

УДК 551.463

НАБЛЮДЕНИЕ КАУСТИК В ОКЕАНЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 1997 г. Р. А. Вадов

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

Поступила в редакцию 10.04.96 г.

Анализируются материалы измерений структуры звукового поля в первой зоне конвергенции, проведенных в северо-восточной части Центральной Атлантики с широкополосным (300–1300 Гц) излучателем. Основное внимание обращается на определение местоположения каустики, которая совпадала с ближней к источнику границей зоны конвергенции. После расфилтровки сигнала в 1/3-октавных частотных полосах положение каустики на экспериментальных кривых изменения уровня звукового поля с дистанцией определялось методом численного согласования уровней поля в окрестности каустики с преобразованной соответствующим образом функцией Эйри. Такой метод определения местоположения каустики, совпадающей с границей первой зоны, показал достаточно высокую надежность. По результатам опытов заметных изменений в положении границ зоны конвергенции, связанных с изменением частоты излучения (в пределах обследованного частотного диапазона) обнаружено не было. Их местоположение достаточно хорошо согласуется с результатами расчетов поля в лучевом приближении.

При анализе звуковых полей в океане особое внимание уделяется рассмотрению таких явлений, которые не могут быть описаны в лучевом приближении. Одним из них является формирование каустических поверхностей, представляющих собой огибающие семейства лучей, в окрестности которых уровень звукового поля может быть описан реалистично лишь в волновом приближении. Теоретическому рассмотрению различного рода каустик посвящено достаточно много статей, однако результаты анализа экспериментально наблюдаемых каустик приводятся лишь в немногих из известных автору работах (см., например, [1, 2]).

Несомненный интерес с этой точки зрения представляют результаты опытов, проведенных 22–23 декабря 1990 г. на судах Акустического института в северо-восточной части Центральной Атлантики (в 400–500 км к северу от островов Зеленого Мыса). В этих опытах экспериментально наблюдалась каустика, совпадающая с ближней к источнику границей зоны конвергенции.

Местоположение каустики однозначно определяло положение начала зоны. В литературе неоднократно обсуждались вопросы изменения местоположения зон конвергенции с изменением частоты излучения, определенное внимание уделялось систематически наблюдаемым расхождениям в значениях расчетного и экспериментально

определенного расстояния от источника до ближней границы зоны конвергенции [3, 4]. В свете этих проблем результаты анализа материалов проведенных опытов также представляют определенный интерес.

Гидрологические условия формирующиеся в этом районе океана хорошо изучены и отличаются достаточно высокой стабильностью. Типичный профиль изменения скорости звука с глубиной (один из зарегистрированных перед проведением акустического эксперимента) представлен на рис. 1. Измерения проводились до глубин 1500–2000 м, далее профиль $C(z)$ восстановлен по архивным материалам. Толщина приповерхностного хорошо перемешанного слоя воды составила 50–70 м. Слой температурного скачка расположен на глубинах 60–90 м, ось подводного звукового канала – на глубине 1200 м. Глубина океана в районе проведения опытов составляла 4900–5000 м. Значения скорости звука у дна превышали ее значения у поверхности на 10–15 м/с.

Широкополосный (перекрывающий диапазон частот 300–1300 Гц) излучатель пересекал первую зону конвергенции. Непрерывно излучаемый им сигнал принимался на ненаправленный гидрофон и регистрировался на магнитную ленту.

В проведении опытов принимали участие два судна (“излучающее” и “приемное”). Расхождение судов обеспечивалось за счет естественного

дрейфа приемного судна при удержании (на электродвижении против дрейфа) излучающего судна в одной точке. Дрейф приемного судна во время опыта оставался постоянным в пределах 1.0–1.3 узлов.

Было проведено два опыта в первой зоне конвергенции. В первом опыте излучатель располагался на глубине 20 м, во втором – на глубине 200 м. Прием осуществлялся на горизонтах 150 и 500 м. Периодически (раз в 20–30 мин) на 10–15 с излучение прерывалось для регистрации уровня шумовой помехи, учитываемой при последующем анализе экспериментальных материалов. Дистанция между излучателем и приемниками определялась акустическим способом [5], между судами – спутниковой навигационной системой.

После окончания опытов записанный на магнитную ленту сигнал воспроизводился, расфильтровывался в треть-октавных частотных полосах и перезаписывался на ленты самописца 2307 фирмы "Buel&Kjer" в режиме регистрации абсолютных арифметических средних значений. Текущее усреднение при регистрации производилось по интервалу 1–2 с.

Согласованные между собой, кривые изменения уровня звукового поля с дистанцией (для разных частот излучения) после оцифровки были введены в память ЭВМ. Оцифровка кривых производилась с интервалом, соответствующим шагу по дистанции 20 м. Таким образом, в качестве исходного материала для последующего анализа было получено по 6–7 массивов (соответствующих 6–7 кривым изменения уровня звукового поля по зоне на 6–7 частотах) для каждого взаимного расположения источника и приемника в проведенных опытах. Для иллюстрации два набора таких кривых приведены на рис. 2.

Предварительный анализ полученных материалов производился с целью определения степени сходства кривых изменения уровня звукового поля $A(R)$ в зоне, зарегистрированных при различных частотах излучения, оценки изменений в положении начала зоны с изменением частоты излучения, выработки критерия определения начала зоны, единого для разных частот излучения.

Для определения степени сходства кривых $A(R)$, полученных на разных частотах, был проведен их взаимно корреляционный анализ. За коэффициент корреляции принималось максимальное значение функции корреляции. При размещении источника на горизонте 200 м в зависимости от разности по частоте коэффициент корреляции монотонно снижался от 0.92–0.99 при разнице частот в 1/3 октавы до 0.79–0.85 при разнице частот в 5/3 октавы. При размещении источника на глубине 20 м (в приповерхностном канале) снижение коэффициента корреляции с разностью частоты было не столь существенным (с 0.84–0.92 при раз-

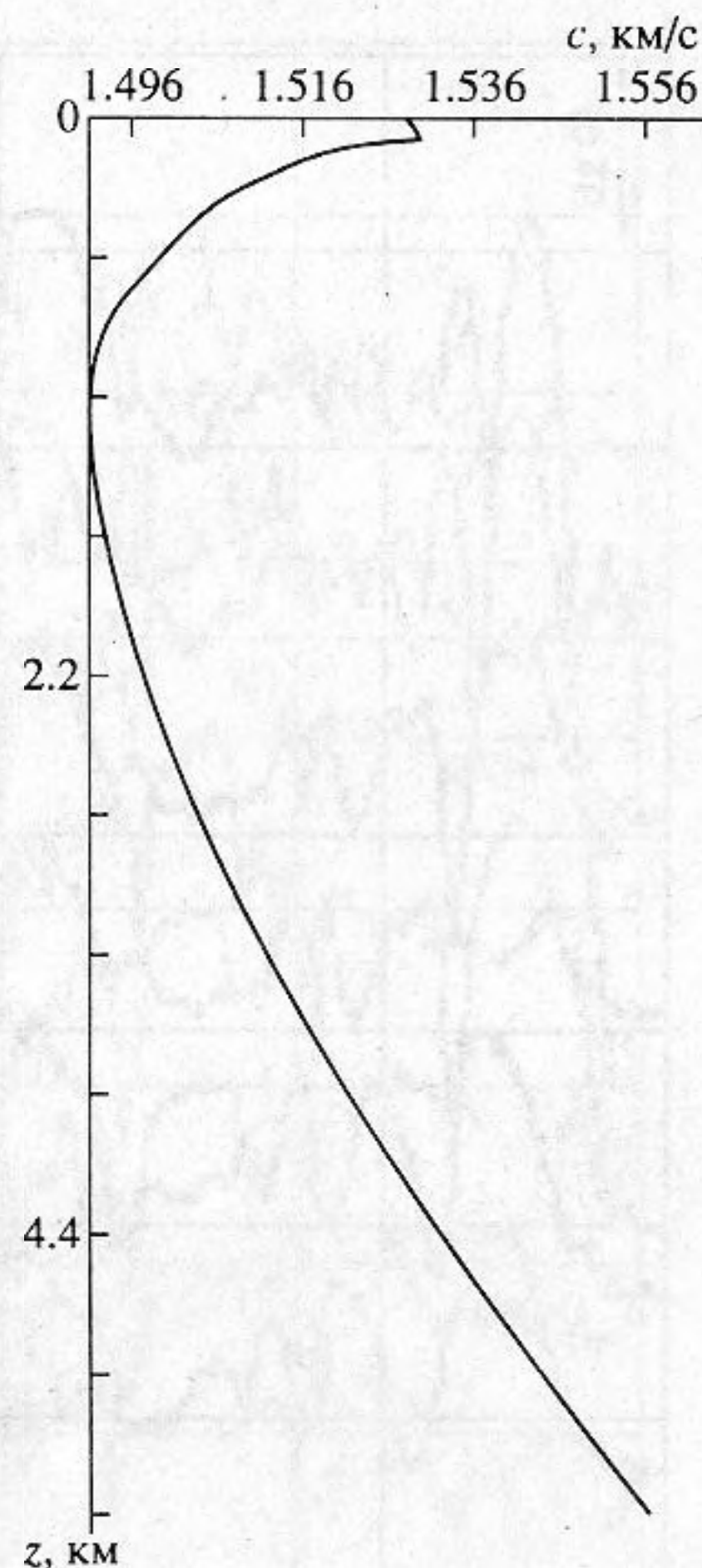


Рис. 1. Профиль изменения скорости звука по глубине в районе проведения экспериментов.

нице частот в 1/3 октавы до 0.75–0.83 при разнице в 5/3 октавы) и далеко не монотонным. В этом случае в формировании суммарного звукового поля в зоне существенную роль играла поверхность океана, что и сказалось на общем снижении коэффициента корреляции и нарушении монотонности его изменения с разнесением частот излучения.

Для выявления участков зоны конвергенции, наиболее подверженных влиянию изменяющейся частоты излучения, в каждой точке зоны определялось среднее (по всем частотам) значение уровня звукового поля и значение его дисперсии. Предварительно все кривые были отнормированы, что исключало возможность искажения результатов анализа из-за различия в исходных уровнях излучения на разных частотах.

Как и следовало ожидать, при расположении излучателя на глубине 200 м максимальные значения дисперсии наблюдались в начале зоны (в районе первого максимума уровня звукового поля и непосредственно за ним). Начало зоны совпадало с каустикой. Изменения уровня звукового поля в окрестности каустики описываются функцией

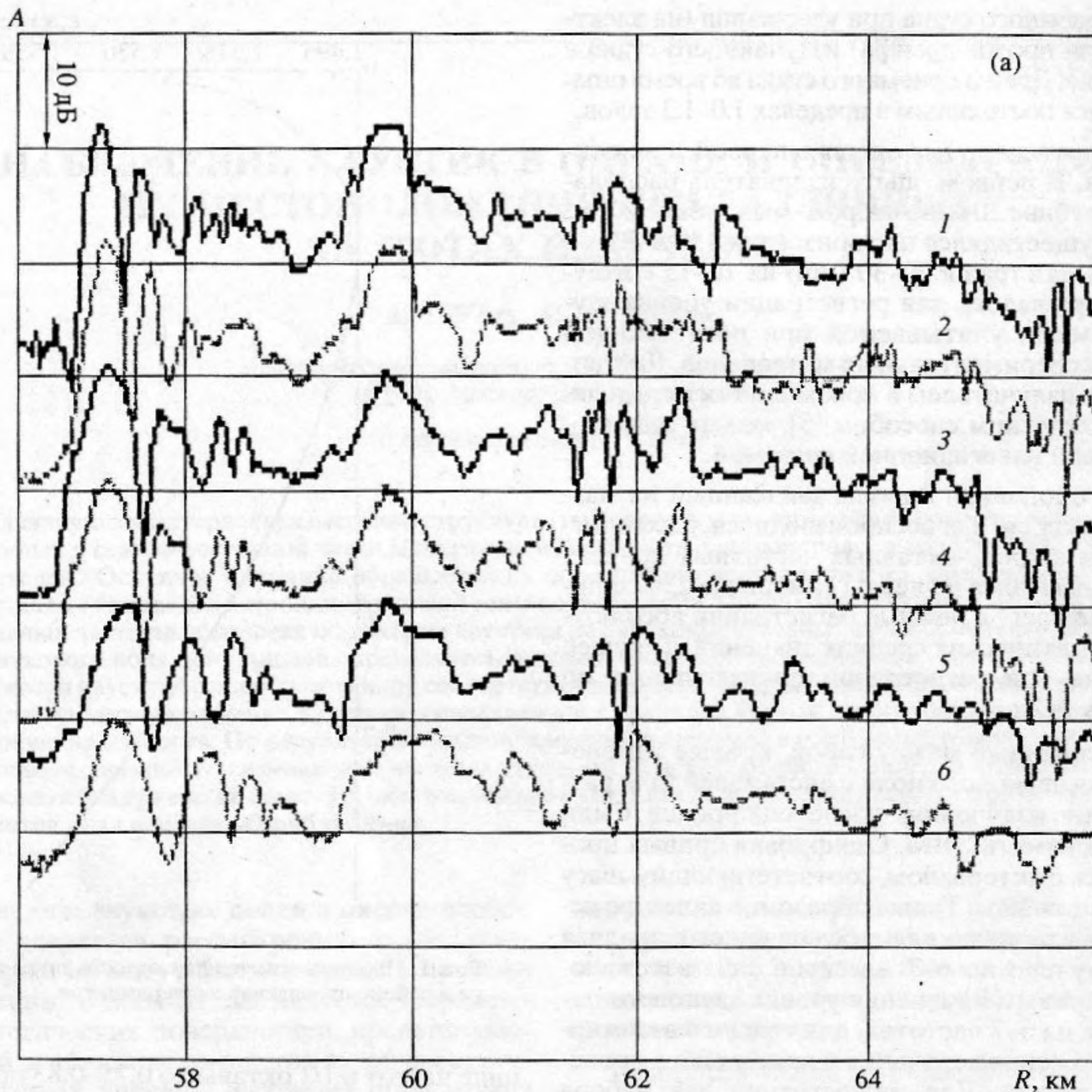


Рис. 2. Изменения уровня звукового поля с дистанцией в первой зоне конвергенции при излучении шумового (в 1/3-октавной полосе) сигнала с центральной полосой: 1 – 1250 Гц, 2 – 1000 Гц, 3 – 800 Гц, 4 – 630 Гц, 5 – 500 Гц, 6 – 400 Гц, 7 – 315 Гц. а – $Z_{ист} = 200$ м, $Z_{пр} = 150$ м, б – $Z_{ист} = 200$ м, $Z_{пр} = 500$.

Эйри, параметр которой частотно зависим. В сторону тени уровень поля монотонно спадает, крутизна спада растет с частотой. В сторону зоны в результате взаимодействия сигналов, приходящих по двум (слабо различающимся углами прихода) лучам, проявляется интерференционная картина, также частотно зависящая, хотя и несколько смазанная из-за шумового (в 1/3-октавной полосе), а не чисто тонального излучения. Это и приводит к большим среднеквадратичным отклонениям от среднего уровня звукового поля в начале зоны. Аналогичный максимум дисперсии наблюдался в начале второй полузоны при расположении приемника на горизонте 500 м. Большие среднеквадратичные отклонения наблюдались также и в конце зоны, где уровни полезного сигнала невысоки. По всей видимости,

они связаны с несовершенством процедуры энергетического вычитания шумовой помехи, проводимой при подготовке экспериментальных материалов к анализу.

При расположении излучателя на глубине 20 м (в приповерхностном канале), приемников на 150 и 500 м каустик в начале зоны конвергенции не образовывалось, интерференционная картина смазывалась из-за взволнованной поверхности (во время проведения опытов волнение достигало 3 баллов). В этом случае значения среднеквадратичного отклонения от среднего уровня звукового поля в пределах зоны конвергенции не превышали 1.5–2.0 дБ, явно выраженных максимумов не наблюдалось.

Предварительная оценка местоположения начала зоны была проведена по произвольно задан-

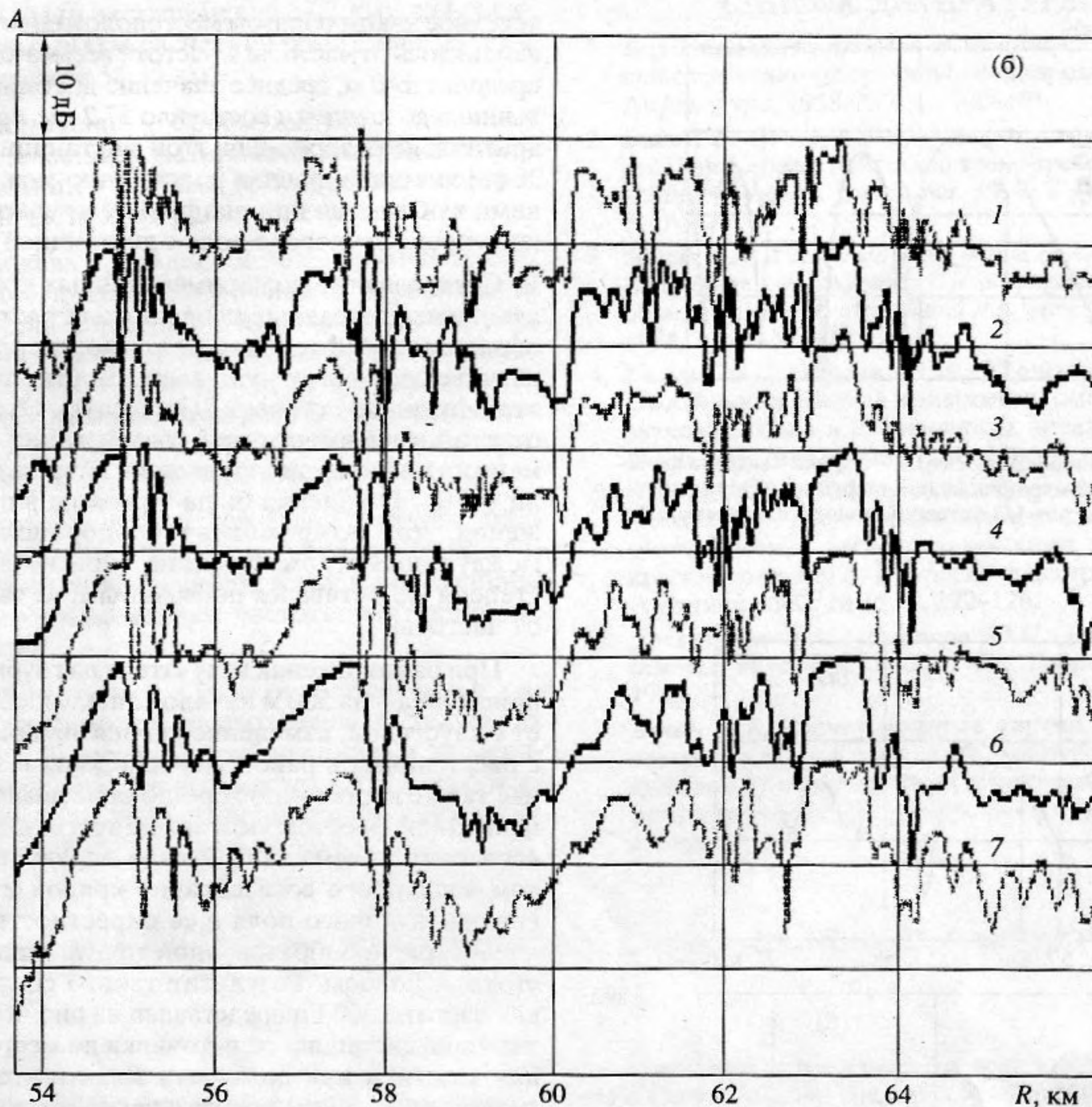


Рис. 2. Окончание.

ному пороговому уровню звукового поля. Подбирался уровень, при котором разброс дистанций до начала зоны был бы минимальным, среднеквадратичное отклонение от среднего значения расстояния до зоны при этом составило около 45 м (вне зависимости от расположения излучателя и приемников). С изменением частоты определенные при этом дистанции до зоны изменялись весьма хаотично, что, по-видимому, говорит об отсутствии явной зависимости местоположения начала зоны от частоты излучения.

При расположении излучателя на глубине 200 м, а приемника на 150 м начало зоны (как показывают расчеты) совпадало с каустикой и изменение уровня звукового поля с дистанцией в окрестности начала зоны (см. рис. 2) достаточно хорошо согласуется по виду с кривой, описываемой квадратом функции Эйри (см. рис. 3).

Поле в окрестности каустики хорошо описывается функцией Эйри лишь при тональном (узкополосном) излучении. Для широкополосного излучения функция, описывающая поле в окрестностях каустики, может быть получена из функции Эйри путем несложных преобразований, учитывающих частотную характеристику излучения. Для 1/3-октавных полос (в предположении независимости уровня излучения от частоты в пределах полосы) такая функция получена и представлена на рис. 3 (кривая 2). Эта функция гораздо лучше согласуется по виду с поведением звукового поля в окрестности начала зоны конвергенции.

Для определения местоположения начала зоны в случае его совпадения с каустикой наиболее целесообразным, по-видимому, следует признать метод численного согласования (по максимуму функции взаимной корреляции или по минимуму

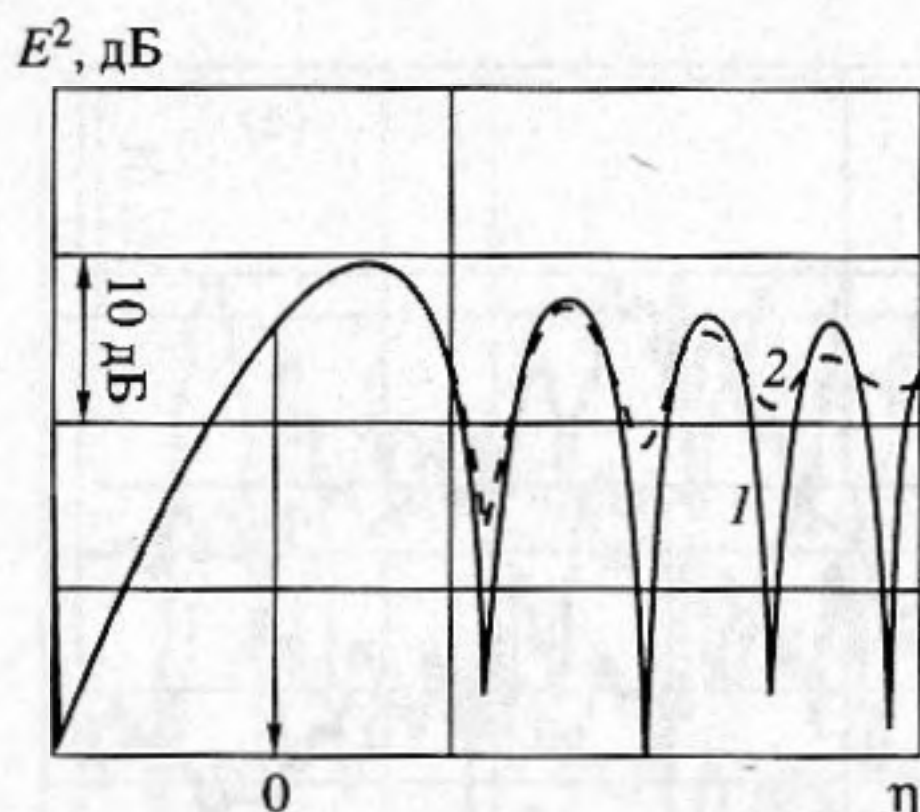


Рис. 3. Функция Эйри $E(\eta)$. 1 – график квадрата функции Эйри. 2 – график квадрата функции Эйри, преобразованной для 1/3-октавной полосы излучаемых частот.

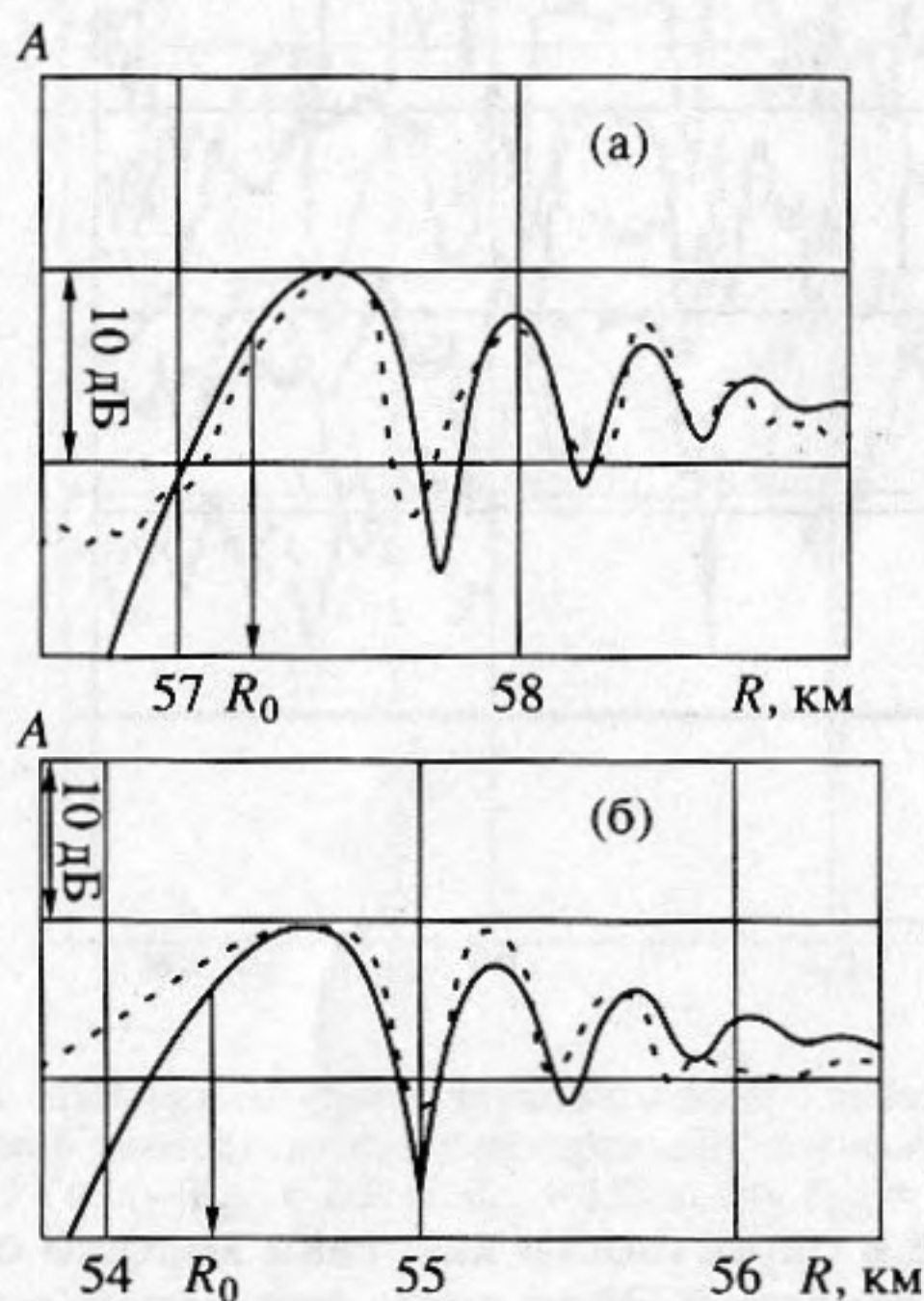


Рис. 4. Результат численного согласования преобразованной функции Эйри (—) с характером изменений уровня звукового поля в районе каустики, измеренного на частоте 500 Гц (---):
а – $Z_{ист} = 200$ м, $Z_{пр} = 150$ м, б – $Z_{ист} = 200$ м, $Z_{пр} = 500$ м.
 R_0 – расстояние от источника до каустики, соответствующее нулевому значению параметра функции Эйри.

среднеквадратичных отклонений) экспериментальной кривой изменения уровня звукового поля в начале зоны с преобразованной нами для шумового излучения функцией Эйри, параметр которой зависит от частоты известным образом [6]. Результат такого согласования для частоты излучения 500 Гц представлен на рис. 4а. Хорошо согласуются с экспериментом три первых “горба” функции Эйри, несколько хуже четвертый. Опре-

деленное таким образом местоположение каустики изменялось от частоты к частоте весьма хаотично в пределах ± 40 м, среднее значение дистанции от источника до каустики составило 57.2 км, среднеквадратичный разброс для этой дистанции – около 20 м (величина, равная расстоянию между соседними выборками при оцифровке кривых изменения уровня звукового поля с дистанцией).

Согласование экспериментальных кривых, полученных для разных центральных частот с преобразованной функцией Эйри подтвердило теоретическую частотную зависимость параметра этой функции – степень $2/3$ частоты. Отклонения от этой зависимости при согласовании экспериментальной кривой с функцией Эйри не превысили 2–3%. Эта оценка была получена в предположении, что коэффициент пропорциональности между параметром функции Эйри и частотой в степени $2/3$ оставался постоянным, не зависящим от частоты.

При расположении излучателя на глубине 200 м, приемника – на 500 м начало зоны также совпадает с каустикой, изменение уровня звукового поля с расстоянием в районе начала зоны в этом случае также достаточно хорошо описывается функцией Эйри. Местоположение каустики для этого горизонта приема также было определено методом численного согласования кривой изменения уровня звукового поля в ее окрестности с функцией Эйри, преобразованной для 1/3-октавной частотной полосы. Результат такого согласования для частоты 500 Гц представлен на рис. 4б. Среднее значение дистанции от источника до местоположения каустики или до начала зоны в этом случае составило 54.35 км при среднеквадратичном разбросе 30 м. Несколько слабее теоретической зависимости параметра функции Эйри от частоты – по материалам эксперимента для горизонта приема 500 м получена степень $1/2$ (вместо $2/3$ по теории).

В каустике (в первом ее максимуме) по экспериментальным данным были определены значения аномалии распространения. На частоте 630 Гц для горизонта приема 150 м аномалия оказалась равной 23 дБ, для горизонта 500 м – несколько ниже (21–22 дБ). С повышением частоты излучения значение аномалии несколько возросло. Максимальное изменение аномалии в каустике при изменении частоты излучения в пределах 2 октав составило около 2–3 дБ.

Расчет местоположения каустики, выполненный в лучевом приближении по программе А.В. Вагина [7] для профиля $C(z)$, представленного на рис. 1, и источника, расположенного на глубине 200 м, достаточно хорошо согласуется с результатами эксперимента. Так, для горизонта приема 150 м расчетное расстояние от источника до кау-

стики 57.4 км (в эксперименте 57.2 км), для горизонта приема 500 м расчетное расстояние 54.3 км (в эксперименте 54.35 км).

В заключение сформулируем основные результаты анализа материалов опытов с широкополосным излучателем, проведенных в северо-восточной части Центральной Атлантики:

– в условиях проведенного эксперимента, когда ближняя к источнику граница первой зоны конвергенции совпадает с каустикой, метод численного согласования экспериментальной кривой изменения уровня звукового поля в ее окрестности с квадратом функции Эйри дает достаточно высокую точность в определении положения каустики, а следовательно, и границы зоны;

– в диапазоне частот 300–1300 Гц какого-либо заметного изменения местоположения ближней к источнику границы первой зоны конвергенции, связанного с изменением частоты излучения, не обнаружено;

– констатируемое в ряде опубликованных работ систематическое расхождение в значениях расчетного (в лучевом приближении) и экспериментально наблюдаемого местоположения ближней к источнику границы первой зоны конвергенции в этих опытах не подтвердилось.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархатов А.Н., Шмелев И.И. Фокусировка звука при отражении от границы неоднородной среды // Акуст. журн. 1958. № 4. С. 100–101.
2. Duba T.F., Bowlin J.B. Ray-acoustic caustic formation and timing effects from ocean sound-speed relative curvature // J. Acoust. Soc. Amer. 1994. V. 96. № 2. Pt. 1. P. 1033–1046.
3. Guthry A.N., Fitzgerald R.N., Nutile D.A., Shaffer J.D. Long-range low frequency CW propagation in the deep ocean: Antigua-Newfoundland // J. Acoust. Soc. Amer. 1974. V. 56. № 1. P. 58–69.
4. Галкин О.П., Швачко Л.В., Харченко Е.А. и др. Особенности угловой и энергетической структуры звукового поля в океанических зонах конвергенции // Акустика в океане. М.: Наука, 1992.
5. Веденев А.Е., Галкин О.П., Рогожкин И.С., Филиппов Л.М. Акустический метод измерения расстояний между исследовательскими судами в открытом океане // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1982. № 15. С. 122–126.
6. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
7. Вагин А.В. Расчет лучевых картин, суммарного звукового поля в точке, его угловой, временной, фазовой и энергетической структуры в двумерно-неоднородной среде: Отчет. М.: Акустический институт, 1974.

Observation and Location of Caustics in the Ocean at Different Sound Frequencies

R. A. Vadov

The sound field structure in the first convergence zone is analyzed. It was measured with a broadband (300–1300 Hz) sound source in the north-eastern region of the Central Atlantic. The main objective of the analysis was to determine the location of a caustic which coincided with the boundary of the convergence zone nearest to the source. Upon 1/3-octave signal filtering, the caustic location was determined by numerically matching the properly transformed Airy function to the experimental sound-field level in the vicinity of the caustic. For a caustic which coincides with the boundary of the first convergence zone, this caustic location method proved to be sufficiently reliable. Within the used frequency band, experiments revealed no significant frequency dependence in the location of the zone boundary. This location agrees well with that computed in the ray approximation.