АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1997, том 43, № 3, с. 333–337

УДК 551.463.228

ОБРАТНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ РАССЕЯНИЕ ЗВУКА КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ОКЕАНЕ

© 1997 г. Н. Н. Галыбин, А. Н. Серебряный

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 14.12.95 г.

Рассматривается новый метод дистанционного обнаружения и оценки некоторых параметров внутренних гравитационных волн, основанный на доплеровском сдвиге частоты акустических сигналов, обратно рассеянных участком поверхности океана, находящимся в области, охваченной орбитальными движениями внутренней волны. Возможность исследования внутренних волн с помощью предлагаемой методики была подтверждена синхронными акустическими и традиционными контактными измерениями, проведенными возле подводного хребта в Индийском океане.

Акустические методы представляют собой потенциально очень мощный и до конца еще не оцененный инструмент для исследования многих процессов в океане, включая его гидродинамику в широком диапазоне масштабов. В данной статье мы представляем новый акустический метод для исследования внутренних гравитационных волн в океане, краткое описание которого было дано в работе [1]. Главной особенностью предложенного метода, выгодно отличающей его от других, является возможность его использования для дальнего обнаружения внутренних волн с одновременным измерением их параметров. Другими словами, данный способ позволяет провести измерение параметров внутренней волны, исключив влияние внутриволновых орбитальных течений на судно, с которого производится наблюдение. Напомним, что широко известный акустический измеритель течений ADCP [2], успешно применяемый в исследованиях внутренних волн, производит измерения в непосредственном контакте с волной.

Из известных нам работ только исследование Апеля и Джессинга [3], использовавших многочастотный радар для регистрации искусственно созданных внутренних волн в экспериментах в норвежском фьорде, методически в некоторых аспектах близко нашей работе.

Предлагаемый способ исследования внутренних волн (обнаружения и измерения их параметров) основан на достаточно хорошо изученном в настоящее время резонансном механизме обратного рассеяния звуковых волн на движущихся неровностях водной поверхности. В этом случае частота принятого сигнала отличается от частоты излученного на величину $F_1 = \pm v_1/\Lambda$, где v_1 – фазовая скорость резонансной гармоники в сплошном спектре поверхностного волнения, Λ – длина волны этой гармоники. Знак величины F_1 зависит от угла между направлением скорости v_1 и волнового вектора рассеянного звука. Проходящую внутреннюю волну сопровождают орбитальные течения, которые в поверхностном слое океана приводят к дополнительному доплеровскому смещению частоты принятого сигнала на величину $F_2 = v_2\cos\psi/\Lambda$. Здесь v_2 – орбитальная скорость частиц во внутренней волне, ψ – угол между скоростью v_2 и направлением на приемник звука.

Таким образом, измерив смещение частоты $F_3 = F_1 + F_2$ рассеянного сигнала относительно частоты излученного, рассчитав величину v_1 и учтя, если это необходимо, дополнительный доплеровский сдвиг за счет дрейфа судна относительно дна, можно легко определить величину v_2. Проследив за временным изменением частоты F_2 (или за изменением орбитальной скорости v_2), можно оценить период наблюдаемой внутренней волны.

Натурный эксперимент по измерению внутренней волны с помощью обратно рассеянного звука от морской поверхности был проведен в юго-восточной части Индийского океана вблизи от Маскаренского хребта во время 9-го рейса НИС "Академик Николай Андреев", в декабре 1990 г. Район Маскаренского хребта известен как место генерации внутренних волн больших амплитуд. Наиболее интенсивные внутренние волны здесь возникают вследствие отражения баротропного поверхностного прилива от хребта и имеют преимущественное восточное направление распространения [4].

Основной целью эксперимента было продемонстрировать работоспособность предложенного метода в условиях измерения внутренних волн

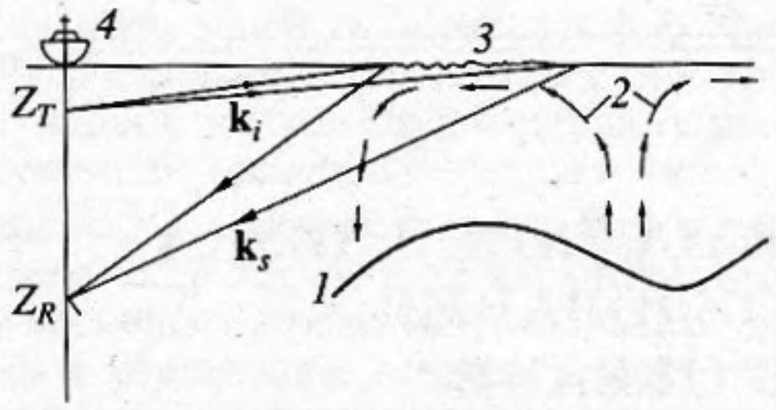

Рис. 1. Геометрия эксперимента: *1* – внутренняя волна, движущаяся к судну; *2* – орбитальные движения во внутренней волне; *3* – резонансная компонента обратного рассеяния звука океанского поверхностного волнения; *4* – дрейфующее судно с излучателем, приемником и комплексом приборов для контактных измерений параметров внутренней волны (распределенные датчики температуры, измеритель течения, CTD-зонд).

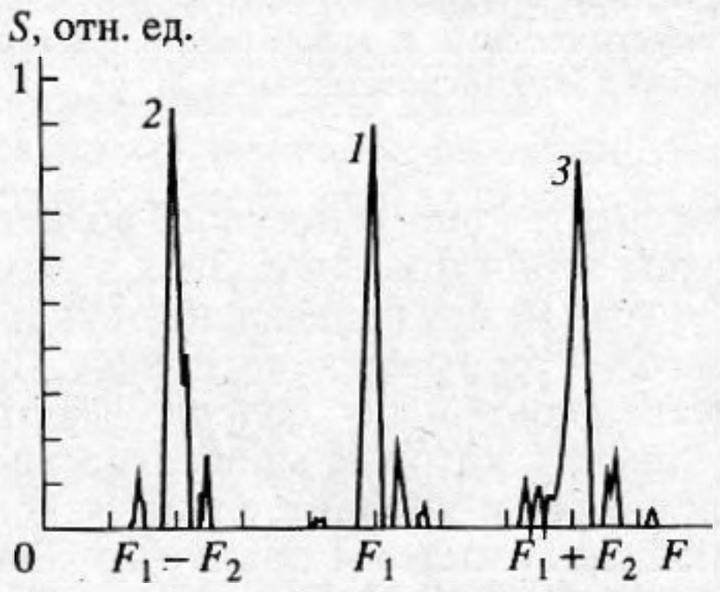

Рис. 2. Доплеровские спектры обратно рассеянного звука в характерные моменты прохождения внутренней волны.

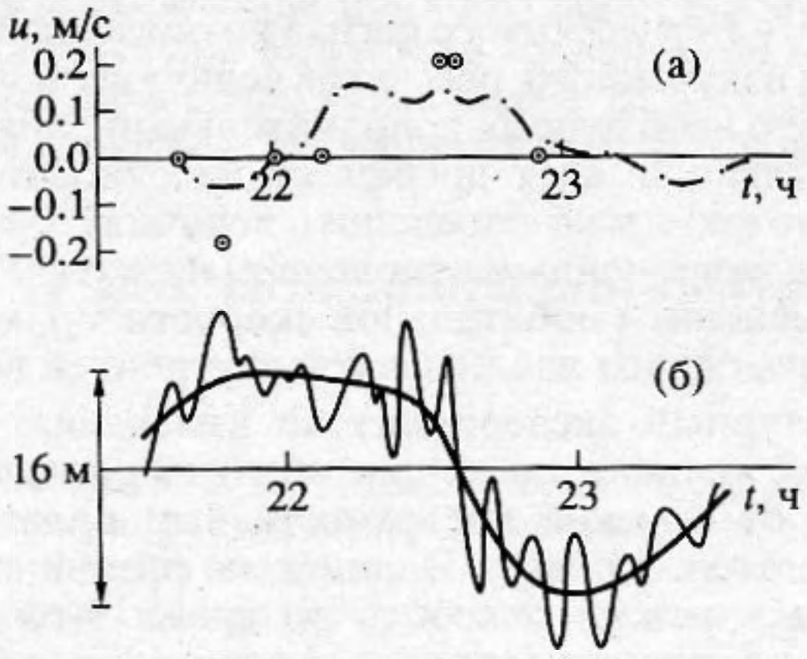

Рис. 3. Орбитальная скорость внутренней волны, измеренная акустическим методом (кружки) и измерителем течения (штрихпунктир) (а); запись внутренних волн, полученная распределенным датчиком температуры (б).

в океане. Стратегия работы была проста и заключалась в проведении одновременных измерений внутренней волны предлагаемым акустическим методом и традиционно используемыми во внутриволновых наблюдениях контактными методами с целью последующего сопоставления результатов. Для выполнения поставленной задачи нами были осуществлены независимые одновременные измерения внутренней волны с дрейфующего судна акустическим способом вместе с измерениями распределенными датчиками температуры.

В данном эксперименте применялась схема бистатического обратного рассеяния (рис. 1), при которой ненаправленный в горизонтальной плоскости источник звука находился на глубине 20 м, а направленная плоская приемная антенна – на глубине 100 м. Антенна была ориентирована к поверхности под небольшим углом скольжения и могла сканировать по азимуту с целью определения направления прихода внутренней волны. В ходе работы излучались пачки тональных импульсов с частотой заполнения $F_0 = 2.7$ кГц, длительностью 1 с и периодом повторения 10 с. Спектральному анализу подвергались принятые рассеянные поверхностью сигналы длительностью 2 с.

В процессе сканирования и непрерывного измерения величины F_3 внутренняя волна была обнаружена (она двигалась на восток под углом 95° относительно азимута), и приемная антенна была ориентирована по горизонтали так, чтобы направление движения внутренней волны, волновые вектора излученного ($\boldsymbol{K}_i$) и рассеянного ($\boldsymbol{K}_s$) полей лежали в одной вертикальной плоскости (рис. 1).

Учтя, что углы скольжения векторов ($\boldsymbol{K}_i$) и ($\boldsymbol{K}_s$) у поверхности достаточно малы, величину F_3 можно представить в виде

$$F_3 = (2gK)^{1/2}/2\pi + v_2K/\pi = \\ = K(v_1 + v_2)/\pi = (Kv_3)/\pi. \quad (1)$$

Здесь K – волновое число звука, $v_1 = (g/2K)^{1/2} \approx \approx 0.66$ м/с (при $F_0 = 2.7$ кГц).

Первое слагаемое в выражении (1) – хорошо известное дисперсионное соотношение для гравитационных волн, на вид которого практически не оказывают влияние вертикальные составляющие орбитальных движений длиннопериодных внутренних волн [5].

На рис. 2 в качестве иллюстрации представлена суммарная картина трех спектрограмм обратно рассеянных поверхностью сигналов. Смещение частоты максимума спектра "*1*" относительно частоты F_0 измеренного сигнала определяется только рассеянием на резонансной компоненте ветрового волнения. Смещения частот максимумов спектров "*2*" и "*3*" определяются суммарным эффектом резонансного рассеяния и орбитальным движением частиц во внутренней волне.

На рис. 3а представлены оценки орбитальной скорости v_2, рассчитанные по соотношению (1), исходя из экспериментально измеренных вели-

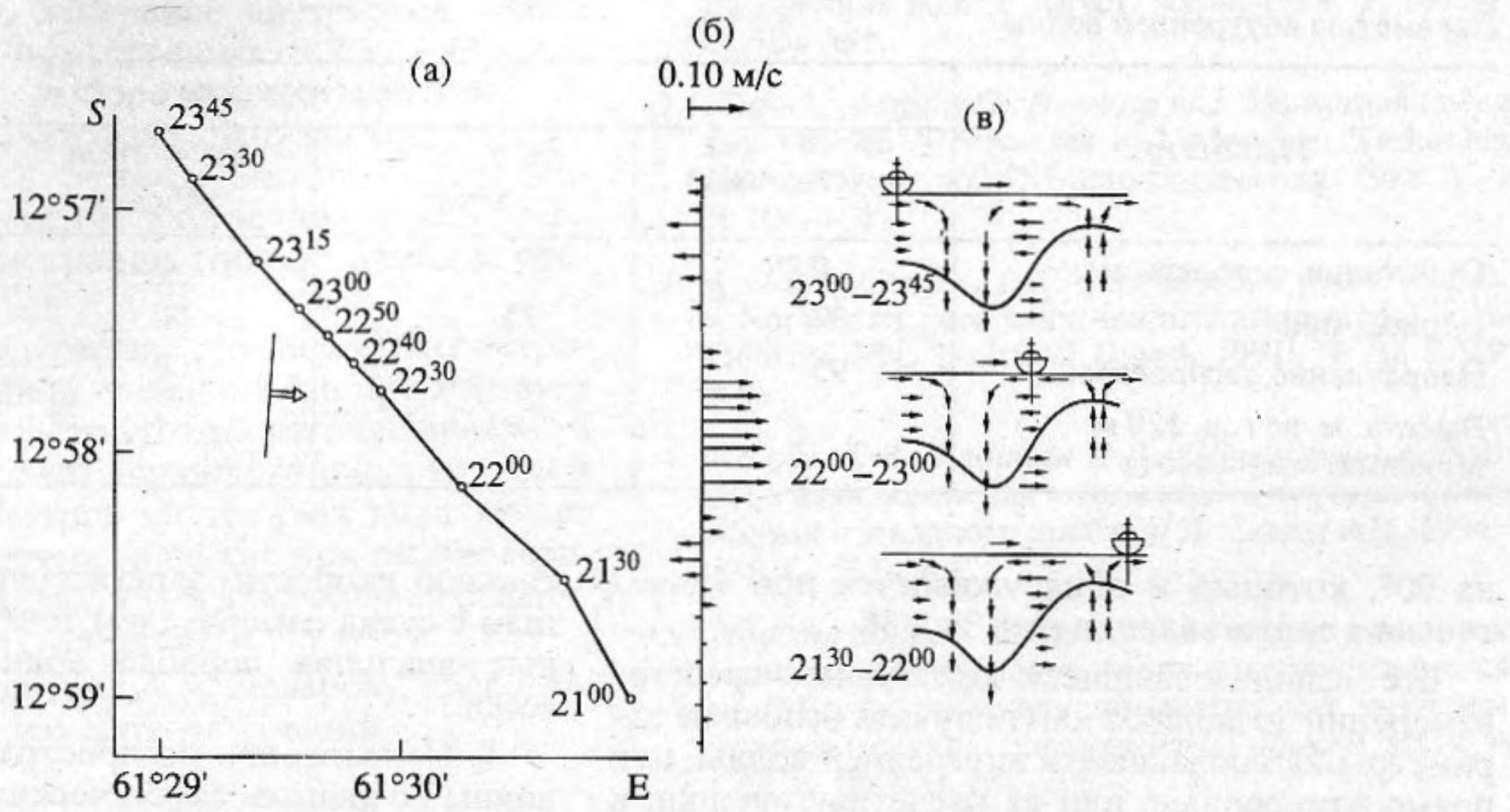

Рис. 4. Траектория дрейфа судна во время эксперимента (а); компонента скорости течения, совпадающая с направлением распространения внутренней волны, зарегестрированная измерителем течения с дрейфующего судна (б); положение судна относительно проходящей под ним внутренней волны в характерные моменты (различные фазы прохождения волны) (в).

чин частоты F_3. Скорость v_2 определялась относительно судна (при расчете были учтены скорость и направления приповерхностного течения). Необходимо отметить, что в статье [1] приведены оценки орбитальной скорости v_2, рассчитанные относительно дна океана. Период внутренней волны можно определить как соответствующее время изменения скорости v_2. Этот период был равен 77 мин.

Контактные измерения внутренней волны осуществлялись опущенной с дрейфующего судна четырехступенчатой вертикальной антенной распределенных датчиков температуры (каждый длиной 40 м), которая охватывала глубины от 16 до 176 м. Кроме того, в течение 70 мин, начиная с 22 ч, была проведена серия безостановочных зондирований верхнего 300-метрового слоя океана СТД-зондом (11 зондирований вниз и столько же вверх). Данные о скорости течения относительно судна получены по записи измерителя течений роторного типа, опущенного с борта судна на горизонт 25 м (дискретность регистрации данных 5 мин). Координаты судна каждые 10 мин регистрировались с помощью навигатора "GPS-500". По этим координатам вычислялся снос судна течением относительно дна.

Наблюдения проводились в тихую погоду при слабом ветре 1–1.5 м/с. При этом судно дрейфовало под действием течения северо-западного направления со средней скоростью 0.60 м/с (в направлении Маскаренского хребта). На рис. 4 показана траектория дрейфа, построенная по данным "GPS-500". После 22.00 дрейф судна замедлился до 0.53 м/с, а через час скорость дрейфа восстановилась до прежней, при этом сохранялись прежние метеоусловия.

Измеритель течения на горизонте 25 м, регистрирующий скорость течения относительно судна, отметил перемену знака скорости течения – до 22.00 течение было западным, а после сменилось на восточное до 0.15 м/с, после 23.00 снова стало западным до 0.07 м/с (см. рис. 4).

Вышеперечисленные особенности в характерном кратковременном изменении скорости дрейфа судна, а также появление движущейся к судну полосы интенсивной ряби на поверхности океана, отчетливо видимой на экране судового радиолокатора, свидетельствовали о подходе к судну внутренней волны, движущейся со стороны Маскаренского хребта и таким образом являющейся встречной к направлению дрейфа судна.

Распределенные датчики температуры зарегистрировали вертикальное смещение термоклина в виде уединенной относительно длиннопериодной волны (периодом 75 мин). Одновременно по термоклину распространялись короткопериодные 10-минутные волны меньших амплитуд высотой 5–8 м (рис. 3б). Высота уединенной внутренней волны оценивалась двумя способами: по ходу сглаженной кривой (высота 16 м), по максимальному размаху колебаний термоклина (высота 21.5 м).

Следует напомнить, что между вызванным внутренней волной полем горизонтальной скорости течений на поверхности и вертикальными смещениями термоклина должен быть сдвиг фаз

Параметры внутренней волны

Параметр	Методы измерения			
	акустический	распредел. датчик	измеритель течения	расчет по линейной модели
Орбитальн. скорость, м/с	0.20	–	0.15	0.11 (0.15)
Период, мин.	77	75	80	75
Направление распростран.	95	–	100	–
Высота, м, на гор. 120 м	–	16 (21.5)	–	16 (21.5)
Максимальная высота				34.8 (46.7)

на 90°, который и обнаруживается при внимательном сопоставлении рис. 3а и 3б.

Все использовавшиеся контактные средства измерений позволяют нам получить основные параметры наблюдавшейся внутренней волны, или прямо измеренные, или их расчетные оценки, и провести сопоставление с результатами их акустических измерений. Полная сводка параметров внутренней волны дана в таблице.

При сопоставлении параметров, измеренных акустическим и контактным методами, следует помнить, что в первом случае велось наблюдение за волной на дистанции около 2 км от судна, в то время как контактные измерения проводились в толще воды непосредственно под судном. Однако при проходе расстояния в 2 км, что составляет около 1/5 своей длины, волна не претерпела существенных изменений, т.е. во временных и пространственных рамках нашего натурного эксперимента она была квазистационарной. Это важное обстоятельство дает нам возможность проверить измеренные акустическим способом параметры внутренней волны традиционными методами контактных измерений.

1. Орбитальная скорость внутренней волны, полученная акустическим способом (0.20 м/с), оказалась близко совпадающей с данными измерителя течений роторного типа (0.15 м/с). Небольшое расхождение может быть объяснимо заниженными данными измерителя течения, вследствие того, что, несмотря на свою большую инерционность, судно при прохождении под ним внутренней волны было захвачено орбитальными движениями в волне, и, соответственно, измеритель течений приобрел небольшую составляющую скорости течения, совпадающую с направлением распространения пришедшей внутренней волны.

2. Период волны оценен тремя способами через волнообразное квазипериодическое изменение соответствующих параметров внутренней волны во времени: орбитальной скорости (акустический метод), вертикальных смещений внутренних слоев океана на горизонте размещения распределенного датчика температуры; орбитальной скорости, зарегистрированной опущенным с судна измерителем течений. Все полученные значения периода волны близки между собой.

3. Направление распространения внутренней волны по данным акустических измерений, определенное по максимальному смещению частоты F_3, подтверждается данными измерителя течений, а также по ориентации светлой полосы ряби (фронта волны), видной на экране судового радиолокатора.

4. Высота волны измерялась распределенным датчиком температуры. Переход от колебаний температуры к вертикальным смещениям термоклина сделан через использование среднего вертикального градиента температуры dT/dz = 0.065 град/м, измеренного при зондировании. В таблице приведены две оценки – для среднего смещения термоклина и смещения с учетом короткопериодных волн (дано в скобках). Высота внутренней волны измерялась на горизонте 120 м, в то время как максимального значения она достигала (согласно расчету по линейной модели внутренних волн) на горизонте 725 м. С учетом вертикального распределения собственной функции внутренних волн получаем оценки максимальной амплитуды 34.8 и 46.7 м.

Исходя из измеренных данных о гидрологии во время эксперимента (вертикального распределения плотности с глубиной), был проведен численный расчет уравнения линейных внутренних волн по программе В.В. Гончарова [6]. В результате были получены следующие значения параметров волны при заданном периоде 75 мин и высоте волны 16 и 21.5 м: длина 11.3 км, фазовая скорость – 2.49 м/с, орбитальная скорость 0.11 и 0.15 м/с. Как видно, расчетная орбитальная скорость оказалась близкой к наблюдавшейся.

Вполне удовлетворительное совпадение значений параметров внутренней волны, полученных различными методами, дают нам возможность рассматривать предлагаемый акустический метод измерений как достаточно перспективный. С помощью вышеописанной методики, использования маломощного и практически ненаправлен-

ного излучателя, измерение внутренней волны осуществлялось на расстояниях от 2.5 км и менее. При оптимальном выборе мощности, рабочей частоты и формы диаграммы направленности приемно-излучающей системы можно обеспечить надежное обнаружение внутренней волны и измерение ее параметров на гораздо больших расстояниях.

В заключение отметим, что поскольку ветровая рябь на водной поверхности присутствует практически всегда, то этот достаточно простой и надежный метод дистанционного обнаружения и измерения параметров внутренних волн может найти широкое применение как при океанологических исследованиях, так и для решения различных практических проблем.

Авторы благодарны А.А. Назарову, предоставившему данные измерителя течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аредов А.А., Галыбин Н.Н., Фурдуев А.В.* Акустико-океанологический эксперимент по регистрации внутренних волн // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 4. С. 584–591.
2. *Flatt D., Griffiths G., Howarth M.J.* Measurment of current profiles // Advances in Underwater Technology, Ocean Science and Offshore Engineering. 1988. V. 16. P. 157–166.
3. *Apel J.R., Gjessing D.T.* Internal wave measurements in a Norwegian fjord using multifrequancy radar // John Hopkins APL Technical Digest. 1991. № 10. P. 295–306.
4. *Коняев К.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Два пути возникновения интенсивных внутренних волн вблизи подводного хребта // Доклады АН. 1994. Т. 338. С. 537–540.
5. *Христофоров Г.Н.* Изменение структуры морского ветрового волнения в зоне поверхностного слика // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. С. 189–208.
6. *Гончаров В.В.* Некоторые характеристики внутренних волн в океане // Цунами и внутренние волны. Севастополь: МГИ АН УССР, 1976. С. 87–96.

Surface Backscattering of Sound as a Tool to Study Internal Waves in the Ocean

N. N. Galybin and A. N. Serebryanyi

A new method of remote detection and estimation of some parameters of internal gravity waves is considered. The method is based on the Doppler frequency shift of acoustic signals backscattered by a sea surface site located in the region enclosed by orbital motions of the internal wave. The feasibility of investigating internal waves by means of the proposed procedure was confirmed by simultaneous acoustic and conventional contact measurements carried out near an underwater ridge in the Indian Ocean.