

УДК 534.232

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННУЮ СТРУКТУРУ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ

© 2003 г. А. Н. Рутенко

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43*

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 27.03.2002 г.

Приводятся результаты исследований влияния внутренних волн с известными пространственно-временными параметрами на распространение тонального акустического сигнала с частотой 240 Гц и частотно-пространственно-временную интерференционную структуру звукового поля, создаваемого шумовым источником звука.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде экспериментальных и теоретических работ показано, что внутренние волны (ВВ) оказывают сильное влияние на распространение звука в нерегулярном мелководном волноводе, характерном для шельфовых зон приливных морей с сезонным термоклином [1–6]. Рефракция и рассеяние акустических волн на неоднородностях поля скорости звука, создаваемых ВВ, вызывают флуктуации частотно-пространственно-временных характеристик и трансформацию модовой структуры акустического поля, формируемого в водном слое такого волновода стационарным источником звука. В то же время пространственно-временные характеристики ВВ в шельфовой зоне имеют ряд важных особенностей, связанных с внутренней приливной волной (ВПВ), которая генерируется приливным течением из-за взаимодействия с рельефом дна и материковым склоном [7, 8]. ВПВ, генерируемая на кромке шельфа, распространяется в направлении к берегу уже как свободная гравитационная ВВ. Из-за взаимодействия с дном она претерпевает трансформации, сопровождающиеся генерированием более коротких внутренних волн и пакетов квазигармонических и солитоноподобных ВВ [8]. В экспериментальных работах [9–11] было показано, что распространяющиеся ВПВ на данном участке шельфа Японского моря имеют длину 10–16 км и высоту 9–20 м, а нелинейные ВВ имеют длину 60–350 м и их высота может достигать 20 м. В теоретических работах [12, 13] установлено, что рассеяние акустических волн на пространственных неоднородностях поля скорости звука, формируемых нелинейными ВВ, может привести к резонансному взаимодействию распространяющихся нормальных акустических волн и аномаль-

но большому поглощению звука на некоторой резонансной частоте. Такое явление было отмечено в экспериментах, проведенных в Желтом море [12].

В данной работе мы рассмотрим результаты натурных исследований влияния группы нелинейных ВВ с известными пространственно-временными параметрами на распространение тонального акустического сигнала с частотой 240 Гц и частотно-пространственно-временную интерференционную структуру звукового поля, создаваемого шумовым источником звука. Измерения были проведены в октябре 2001 г. на шельфе Японского моря.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

На рис. 1 показана карта района исследований с указанием точек постановки измерительных средств и трассы, на которой проводились измерения. Излучение тонального с частотой 240 Гц и шумового сигналов производилось с помощью излучателя пьезокерамического типа, стационарно установленного на глубине 36 м вблизи обрывистого берега (точка т.1) [14]. На рис. 1 видно, что примерно в 3.5 км от точки т.1 были установлены в форме треугольника со сторонами 160, 210 и 230 метров три радиогидроакустических буя с донными гидрофонами и распределенными датчиками температуры, обеспечивающими измерения вариаций средней температуры перекрываемых ими 30-метровых слоев воды. Синхронный прием радиотелеметрических сигналов осуществлялся на м. Шульца (Морская экспедиционная база ТОИ ДВО РАН). Такая постановка измерительных средств в море впервые позволила количественно исследовать влияние ВВ с известными

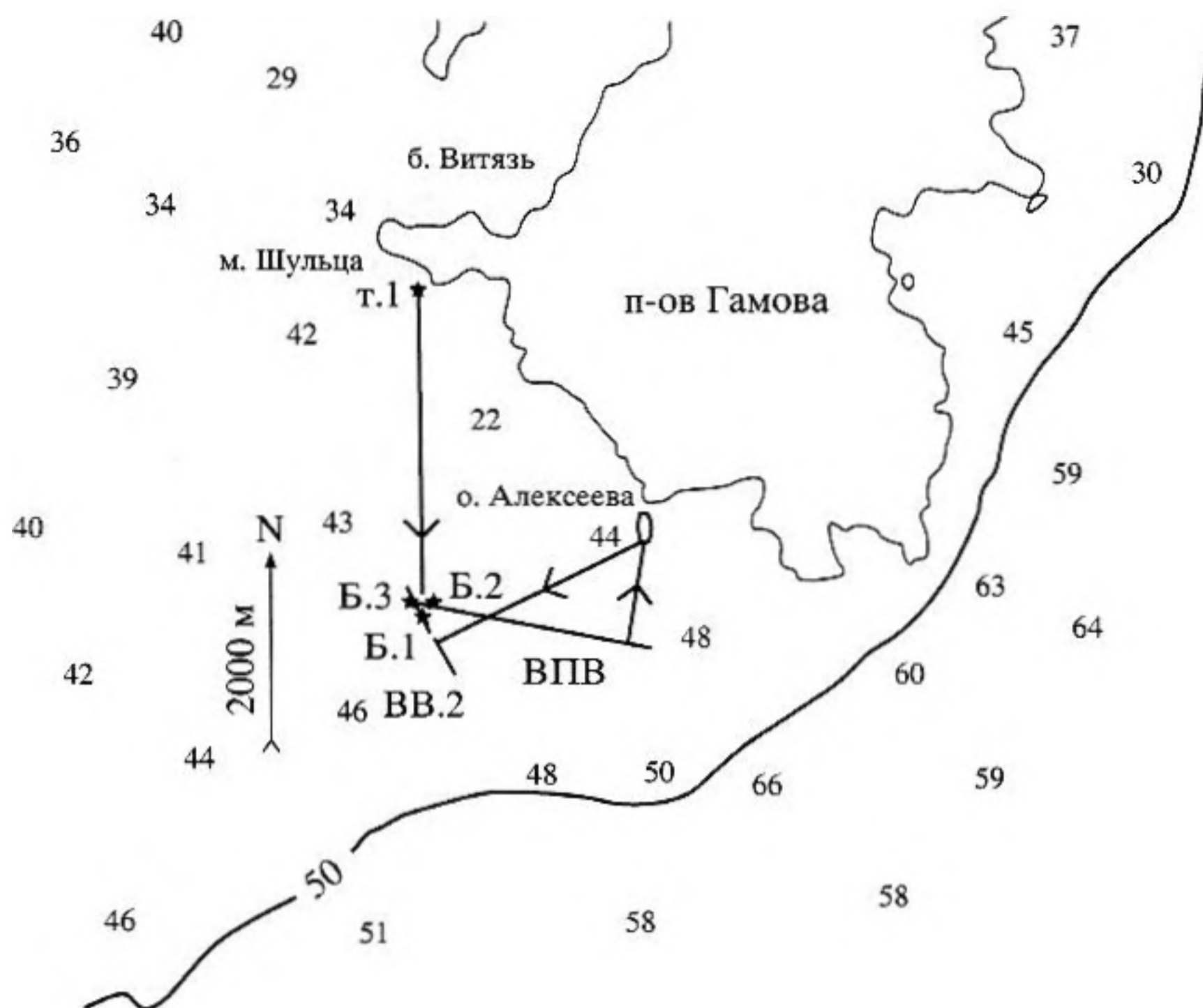


Рис. 1. Карта района с указанием точек постановки измерительных средств, акустической трассы, а также гребней и направлений распространения внутренней приливной волны (ВПВ) и группы коротких нелинейных внутренних волн (ВВ.2), зарегистрированных во время акустического эксперимента. Обозначения: Б.1, Б.2, Б.3 – автономные радиогидроакустические буи с распределенными датчиками температуры; т.1 – точка излучения акустических сигналов; стрела показывает направление на север, а ее длина соответствует расстоянию 2 км.

пространственно-временными параметрами на частотно-пространственно-временную интерференционную структуру акустического поля в шельфовой зоне.

В данном районе наблюдается неправильный полусуточный прилив с высотой до 30 см, но в то же время заметную роль в смещениях морской поверхности играют сгонно-нагонные явления, связанные с ветровыми течениями и нелинейными поверхностными волнами. Штормовой ветер южного и юго-восточного направления может вызвать в данном районе подъем уровня моря на величину до 50 см. При этом из мелководной части шельфа вытесняется сезонный термоклин и водный слой становится практически однородным по температуре. Измерения вертикального профиля температуры воды показали, что во время проведения акустико-гидрофизических измерений на данной акватории температура воды у поверхности была равна 14.6°C , а на глубине 42 м 12.2°C . После 30-часового воздействия на море ветра северо-западного направления (штормовые волны с барашками), прекратившегося вечером 17 октября, ночью 18 октября мы наблюдали относительно кратковременное (на 10 часов) затекание на полигон холодной воды. Известно [15], что это явление сопровождается интенсивными нелинейными ВВ. Таким образом, представлен-

ные ниже результаты акустико-гидрофизических измерений дают уникальную возможность исследовать параметры ВВ, генерируемых разрушенной ВПВ, и их влияние на распространение звука вдоль стационарной трассы протяженностью 3.5 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИКО-ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены спектры электрического напряжения на излучателе, формируемого с помощью прецизионного синусоидального (ТОН-240 Гц) и шумового генераторов, и соответствующего данному излучению акустического поля, измеренного возле дна гидрофоном радиогидроакустического буя в точке Б.1 (см. карту на рис. 1). Данный рисунок иллюстрирует частотную интерференционную структуру акустического поля, формируемого широкополосным шумовым сигналом в волноводе с практически однородным по температуре слоем воды.

На рис. 3 приведены осциллограммы разрушающейся ВПВ. При этом происходит затекание холодной придонной воды и формирование нелинейных ВВ. Напомним, что распределенный датчик температуры измеряет вариации средней

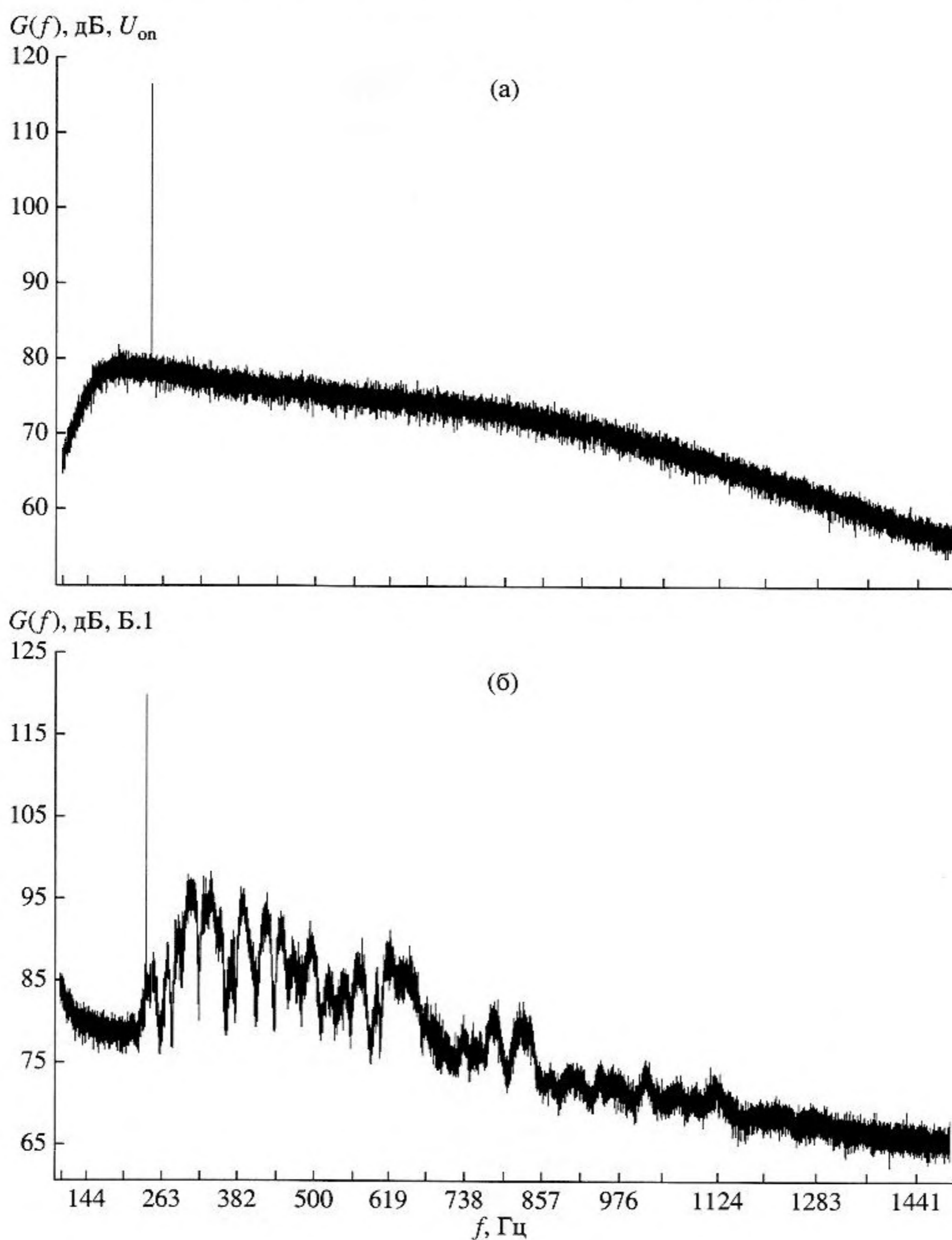


Рис. 2. Спектр $G(f)$ электрического напряжения U_{on} на излучателе, формируемого с помощью синусоидального (ТОН-240 Гц) (а) и шумового генераторов и $G(f)$ акустического поля, синхронно измеренного гидрофоном радиогидроакустического буя в точке Б.1 (см. рис. 1) (б).

температуры перекрываемого им слоя воды, и поэтому график $\eta(t)$ несет информацию об амплитуде и периоде распространяющихся ВВ. Измерения $\eta(t)$ проводились синхронно в трех точках, и поэтому по их графикам мы можем оценить направление и фазовую скорость распространения ВПВ и отдельных, наиболее выраженных, ВВ. Видно, что ВВ формируют распространяющиеся пространственные образования из холодной воды высотой до 6 метров, с острыми вершинами и относительно широкими основаниями. Анализ гра-

фиков, представленных на рис. 3а, показал, что ВПВ и нелинейная внутренняя волна ВВ.1 имели фронт и направление распространения, показанные на рис. 1 (ВПВ). Фазовые скорости их движения были соответственно равны: $V_{ВП} = 0.42$ м/с, $V_{ВВ.1} = 0.4$ м/с. На рис. 1 видно, что эти волны распространялись примерно с юга на север, и это соответствует модели генерирования ВПВ на кромке шельфа. Направление распространения ВВ.2 ($V_{ВВ.2} = 0.23$ м/с) позволяет нам предположить, что эта группа нелинейных ВВ

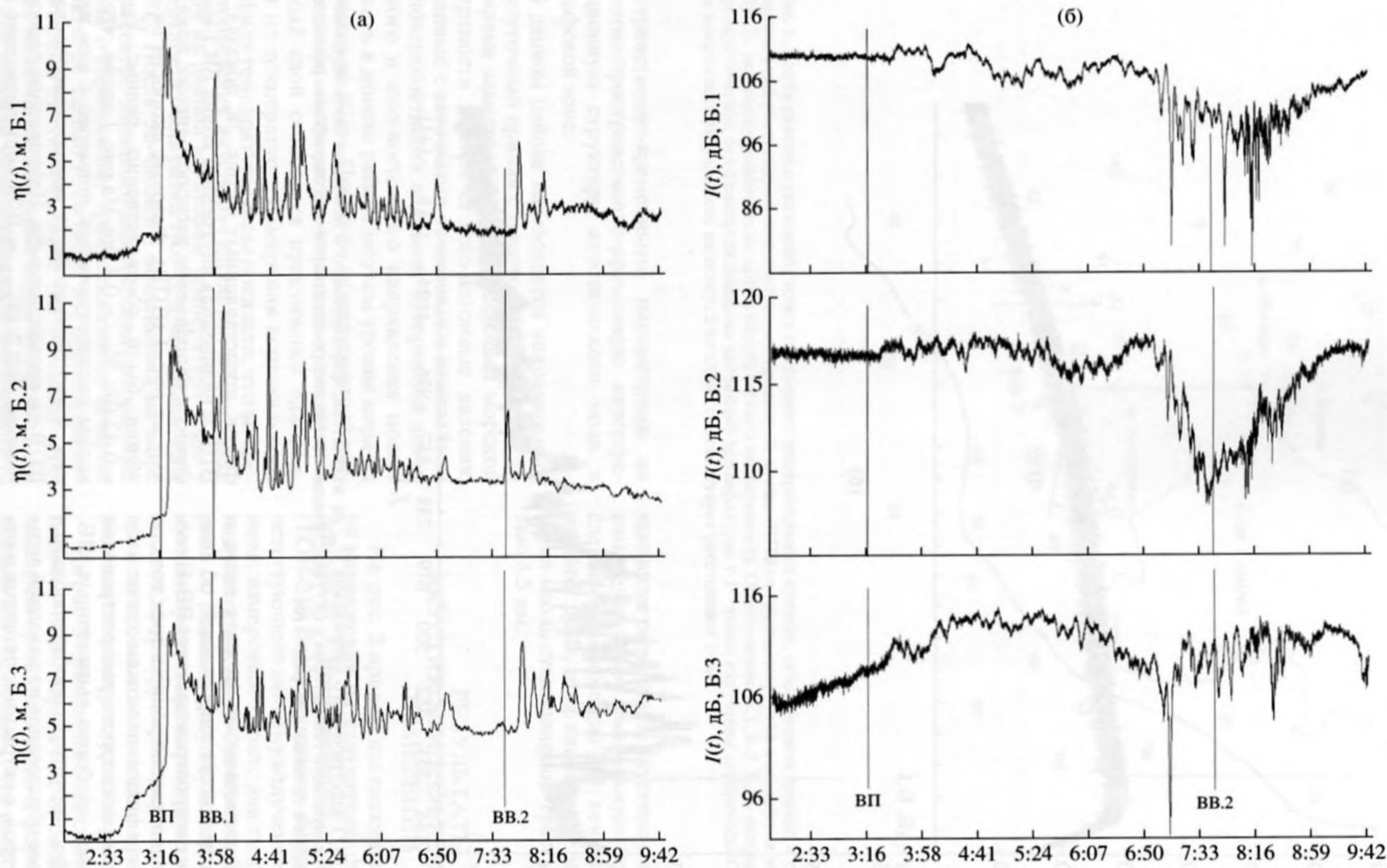


Рис. 3. Профили внутренних волн $\eta(t)$ (а) и графики интенсивности $I(t)$ (б) акустического поля, генерируемого в точке т.1 тональным сигналом с частотой 240 Гц, синхронно измеренные в трех пространственно разнесенных точках с помощью радиогидроакустических буев (см. рис. 1) ночью 18 октября 2001 г.

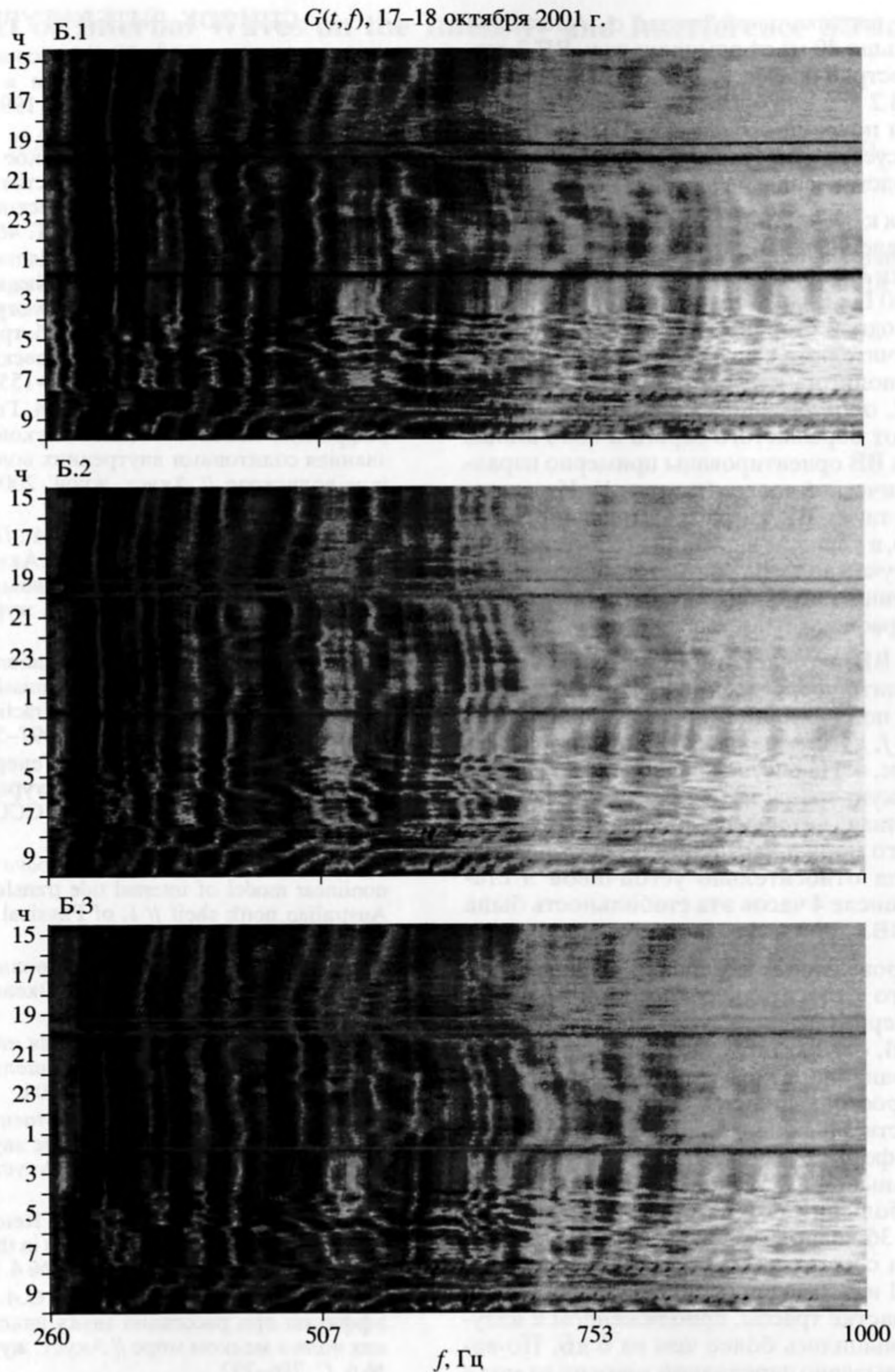


Рис. 4. Сонограммы спектров $G(f, t)$ шумового акустического поля, генерируемого в т.1 и синхронно измеренного в трех пространственно разнесенных точках (см. рис. 1).

образовалась из-за отражения ВПВ от обрывистого берега о. Алексеева. На рис. 1 показаны траектории распространения ВПВ и ВВ.2, соответствующей отражению ВПВ от о. Алексеева. Если

бы до отражения ВПВ распространялась со средней фазовой скоростью $V_{ВП} = 0.4$ м/с, то она бы подошла к о. Алексеева через 41 мин (см. рис. 1). В результате разрушений и отражения ВПВ от

практически вертикальной стены о. Алексеева (глубина больше 40 м) сформировалась ВВ.2, которая распространялась с $V_{ВВ.2} = 0.23$ м/с. Следовательно, ВВ.2 должна была бы подойти к точке Б.2 через 4 ч после прохождения ВПВ, что примерно согласуется с результатами натурных измерений, представленными на рис. 3а (4 ч 20 мин).

Обратимся к результатам акустических измерений, представленным на рис. 3б в виде графиков интенсивности $I(t)$ тонального акустического поля с частотой 240 Гц. Видно, что эффекты от ВВ максимальны, с одной стороны, в период их приближения к излучателю, а с другой стороны именно в это время на полигоне распространялись ВВ, в том числе и ВВ.2, образовавшиеся в результате отражений ВПВ от обрывистого берега п-ова Гамова. Гребни таких ВВ ориентированы примерно параллельно акустической трассе (см. рис. 1). Известно, что влияние таких ВВ на распространение звука максимально, а периоды вариаций его интенсивности в этом случае должны соответствовать периодам ВВ. Именно такую картину мы и наблюдаем на рис. 3б в графиках $I(t)$ после 7 часов.

Влияние ВВ на частотно-пространственно-временную интерференционную структуру акустического поля иллюстрируют сонограммы спектров $G(f, t)$ шумовых сигналов, представленные на рис. 4. На рисунке видно, что до выхода на акустическую трассу ВПВ и коротких ВВ частотно-временная интерференционная структура акустического поля в частотном диапазоне 260–1000 Гц была относительно устойчивой и стабильной, но после 4 часов эта стабильность была разрушена ВВ.

Анализ проведенных измерений позволяет утверждать, что относительно короткие нелинейные ВВ, генерируемые разрушающейся на мелководье ВПВ, оказывают существенное влияние на распространение звука в шельфовой зоне. Рассеяние распространяющихся акустических волн на пространственных неоднородностях поля скорости звука, формируемых ВВ в водном слое, вызывает сильные флуктуации их параметров и приводит к большим потерям при распространении. На рис. 3б видно, что интенсивности акустического поля с частотой 240 Гц (см. графики $I(t)$ для точек Б.1 и Б.2) во время прохождения коротких ВВ на участке трассы, приближенном к излучателю, уменьшились более чем на 6 дБ. По-видимому, это вызвано перекачкой энергии из мод с малыми номерами в моды более высокого порядка [12, 13], которые распространяются с большими потерями из-за их поглощения дном.

Автор выражает благодарность С.В. Борису, А.В. Гриценко и Е.А. Масленникову за участие в натурном эксперименте. Работы выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 00-05-64844).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tielbuerger D., Funette 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.
2. Рутенко А.Н. Экспериментальное исследование влияния внутренних волн на частотную интерференционную структуру акустического поля в мелком море // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 2. С. 259–263.
3. Рутенко А.Н. Влияние внутренних волн на интерференционную и модовую структуры низкочастотного поля в мелком море // Сб. трудов VIII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2000. С. 151–155.
4. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А. Горизонтальная рефракция низкочастотного звукового поля, вызванная солитонами внутренних волн в мелководном волноводе // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 6. С. 779–788.
5. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А., Петников В.Г., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Акустические эффекты, обусловленные интенсивными внутренними волнами на шельфе // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 4. С. 494–500.
6. Oba R., Finette S. Acoustic propagation through anisotropic internal wave fields: transmission loss, cross-range coherence and horizontal refraction // J. Acoust. Soc. Amer. 2002. V. 111. № 2. P. 497–504.
7. Ильичев В.И., Навроцкий В.В. Генерация внутренних волн и вертикальная структура температуры вблизи границы шельфа // ДАН СССР 1987. Т. 294. № 1. С. 216–220.
8. Holloway P.E., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian north shelf // J. of Physical Oceanography. 1997. V. 27. P. 871–896.
9. Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 5. С. 744–751.
10. Серебряный А.Н. Долгоживущая инверсия температуры и внутренние волны на шельфе // Океанология. 1995. Т. 35. № 4. С. 497–504.
11. Бондарь Л.Ф., Бугаева Л.К., Рутенко А.Н. Влияние прилива на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 5. С. 613–623.
12. 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. 1991. V. 90. № 4. P. 2042–2054.
13. Кацнельсон Б.Г., Переселков С.А. Резонансные эффекты при рассеянии звука пакетами внутренних волн в мелком море // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 6. С. 786–792.
14. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография динамических процессов водной среды в шельфовой зоне Японского моря // ДАН СССР. 2001. Т. 381. № 2. С. 243–246.
15. Рутенко А.Н. Экспериментальное исследование генерации придонной турбулентности внутренними волнами // Морской гидрофизический журнал. 1989. № 3. С. 58–61.

Effect of Internal Waves on the Intensity and Interference Structure of the Sound Field in a Shelf Zone

A. N. Rutenko

*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Baltiiskaya ul. 43, Vladivostok, 690041 Russia
e-mail: rutenko@poi.dvo.ru*

Experimental data obtained by studying the effect of internal waves with the known space-time parameters on the propagation of a 240-Hz tone signal and on the space-time interference structure of the sound field generated by a noise-like sound source are presented.