

УДК 534.232

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗВУКА, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В МЕЛКОМ МОРЕ

© 1999 г. А. Н. Рутенко

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН

690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43

E-mail: pacific@online.marine.su

Поступила в редакцию 2.06.1998 г.

Обсуждаются, полученные в осенних гидрологических условиях результаты натурных измерений флуктуаций интенсивности тональных акустических сигналов с частотами 315, 3200, 3700 и 320, 1000 Гц, распространяющихся вдоль двух стационарных трасс протяженностью 22 и 18 км, ориентированных поперек шельфа Японского моря. Установлено, что графики оценок спектров мощности вариаций интенсивности акустических сигналов  $\hat{G}_I(\omega)$  имеют точку перегиба, зависящую от частоты сигнала. На низких частотах спектральная мощность флуктуаций с ростом частоты падает медленнее, чем  $\omega^{-1}$ , а на более высоких – быстрее, чем  $\omega^{-2}$ ; на частотах выше 0.01 Гц спектры  $\hat{G}_I(\omega)$  стабилизируются на уровнях, пропорциональных частоте сигнала, и имеет ярко выраженные резонансные пики на частотах поверхностных волн. Положение точки перегиба в графике  $\hat{G}_I(\omega)$  объясняется особенностями экспериментального спектра внутренних волн и вертикального профиля частоты Вайсяля–Брента.

### ВВЕДЕНИЕ

Натурные измерения и численное моделирование акустического поля, распространяющегося в условиях мелководного звукового канала с наклонным дном и динамичными границами водного слоя (поверхность моря и сезонный пикноклин), постоянно возмущаемыми бегущими по ним волнами поверхностного и внутреннего приливов, а также значительно более короткими поверхностными и внутренними волнами (ВВ), показали, что параметры акустического поля рандомизируются при увеличении длины трассы, частоты звука и максимума частоты Вайсяля–Брента ( $N$ ) в слое пикноклина [1–5]. Рефракция и рассеяние звука на разномасштабных неоднородностях поля скорости звука в дне и в водной толще приводят к перекачке энергии из низших нормальных мод в моды более высокого порядка (причем взаимодействие мод может иметь резонансный характер, например, для неоднородностей, создаваемых группами нелинейных ВВ [6]), а также к трансформации энергии когерентной составляющей в некогерентную часть поля [7]. Это приводит к размыванию и разрушению интерференционной структуры акустического поля и более равномерному “освещению” всей водной толщи. Поверхностные волны (ПВ) рассеивают энергию падающего звука и приводят к образованию боковых частотных полос, причем модуля-

ционный спектр определяется спектром ПВ и зависит от частоты звука.

В данной работе приводятся экспериментальные данные о частотной зависимости флуктуаций интенсивности акустического поля, распространяющегося в осенних гидрологических условиях шельфа Японского моря. Измерения были проведены на двух стационарных трассах, показанных на рис. 1, с помощью тональных сигналов с частотами 315, 320, 1000, 3200 и 3700 Гц.

### 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Эксперимент проводился 15–16 сентября 1993 г. в шельфовой зоне Японского моря на акустико-гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института [1–4] в условиях хорошо выраженного сезонного пикноклина, в котором вертикальный градиент скорости звука был равен  $0.9 \text{ с}^{-1}$ , а значение частоты Вайсяля–Брента достигало 25 цикл./час. Карта полигона представлена на рис. 1 с указанием мест установки излучателей (т. 1, т. 2) и автономной радиогидроакустической приемной системы (т. 3), обеспечивающей измерение акустических сигналов на глубине 120 м с помощью гидрофона, лежащего на дне. Тональные сигналы с частотами 320 и 1000 Гц излучались с помощью излучателя пьезокерамического

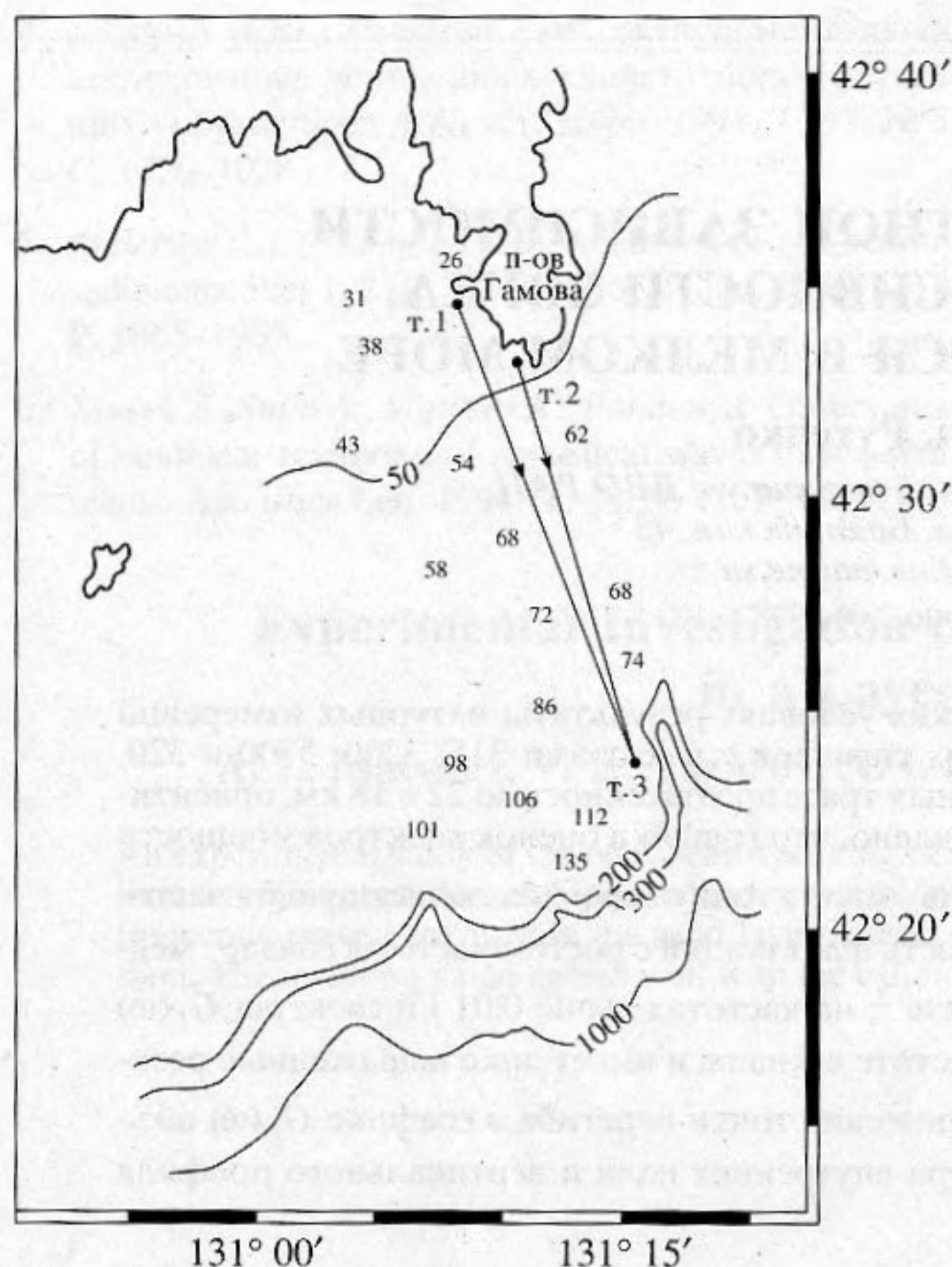


Рис. 1. Карта района исследований с указанием точек постановки измерительных средств и трасс, на которых проводились измерения.

типа, установленного на глубине 38 м в точке т. 2, длина трассы для этих сигналов была равна 18 км. Сигнал с частотой 315 Гц генерировался излучателем электромагнитного типа, установленным в т. 1 на глубине 26 м, а сигналы с частотами 3200 и 3700 Гц формировались с помощью четырехэлементной горизонтальной излучающей антенны с характеристикой направленности в горизонтальной плоскости, примерно равной  $25^\circ$ . Антенна была установлена на глубине 20 м вблизи точки т. 1. Расстояние между т. 1 и т. 3 равно 22 км. Во время эксперимента принимаемые сигналы записывались на магнитофон типа 7005 фирмы Брюль и Кьер, а затем после низкочастотной и полосовой фильтрации вводились по двум каналам АЦП в ЭВМ с частотой дискретизации 2600 Гц. После набора синхронных рядов данных по 4096 значений каждый осуществлялось их взвешивание во временной области с помощью весовой функции Хэмминга; далее с помощью алгоритма БПФ рассчитывались периодограммы и запоминались комплексные значения БПФ в узких предварительно выбранных частотных полосах, включающих частоты 315, 320, 1000 Гц излучаемых акустических сигналов, а также частоты, соответст-

вующие сигналам с частотами 3200 и 3700 Гц после их гетеродинирования. После этого снова начинался ввод данных. В результате такой обработки непрерывно поступающих сигналов были получены синхронные ряды данных, позволяющие рассчитать оценки исследуемых статистических характеристик, в частности, флуктуаций интенсивности ( $I$ ) измеренных сигналов.

Вариации значений  $I$  представляют собой случайные функции (см. рис. 2а) и к ним применимы методы спектрального анализа случайных полей, основанные на линейном алгоритме вычисления оценки спектра мощности  $\hat{G}_I(\omega)$  флуктуаций или просто спектра, характеризующего распределение интенсивности колебаний по частоте. Оценки спектров флуктуаций интенсивности  $\hat{G}_I(\omega)$  и внутренних волн  $\hat{G}_{ВВ}(\omega)$  для более удобного визуального анализа разделены на низкочастотный и высокочастотный диапазоны с разными значениями частотного разрешения  $\Delta f$  и числа степеней свободы  $\nu$ . Для количественного сравнения все оценки приведены к полосе 1 Гц, т.е. имеют размерность  $\text{дБ}^2/\text{Гц}$  и  $\text{м}^2/\text{Гц}$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены графики  $I(t)$  и соответствующие им оценки спектров мощности  $\hat{G}_I(\omega)$ . Из рис. 2а видно, что частота флуктуаций интенсивности возрастает при увеличении частоты сигнала. Вариации интенсивности сигналов, распространявшихся по одним и тем же трассам, практически не коррелируют во временной области, но спектры  $\hat{G}_I(\omega)$  сигналов с близкими частотами 315, 320 Гц и 3200, 3700 Гц, как это видно на рис. 2б, подобны и лежат в пределах доверительных интервалов, что свидетельствует об их пространственной однородности и слабой зависимости от частоты. Графики  $I(t)$  и  $\hat{G}_I(\omega)$ , представленные на рис. 2а и рис. 2в, показывают также, что уровень низкочастотной части спектра (эффект "выбеливания") понижается при увеличении частоты распространяющегося акустического поля [4].

На рис. 3 приведены графики профиля  $\eta_{ВВ}(t)$  и оценки спектра мощности  $\hat{G}_{ВВ}(\omega)$  первой моды ВВ, измеренной осенью 1997 г. в 460 м от берега м. Шульца в точке с глубиной 40 м (примерно т. 1 на рис. 1). Измерения были проведены с помощью вертикальной цифровой акустико-гидрофизической антенны, обеспечивающей синхронные измерения температуры воды на восьми горизонтах точечными датчиками и семью распределенными датчиками температуры, перекрывающими слой воды толщиной 31.5 м. Согласно рис. 3

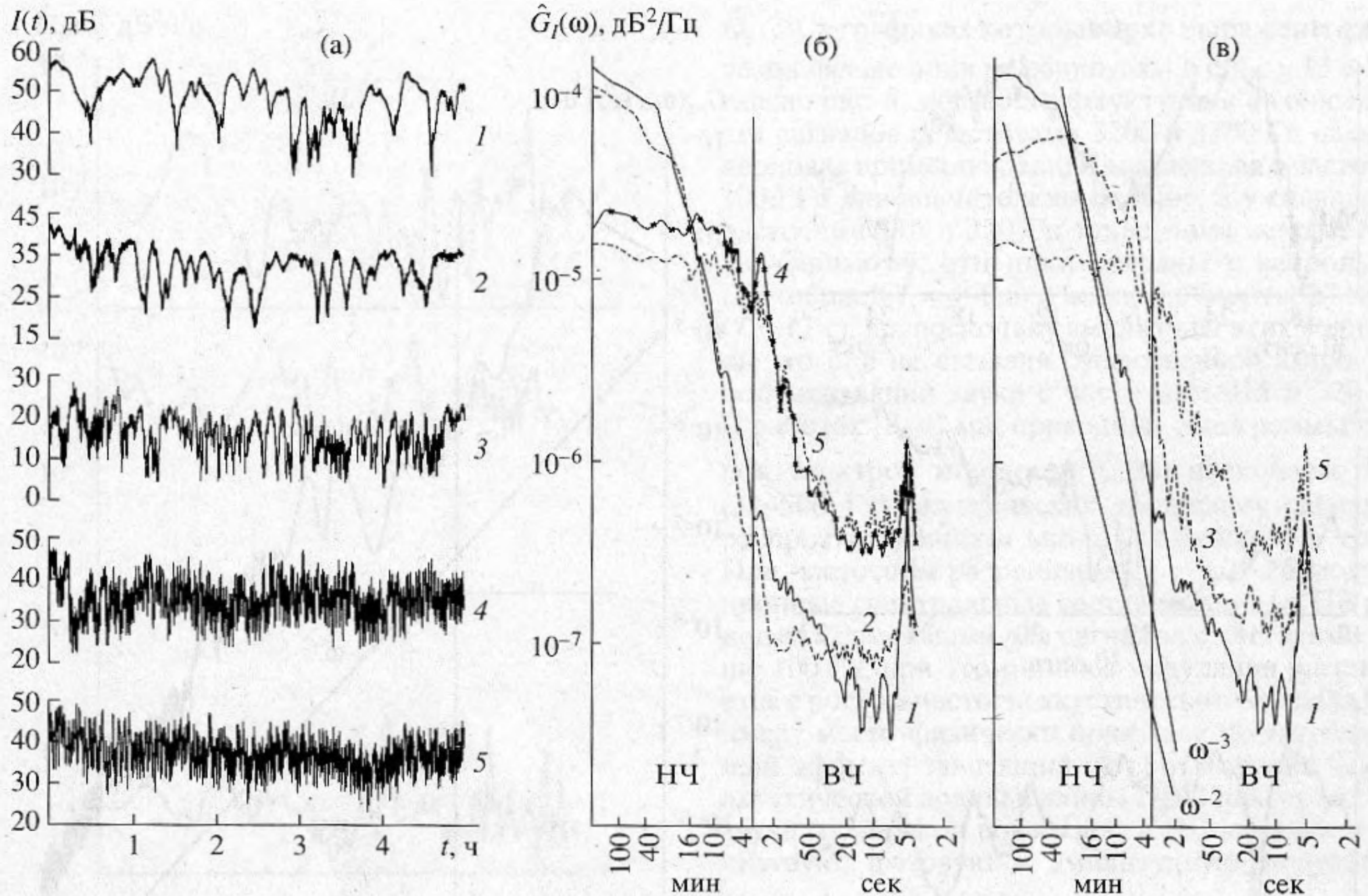


Рис. 2. Графики флуктуаций интенсивности  $I(t)$  акустических сигналов (а) с частотами: 315 Гц – кривая 1, 320 Гц – 2, 1000 Гц – 3, 3200 – 4, 3700 – 5 и соответствующие им оценки спектров мощности  $\hat{G}_I(\omega)$ . В НЧ-диапазоне  $\Delta f = 1.5 \times 10^{-4}$  Гц,  $\nu = 7$  (б) и  $\Delta f = 10^{-4}$  Гц,  $\nu = 5$  (в), а в ВЧ-диапазоне  $\Delta f = 4.5 \times 10^{-4}$  Гц,  $\nu = 19$  (б) и  $\Delta f = 4 \times 10^{-4}$  Гц,  $\nu = 17$  (в).

поле ВВ в данном районе шельфа Японского моря обладает особенностями, характерными для ВВ, генерируемых приливом на кромке шельфа и распространяющихся над наклонным дном в направлении к берегу. Особенности поля таких ВВ обусловлены трансформациями и разрушениями волны внутреннего прилива, вызывающими генерирование пакетов нелинейных и квазигармонических ВВ с выраженным направлением их распространения [8]. В графике  $\hat{G}_{ВВ}(\omega)$ , показанном на рис. 3б, можно выделить несколько пиков мощности, возвышающихся над фоновым спектром Гарретта-Манка, монотонно спадающим с ростом частоты как  $\omega^{-2}$ . В данном случае представляют интерес хорошо выраженное возвышение и пики на периодах 4–50 мин, а также заметное возвышение на периодах 1.5–3 мин. Многолетние наблюдения за ВВ в данном районе позволяют констатировать, что рассматриваемый спектр ВВ является характерным для осенних гидрологических условий и поэтому его можно использовать при интерпретации представленных в данной работе результатов акустических измерений.

Натурные измерения [1–4] и численные эксперименты [2] показали, что связь флуктуаций интенсивности и фазы акустического поля с профилем распространяющихся ВВ утрачивается по мере заполнения трассы ВВ. Экспериментальные спектры  $\hat{G}_I(\omega)$  имеют характерную точку перегиба, до которой спектральная мощность флуктуаций  $I$  с ростом частоты падает медленнее, чем  $\omega^{-1}$ , а после нее – быстрее, чем  $\omega^{-2}$  [1, 2, 4]. Пропорциональность частоты точки перегиба частоте акустического поля, очевидно, связана с соотношением между длиной акустической волны и толщиной пикноклина, синхронно смещаемого распространяющимися ВВ. Связь параметров пикноклина с периодами распространяющихся по нему ВВ определяется вертикальным профилем частоты Вьяйсяля-Брента  $N(z)$  (экспериментальные  $N(z)$ , измеренные в характерных точках полигона, представлены в работе [9]). Чем меньше частота звука, тем толще должен быть слой с градиентом скорости звука, а значит меньше значение  $N$ , перекрывающее этот слой, и, следовательно, больше период ВВ, которые влияют на его распространение. Действительно, в работе [4] по-

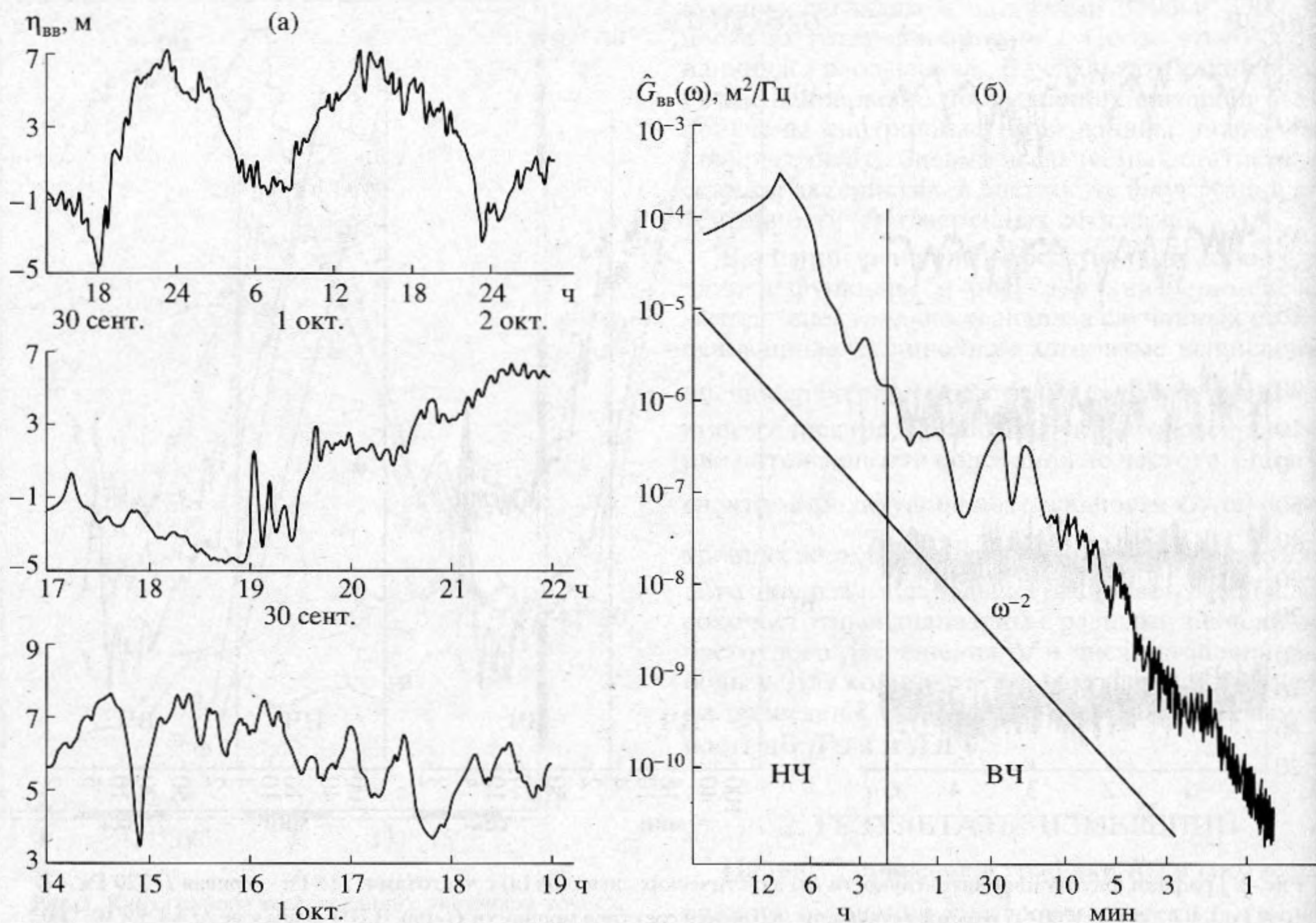


Рис. 3. Графики профиля  $\eta_{BB}(t)$  (а) и оценки спектра мощности  $\hat{G}_{BB}(\omega)$  внутренних волн (б), измеренных в 460 м от берега в точке с глубиной 40 м. В НЧ-диапазоне  $\Delta f = 1.2 \times 10^{-5}$  Гц,  $\nu = 5$ , а в ВЧ-диапазоне  $\Delta f = 9.6 \times 10^{-5}$  Гц,  $\nu = 33$ .

казано, что акустическое поле с частотой 32 Гц, распространяющееся на полигоне, практически не взаимодействовало с неоднородностями пикноклина, создаваемыми ВВ, и в то же время в графике  $\hat{G}_I(\omega)$  сигнала с частотой 315 Гц (весенняя гидрология) был хорошо выражен пик мощности на периодах 0.6–1.5 часа.

Графики  $\hat{G}_I(\omega)$ , представленные на рис. 2, также имеют точку перегиба. Для сигналов с частотами 315, 320 Гц она соответствует периодам вариаций  $I$ , равным 30 мин, а для сигналов с частотами 1000 и 3200, 3700 Гц – 5 мин и 130 с соответственно. Графики  $\hat{G}_I(\omega)$  сигналов с частотами 1000 и 3200 Гц имеют пики на периодах 5 и 3 мин. Согласно рис. 3б график  $\hat{G}_{BB}(\omega)$  на периодах 4–50 мин имеет относительный подъем спектральной мощности ВВ. Период 130 с соответствует ВВ, распространяющимся в тонком слое сезонного пикноклина. После точки перегиба мощность флуктуаций  $I$  быстро уменьшается с

ростом частоты, но на периодах меньше 30 с мощность флуктуаций стабилизируется на уровне, пропорциональном частоте сигнала, что обусловлено рассеянием звука на пространственных неоднородностях поля скорости звука, соответствующих тонкой структуре плотностной стратификации воды. Тонкая структура обусловлена существованием слоистой стратификации в вертикальном профиле плотности и температуры. Слои являются участками с относительно однородной плотностью, разделенными тонкими прослойками с большими градиентами плотности. Толщина слоев может сильно меняться от десятков сантиметров до нескольких метров, а горизонтальные размеры – от единиц до десятков метров. Поскольку поле тонкоструктурных акустических неоднородностей формируется гидродинамическими процессами и, прежде всего, ВВ, то оно должно быть сильно изменчивым во времени и в пространстве.

На периодах меньше 10 с все графики  $\hat{G}_I(\omega)$  имеют ярко выраженный пик, соответствующий

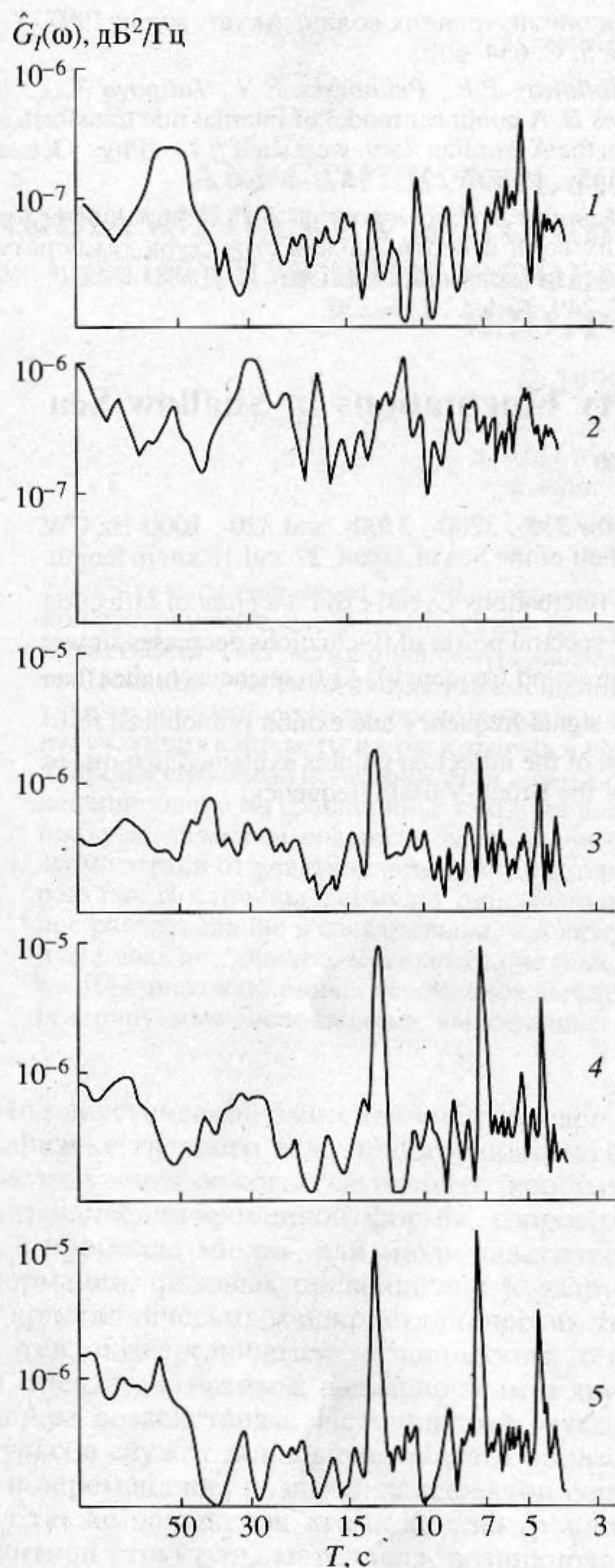


Рис. 4. Оценки спектров мощности флуктуаций интенсивности акустических сигналов с частотами: 315 Гц – кривая 1, 320 Гц – 2, 1000 Гц – 3, 3200 Гц – 4, 3700 Гц – 5.  $\Delta f = 4 \times 10^{-3}$  Гц,  $\nu = 15$ .

модуляционным эффектам от ПВ. Графики  $\hat{G}_I(\omega)$  на рис. 2 соответствуют пятичасовому ряду данных. Анализ рядов продолжительностью меньше часа, показал наличие пиков в графиках  $\hat{G}_I(\omega)$  на периодах ПВ. На рис. 4 приведены

$\hat{G}_I(\omega)$ , в графиках которых ярко выражены узкие резонансные пики на периодах 4.6 с, 7 с и 13 с. Согласно рис. 4, мощности флуктуаций интенсивности сигналов с частотами 3200 и 3700 Гц на этих периодах примерно равны, для сигнала с частотой 1000 Гц они значительно меньше, а у сигналов с частотами 315 и 320 Гц такие пики не заметны. По-видимому, эти пики связаны с ветровыми ПВ (период  $T = 4-8$  с) и волнами “мертвой” зыби ( $T = 13$  с), но, поскольку амплитуды этих волн малы, то они не вызвали существенной амплитудной модуляции звука с частотами 315 и 320 Гц. В работах [3, 4] мы приводили сонограммы оценок спектров мощности  $\hat{G}(\omega)$  низкочастотных (32–500 Гц) акустических тональных сигналов, распространявшихся вдоль стационарных трасс. При частотном разрешении  $\Delta f = 0.01$  Гц модуляционные спектральные составляющие от ПВ становятся заметными для сигналов с частотами выше 100 Гц; при этом полоса модуляции расширяется с ростом частоты акустического сигнала, т.е. имеет место физически понятный фильтрационный эффект, зависящий от соотношения длины акустической волны и длины ПВ. При отражении звука от морской поверхности ПВ вызывают частотную, фазовую и амплитудную модуляции. На графике  $\hat{G}(\omega)$  в боковых полосах проявляются спектральные составляющие от всех типов модуляции, а в графике  $\hat{G}_I(\omega)$  только амплитудная; наверное, этим и объясняется столь ярко выраженная частотная избирательность  $I(t)$  к практически непрерывному частотному спектру ПВ.

В заключение хочу выразить благодарность всем, кто принимал участие в организации данного натурального эксперимента и РФФИ за поддержку этих исследований (проект 96-02-16114).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Гриценко А.В. и др. Результаты исследований флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных акустических сигналов на стационарных трассах в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 561–570.
2. 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.
3. Борисов С.В., Кабанов Н.Ф., Рутенко А.Н. Экспериментальные исследования флуктуаций акустического поля на стационарных трассах // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 3. С. 347–358.
4. Рутенко А.Н. Сезонная изменчивость флуктуаций интенсивности и фазы низкочастотных гидроакустических сигналов, распространяющихся в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 1. С. 98–105.

5. *Tielburger D., Finette S., Wolf S.* Acoustic propagation through an internal wave field in a shallow water waveguide // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. V. 101. № 2. P. 789–808.
6. *Zhou J.-X., Zhang X.-Z., Rogers P.H.* Resonant interaction of sound wave with internal solitons in the coastal zone // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1992. V. 90. № 4. P. 2042–2054.
7. *Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А.* Интенсивность звукового поля в мелководном волноводе при наличии внутренних волн // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 5. С. 654–660.
8. *Holloway P.E., Pelinovsky E.N., Talipova T.G., Barnes B.* A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian north west shelf // *J. of Phys. Oceanography.* 1997. V. 27. С. 871–896.
9. *Ильичев В.И., Навроцкий В.В.* Генерация внутренних волн и вертикальная структура температуры вблизи границы шельфа // *ДАН СССР.* 1987. Т. 249. № 1. С. 216–220.

## Frequency Dependence of Sound Intensity Fluctuations in Shallow Sea

A. N. Rutenko

Experimentally measured intensity fluctuations are discussed for 315-, 3200-, 3700-, and 320-, 1000-Hz CW sound signals propagating along two fixed paths crossing the shelf of the Sea of Japan, 22 and 18 km in length. It is shown that the estimated power spectra of sound intensity fluctuations  $\hat{G}_I(\omega)$  exhibit a point of inflection which depends on the signal frequency. At low frequencies, the spectral power of fluctuations decreases slower than  $\omega^{-1}$ , at higher frequencies it drops faster than  $\omega^{-2}$  ( $\omega$  is the sound frequency). At frequencies higher than 0.01 Hz, the spectra  $\hat{G}_I(\omega)$  flatten at levels proportional to the signal frequency and exhibit pronounced resonant peaks at the frequencies of the surface waves. The position of the inflection point is explained in terms of the measured spectrum of internal waves and vertical profile of the Brunt–Vaisala frequency.