АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 5, с. 662–672

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.232

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ПОТЕРИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗВУКА НА ШЕЛЬФЕ

© 2010 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 12.10.09 г.

Обсуждаются результаты исследований влияния внутренних волн на потери звука при распространении вдоль стационарных трас на шельфах Японского и Охотского морей. Измерения проводились с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы "Моллюск-07" и автономных излучателей электромагнитного типа, генерирующих тональный акустический сигнал ТОН-320 Гц и частотно-модулированный сигнал – ЧМ_290–330 Гц. Установлено, что потери звука на частотах 290–330 Гц, обусловленные внутренними волнами, не превышают 5 дБ. В тоже время относительно редкие, но характерные для шельфа пакеты интенсивных нелинейных внутренних волн, могут увеличивать потери до 15 дБ.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании вариаций интенсивности тональных акустических сигналов, распространявшихся вдоль стационарных акустических трасс и измеренных с помощью гидрофонов вертикальных акустико-гидрофизических измерительных систем типа "Моллюск" [1, 2], было замечено, что в ряде случаев наблюдаются синхронные вариации на всех 8 гидрофонах, практически перекрывающих всю толщу воды [3, 4]. По-видимому, это свидетельствует об изменениях потерь из-за взаимодействия распространяющегося звука с неоднородностями поля скорости звука, вызываемыми гидродинамическими процессами, характерными для шельфовых зон, и прежде всего внутренними волнами (ВВ). Изучению этого явления посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ. В работе [5], по-видимому, впервые было предложено объяснение аномально высоких значений потерь, которые испытывает звук взрывных источников при распространении в шельфовой зоне Желтого моря. Объяснение основано на возможности резонансного взаимодействия мод акустического поля на неоднородностях поля скорости звука, формируемых группой внутренних солитонов. Это взаимодействие приводит к перекачке энергии из низших нормальных мод в моды более высоких номеров, которые из-за поглощения в дне распространяются с большими потерями. В работе [6] с помощью численного моделирования этот механизм был проверен на группе внутренних солитонов с классическими параметрами. Результаты моделирования показали, что дополнительные потери в ограниченном диапазоне частот могут возникать из-за рассеяния акустических волн на пакетах нелинейных ВВ. При этом взаимодействие максимально при выполнении условий резонанса $k_{BB} = k_n - k_m$, где k_{BB} – волновое число ВВ, приводящее к интенсивному взаимодействию акустических мод с волновыми числами k_n и k_m.

В настоящее время, в связи с активным освоением углеводородных месторождений континентальных шельфов особую актуальность получили задачи предсказания уровней антропогенных шумов, которые может инициировать производственная деятельность людей в районах постоянного или сезонного проживания морских животных. Возможности теоретических моделей предсказания потерь при распространении звука от "точки" будущего индустриального объекта до района обитания морских животных, на которых индустриальные шумы могут оказать воздействие, весьма ограничены, особенно на низких частотах из-за сильного влияния дна. Получение знаний о потерях, которые будет испытывать звук на разных частотах при распространении вдоль заданного направления, требует организации специальных измерений по приему и излучению в определенных точках стационарной трассы сигналов с параметрами, контролируемыми вблизи излучателя [7]. Во время проведения таких измерений трассу могут пересекать ВВ и вызвать на некоторых частотах аномальные значения потерь. Поэтому актуальны исследования влияния ВВ на потери звука, распространяющегося на шельфе, которым посвящена данная работа.

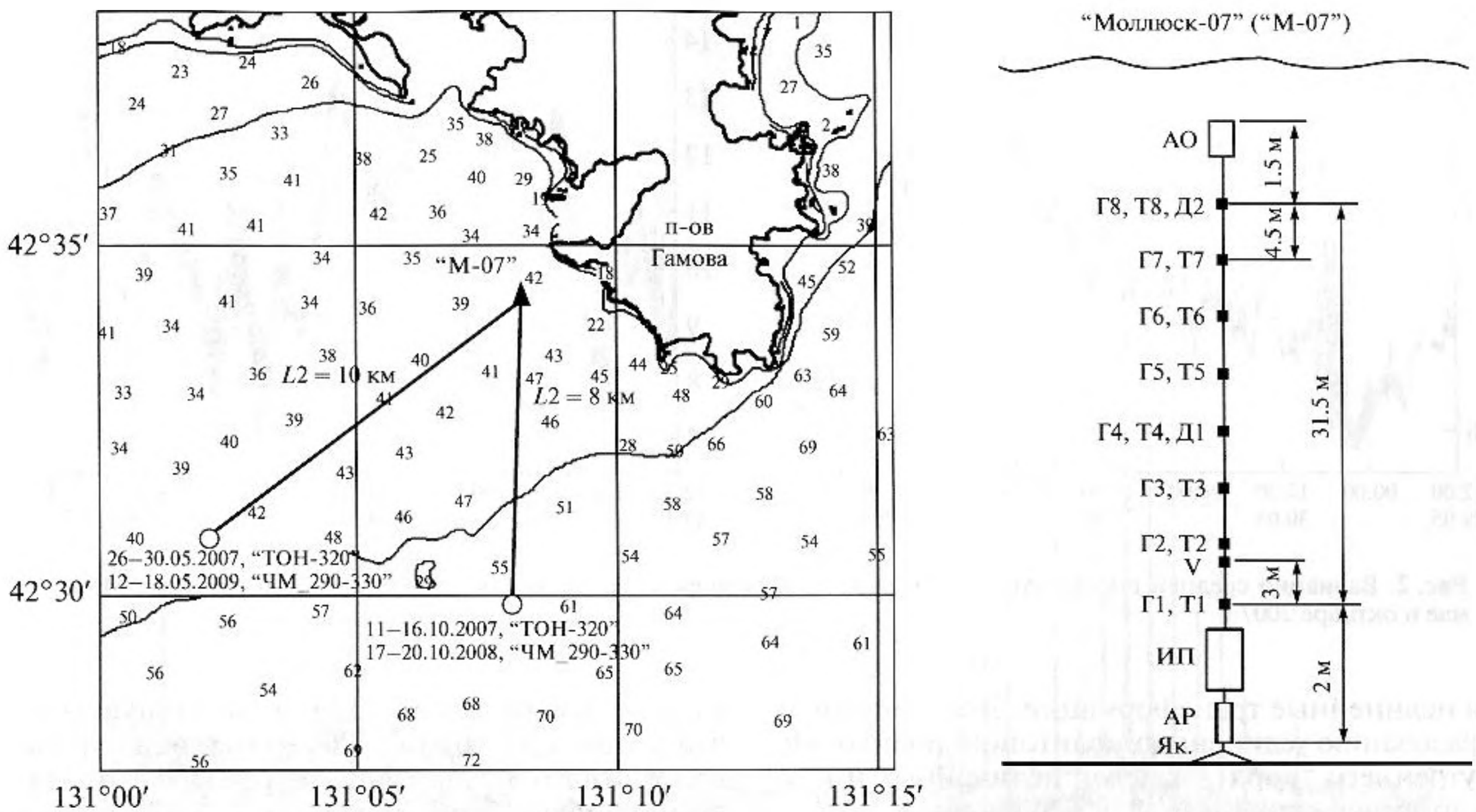

Рис. 1. Карта района исследований с указанием точек постановок автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы “Моллюск-07”, автономных излучателей “ТОН-320”, “ЧМ_290–330” и стационарных акустических трасс L1 и L2 (а). Схема постановки “М-07” в море (б). Обозначения: АО – аппаратурный отсек; Г1 – Г8 – гидрофоны; Т1 - Т8 – датчики температуры; Д1, Д2 – датчики гидростатического давления, V – преобразователь модуля скорости течения, ИП – герметичный контейнер с аккумуляторами; АР – акустический размыкатель, Як. – якорь.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕТОДИКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

На рис. 1, а показана карта полигона с указанием точек постановки измерительных средств и трасс, на которых проводились измерения. В данном районе шельфа Японского моря наблюдается неправильный полусуточный прилив высотой до 35 см, но в тоже время заметную роль в смещениях морской поверхности играют сгонно-нагонные явления, связанные с ветровыми течениями и поверхностными волнами. Известно [8–12], что в данном районе длинные ВВ, индуцируемые приливным течением, и связанные с ними более короткие ВВ, распространяются примерно вдоль акустической трассы L1 (см. рис. 1, а) с фазовой скоростью ≈0.3–0.45 м/с.

На рис. 2 приведены графики средней температуры $\overline{T}(t)$ слоя воды толщиной 31.5 м, полученные в результате усреднения значений температуры, синхронно измеренных на 8 горизонтах с помощью датчиков “М-07”. Они иллюстрируют вариации поля температуры, характерные для весенних и осенних гидрологических условий данной акватории шельфа Японского моря. Из рис. 2 видно, что весной вариации $\overline{T}(t)$ не превышают 2°С, а осенью достигают 6°С. В конце мая начинается активная фаза формирования сезонного термоклина. Однако на пространственные характеристики поля температуры все еще продолжает оказывать существенное влияние горизонтальная адвекция более теплых вод, поступающих с юга, и ветровые течения. Поэтому вариации $\overline{T}(t)$, вызываемые волной внутреннего прилива, слабо выражены и наблюдаются продолжительные тренды, заканчивающиеся резким увеличением (см. рис. 2, 30.05.2007) или уменьшением значения $\overline{T}(t)$, апвеллингом (рис. 2, 1.06.2007). Как правило, это связано с воздействием на морскую поверхность юго-восточного или северо-западного ветра.

В конце августа термоклин в этом районе может опуститься на дно, расположенном на глубине 50–40 м, что вызывает в прибрежной зоне у м. Шульца однородное распределение температуры по глубине [9, 10]. В конце сентября начинается вырождение сезонного термоклина, сопровождающееся эпизодическими апвеллингами, вызываемыми северо-западным ветром. Поэтому в это время сезонный термоклин простирается поперек всего шельфа. Соответственно длинные ВВ (рис. 2), генерируемые на кромке шельфа [14, 15], могут распространяться до берега, претерпе-

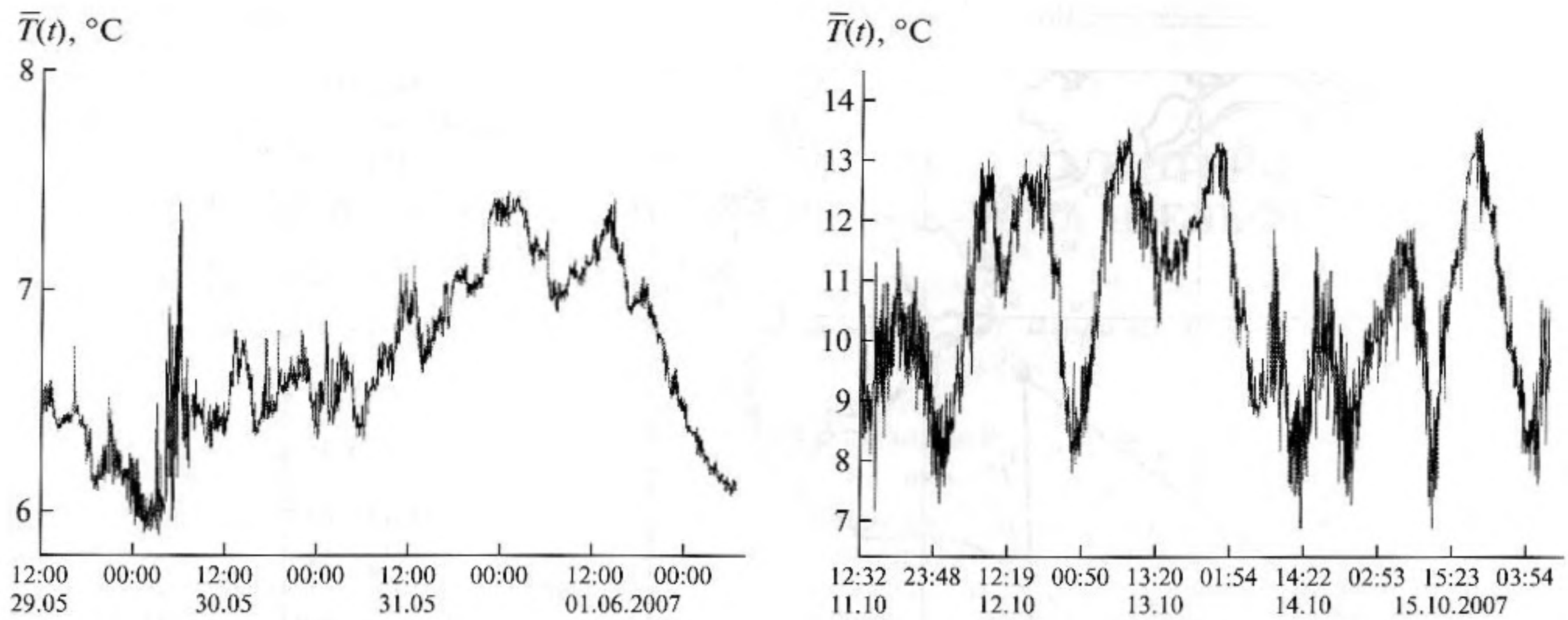

Рис. 2. Вариации средней температуры 31.5 м слоя воды, измеренные с помощью 8 датчиков температуры "М-07" в мае и октябре 2007 г.

вая нелинейные трансформации. Это приводит к образованию уединенных солитоноподобных ВВ, внутреннего "бора", пакетов нелинейных и квазигармонических ВВ [3, 8, 9, 15].

Результаты обсуждаемых в работе измерений были выполнены с помощью автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы "Моллюск-07" ("М-07"), показанной на рис. 1, б. Комплекс "М-07" специально разработан для изучения влияния неоднородностей поля скорости звука, формируемых на шельфе из сезонного термоклина ВВ, на распространение акустических сигналов [2]. Особенностью "М-07" является сочетание акустических измерений с измерениями температуры воды возле каждого гидрофона, модуля скорости течения на одном из горизонтов, контролем глубины положения верхнего и среднего гидрофонов. В указанный комплекс входит также оригинальная цифровая система накопления данных с бортовой ЭВМ. Система "М-07" обеспечивает измерения вариаций акустического давления в частотном диапазоне 10–5000 Гц с потенциальным динамическим диапазоном 96 дБ. Анализ натурных данных показал, что при усреднении за 1–5 секунд собственные шумы измерительных трактов "М-07" позволяют проводить измерения вариаций температуры воды с разрешением, равным ≈0.006°С.

Для контроля глубины в "М-07" используются два датчика гидростатического давления PDCR 1830 D фирмы GE Druck. Датчики калиброваны для глубин 0...100 м, абсолютная точность определения глубины 0.1 м. В экспедиции была проведена сравнительная калибровка гидрофонов "М-07" относительно гидрофона Г6, который имеет свидетельство о метрологической поверке. Спектральный анализ этих измерений показал, что в полосе частот 10...5000 Гц разница в уровнях измеренного 8 гидрофонами акустического поля не превышает 3 дБ. Комплекс "М-07" оснащен преобразователем скорости течения (рис. 1, б), работа которого основана на изменении геометрических размеров и сопротивления участка морской воды в зазоре датчика при прохождении через него лопасти "вертушки".

Ранее при изучении влияния ВВ волн на распространение звука мы уже применяли вертикальную акустико-гидрофизическую измерительную систему типа "Моллюск" и автономный тональный излучатель акустического сигнала ТОН-320Гц [3, 12, 13]. В работе [3] экспериментально показано, что синхронные вариации с периодом ≈40 мин интенсивности $I(t)$ акустического сигнала ТОН-320 Гц, распространяющегося через движущейся к берегу внутренний температурный фронт, могут достигать 14 дБ. Данный период вариаций интенсивности соответствует времени, за которое внутренний температурный фронт, движущейся со скоростью 0.4 м/с, проходит расстояние 960 м. Это соответствует пространственному периоду 900–1300 м интерференции первой и второй моды звука частоты 320 Гц.

При проведении подобных экспериментов на северо-восточном шельфе о. Сахалин [4] в определенные интервалы времени продолжительностью от 1 до 3 часов были так же замечены вариации $I(t)$ с периодами 6 и 25 мин, синфазные на всех 8 гидрофонах "М-07". Они перекрывали толщину воды 31.5 м при глубине моря 43 м. На основании этого был сделан вывод о возможности вариаций потерь, которые вызываются ВВ и дости-

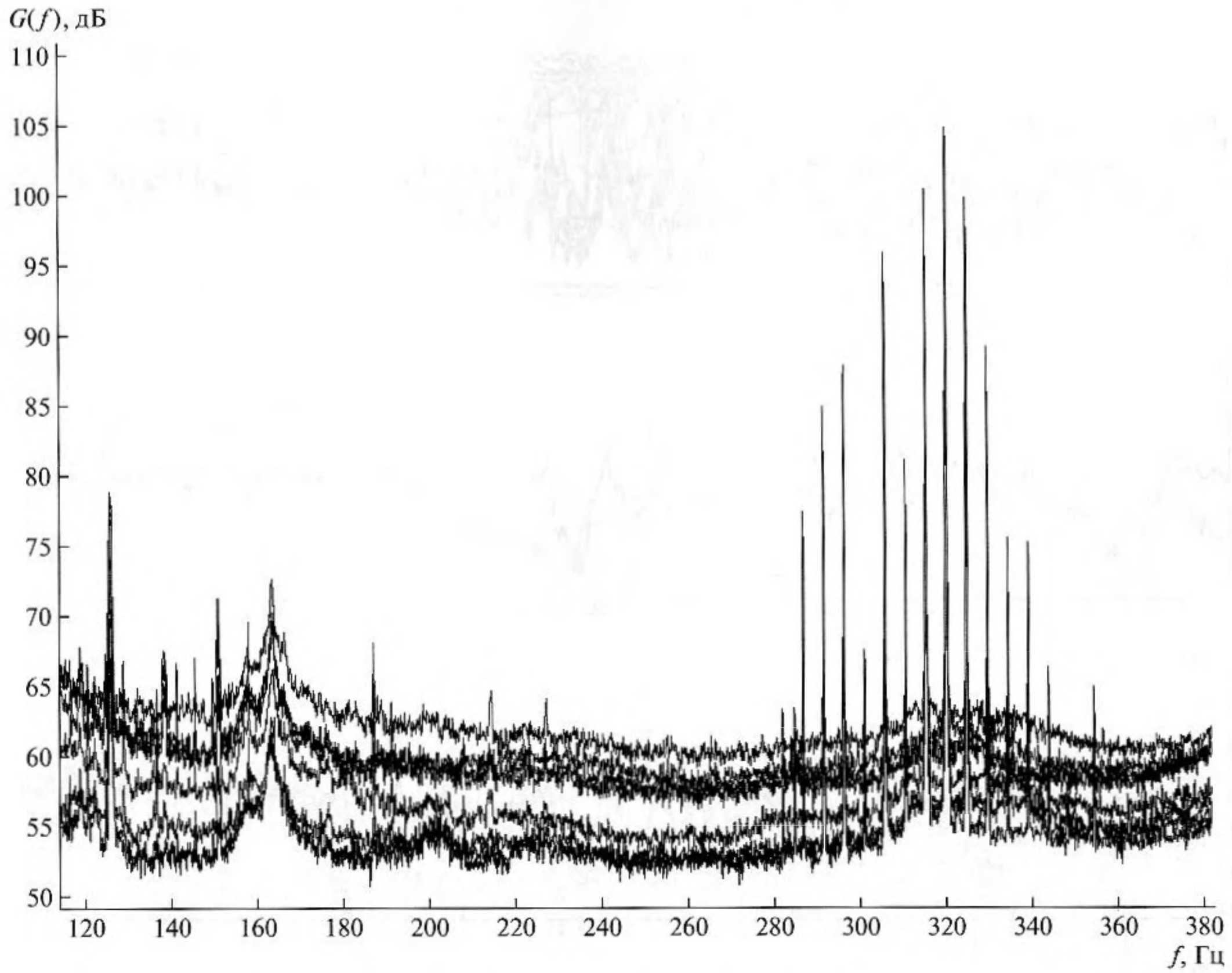

Рис. 3. Спектр акустического поля, измеренного с помощью гидрофонов "М-07" во время работы автономного излучателя "ЧМ_290–330" на трассе L2 (см. рис. 1, а)).

гают ≈12 дБ при распространении звука с частотой 320 Гц вдоль трассы протяженностью 14 км.

В 2007 г. подобные эксперименты были проведены с помощью "М-07" и автономного тонального излучателя "ТОН-320" на шельфе Японского моря на стационарных акустических трассах L1 и L2 (рис. 1, а). В 2008 и 2009 годах эти эксперименты были повторены, но уже с применением автономного излучателя, генерирующего частотно-модулированный акустический сигнал.

Поясним методику выделения вариаций потерь, которые испытывает звук при распространении. Частотно-модулированный звуковой сигнал в полосе 290–330 Гц ("ЧМ_290–330") непрерывно генерируется в течение 4 суток с помощью автономного излучателя электромагнитного типа, устанавливаемого на дне моря в заданной точке. Частота модуляции равна 5 Гц и, соответственно, в море формировалось акустическое поле, в спектре которого (см. рис. 3) хорошо выражены тональные компоненты, отстоящие друг от друга на 5 Гц. Применение вертикальной цепочки из 8 гидрофонов, перекрывающих водный слой, и акустического сигнала "ЧМ_290–330" позволяет практически исключить флуктуации интерференционной структуры, вызываемые в "точке" наблюдения пространственно-временными изменениями неоднородностей поля скорости звука на трассе. Это позволяет выявить вариации потерь из-за трансформации модовой структуры звукового поля. Зависимости, представленные на рис. 4, иллюстрируют применяемую нами данную методику.

Вариации интерференционной структуры акустического поля в "точке" приема (рис. 4, а) исключаются усреднением флуктуаций интенсивностей тональных компонент, формируемых излучателем на 8 горизонтах по 7 частотам (рис. 4, б), а затем по 8 горизонтам (рис. 4, в). При этом используются следующие алгоритмы. Из периодограмм, рассчитанных с помощью БПФ по синхронным рядам акустических данных, полученных с помощью гидрофонов измерительной системы

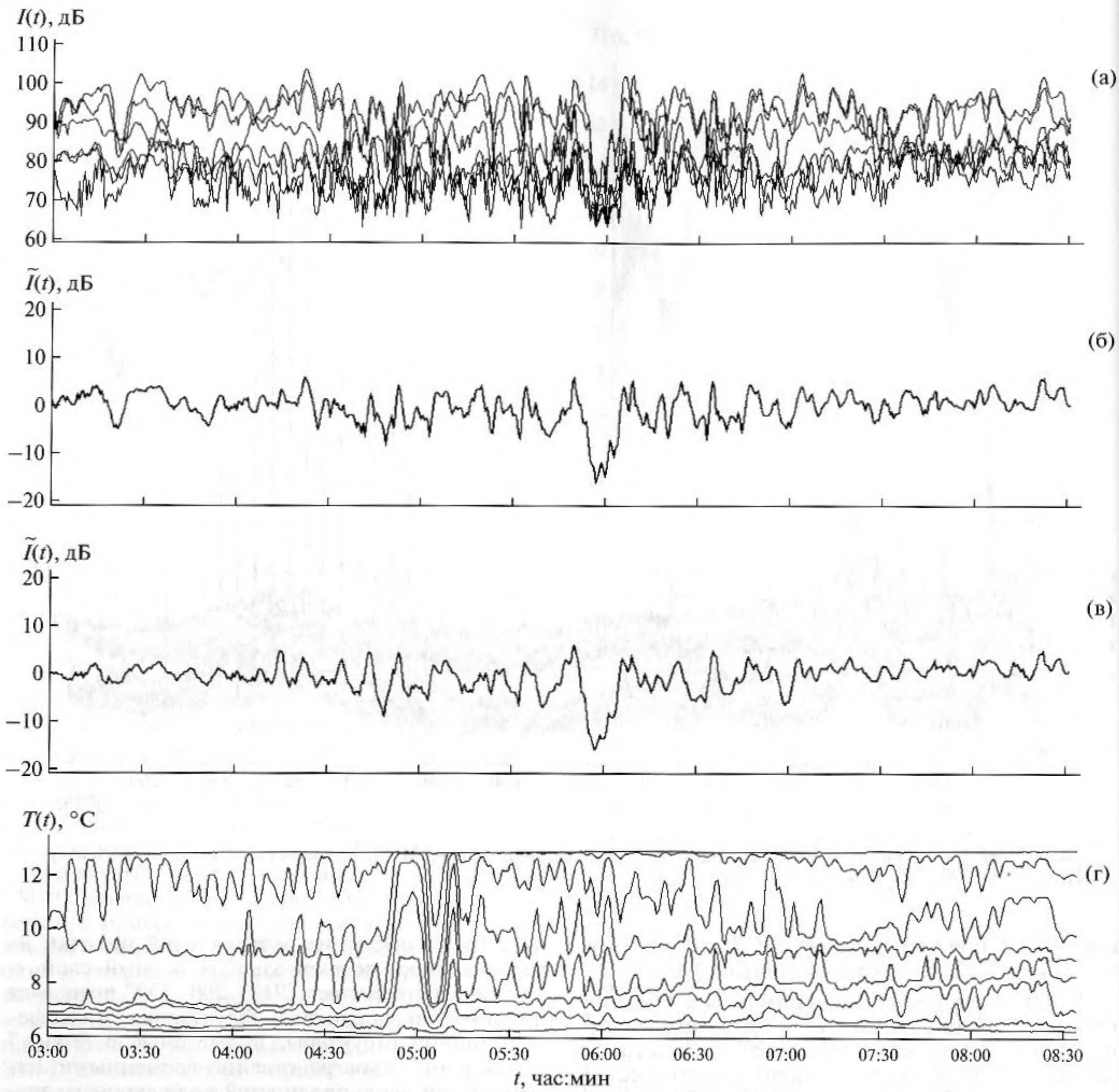

Рис. 4. Результаты анализа измерений, проведенных на шельфе о. Сахалин. Вариации интенсивности тональных компонент акустического сигнала "ЧМ_290–330", измеренных гидрофоном Г.2 "М-07" (а). Флуктуации интенсивности после усреднения по семи тональным компонентам сигнала "ЧМ_290–330" (б). Флуктуации интенсивности после дополнительного усреднения по 8 гидрофонам "М-07" (в). Вариации температуры воды на 8 горизонтах (г).

"М-07", выделяются ряды значений интенсивности $I(t)$ (спектральной плотности мощности) на частотах, соответствующих тональным компонентам излучаемого сигнала. Кривые, построенные по этим данным, показаны в дБ на рис. 4, а. Для каждого ряда данных вычисляется среднее значение и производится центрирование. Таким образом, мы получаем ряды значений флуктуаций интенсивности звука на заданных частотах. После этого производится усреднение центрированных рядов, полученных с помощью одного гидрофона на тональных компонентах излучаемого сигнала (рис. 3). Результаты такого усреднения представлены зависимостью $\tilde{I}(t)$ в дБ (рис. 4, б). После этого производится еще одно усреднение флуктуаций по 8 гидрофонам (рис. 4, в). Таким образом, мы осуществляем усреднение интерференционной структуры акустического поля, формируемого излучате-

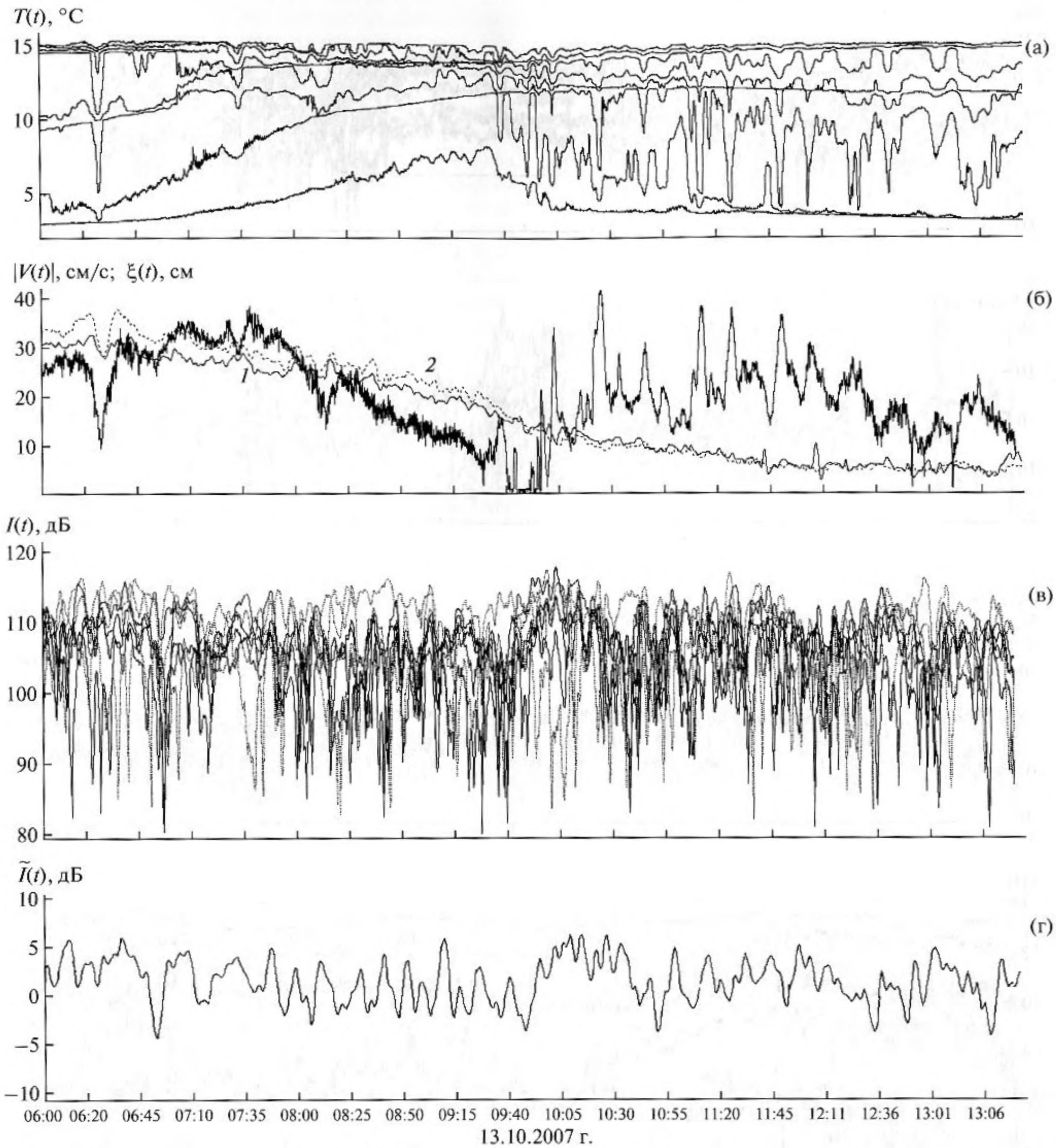

Рис. 5. Результаты анализа измерений, проведенных в октябре 2007 г. на трассе L1. Вариации температуры воды на 8 горизонтах (а). Вариации модуля скорости течения на горизонте 37 м (см. рис. 1, б)) и гидростатического давления, измеренного с помощью датчиков "М-07", расположенных на горизонтах 27 м (кривая *1*) и 9 м (кривая *2*) (б). Вариации интенсивности акустического сигнала "ТОН-320" в точке "М-07" (в). Вариации интенсивности после усреднения флуктуаций синхронно измеренных 8 гидрофонами "М-07" (г).

лем "ЧМ_290–330" в слое воды толщиной 31.5 м. В случае применения автономного тонального излучателя "ТОН-320" усреднение флуктуаций производилось только по 8 гидрофонам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ОХОТСКОГО МОРЯ

Рассмотрим результаты анализа акустических и гидрологических измерений, проведенных на

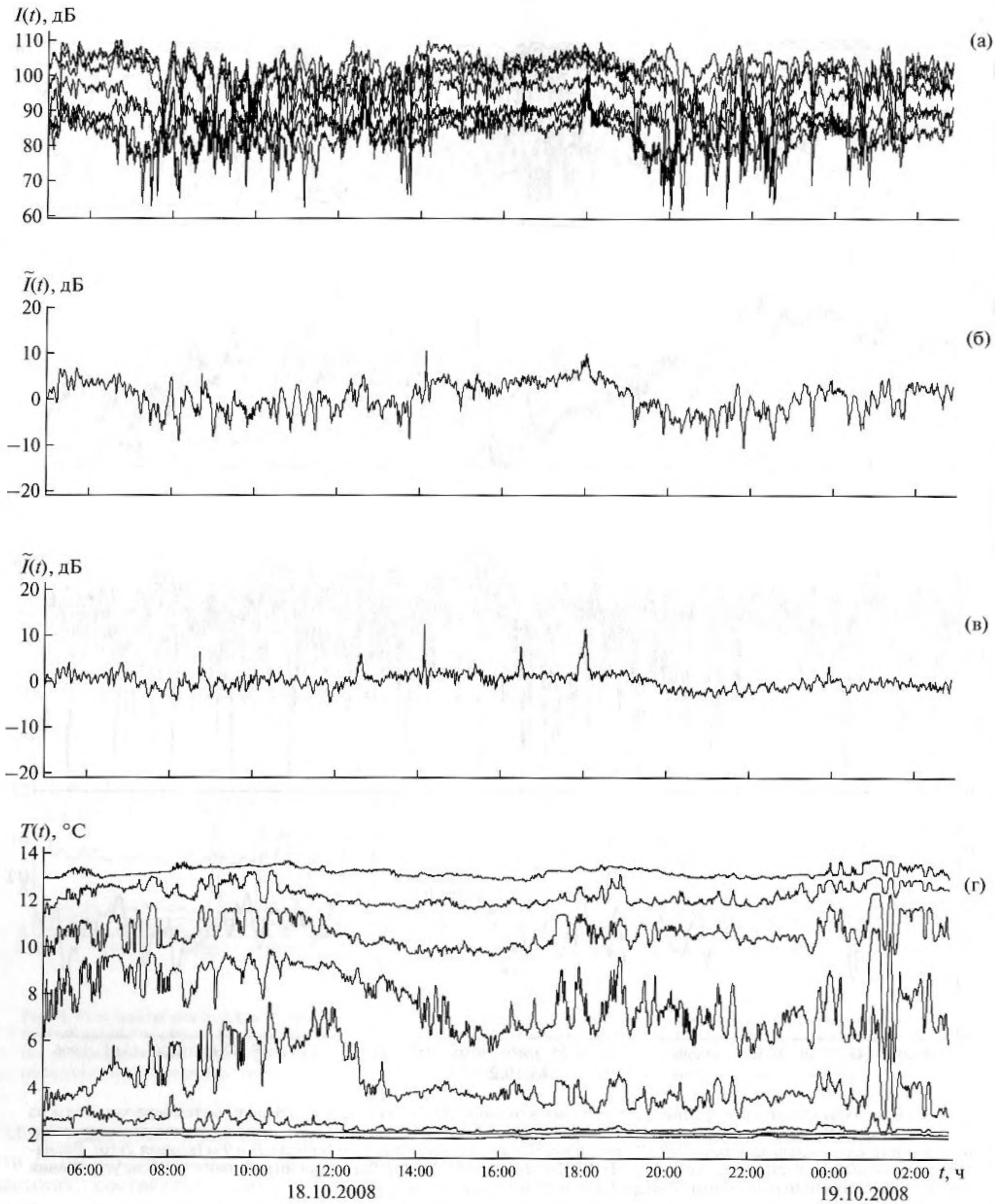

Рис. 6. Результаты анализа измерений, проведенных в октябре 2008 г. на трассе L1. Вариации интенсивности тональных компонент акустического сигнала "ЧМ_290–330", измеренные с помощью гидрофона Г2 "М-07" (а). Вариации интенсивности после усреднения флуктуаций измеренных гидрофоном Г2 по семи тональным компонентам сигнала "ЧМ_290–330" (см. рис. 3) (б). Вариации интенсивности после дополнительного усреднения флуктуаций по 8 гидрофонам "М-07" (в). Вариации температуры воды, синхронно измеренные на 8 горизонтах (г).

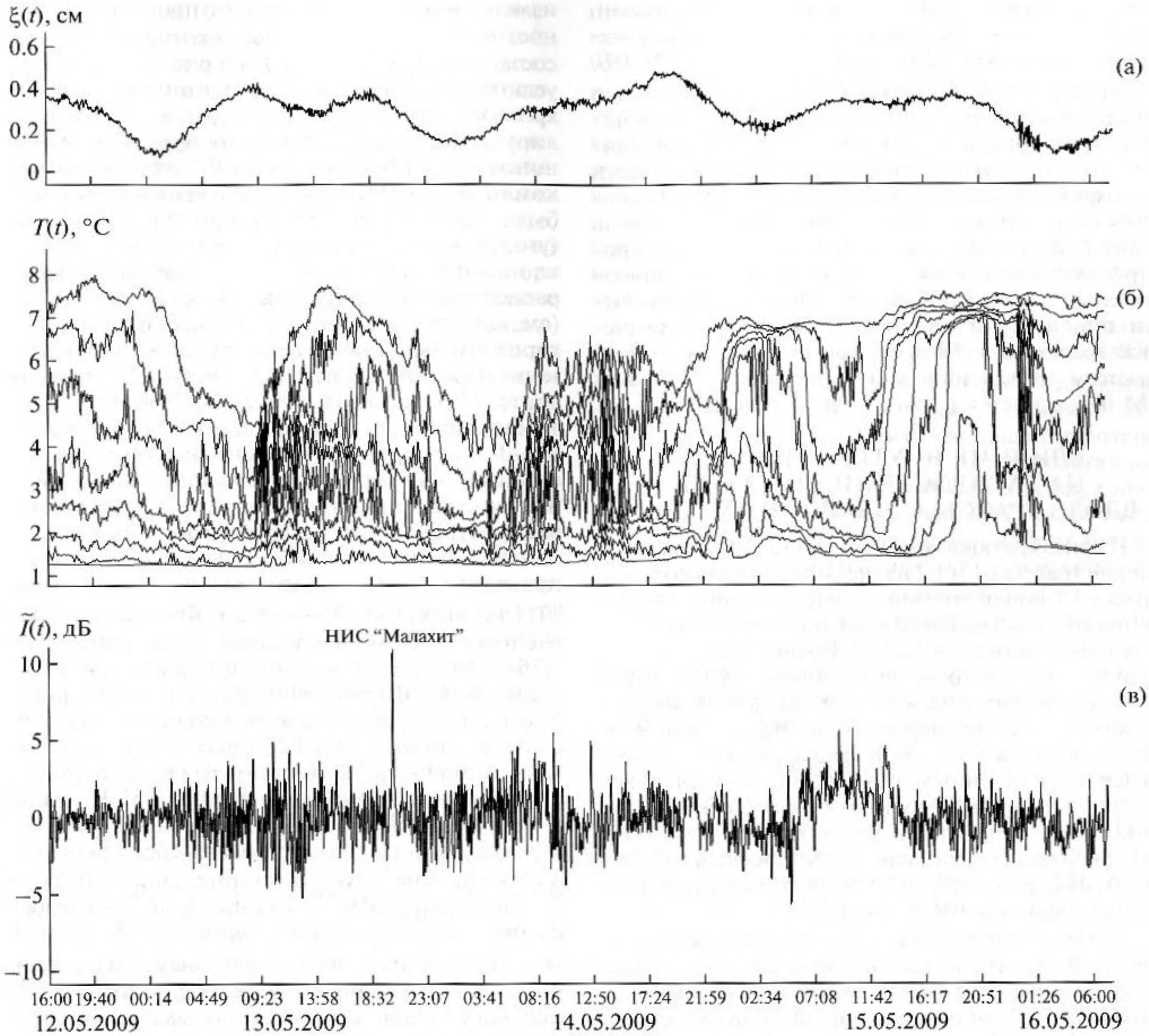

Рис. 7. Результаты измерений, проведенных в мае 2009 г. на трассе L2. Вариации гидростатического давления, измеренные с помощью датчика "М-07", расположенного на горизонте 27 м (а). Вариации температуры воды на 8 горизонтах (б). Вариации интенсивности после усреднения флуктуаций синхронно измеренных на 7 частотах 8 гидрофонами (в).

стационарной трассе в Охотском море на северо-восточном шельфе о. Сахалин южнее г. Оха. Эта трасса имела среднюю глубину ≈45 м и длину 12 км. Когда наблюдаемые с помощью гидрофонов вертикальной измерительной системы "М-07" вариации интенсивности тональных компонент звука синхронны (рис. 4, а, 06:00), то после их усреднения по 7 частотам (рис. 4, б) и по 8 гидрофонам (рис. 4, в) данная вариация сохраняется. По-видимому, она соответствует увеличению потерь звука, распространяющегося вдоль данной трассы. Можно предположить, что эти вариации потерь звука вызваны трансформациями его модового состава на неоднородностях, сформированных пакетом нелинейных ВВ, характеризующемся распределением температуры. Из рис. 4, г видно, что в 5 часов через точку постановки "М-07" прошла группа нелинейных ВВ. Орбитальное движение частиц воды в этих волнах вызвало синхронные вертикальные смещения изотерм в слое толщиной ≈26 м, и соответственно высота этих ВВ достигала ≈15 м, а период был равен ≈9 мин. Как и ожидалось, в это время не произошли изменения потерь, но через 1 час на всех зависимостях рис. 4, а, б, в хорошо выражено аномальное увеличение потерь на ≈14 дБ.

Можно предположить, что в это время акустическую трассу под каким-то углом в "особенной"

точке [3] пересекли ВВ с подобными параметрами. Для объяснения разницы во времени между наблюдением пакета ВВ в точке постановки "М-07" и регистрацией вариаций $\tilde{I}(t)$ мы можем только предположить, что данная группа ВВ имеет протяженный многокилометровый фронт. Об этом свидетельствуют наблюдаемые в данной области шельфа Охотского моря картины "сликов". По визуальным наблюдениям за картиной "сликов" в данной акватории можно сказать, что ВВ распространяются под углом к береговой линии и дополнительно сносятся быстрыми (до 2 м/с) береговыми приливными течениями. Поэтому акустическая трасса могла быть сначала пересечена данным пакетом интенсивных ВВ в точке установки "М-07", а затем и в других точках трассы.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА ВДОЛЬ ТРАССЫ С НАКЛОННЫМ ДНОМ

На рис. 1, а показаны две стационарные акустические трассы L1 и L2 на шельфе Японского моря. Трасса L1 ориентирована вдоль типового направления распространения пакетов нелинейных ВВ в данной области шельфа [11]. Из рис. 1, а видно, что глубина моря в точке постановки "М-07" равна 42 м, а в начале трассы L1, в точке постановки автономных излучателей глубина была равна 56 м. Таким образом, на данной трассе звук распространялся над наклонным дном (средний уклон равен 0.02) с сужающимся водным слоем. Поскольку на этой трассе направление распространения звука и ВВ совпадают, то согласно теоретическим работам [6, 16] именно на трассе L1 следует ожидать максимальное влияние ВВ на потери.

На рис. 5 приведены некоторые результаты измерений, проведенных в октябре 2007 г. на трассе L1 с помощью "М-07" и автономного излучателя "ТОН-320". В данном районе наблюдается неправильный полусуточный прилив. Кривые *1* и *2* (рис. 5, б), с учетом схемы постановки "М-07" в море глубиной 42 м, позволяют сделать следующие количественные оценки. Для большей наглядности изменчивости морской среды на шельфе Японского моря на одном и том же рисунке 5, б одновременно показаны вариации гидростатического давления и модуля скорости течения. С этой же целью в статье выбраны нестандартные единицы измерения гидростатического давления (сантиметры водного столба) и специальным образом выбраны средние значения гидростатического давления.

Скорость приливного течения на горизонте 37 м в 07:30 достигала 35 см/с (рис. 5, б), что вызвало отклонение цепочки датчиков измерительной системы "М-07" от вертикали на 3°. Это обусловило дополнительное заглубление датчика гидростатического давления Д2 (рис. 1, б) примерно на 5 см, а Д1 на 2 см. Таким образом, кривая *1*, показанная на рис. 4, б), практически соответствует изменению уровня моря или профилю поверхностного прилива $\xi(t)$, высота которого 13.10.2007 составила 25 см. Из рис. 5, а и рис. 5, б видно, что уединенная ВВ (время 06:20) инициировала синхронные вариации температуры во всем контролируемом слое воды. Во время прохождения вершины этой ВВ в точке "М-07" горизонтальная компонента орбитального движения частиц воды была направлена против приливного течения (угол между векторами течений не известен). Наклон цепочки датчиков "М-07" уменьшился, и ее расположение приблизилось к вертикальному (см. кривую *1* и кривую *2* на рис. 5, б), а значение горизонтальной компоненты скорости орбитального движения частиц воды на этой ВВ на горизонте 37 м достигла ≈20 см/с. По-видимому, в 10 час направление приливного течения в точке "М-07" реверсивно изменилось и, соответственно, направление горизонтальной компоненты орбитального движения частиц воды в распространяющихся по шельфу короткопериодных нелинейных ВВ стало совпадать с направлением приливного течения (зависимость $|V(t)|$ на интервале 10–13 час). Фазовая скорость распространения ВВ с такими параметрами равна 0.35–0.4 м/с. Наблюдаемые группы интенсивных нелинейных ВВ проходят трассу L1 примерно за 5–6 час, следовательно, на ней постоянно находится пакет интенсивных ВВ, связанных с трансформированной волной внутреннего прилива, генерируемой приливными течениями [14, 15]. Рассеяние и рефракция распространяющегося по трассе L1 звука на неоднородностях водной среды вызывают в точке приема флуктуации интенсивности $I(t)$ до 30 дБ сигнала ТОН-320 Гц (рис. 5, в). Зависимость на рис. 5, г иллюстрирует вариации флуктуаций $\tilde{I}(t)$, усредненные по 8 гидрофонам. Эту зависимость можно интерпретировать как относительные вариации потерь, которые испытывает звук частотой 320 Гц при распространении вдоль трассы L1.

Для большей объективности в оценке влияния ВВ на потери, а не на интерференционную структуру, в октябре 2008 г. на трассе L1 был повторен эксперимент с применением частотно-модулированного сигнала, генерируемого автономным излучателем "ЧМ_290–330". Результаты этих измерений представлены на рис. 6. Измерения, проведенные с помощью гидрологического зонда возле "М-07" и "ЧМ_290–330", показали, что гидрофон Г8 и датчик температуры Т8 находились в однородном приповерхностном слое, а Г1 и Т1 в однородном придонном слое. Это подтверждают и зависимости вариаций температуры, показанные на рис. 6, г. Во время рассматриваемого эксперимента вертикальные градиенты температуры и скорости звука в термоклине достигали 1°С/м и 3.8 $с^{-1}$, соответственно. Согласно нашей оценке, группа интенсивных нелинейных ВВ, измеренных в точке "М-07" (рис. 6, г) на временном ин-

тервале 0–2 часа 19.10.2008) вышла на акустическую трассу примерно в 20 часов 18.10.2008. Действительно, на рис. 6, а видно, что после этого времени наблюдается заметное усиление короткопериодных флуктуаций интенсивности акустического поля, сопровождающееся плавным увеличением потерь (рис. 6, в) и с последующим восстановлением среднего значения. На зависимостях вариаций температуры $T(t)$ рис. 6, г видно, что, как и на шельфе о. Сахалин (рис. 4, г), в данной группе нелинейных ВВ выделяются две характерные интенсивные волны, вызвавшие синхронные вертикальные смешения изотерм в слое толщиной более 22 м. Однако в данном случае высота этих волн не превышала 5 м, а период был равен ≈30 мин. При этом необходимо учитывать, что данный пакет ВВ распространялся над поднимающимся дном, поэтому их характеристики могли существенно изменяться по мере продвижения к берегу. Согласно данным рис. 6, а, вариации интенсивности тональных компонент сигнала "ЧМ_290–330", измеренные на одном горизонте, достигали 30 дБ. После усреднения флуктуаций интенсивности на одном гидрофоне по 7 тональным компонентам, вариации не превышали 12 дБ (рис. 6, б), а после дополнительного усреднения по 8 гидрофонам величина короткопериодных флуктуаций не превышала 3 дБ (рис. 6, в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА РАВНОГЛУБИННОЙ ТРАССЕ

Результаты акустических и гидрологических измерений, проведенных в период с 12 по 16 мая 2009 г. на трассе L2, которая была ориентирована под 45° к направлению распространения ВВ в этом районе шельфа Японского моря, представлены на рис. 7. Глубина дна вдоль трасс была примерно одинаковой. Зависимость $\xi(t)$, отвечающая вариациям гидростатического давления, зарегистрированным на горизонте 27 м датчиком "М-07", характеризует поверхностный прилив. В тоже время, на зависимости $\xi(t)$ можно выделить короткопериодные флуктуации, коррелированные с прохождением интенсивных ВВ, параметры которых можно оценить по кривым $T(t)$ рис. 7, б. Из рис. 7, б видно, что пакеты интенсивных ВВ подходили к точке "М-07" (рис. 1, а) в разные фазы поверхностного прилива. Однако они явно связаны с передним фронтом горизонтальной адвекции более теплой воды (см. зависимости на интервалах времени 9–13 час 13.05.2009 и 8–13 час 14.05.2009), или холодным фронтом – 1 час 16.05.2009. По-видимому, вопрос о том, являются ли наблюдаемые в точке "М-07" вариации вертикального распределения поля температуры результатом горизонтального переноса воды приливно-отливными течениями или же это волна внутреннего прилива, остается открытым. В работе [12] при анализе гидрофизических данных, полученных в данном районе в конце апреля 2003 г., было установлено, что подобные образования из холодной воды (зависимости $T(t)$ на интервалах 4–9 час 13.05 и 0–7 час 14.05) могут генерироваться на кромке шельфа. После этого они, как свободные гравитационные ВВ, распространяются к берегу вдоль трассы L1 с фазовой скоростью ≈0.4 м/с и пространственным масштабом ≈6.5 км. Из рис. 7, б видно, что за "холодной" фазой следует "теплая" полуволна, на которую накладываются интенсивные короткопериодные ВВ.

Из рис. 7, в видно, что до начала и во время наблюдения короткопериодных ВВ в точке "М-07" на зависимостях $\tilde{I}(t)$ хорошо выражено усиление флуктуаций с амплитудой, достигающей 5 дБ. Кроме того, можно отметить уменьшение потерь на интервале 4–12 часов 15.05, соответствующее наклонному положению термоклина между горизонтами 9 и 27 м с градиентом 0.28°С/м. До этого интервала времени и после него градиент температуры в термоклине достигал 0.8°С/м и, соответственно, стратификация приближалась к "двухслойной". Поскольку излучатель находился на дне, то при резко выраженном термоклине энергия звука при распространении концентрировалась в придонном слое и поглощалась дном. При наклонном термоклине звук распространялся во всем водном слое и, соответственно, потери из-за уменьшения влияния дна могли уменьшиться, что и наблюдается на рис. 7, в. Во время прохода возле "М-07" маломерного НИС "Малахит" уровни генерируемых им шумов значительно превысили уровни принимаемого сигнала "ЧМ_290–330", данный момент отмечен на рис. 7, в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних наблюдений ВВ на шельфах Японского и Охотского морей, распространяющихся по сезонному термоклину в направлении берега, позволил выявить характерную для них особенность. Эпизодически по термоклину распространяются "пакеты", состоящие из 3–4 интенсивных нелинейных ВВ, орбитальное движение частиц воды в которых вызывают квазипериодические (8–30 мин) вертикальные смещения термоклина до 9 м (рис. 4, г, рис. 6, г). Теория формирования на шельфе подобных "пакетов" нелинейных ВВ изложена в работе [15]. Для нас важно то, что при подобных характеристиках термоклина пакеты из нелинейных ВВ могут формировать неоднородности поля скорости звука как из холодной воды (рис. 7, б), кривые $T(t)$ на интервале 16.05), так и из теплой воды (рис. 4, г и рис. 6, г). Следовательно, они по-разному могут влиять на распространение звука в мелководном волноводе. В работе [17] установлено, что вариации интенсивности тонального сигнала зависят от частоты звука, длины акустической трассы [8] и параметров термо-

клина (сезона года) [18]. Показано, что при длине трассы 8–10 км и частоте звука 320 Гц значения короткопериодных флуктуаций достигают 30 дБ. На шельфах Японского и Охотского морей формы их спектров подобны и имеют характерную точку изменения наклона, совпадающую, примерно, с наименьшем периодом 9 мин наблюдаемых в этих районах интенсивных короткопериодных ВВ [4].

В работе [19] показано, что короткие ВВ оказывают существенное влияние на частотно-пространственно-временную интерференционную структуру акустического поля, формируемого шумовым сигналом в диапазоне 260–1000 Гц, разрушая ее относительную стабильность до выхода ВВ на акустическую трассу.

В данной работе экспериментально установлено, что неоднородности поля скорости звука, формируемые из сезонного пикноклина нелинейными ВВ высотой более 9 м и периодами 15–25 мин (рис. 4, г), могут вызвать изменения потерь на 14 дБ звука частотой 290–330 Гц, распространяющегося вдоль стационарной трассы с глубиной 42–45 м и длиной 12 км. Многочисленные измерения на стационарных акустико-гидрофизических трассах, организуемых на шельфах Охотского и Японского морей, показали, что влияние ВВ на потери не превышает 6 дБ. Только относительно редкие пакеты интенсивных нелинейных ВВ, формирующие пространственные неоднородности скорости звука из "теплой" воды, могут вызвать кратковременное увеличение потерь при распространении звука со средней частотой 310 Гц на 12–15 дБ (рис. 4).

В заключение автор выражает благодарность С.В. Борисову, В.А. Гриценко, Д.Г. Ковзелю, Р.А. Коротченко, А.А. Соловьеву и В.Г. Ущиповскому за участие в экспериментальных работах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 06-05-64113а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рутенко А.Н.* Вертикальная акустико-гидрофизическая антенна "Моллюск-97" // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 5. С. 141–144.
2. *Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система "Моллюск-07" // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 138–142.
3. *Рутенко А.Н.* Влияние движущегося по шельфу внутреннего температурного фронта на распространение звука // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 710–715.
4. *Рутенко А.Н.* Результаты экспериментальных исследований внутренних волн на шельфах Охотского и Японского морей и их влияния на распространение звука / Акустика океана // Сб. трудов XX сессии РАО. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 243–247.
5. *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.
6. *Zhou J.X., Zhang X.Z., Rogers P.H., Wang D.Z., Luo E.S.* Anomalous sound propagation in shallow water due to internal wave solitons // IEEE Proc. Oceans 93. 1993. V. 1. P. 87–92.
7. *Круглов М.В., Рутенко А.Н., Racca R.* Построение экспериментальных оценок уровней акустических шумов на границах районов кормления серых китов во время будущей индустриальной деятельности нефтедобывающих компаний на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Доклады XI школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 340–343.
8. *Борисов Н.Г., Гриценко А.В., Козицкий С.Б., Никора О.И., Рутенко А.Н., Трофимов М.Ю., Филонов А.Е.* Флуктуации гидроакустических сигналов, обусловленные внутренними волнами // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 749–755.
9. *Рутенко А.Н.* Экспериментальное исследование генерации придонной турбулентности внутренними волнами // Морской гидрофизический журнал. 1989. № 3. С. 58–61.
10. *Рутенко А.Н.* Особенности океанологических характеристик в шельфовой зоне Японского моря и их влияние на распространение низкочастотного звука // Акустика океана. М.: ГЕОС, 1998. С. 160–163.
11. *Рутенко А.Н.* Наблюдение воздействия внутренних волн на интенсивность и интерференционную структуру акустического поля на шельфе // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 4. С. 535–541.
12. *Рутенко А.Н.* Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 4. С. 527–535.
13. *Рутенко А.Н.* Особенности спектров вариаций температуры воды и интенсивностей акустических сигналов, измеренных на шельфе Японского моря // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 4. С. 531–538.
14. *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.
15. *Holloway P.E., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B.* A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian north shelf // J. Physical of Oceanography. 1997. V. 27. P. 871–896.
16. *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.
17. *Рутенко А.Н.* Исследование частотной зависимости флуктуаций интенсивности звука, распространяющегося в мелком море // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 547–552.
18. *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.
19. *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.