АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 6, с. 844–847

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222

ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ТОНКОСТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ОКЕАНЕ

© 1998 г. В. С. Гостев, Л. Н. Носова, Р. Ф. Швачко

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail:bvp.@ acoins.msc.ru

Поступила в редакцию 23.12.97 г.

Наблюдение звукового поля в зоне тени дает возможность в чистом виде выделять звуковые сигналы, обусловленные эффектами его переизлучения неоднородностями тонкой структуры показателя преломления. Анализируя угловую, временную, спектральную, энергетическую структуры звукового поля в зоне тени и особенности экспериментально получаемых зависимостей его характеристик от пространственных координат, можно получать полезную информацию о параметрах тонкоструктурных неоднородностей показателя преломления водной толщи. Экспериментальный материал по структуре звукового поля в зоне тени, представленный в работах [1–3], а также предлагаемые способы его интерпретации [4] наглядно иллюстрируют возможности решения некоторых обратных задач гидроакустики, касающихся исследования параметров таких неоднородностей.

Предлагаемый в указанных выше работах механизм проникновения звука в зоны тени основан на том, что при рассеянии звука в океане в диапазоне частот от сотен до нескольких тысяч Гц осуществляется режим резкоанизотропного рассеяния с максимумом рассеянного поля в направлении, определяемом углом зеркального отражения от горизонтально ориентированных резкоанизотропных неоднородностей скорости звука (см., например, [5, 6]). В соответствии с механизмом проникновения звука в зону тени за счет рассеяния на тонкоструктурных неоднородностях каждая каустика переизлучает в зону тени вторичные лучи [4], которые формируют звуковые “блики” всюду в зоне тени за исключением области, запретной (в силу законов геометрической акустики) для лучей, формирующих эти “блики”. Эта область находится на глубинах выше точек заворота вторичных лучей, формирующих “блик”. В результате вблизи поверхности, в зоне тени формируется вторичная зона тени для “бликов”. Это обстоятельство было отмечено в работе [6] и подтверждалось в экспериментах по измерению уровней звуковых сигналов в зоне тени на вертикальных разрезах звукового поля [1, 7].

При проведении эксперимента по исследованию звукового поля в зоне тени в центральной части Индийского океана в условиях характерного тропического распределения скорости звука с глубиной, результаты которого представлены в работах [2, 3], был также осуществлен прием линейно частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала на двадцати эквидистантно расположенных через 2 м гидрофонах вертикальной антенны, находящейся на расстоянии 12 км от излучателя с центром на глубине около 200 м. Излучался прецизионный линейно частотно модулированный сигнал с девиацией частоты $\delta f = 1$ кГц, длительностью $\delta t = 10$ с (база $B = \delta f \delta t = 10^4$) в диапазоне 1–2 кГц [2]. При глубине излучения 300 м антенна оказалась расположенной на границе вторичной зоны тени, как показано на рис. 1. На нем изображена рассчитанная по лучевой программе картина каустик, которые формируются в ближней озвученной зоне (подробнее см. [4]). Лучи, образующие каустику, помечены углами выхода этих лучей из источника. Показана также система вторичных лучей, переизлученных тонкоструктурными неоднородностями толщи под углом зеркального отражения относительно горизонтальной плоскости в области каустики, образованной лучами с углами выхода из источника 2.3°–4.2°. Видно, что эта система вторичных лучей формирует вторичную зону тени на глубинах выше их точек заворота. Вертикальная антенна, помеченная на рис. 1 символом *a*, находилась на границе зоны тени для указанной системы вторичных лучей. Спадание уровня звукового поля во вторичной зоне тени определяется эффективной шириной индикатрисы рассеяния звука океанской средой на тонкоструктурных неоднородностях. Пунктиром показан луч, выходящий из области переизлучения звука под углом, отличным от зеркального, и обусловленный конечной угловой шириной индикатрисы рассеяния звука.

По каждому из приемных каналов регистрировался ЛЧМ-сигнал, пример спектрограмм которого представлен на рис. 2. Спектрограмма на рис. 2а соответствует гидрофону, расположенному на глубине около 184 м, а на рис. 2б – гидрофо-

ну на 32 м глубже. Пики на спектрограммах соответствуют моментам прихода звуковых сигналов, а величина пиков пропорциональна их уровню. На обеих спектрограммах первый по времени пик соответствует приповерхностному ликиджу, второй – сигналу, проникающему в зону тени по микроканалу. Примерно через 170 мс после прихода приповерхностного ликиджа на спектрограмме (рис. 2б) проявляется группа "бликов", формируемых каустиками ближней озвученной зоны. Отчетливо виден существенно различный характер проявления "бликов" на верхнем и нижнем гидрофонах антенны. На нижнем гидрофоне в группе сигналов, формируемых каустиками, явно выделяется первый по времени прихода, обусловленный по расчетам [4] каустикой, сформированной лучами с углами выхода из источника около 2.3°–4.2°. На верхнем гидрофоне этот пик практически исчезает и остаются лишь более поздние и слабые приходы, обусловленные более крутыми каустиками ближней озвученной зоны. Отмеченное обстоятельство свидетельствует, что антенна находилась на границе зоны тени для вторичных лучей, генерируемых каустикой, образованной лучами с углами выхода из источника около 4°. При уменьшении глубины приема на заданном расстоянии от источника область формирования "бликов" скользит по каустикам, удаляясь от источника и заглубляясь. Время распространения "бликов" при этом увеличивается, а сама группа "бликов" растягивается во времени. Время распространения приповерхностного и микроканального ликиджей при уменьшении глубины приема уменьшается. Общее же время задержки прихода "бликов" относительно прихода приповерхностного ликиджа увеличивается, что можно заметить на рис. 2.

На рис. 3 представлены в линейном масштабе нормированные величины рассмотренных выше пиков, соответствующих приповерхностному и микроканальному ликиджам, а также "блику", формируемому 4°-ной каустикой, зарегистрированные одновременно на гидрофонах антенны в зависимости от глубины расположения каждого гидрофона, указанной на вертикальной оси. Если уровни приповерхностного и микроканального ликиджей распределены по антенне примерно равномерно, то уровень "блика" 4°-ной каустики имеет очевидную тенденцию к уменьшению, снижаясь на глубине 182 м практически до уровня шумов.

Лучевые расчеты показывают [4], что "блики" в зоне тени на глубинах около 200 м и расстоянии от источника 12 км формируются лучами, образующими 4°-ную и более крутые каустики в ближней озвученной зоне. Точки заворота лучей с углами выхода из источника 1°–2°, формирующих наиболее пологую каустику, лежат существенно ниже горизонта 200 м. Для дистанции от излучателя до приемника 12 км область формирования "блика" 4°-ной каустики располагается вблизи этой каустики на глубине 600 м и расстоянии от источника

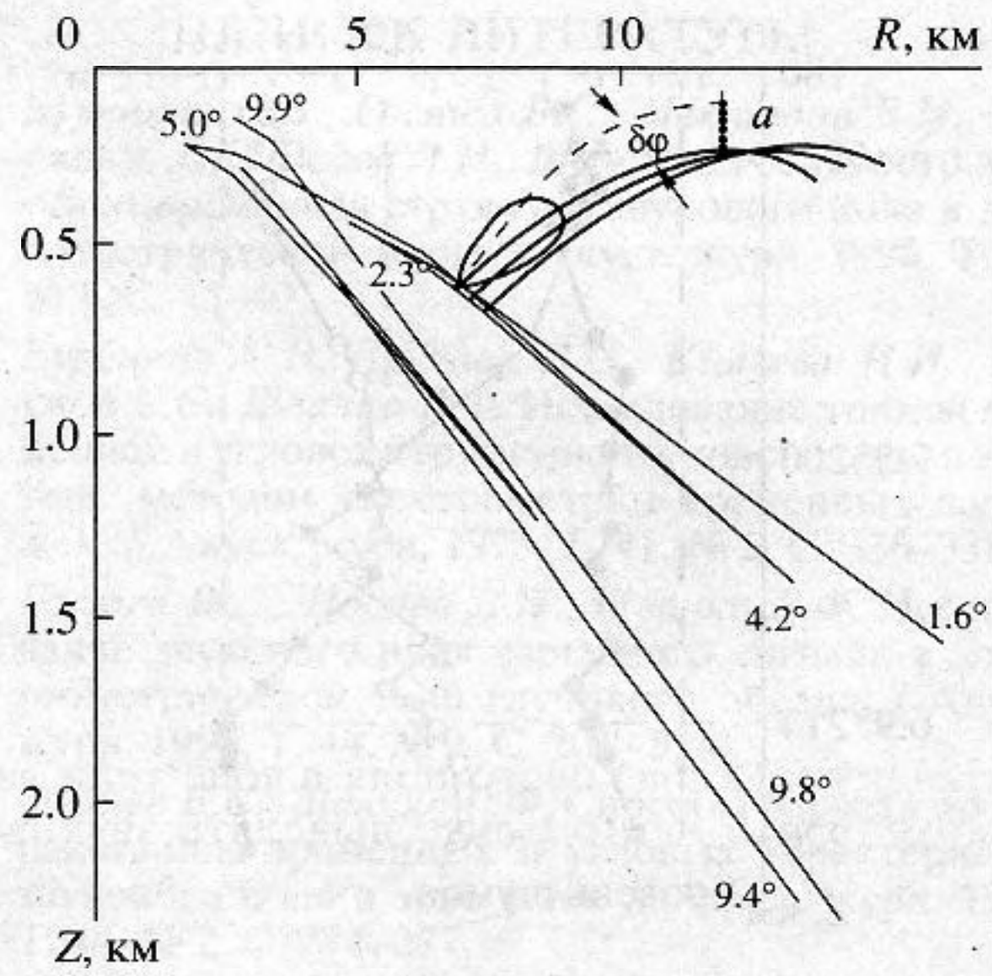

Рис. 1. Картина каустик в ближней озвученной зоне и расположение приемной антенны в поле вторичных лучей.

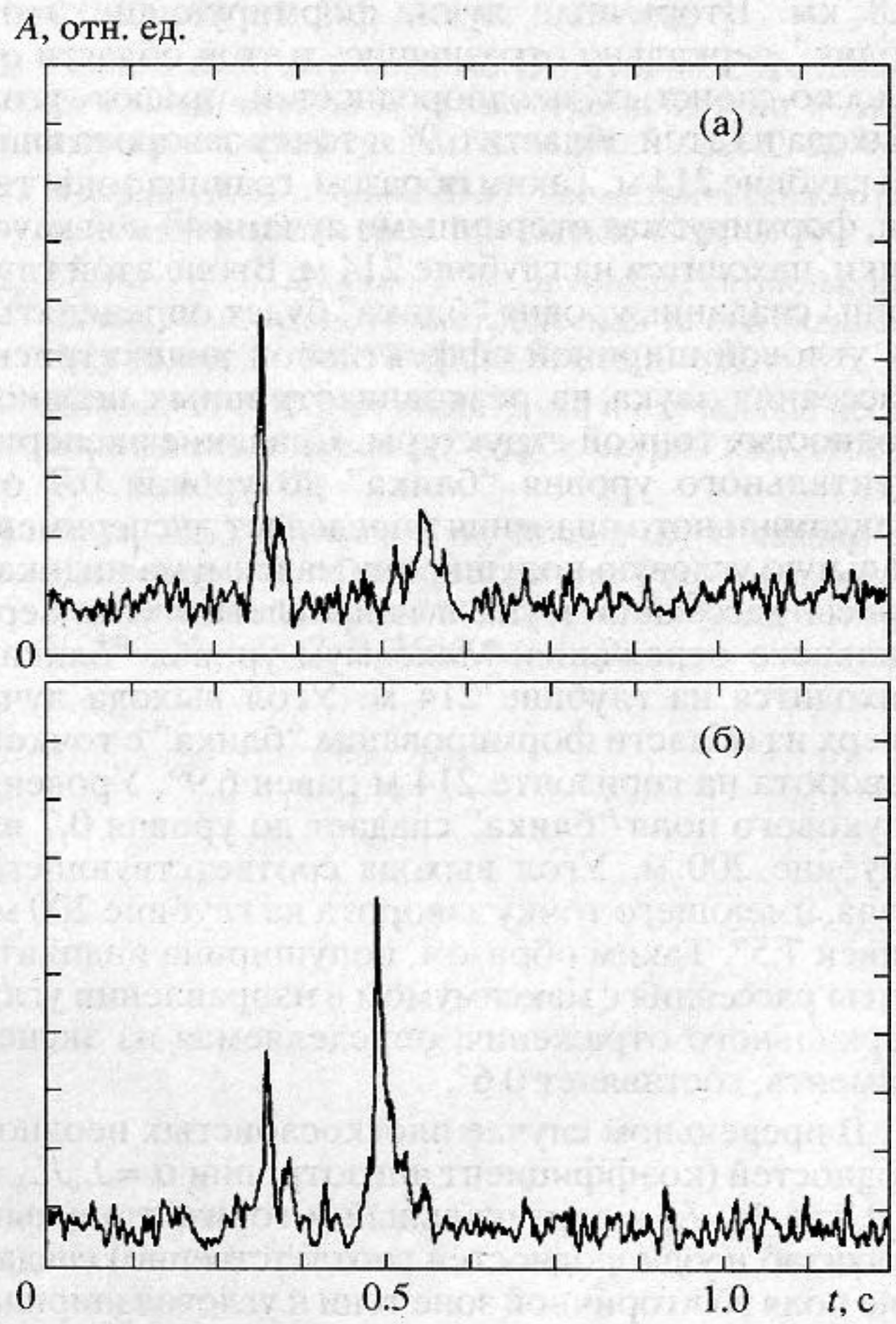

Рис. 2. Пример спектрограмм, получаемых с гидрофонов вертикальной антенны. а – гидрофон расположен на глубине 184 м; б – гидрофон расположен на глубине 216 м.

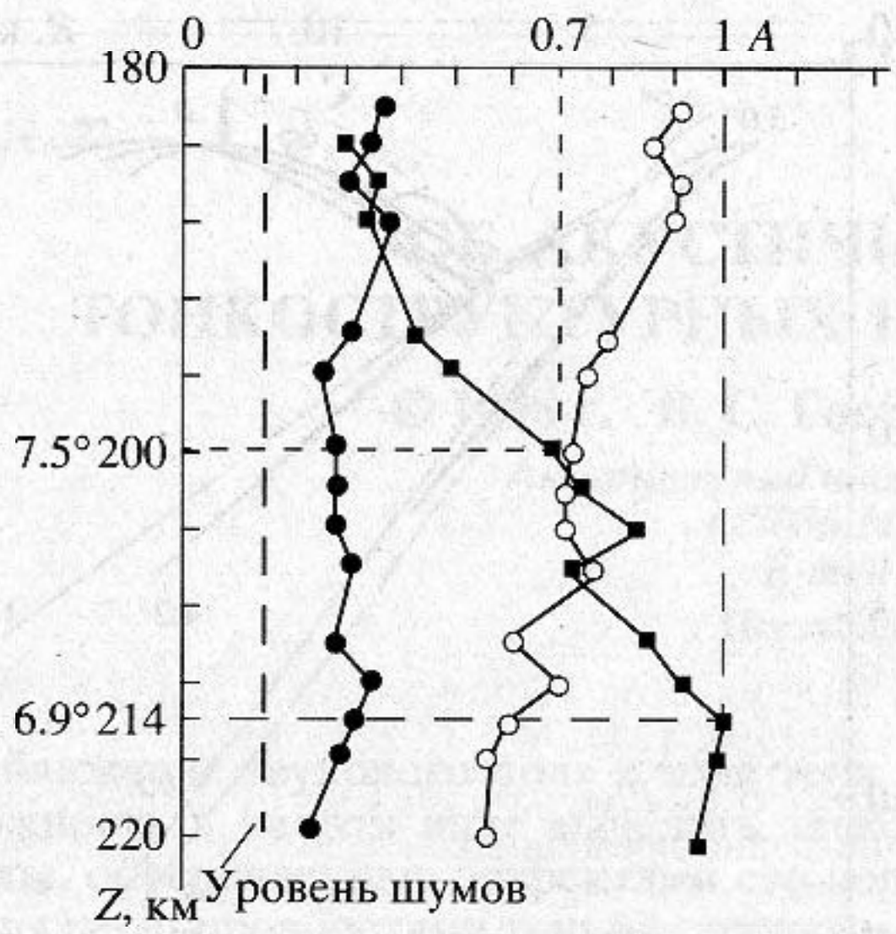

Рис. 3. Нормированное распределение уровней звуковых сигналов в зоне тени на гидрофонах вертикальной антенны. ○ – приповерхностный ликидж, ● – микроканальный ликидж, ■ – уровни "блика".

6.8 км. Вторичные лучи, формирующие этот "блик", зеркально отразившись в этой области от плоско-слоистых неоднородностей, имеют угол выхода из этой области 6.9° и точку заворота вниз на глубине 214 м. Таким образом, граница зоны тени, формируемая вторичными лучами 4°-ной каустики, находится на глубине 214 м. Выше этой глубины спадание уровня "блика" будет определяться угловой шириной эффективной индикатрисы рассеяния звука на резкоанизотропных неоднородностях тонкой структуры. Спадание экспериментального уровня "блика" до уровня 0.7 от максимального значения определяет экспериментальную угловую полуширину максимума индикатрисы рассеяния звука в направлении угла зеркального отражения. Максимум уровня "блика" находится на глубине 214 м. Угол выхода луча вверх из области формирования "блика" с точкой заворота на горизонте 214 м равен 6.9°. Уровень звукового поля "блика" спадает до уровня 0.7 на глубине 200 м. Угол выхода соответствующего луча, имеющего точку заворота на глубине 200 м, равен 7.5°. Таким образом, полуширина индикатрисы рассеяния с максимумом в направлении угла зеркального отражения, определяемая из эксперимента, составляет 0.6°.

В предельном случае плоскослоистых неоднородностей (коэффициент анизотропии $\alpha = L_v/L_h = 0$, где L_v, L_h – вертикальный и горизонтальный масштаб неоднородностей соответственно) спадание поля во вторичной зоне тени и угловая ширина дифракционного максимума звукового поля, переизлученного в направлении зеркального отражения, будут определяться продольным размером L области эффективного переизлучения звука. Для индикатрисы рассеяния вида: $\sin(\varphi kL\sin\theta)/\varphi kL\sin\theta$ полуширина дифракционного максимума по уровню 0.7 равна $\delta\varphi = 1.4/kL\sin\theta$, где k – волновое число падающей звуковой волны, θ – угол скольжения луча при входе в область переизлучения звука с продольным размером L. В случае же резкоанизотропных неоднородностей с конечным коэффициентом анизотропии, когда $L_h < L$, угловая ширина будет определяться по той же формуле горизонтальным размером неоднородностей L_h, заполняющих область переизлучения звука [5].

В соответствии с моделью формирования звукового поля "бликов", размеры эффективной рассеивающей области будут определяться физическими размерами каустики. Для проведения оценок продольного размера эффективной рассеивающей области воспользуемся приближенной формулой для ширины каустики: $r = 1.77k^{-2/3}\beta^{-1/3}$. Параметр β определяется удвоенной разностью между кривизной нормального сечения каустики в направлении луча и кривизной самого луча в точке его касания каустики [8]. Из лучевых расчетов для величины β было получено значение $\beta = 5 \times 10^{-6}$ м$^{-1}$. При этом для продольного размера эффективной рассеивающей области имеем $L = r/\sin\theta = 320$ м для $f = 1$ кГц и $\theta = 6.9°$. Расчетная угловая полуширина дифракционного максимума звукового поля, переизлученного эффективной рассеивающей областью с продольным размером L будет в этом случае равна 0.5°, что по порядку величины совпадает с экспериментальной. Из этого можно заключить, что анизотропные неоднородности тонкой структуры по своей протяженности по крайней мере не меньше протяженности всей эффективной рассеивающей области. Полученный результат еще раз, теперь уже из фазовых соотношений, подтверждает правильность выбранной ранее модели рассеяния звука в окрестностях каустик на резкоанизотропных тонкоструктурных неоднородностях.

Приведенные в работах [1–4, 6] и в настоящей работе экспериментальные результаты и их интерпретация показывают, что исследование звукового поля в зонах тени может представлять интерес с точки зрения наблюдения структуры неоднородностей океанской толщи и определения их параметров. Так, например, описанный в работах [2, 3] микроканальный ликидж свидетельствует о высокой степени протяженности слоистых неоднородностей (до 20 км), а также о длительном времени жизни этих неоднородностей, сохранявшихся на протяжении всего эксперимента, продолжавшегося около 12 часов. Анализ угловой и временнóй структур звукового поля в зоне тени, представленный в работах [2, 4], дает возможность определять положения каустик в озвученных областях и при точном позиционировании делать уточняющие количественные выводы о распределении скорости звука с глубиной. Длительная регистрация угловой и временнóй структур звукового поля в зонах тени может позволить следить за

изменчивостью положения каустик, вызванной возмущениями в профиле скорости звука, производимыми внутренними волнами, а изменчивость величин максимумов в многолучевом сигнале "блика" позволяет проследить за изменчивостью степени фокусировки в областях формирования вторичных лучей ("бликов"), а также степени тонкоструктурной стратификации. Так, например, уменьшение или полное исчезновение какого-либо максимума в "блике" может свидетельствовать о разрушении тонкоструктурных неоднородностей (соответственно исчезновении зеркального максимума в индикатрисе рассеяния звука). Анализ спектрального состава "бликов" [3, 9] предоставляет возможность определения передаточной функции канала в зоне тени, которая непосредственно связана с видом вертикального пространственного спектра тонкоструктурных резкоанизотропных неоднородностей скорости звука в областях формирования "бликов". Аналогичная задача определения видов спектров или структурных функций случайных неоднородностей показателя преломления по характеристикам амплитудных флуктуаций звука решалась в работах [10] (для изотропных неоднородностей турбулентного происхождения) и [11] (для поля внутренних волн). Особый интерес представляет регистрация угловой и временнóй структур звукового поля в зонах тени на вертикальных и горизонтальных разрезах, как описано в работе [1]. В этом случае при изменении глубины приема или горизонтального расстояния до точки излучения области формирования "бликов" как бы скользят по каустикам, существующим в предшествующей исследуемой зоне тени зоне конвергенции. Таким образом можно получить указанную выше информацию по всей верхней толще океана до глубины около 2 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код РФФИ 96-05-64799).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буренков С.В., Гостев В.С., Неклюдов В.И., Наумов С.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* Пространственно-временная структура звукового поля в зоне геометрической тени. // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 45–49.
2. *Буренков С.В., Гостев В.С., Князева Н.И., Наумов С.С., Швачко Р.Ф.* Исследование тонкой временнóй и угловой структуры звукового поля в зоне тени методом спектрометрии временных задержек. // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 2. С. 336–338.
3. *Гостев В.С., Носова Л.Н., Швачко Р.Ф.* Исследование звукового поля взрывного сигнала в зонах геометрической тени глубокого океана // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 201–205.
4. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Способы расчета пространственно-временных и угловых характеристик звукового поля в зоне тени. // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 2. С. 274–277.
5. *McCoy J.J., Beran M.J.* Directional spectral spreading in randomly ingomogeneous media. // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. V. 66. № 5. P. 1468–1481.
6. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Экспериментальные исследования звуковых сигналов, наблюдаемых в зоне геометрической тени в океане // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282. № 5. С. 1082–1085.
7. *Гостев В.С., Неклюдов В.И., Чупров С.Д., Швачко Р.Ф., Швачко Л.В.* О засветке зоны тени. // Акустика океанской среды. М.: Наука. 1989. С. 88–97.
8. *Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 1980. С. 89.
9. *Гостев В.С., Швачко Р.Ф.* Звуковые сигналы, наблюдаемые в зоне геометрической тени в океане // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 6. С. 800–802.
10. *Швачко Р.Ф.* Флуктуации звука и случайные неоднородности в океане // Акуст. журн. 1967. Т. 13. № 1. С. 119–125.
11. *Ewart T.E., Reynolds S.A., Rouseff D.* Obtaining of ocean index of refraction spectrum from the acoustic amplitude fluctuations // J. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 100. № 4. Pt. 2. P. 2666(A).