. V. Kalinin, Yu. N. Morgunov, A. N. Rutenko, A. I. Chudakov, and A. N. Shvyrev**

This paper considers the results of space-time investigations of intensity and phase fluctuations of 32-, 315-, and 330-Hz acoustic signals measured at a stationary test site in the shelf zone of the Sea of Japan.