АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1995, том 41, № 2, с. 260 - 266

УДК 534.231;551.466

АКУСТИКО-ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ПОРОЖДАЕМЫЕ РЫБОЛОВНЫМ СУДНОМ С ДОННЫМ ТРАЛОМ

© 1995 г. Р. А. Коротченко, Ю. А. Кузнецов, А. Н. Рутенко, М. Ю. Трофимов

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

Поступила в редакцию 11.02.94 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных и численных исследований акустического поля и внутренних волн, генерируемых судном при проведении донного траления в шельфовой области моря с выраженным сезонным термоклином и придонным звуковым каналом.

Для оптимизации техники и организации рыболовного промысла в настоящее время имеется определенный дефицит информации о механизмах воздействия орудий лова на среду и объекты лова. В работе [1] предложена схема планирования, исследований и разработок, основанная на способности рыб воспринимать акустические сигналы и ориентироваться в них. Показано, что большинство промысловых видов рыб обладают повышенной чувствительностью к акустическим сигналам в диапазоне частот 200 - 800 Гц, причем их поведенческая реакция зависит от природы источников этих сигналов. Наблюдается также повышенная чувствительность рыб к сигналам инфразвуковых частот, выражающаяся в изменении кардиограммы, уменьшении латентного периода реакции и увеличении подвижности. Скалярный параметр звуковой волны – давление – воспринимается средним ухом рыбы, а с помощью боковой линии она определяет направление на источник звука, то есть с акустической точки зрения рыба подобна скалярно-векторному приемнику. Ответная реакция рыб на звуковые сигналы зависит от их звукового порога и внешнего воздействия среды: температуры, освещенности, течения и т.п. Известна повышенная чувствительность рыб к температуре воды и в случае нахождения косяка вблизи термоклина его вертикальные смещения, вызываемые внутренними волнами (ВВ), отражаются на их поведении. Эта реакция делает актуальной задачу исследования параметров ВВ, генерируемых тралом, движущимся вблизи термоклина.

В условиях реального промысла часто возникают ситуации, когда при наличии объектов лова рыба не попадает в трал, что приводит к потере промыслового времени и неоправданным расходам топлива. Для создания энергосберегающих технологий тралового лова необходимо знание и количественные оценки возмущений, вносимых судном и тралом в естественные акустико-гидрофизические поля в зоне лова и выявить основные источники, оказывающие влияние на объекты лова. Эти знания необходимы для выбора оптимальных режимов траления, осуществляемого по обычной схеме, а также при лове с применением акустических сигналов управления поведением рыбы в траловой зоне, например, сигналов дельфинов. В критических зонах траления уровень моделируемых биосигналов должен иметь превышение над фоном, соответствующее порогу восприятия объекта лова. Настоящая работа посвящена анализу натурных исследований акустических и гидрофизических эффектов, сопровождающих процесс донного траления на шельфе и попытке математического моделирования этих явлений.

Натурные измерения были проведены в сентябре 1993 г. на акустико-гидрофизическом полигоне Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (шельф Японского моря) [2]. Во время эксперимента в море была хорошо выражена сезонная стратификация, а в шельфовой области сформирован придонный звуковой канал. На рис. 1 приведены вертикальные профили температуры $T(z)$, скорости звука $C(z)$ и частоты Вяйсяля–Брента $N(z)$, используемые при математическом моделировании и примерно соответствующие условиям натурного эксперимента. Траление осуществлялось типовым донным тралом 31.7/19.3 м, буксируемым судном МРС-225 (водоизмещением 40 т) со скоростью 1 м/с. Длина вытравленного за борт ваера была равна 110 м, траловые доски (металлические полусферы) имели эквивалентную площадь 1.9 м^2 каждая и были удалены от устья трала на 54 м. Входное устье имело раскрыв 2 м по вертикали и 16 м по горизонтали. Длина конусной части мешка трала равна 27 м. Ячея траловой сети изменяется от 70 мм в устье до 50 мм в куте. Схема эксперимента показана на рис. 1, но в действительности судно осуществляло маневрирование по галсу, примерно

параллельному береговой линии, а не наезжало на цифровую кабельную акустико-гидрофизическую станцию "Бухта-93", установленную в 300 м от обрывистого берега м. Шульца. Станция обеспечила синхронное измерение в полосе частот от 10 до 500 Гц трех ортогональных компонент колебательной скорости (V_x, V_y, V_z) и давления (P) звукового поля с помощью метрологически аттестованного комбинированного приемника (КП), установленного на специальной донной платформе примерно в 1.3 м от дна. В 5 м мористей платформы на фале затопленного буя установлен распределенный датчик температуры (РДТ), охватывающий слой воды от дна до горизонта 13 м. РДТ измеряет осредненную по вертикали температуру перекрываемого им слоя воды и практически линейно преобразует смещения термоклина, вызываемые низшей модой распространяющихся ВВ, в электрический сигнал [3].

Подробное описание цифровой системы уплотнения и передачи данных, используемой в станции "Бухта-93", представлено в работе [4]. Данная модификация благодаря применению 12-разрядного АЦП обеспечивает динамический диапазон измерений, равный 72 дБ. Электрические сигналы, поступающие с первичных преобразователей, после ряда необходимых преобразований в специальный цифровой код [4], передавались по кабель-тросу на береговой пост. В обсуждаемом эксперименте были выбраны частоты дискретизации акустических сигналов 1300 Гц и гидрофизических 40 Гц. На береговом посту код демодулировался – восстанавливалась информация в аналоговой форме для визуализации и контрольной записи на магнитографе, а также производилась регенерация последовательного цифрового кода с последующим его вводом в ЭВМ. После накопления данных на диске ЭВМ они переписывались на стримерные ленты емкостью 60 Мб.

Рассмотрим результаты акустических измерений, проведенных во время траления и прохода сейнера без трала по тому же галсу и с теми же оборотами вала – 540 об/мин. На рис. 2 и 3 представлены оценки спектров мощности акустических сигналов (P, V_x, V_y, V_z) и потока акустической мощности (W), измеренных КП станции "Бухта-93", соответствующих фоновым условиям эксперимента (рис. 2, графики *1*; рис. 3а), проходу сейнера в 400 м от станции без трала (рис. 2, графики *2*; рис. 3б) и с тралом (рис. 2, графики *3*; рис. 3в). На всех графиках, соответствующих движению сейнера с частотой вращения вала, равной 540 об/мин, хорошо выражены пики мощности на частоте 27 Гц. Этот акустический сигнал связан с вращением трехлопастного винта сейнера (вальные составляющие частоты 9 Гц в нашем случае по мощности ниже лопастной более чем на 15 дБ). На рис. 3

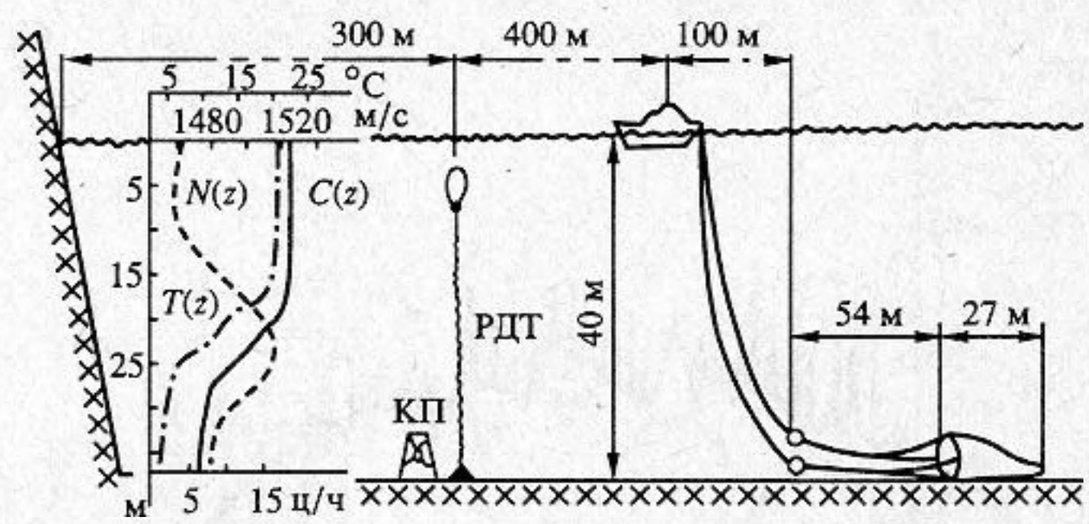

Рис. 1. Схема и условия проведения эксперимента. Обозначения: $N(z)$ – вертикальное распределение частоты Вяйсяля–Брента, $C(z)$ – скорость звука, $T(z)$ – температура воды, КП – комбинированный приемник, РДТ – распределенный датчик температуры.

показаны направления на источник этого сигнала, соответствующие проходам без трала и с тралом: в горизонтальной плоскости – угол α, а в вертикальной – θ. Оценка спектра потока акустической мощности W, представленная на рис. 3г, соответствует измерениям во время работы калибровочного излучателя акустического сигнала частоты 330 Гц, установленного на глубине 26 м и удалении 60 м от берега м. Шульца.

Известно, что работа гребного винта в кильватерной струе с периферийными неоднородностями приводит к появлению осциллирующих компонент тяги с частотами, кратными частоте вращения лопастей. Наличие осциллирующей тяги приводит к излучению звука с частотой вращения лопастей и ее гармоник. Сам винт при малых числах Маха является неэффективным излучателем тональных компонент с частотами вращения лопастей, но колебания передаются корпусу судна, а в случае буксировки трала осциллирующие силы могут вызвать колебания его оснастки и прежде всего ваеров. Если частота осциллирующих сил совпадает с низкочастотными резонансами корпуса судна или оснастки трала, то они могут излучать тональные компоненты, соответствующие частоте вращения лопастей, с существенно более высокими уровнями звукового давления, чем излучаемые непосредственно винтом, а поскольку оснастка трала перекрывает всю толщу воды до дна, то пространственная структура акустического поля у дна, создаваемая судном и тралом, может существенно отличаться от поля, генерируемого одним судном.

Проиллюстрируем это на результатах модельных расчетов. Процессы распространения звука моделировались методом широкоугольного параболического уравнения с дробно-линейной аппроксимацией Паде корня квадратного из поперечного оператора Гельмгольца, предложенная Клаербоутом. Использованная аппроксимация,

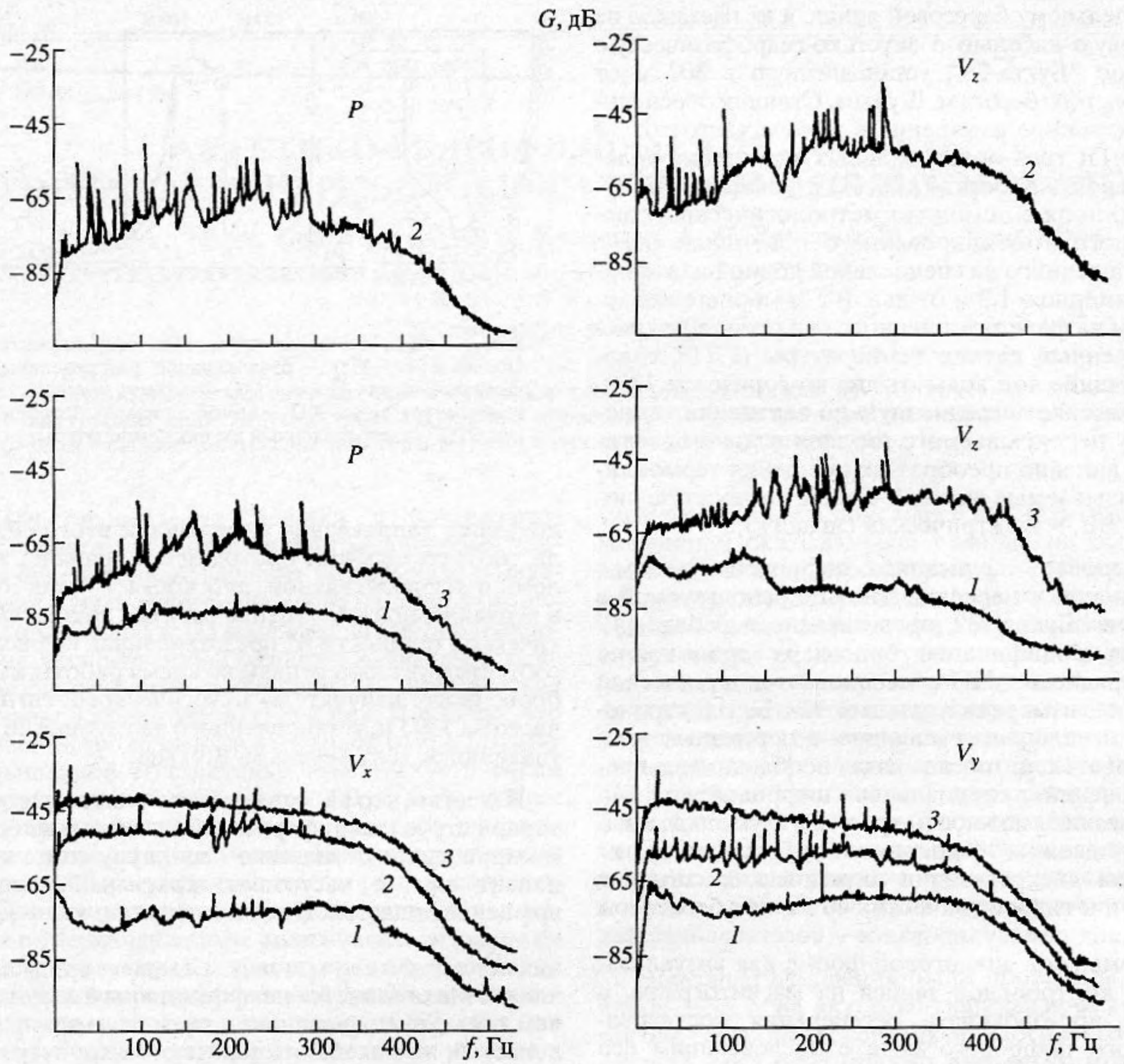

Рис. 2. Оценки спектров мощности G акустических сигналов, измеренных с помощью P-, V_z-, V_x- и V_y-датчиков комбинированного приемника, соответствующие фоновым условиям эксперимента – графики *1*, проходу сейнера без трала – графики *2* и с тралом – графики *3*.

как показывают теоретические соображения и результаты численных экспериментов Грина [5], для случая распространения звука на мелководье, когда углы распространения не слишком большие, а донные породы имеют заметный коэффициент поглощения, является наиболее оптимальной.

В качестве исходных данных для численного моделирования использовались гидрологические условия (рис. 1) и геометрия трассы, на которой проводился эксперимент. В расчетную область для распространения звука включались также слои песка, гравия и гранита с типичными для этих сред плотностями, скоростями звука и коэффициентами поглощения.

Результаты вычислений потерь на распространение для звука, излучаемого точечными источниками одинаковой интенсивности, расположенными вблизи поверхности моря и дна представлены на рис. 4.

Согласно вычислениям, уровень акустического сигнала, излучаемого с поверхности и регистрируемого в точке приема (рис. 1) P-датчиком, почти на 15 дБ превышает уровни сигналов, измеряемых V-датчиками, обладающими соответствующими диаграммами направленности. Кроме того, согласно рис. 4б, уровень сигнала, принимаемый V_x-датчиком и излучаемый точечным придонным источником, в диапазоне частот от 10 до 250 Гц почти на 20 дБ превышает уровень

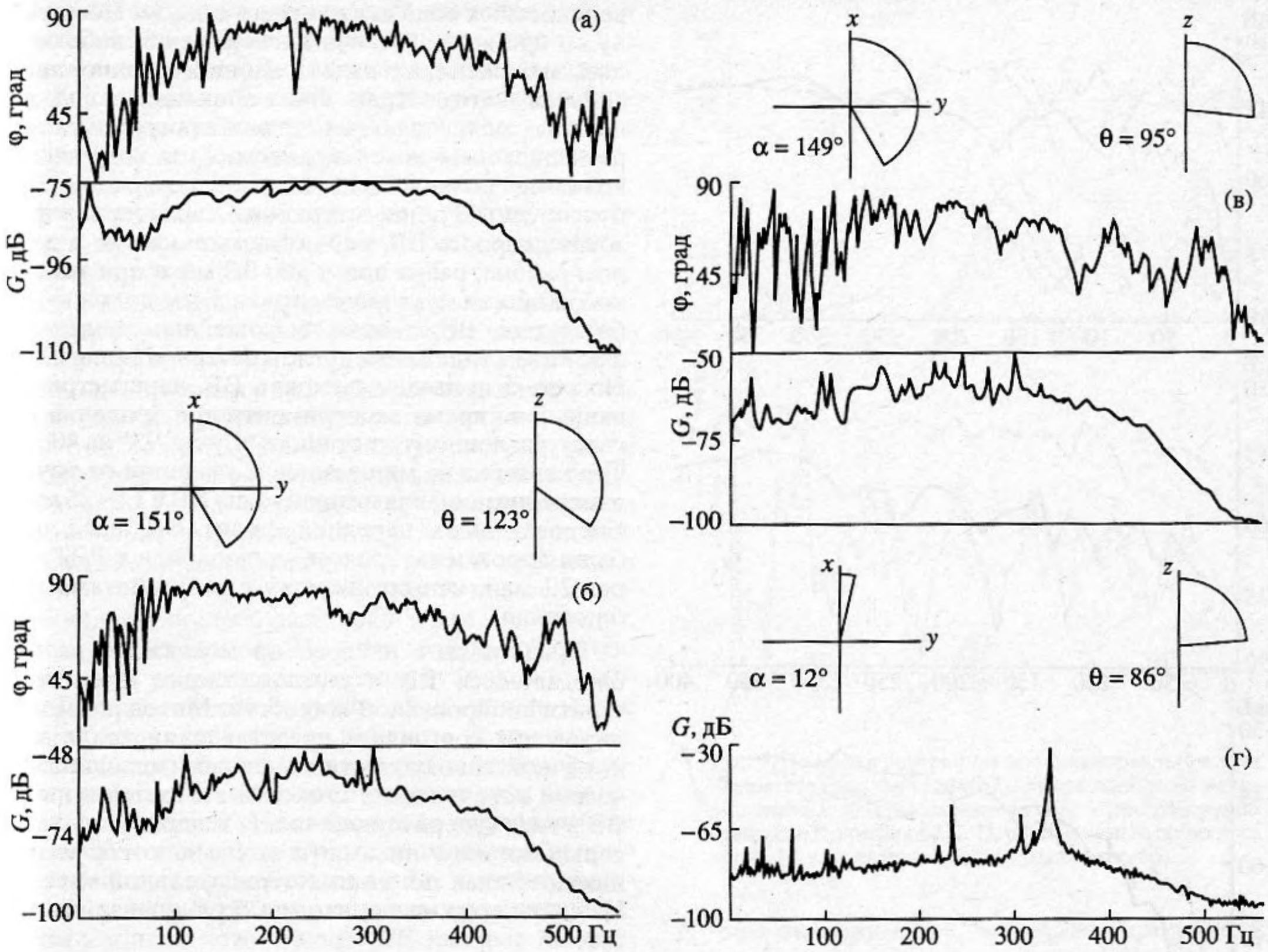

Рис. 3. Оценки спектров мощности G и фазы φ плотности потока акустической мощности W, измеренного с помощью комбинированного приемника, соответствующие фоновым условиям эксперимента (а), проходу сейнера без трала (б), с тралом (в) и при работе калибровочного излучателя (г). Углы α и θ соответствуют направлению W акустических сигналов с частотой 27 Гц (рис. 3б, 3в), 330 Гц (рис. 3г) в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

сигнала, излучаемого с поверхности моря. Для сигналов, принимаемых вертикально ориентированным V_z-датчиком, расхождение в уровнях принимаемых сигналов от поверхностного и придонного источников на частотах свыше 60 Гц не является значительным.

Вернемся к результатам натурных измерений, представленных на рис. 2. Из рисунка видно, что во время прохождения сейнера без трала мощность акустического сигнала частоты 27 Гц, измеряемого P-датчиком КП, превысила уровень фона более чем на 30 дБ, в канале V_z – на 15 дБ, V_x – на 22 дБ и в канале V_y – на 17 дБ. Из сравнения графиков спектров мощности сигналов (рис. 2), измеренных КП во время прохода сейнера с тралом (графики *3*) и без трала (графики *2*), можно заключить следующее. Спектры сигналов, измеренных P- и V_z-датчиками практически не изменились как по форме, так и по уровням мощности основных тональных сигналов, но можно отметить подъем средней мощности сигналов в области частот меньше 150 Гц в сигнале с V_z-датчика. Следовательно, акустические сигналы, генерируемые донным тралом и наблюдаемые в канале P, по уровню мощности значительно ниже шумов от сейнера. В канале V_z заметен относительный подъем средней мощности сигналов на частотах, меньших 150 Гц и очевидно связанных с тралом. Как и следовало из модели, акустические сигналы, излучаемые тралом, хорошо выражены в сигналах с V_x- и V_y-датчиков. Согласно рис. 2 (графики *3*), их спектр в частотной области до 400 Гц подобен спектру "красного" шума с наклоном – 0.03 дБ/Гц. Интересен факт значительного увеличения во время траления интенсивности сигнала частоты 27 Гц, измеренного V_x- и V_y-датчиками. Это можно пытаться объяснить с помощью результатов моделирования. Действительно, если оснастка и сам трал испытывают воздействие осциллирующей движущей силы, то, согласно рис. 4в, уровень

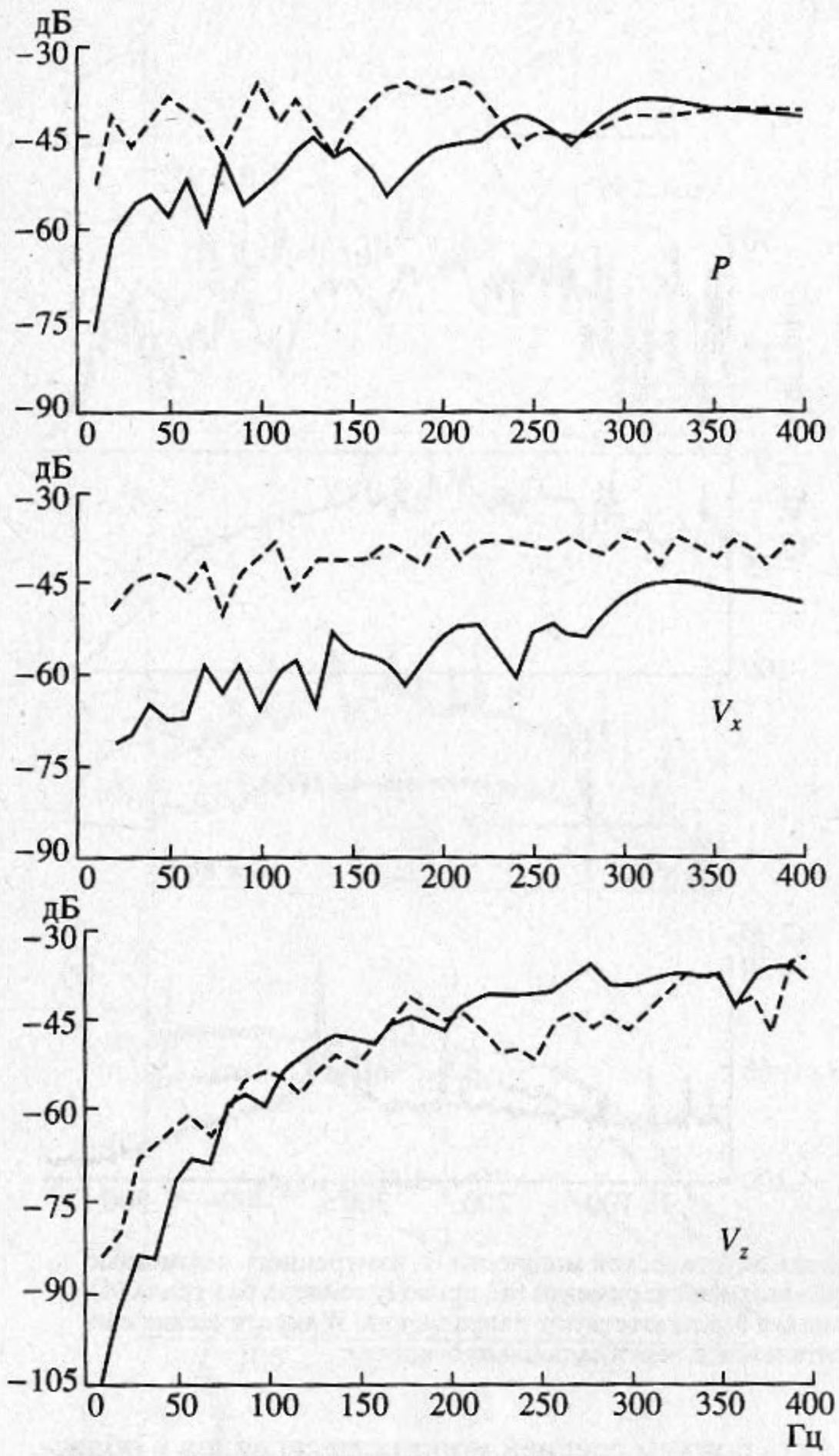

Рис. 4. Частотные и пространственные зависимости потерь на распространение акустических сигналов излучаемых точечными источниками одинаковой интенсивности: сплошная линия – глубина излучения 1 м, штриховая линия *1* – глубина излучения 39 м.

сигнала, измеренного V_x- и V_y-датчиками на частоте 27 Гц, может возрасти более чем на 15 дБ. Согласно тем же расчетам, уровень сигналов с частотами выше 250 Гц практически не зависит от глубины излучения, что согласуется с натурными измерениями – уровень тональных сигналов в этом диапазоне частот, наблюдаемых V_x- и V_y-датчиками, практически не изменился.

Перейдем к рассмотрению гидрофизических эффектов. Хорошо известно, что движущееся в стратифицированной жидкости тело возбуждает внутренние волны, механизм генерации которых во многом сходен с механизмом возбуждения поверхностных волн движущимся судном. Поскольку во время проведения эксперимента наблюдалась выраженная в виде придонного пикноклина сильная плотностная стратификация воды на шельфе, обусловленная летним прогревом и перемешиванием поверхностного слоя ветровыми волнами, можно было ожидать генерацию ВВ буксируемым донным тралом. Характерная фазовая скорость ВВ, наблюдаемых осенью в данном районе, равна примерно 0.3 м/с и при типичной скорости буксировки трала 1 м/с должны наблюдаться ВВ с ярко выраженным передним фронтом в виде клина с углом раствора 2arctg (0.3). На рис. 5 приведен профиль ВВ, зарегистрированных во время эксперимента при тралении по галсу, удаленному от станции "Бухта-93" на 400 м. Трал прошел на минимальном удалении от точки измерения профиля низшей моды ВВ в 12 ч 25 мин. Следовательно, передний фронт ВВ, если они были порождены тралом, мог подойти к РДТ через 20 мин, что согласуется с результатами наблюдения.

Представляет интерес промоделировать наблюдавшиеся ВВ в рамках теории идеальной стратифицированной жидкости. Методика моделирования состояла в представлении трала как конечной совокупности точечных гидродинамических источников и стоков и вычислении поля ВВ в виде суперпозиции полей, генерируемых отдельными источниками (и стоками, которые понимаются как источники отрицательной массы). Из сказанного видно, что мы ограничиваемся линейной теорией ВВ, кроме того, мы пользуемся приближением Буссинеска и асимптотикой дальнего поля, даваемой методом стационарной фазы. В этих приближениях поле ВВ источника постоянного расхода M_0, движущегося со скоростью U_0, дается, как известно [6], формулой

$$\eta \approx \frac{M_0 U_0}{2\pi} \int_0^t d\xi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n^2 \cos\psi W_n(z) W_n'(-h)}{k_n \sqrt{k_n \chi \xi |f_n|}} \sin \Phi_n, \quad (1)$$

где $\eta(x, y, z, t)$ – вертикальные смещения жидких частиц k_n и ω_n – волновое число и частота n-й моды, причем k_n есть корень уравнения $c_{g,n}(k_n) = \chi/\xi$, где $c_{g,n}$ – групповая скорость, h – глубина, на которой движется источник, W_n – нормированная (в приближении Буссинеска, т.е. $\int N^2 W_n^2 dz = 1$) мода, N – частота Вяйсяля–Брента,

$$\Phi_n = k_n \chi - \omega_n \xi, \ \chi = \sqrt{(U_0 \xi - x_0)^2 + y^2},$$

$$x_0 = U_0 t - x, \quad f_n = d^2 \omega_n / dk^2$$

при $k = k_n$, $\cos\psi = (U_0 \xi - x_0)/\chi$.

Необходимые для расчета по этой формуле моды, фазовые и групповые скорости, дисперсионные соотношения находились с помощью

решения задачи на собственные значения для так называемого основного уравнения по вертикали линейной теории ВВ. Эта задача решалась нами с помощью галеркинской аппроксимации собственных функций полиномами Лежандра. Как известно [7], аппроксимация глобальными функциями позволяет очень точно оценить собственные значения и тем самым фазовые и групповые скорости, которые играют важную роль в приведенной выше формуле (1).

В проведенных вычислениях было использовано три модели трала, состоящие из движущегося на глубине 38 м источника мощности 10 отн. ед., моделирующего траловые доски и следующего за ним на расстоянии 50 м источника мощности 100 отн. ед., который моделирует устье трала и движется в 1-й и 2-й моделях трала на той же глубине, а в 3-й – на 1 м выше, и расположенных за ними на различных удалениях от первого источника стоков, распределение которых показано в табл. 1. Указанные мощности источников и стоков при скорости буксировки трала 1 м/с дадут, после умножения на 2π, физическую объемную мощность источников в одном кубическом метре. Получающиеся большие числа тем не менее приемлемы, если учесть близость источников к дну. Отметим более высокое расположение стоков по сравнению с источниками во всех использованных моделях. Именно такое расположение позволило получить в рамках линейной теории внутренний бор, наблюдавшийся в эксперименте. Физическое обоснование такого распределения состоит в том, что оно моделирует вызванное сильным вихреобразованием перемешивание и поднятие нижнего более плотного слоя воды тралом.

Для расчетов использовалось распределение частоты Вяйсяля–Брента, соответствующее условиям эксперимента (рис. 1). Получающиеся при такой стратификации зависимости фазовых и групповых скоростей от длины волны показывают, что длины волн, приходящих в точку наблюдения в течение нескольких первых минут (если эта точка лежит на достаточном удалении от трассы движения), порядка сотен и более метров.

Основные результаты моделирования приведены на рис. 5 и представляют собой колебания 1-й моды на глубине 30 м в точке наблюдения, лежащей в 400 м от трассы движения (рис. 5а) и в кильватерном следе (рис. 5б). Скорость буксировки трала принималась равной 1 м/с.

Таким образом, моделирование, основанное на представлении трала гидродинамическими источниками и стоками водной массы, буксируемыми у дна в условиях стратификации, близкой к реальным условиям лова рыбы на шельфе в осенний период года, дало качественные и количественные оценки, близкие к зарегистрированным параметрам ВВ, генерируемых тралом в на-

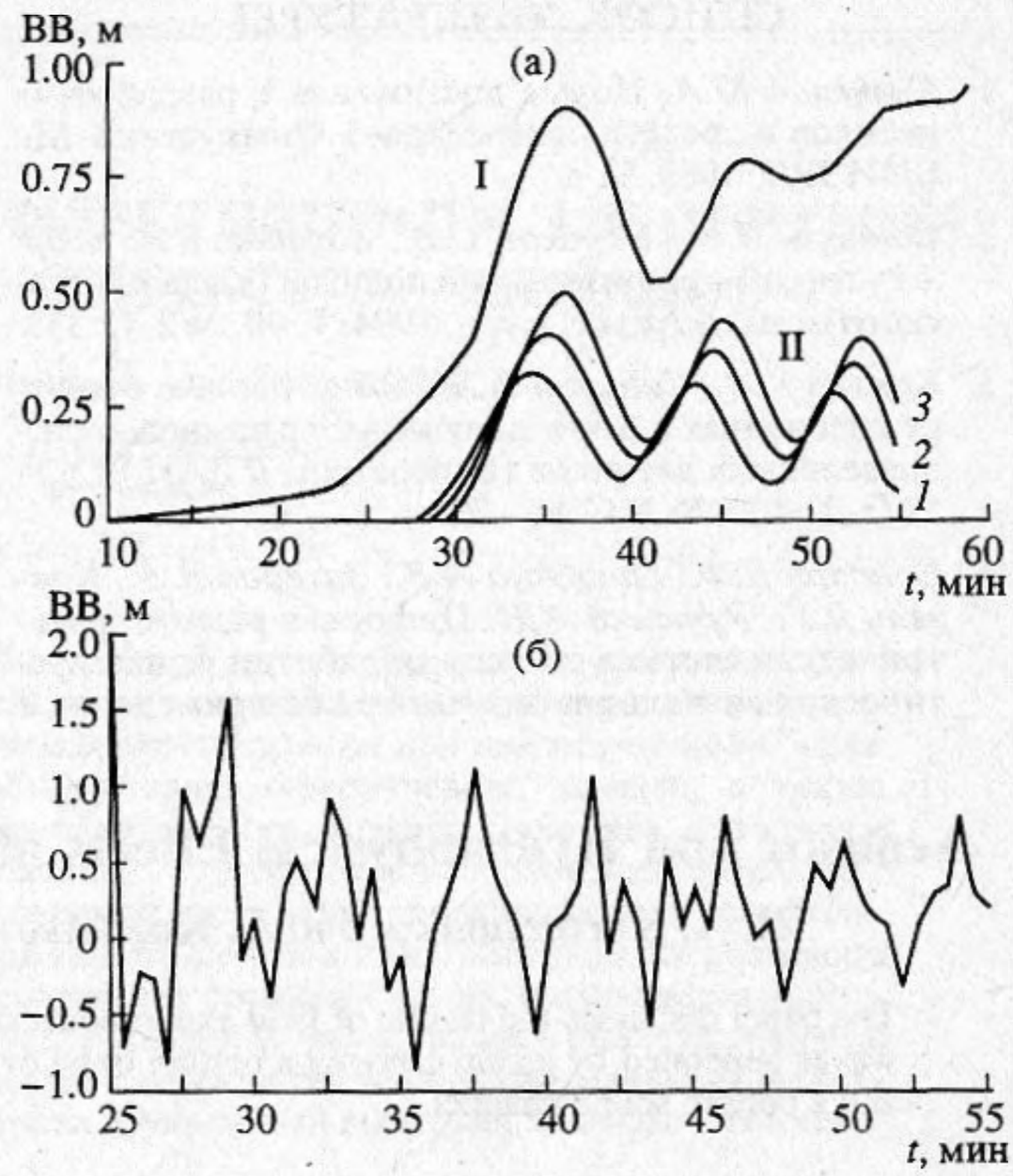

Рис. 5. Профили внутренних волн: измеренный в эксперименте (рис. 5а, график I), рассчитанные по моделям трала *3*, *2*, *1*, описанным в табл. 1 (рис. 5а, группа графиков II, графики *3*, *2*, *1*), рассчитанный по модели трала *3* в кильватерном следе трала (рис. 5б).

турном эксперименте, а именно: профиль ВВ, наблюдаемых и моделируемых в 400 м от трассы траления подобен бору и ВВ имеют следующие параметры: амплитуда – приблизительно 0.5 м, период – от 12 до 20 мин, длина волны – от 200 до 20000 м. Моделирование внутренних волн в кильватерном следе показало их нерегулярную многочастотную структуру. Подобные картины генерации внутренних волн наблюдаются и при тралении на глубокой воде под термоклином.

В заключение отметим, что результаты экспериментальных исследований влияния ВВ на распространение низкочастотных гидроакустических сигналов [8] указывают на возможность проявления подобных эффектов от ВВ, генерируемых тралом в акустическом поле, наблюдаемом в кильватере.

Таблица 1

Модель трала	Стоки: мощность (отн. ед.) / глубина / удаление		
	1 сток	2 сток	3 сток
1	50 / 21 / 75	30 / 28 / 100	30 / 33 / 150
2	50 / 21 / 90	30 / 24 / 130	30 / 28 / 170
3	50 / 18 / 90	30 / 20 / 130	30 / 23 / 170

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов Ю.А.* Новые достижения в разработках методов и средств промысловой биоакустики. М.: ВНИЭРХ, 1989. 91 с.
2. *Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Захаров В.А. и др.* Акустикогидрофизический полигон (шельф Японского моря) // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 333.
3. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // ДАН СССР. 1973. Т. 209. № 1. С. 86 - 89.
4. *Бондарь Л.Ф., Гриценко А.В., Захаров В.А., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н.* Цифровая радиотелеметрическая система сбора и обработки гидроакустических сигналов и результаты ее применения в исследованиях характеристик морских реверберации // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 223 - 228.
5. *Greene R.R.* The rational approximation to the acoustic wave eguation with bottom interaction // J. Acoust. Soc. Amer. 1984. V. 76. № 6. P. 1764 - 1773.
6. *Стурова И.В.* Генерация внутренних волн в стратифицированной жидкости. // Нелинейные проблемы теории поверхностных и внутренних волн / Овсянников Л.В. и др. Новосибирск: Наука, 1985. С. 200 - 242.
7. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галеркина. М.: Мир, 1988. 352 с.
8. *Бондарь Л.Ф., Борисов С.В., Борисов Н.Г. и др.* Влияние внутренних волн на распространение низкочастотного звука в мелком море // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 2. С. 334.

Acoustic and Hydrophysical Effects of a Fishing Vessel with a Bottom Trawl

R. A. Korotchenko, Yu. A. Kuznetsov, A. N. Rutenko, and M. Yu. Trofimov

The paper discusses the results of field experiments and numerical experiments of acoustic field and internal waves generated by a ship carrying a bottom trawl over the shelf in a sea region with a seasonal thermocline and a bottom sound channel.