АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2007, том 53, № 4, с. 574–579

АКУСТИКА ОКЕАНА. ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.23

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЭНЕРГИИ ДОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ КАК ИНДИКАТОР ПЕРЕСЕЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ТРАССОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ

© 2007 г. А. В. Микрюков, О. Е. Попов

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника, 4
E-mail: po5791@aport.ru

Поступила в редакцию 22.12.2005 г.

Выявлена значительная индивидуальная изменчивость энергии четверки сигналов двукратного отражения от дна при пересечении акустической трассой фронтальной зоны Гольфстрима. На экспериментальных кривых наблюдается локальное увеличение энергии отдельных сигналов, отраженных от дна, более чем в два раза. Как показали результаты численного моделирования, местоположение и величина наблюдаемых максимумов энергии оказываются весьма чувствительными к положению границ фронтальной зоны, ее горизонтальной и вертикальной протяженности, величине горизонтальных градиентов. Делается вывод о возможности использования наблюдаемого явления в качестве индикатора положения фронтальной зоны, а также для оценки ее параметров.

PACS: 43.30Pc

При обработке данных морских акустических экспериментов на трассах, пересекающих фронтальные зоны, весьма важно знать точное местоположение границ фронтальной зоны. Получить эту информацию во время эксперимента прямыми методами удается далеко не всегда. В первую очередь это вызвано тем, что фронтальные зоны в океане представляют собой один из ярких примеров нестабильности динамических характеристик водной среды. Их параметры – положение, ширина, углы наклонов фронтальных разделов, профили горизонтальных градиентов – могут претерпевать значительные изменения даже в относительно короткие отрезки времени [1]. Оценка границ фронтальных зон, осуществляемая с помощью спутниковых данных на основе резкого изменения поверхностной температуры, часто может и не совпадать с границей подповерхностного фронта [2]. Проводимые параллельно с акустическим экспериментом измерения с помощью буксировки на различных глубинах датчиков температуры и солености удается выполнить в нужном объеме далеко не всегда. В связи с этим важно выявить надежные признаки пересечения границы фронтальной зоны в параметрах самих акустических сигналов, которые могут проявляться в резком изменении частотно-временной и энергетической структуры сигналов. Самым сложным при поиске этих признаков является установление причины, вызвавшей изменение структуры сигналов, на фоне множества факторов влияющих на распространение звука в реальных волноводах. Решение этой задачи позволит не только уточнить модель среды при обработке данных конкретного эксперимента, но и пополнит арсенал акустических методов мониторинга океанической среды.

Попытка использования акустического метода для контроля положения фронтальной зоны была предпринята в работе [3], посвященной анализу результатов эксперимента во фронтальной зоне Гольфстрима.

Повторим описание условий проведения эксперимента. Приемное судно с одиночным гидрофоном на глубине 1200 м, лежало в дрейфе в области холодных склоновых вод, характерных для северного или левого края Гольфстрима. Излучающее судно, двигаясь со скоростью ~30 км/ч в юго-восточном направлении, производило через каждые 2.5 км подрывы зарядов весом 2.8 кг на глубине 290 м. На основе анализа поверхностной температуры предполагалось, что конечная точка трассы протяженностью 120 км будет располагаться непосредственно над областью "теплого ядра" Гольфстрима. Глубина океана незначительно менялась вдоль трассы от 4.8 км в точке приема до 5.05 км в конечной точке трассы.

В работе [3] было предложено использовать в качестве индикатора области больших горизонтальных градиентов скорости звука, характерных для фронтальной зоны, поведение временных задержек между сигналами одинаковой кратности отражения от дна. Данный метод позволил доста-

точно надежно показать, что зафиксированное в опыте положение резкого изменения поверхностной температуры на трассе существенным образом не совпадает с границей наклонного подповерхностного фронта Гольфстрима.

В ходе дальнейшей обработки экспериментальных материалов данного опыта был продолжен поиск изменений параметров сигналов, которые могли бы служить надежными индикаторами наличия больших горизонтальных градиентов скорости звука при пересечении акустической трассой фронтальной зоны. В частности, была выявлена сильная изменчивость энергии сигналов, отраженных от дна.

На рис. 1 представлены траектории лучей, соответствующие четвертке сигналов, пришедших в точку приема после двукратного отражения от дна. Заметим, что в дальнейшем при расчетах мы, используя принцип взаимности, будем предполагать, что имеем дело не с движущимся источником, а с буксируемым на глубине 290 м приемником, удаляющимся от зафиксированного на глубине 1200 м источника. Последовательность времен приходов сигналов в рассматриваемом семействе лучей с двукратным отражением от дна при такой геометрии корреспондирующих точек распределена следующим образом. Первым в точку приема приходит сигнал, вышедший из источника вниз и пришедший в точку приема снизу (сигнал *1*, соответственно луч 1). Вторым будет приходить сигнал, вышедший также как и первый вниз, но пришедший в точку приема сверху (сигнал *2*). Третьим и четвертым придут сигналы, вышедшие из источника вверх и испытавшие по сравнению с сигналом 1 дополнительное отражение от поверхности в окрестности источника (сигнал *3*) и дополнительное отражение от поверхности, как в окрестности источника, так и приемника (сигнал *4*).

На рис. 2 показаны зарегистрированные в эксперименте сигналы донного отражения второй кратности в частотном диапазоне 50–1000 Гц для глубины приема 1200 м и диапазона расстояний 73–95 км (время прихода первого сигнала принято за ноль). Сигналы пронумерованы согласно указанной выше очередности их времен прихода в точку приема. Как видим, сигналы надежно разрешаются во времени, что позволило оценить энергию каждого из них при изменении расстояния от 35 до 107 км. Обращает на себя внимание резкое уменьшение амплитуд регистрируемых сигналов на расстояниях более 89 км.

На рис. 3 представлена зависимость энергии этих сигналов от расстояния между источником и приемником звука. Помимо резкого уменьшения уровней энергии практически в десять раз начи-

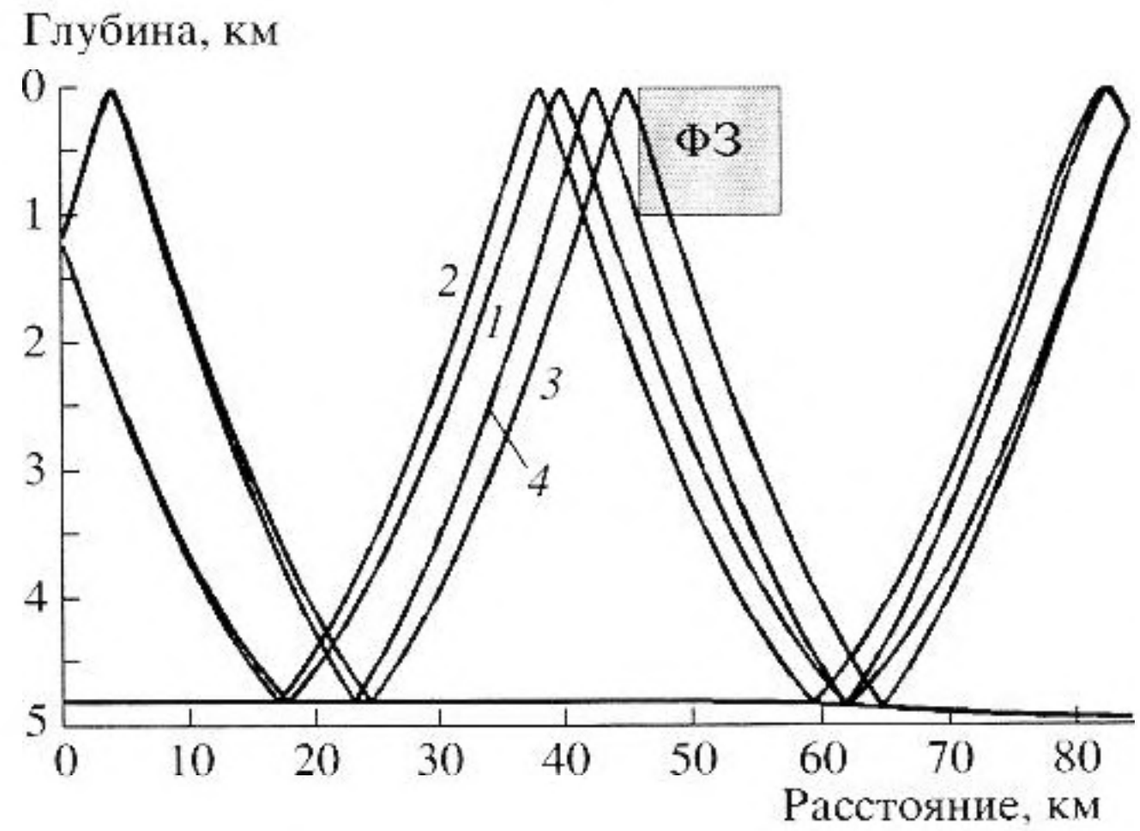

Рис. 1. Траектории двукратно отразившихся от дна лучей в неоднородном волноводе. Глубина источника – 1200 м, приемника – 290 м. Цифры на рисунке указывают последовательность времен прихода сигналов, распространяющихся вдоль данных траекторий, в точку приема.

ная с расстояния ~89 км, на несколько меньших расстояниях наблюдается хорошо различимое локальное увеличение энергии отдельных приходов более чем в два раза. Это увеличение энергии невозможно объяснить ни изменением рельефа, поскольку глубина по трассе менялась незначительно, ни горизонтальной неоднородностью акустических свойств дна.

С целью объяснения наблюдаемого эффекта было проведено моделирование распространения звука в волноводе с фронтальной зоной с помощью лучевой программы для двумернонеоднородных сред. Детальной съемки гидрофизических полей во время проведения опыта не проводилось, так что подробных данных о структуре фронтальной зоны в нашем распоряжении не имелось. Основываясь на результатах работы [1] и ряда предварительных расчетов, было решено остановиться на самой простой модели среды. В начале трассы предполагалось наличие плоскослоистого участка протяженностью 46 км с профилем скорости звука склоновых вод, измеренного в начальной точке трассы. Сама фронтальная зона моделировалась как 11-ти километровая область с линейным изменением скорости звука от профиля скорости звука склоновых вод к профилю скорости звука более теплых и соленых вод, измеренного непосредственно в водах Гольфстрима. Профили скорости звука склоновых вод и вод Гольфстрима приведены на рис. 4.

На рис. 5 представлены графики зависимости факторов фокусировок лучей для донного отражения второй кратности от расстояния для плоскослоистой среды с профилем скорости звука

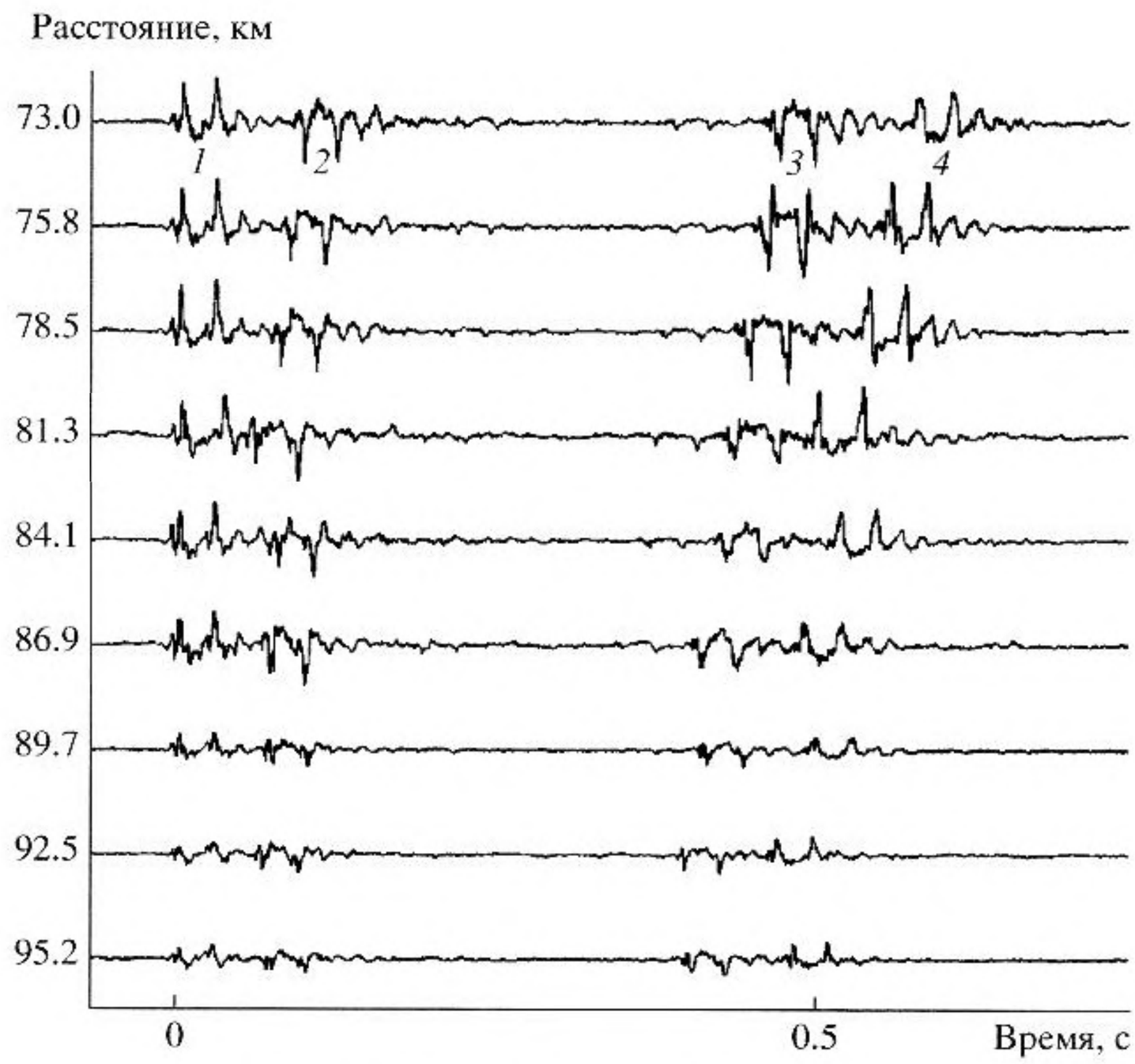

Рис. 2. Зарегистрированные в эксперименте для горизонта приема 1200 м сигналы донного отражения второй кратности. Диапазон частот 50–1000 Гц. За нулевой момент времени принято время прихода первого сигнала.

склоновых вод (жирная штриховая линия, соответствующая изменению фактора фокусировки для луча 1) и для выбранной модели среды с фронтальной зоной. Видим, что в случае однородного по трассе волновода фактор фокусировки плавно уменьшается по мере роста расстояния. Во втором случае, при наличии фронтальной зоны, изменение факторов фокусировки с расстоянием приобретает гораздо более сложный характер, качественно во многом аналогичный ходу экспериментальных кривых на рис. 3.

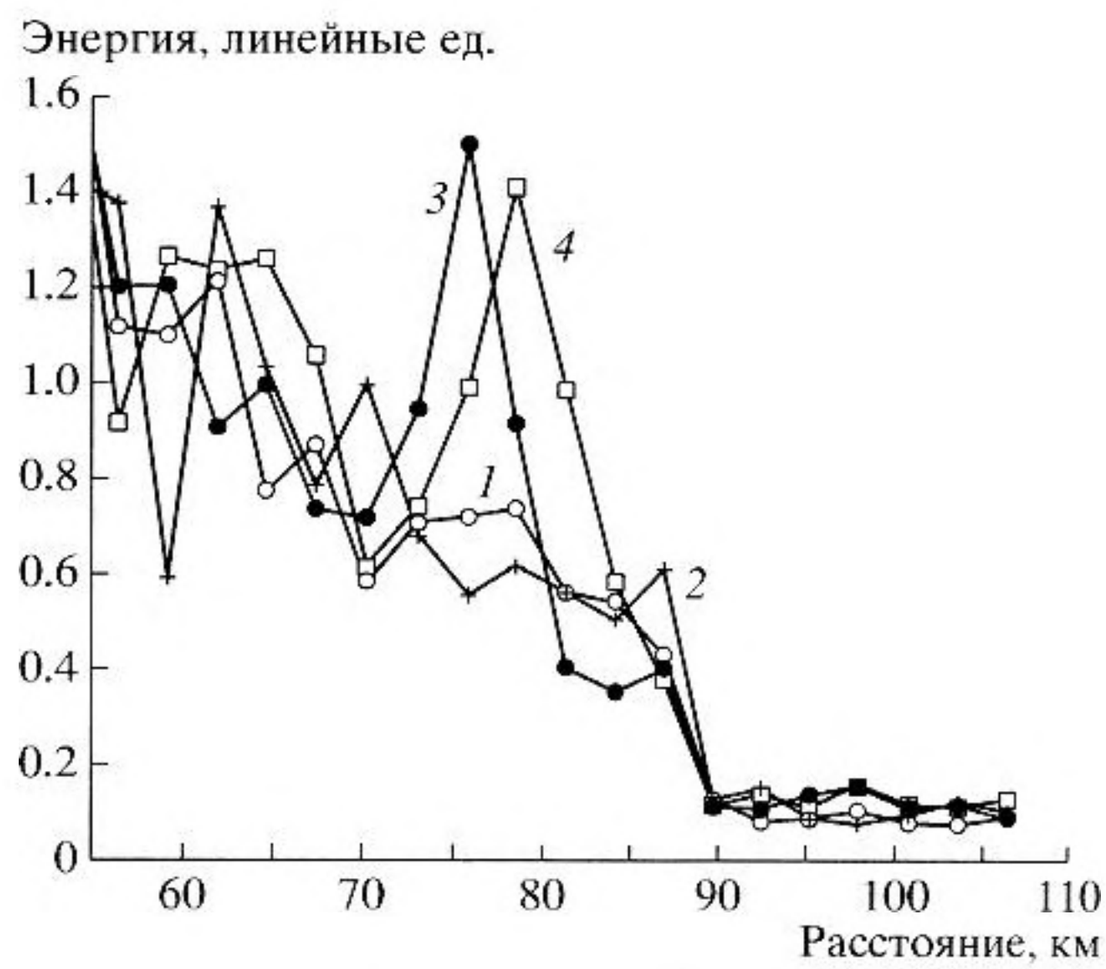

Рис. 3. Зависимость энергии сигналов донного отражения второй кратности от расстояния. Цифры на рисунке указывают ход кривых для соответствующих номеров сигналов.

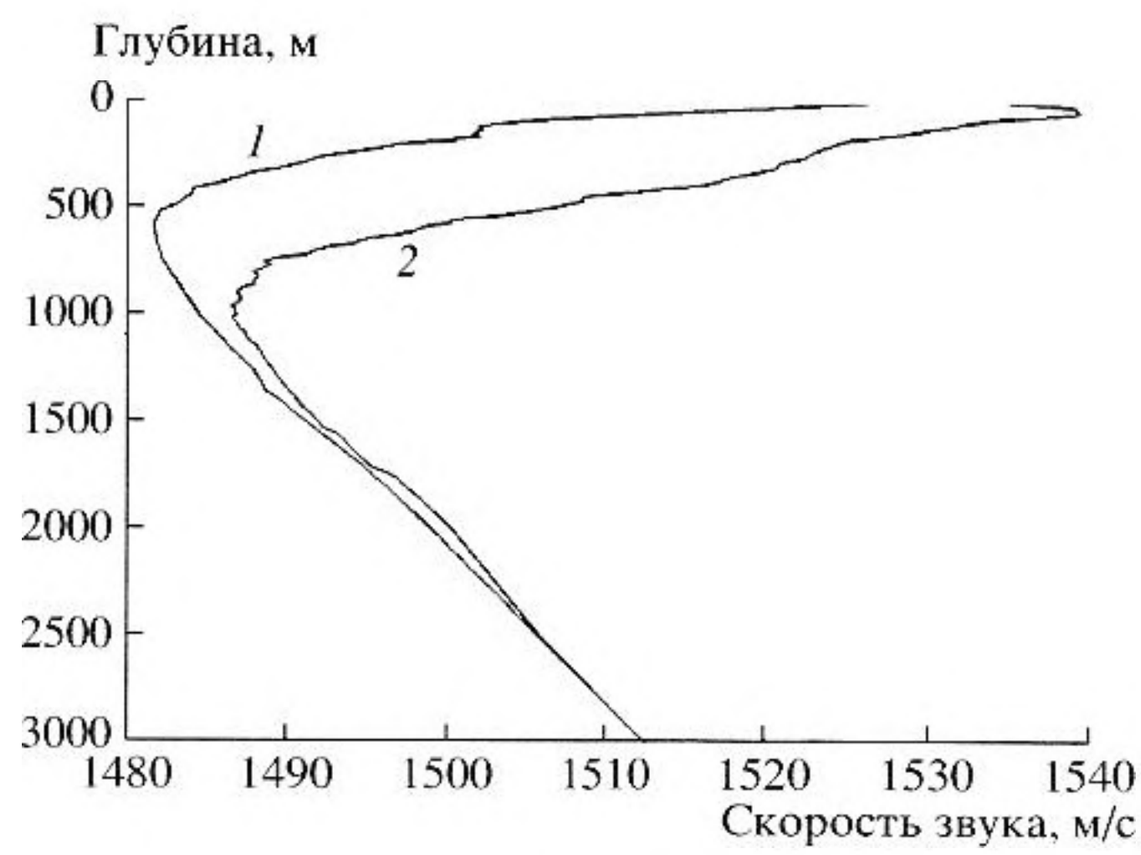

Рис. 4. Профили скорости звука для склоновых вод (1) и теплых вод Гольфстрима (2).

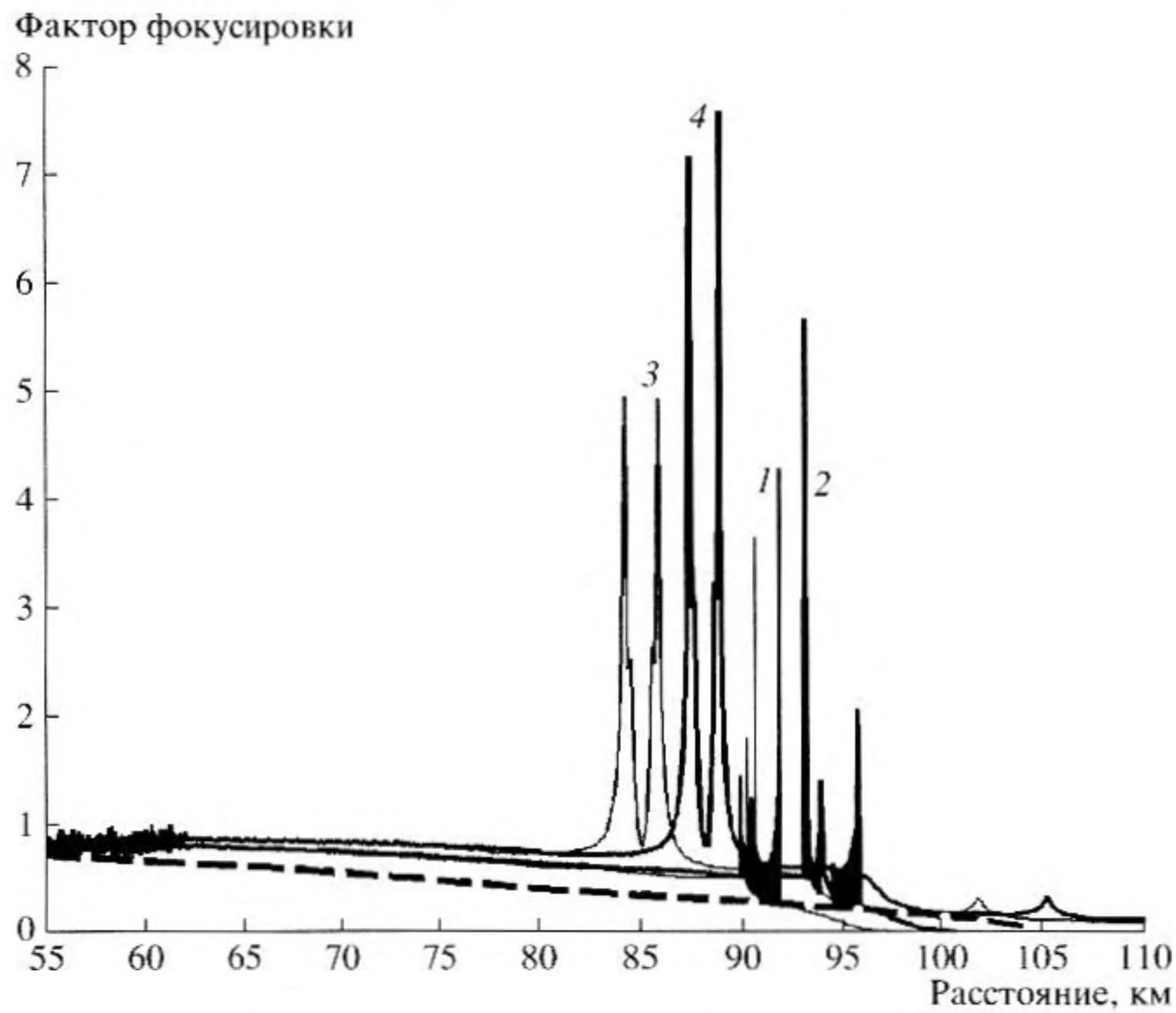

Рис. 5. Изменение факторов фокусировки лучей, соответствующих донным отражениям второй кратности, в зависимости от расстояния для выбранной модели среды с фронтальной зоной. Жирной штриховой линией для луча 1 в плоскослоистом волноводе с профилем скорости звука для склоновых вод.

Кривые зависимости факторов фокусировки лучей от расстояния, начиная с границы фронтальной зоны (46 км) и до появления заметных максимумов перед началом спада кривых, лежит несколько выше аналогичной кривой для плоскослоистого волновода. Это объясняется тем, что для этих расстояний факторы фокусировки лучей, выходящих из источника под крутыми углами и, не касаясь фронтальной зоны, проходящих ниже ее, оказываясь в теплых водах Гольфстрима, где их факторы фокусировки становятся несколько большими.

Лучи, покидающие источник под более пологими углами и впервые касающиеся поверхности непосредственно в самой фронтальной зоне, имеют уже факторы фокусировки, сопоставимые с факторами фокусировки лучей в плоскослоистом волноводе, что и обуславливает наблюдаемый резкий спад кривых.

Таким образом, двойные максимумы, наблюдаемые на кривых факторов фокусировки непосредственно перед спадом этих кривых, обусловлены лучами, вышедшими из источника в небольшом угловом диапазоне. Их местоположение соответствует расстояниям, на которых горизонта приема достигают последовательно лучи под номерами 3, 4, 1, 2 (нумерация лучей сохраняется той же, что и при анализе времен распространения сигналов). Из лучевой картины на рис. 1 мы видим, что именно в такой последовательности рассматриваемое семейство лучей после отражения от поверхности уходит вниз, пересекая границу фронтальной зоны. Увеличение энергии сигналов донных отражений на экспериментальной кривой (рис. 3) происходит в той же последовательности, что и в предложенной выше модели. Хорошо и в той же последовательности проявляются максимумы для сигналов 3 и 4. К сожалению, большой интервал между экспериментальными точками (~2.5 км) не позволил достаточно подробно отобразить детальную структуру данных максимумов и, возможно, обусловил лишь слабую выраженность максимумов для сигнала 2 и их полное отсутствие для сигнала 1.

Расчеты изменения энергии сигналов донных отражений с расстоянием, проведенные по волновой программе Авилова К.В., реализующей широкоугольное параболическое приближение [4], .качественно хорошо совпадают с результатами лучевых расчетов.

Дальнейшее моделирование показало, что небольшой диапазон углов выхода лучей, принимающих участие в формировании подъемов на кривых факторов фокусировки, обусловливает зна-

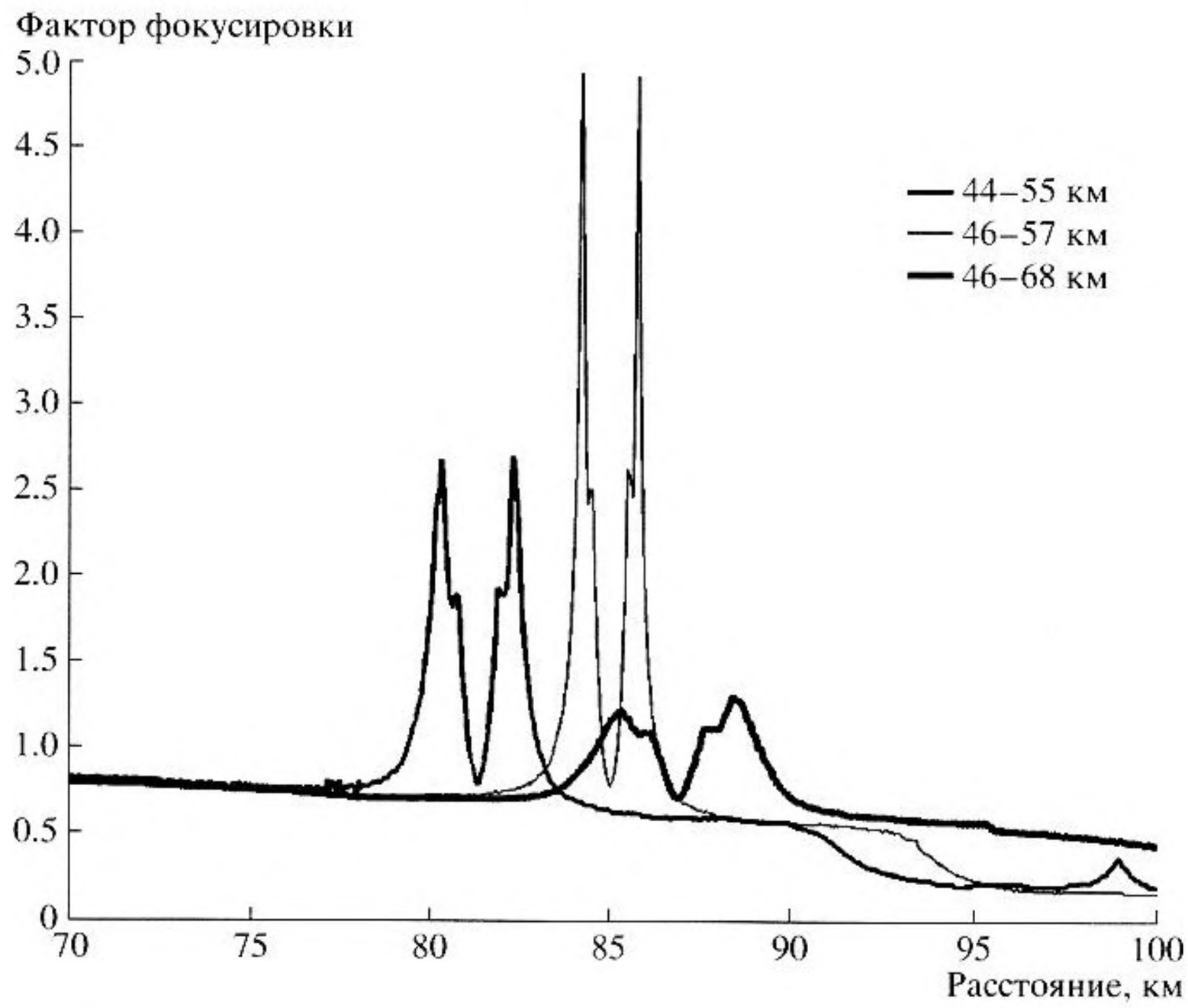

Рис. 6. Поведение факторов фокусировки луча 3 при смещении границ и изменении протяженности фронтальной зоны. Цифрами дано положение начала и конца фронтальной зоны.

чительную чувствительность местоположения данных пиков к модели волновода. Это касается в первую очередь положения границ этой зоны в волноводе, ее горизонтальной протяженности, величин и характера поведения в ее пределах горизонтальных градиентов. Любые изменения данных параметров ведут как к изменению местоположения пиков, так и их амплитуд. На рис. 6 показано изменение местоположения и амплитуды максимума сигнала 3 при изменении границ и протяженности фронтальной зоны в волноводе. Видим, что смещение фронтальной зоны на 2 км при неизменной ее ширине ведет к сдвигу пика в том же направлении уже на 4 км, а увеличение ширины фронтальной зоны вдвое, практически не сказываясь на положении максимума, уменьшает его амплитуду в несколько раз.

Таким образом, как показали проведенные выше исследования, на кривых зависимости от расстояния энергии четверки сигналов донного отражения в определенном интервале расстояний наблюдается ряд хорошо различимых максимумов. Численное моделирование показало, что появление данных максимумов обусловлено сигналами, распространяющимися вдоль траекторий отразившихся от дна лучей, вышедших из источника в небольшом угловом диапазоне и, после отражения от поверхности, уходящих вниз и пересекающих переднюю границу фронтальной зоны. Небольшой угловой диапазон углов выхода из источника обусловливает значительную чувствительность местоположения и амплитуд данных максимумов к модели волновода. Последнее обстоятельство дает возможность использовать наблюдаемое явление в качестве индикатора момента пересечения акустической трассой фронтальной зоны и для оценки ее параметров.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-02-16565, 04-02-16959).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадов Р.А.* Межгодичная изменчивость условий дальнего распространения звука в Норвежском море // Акуст. журн. 2002. Т. 48. № 4. С. 485–492.
2. *Athanassoulis G.A., Skarsoulis E.K.* Arrival-time perturbations of broadband tomographic signals due to sound-speed disturbances. A wave-theoretic approach //J. Acoust. Soc. Amer. 1995. V. 97. № 6. P. 3575–3588.
3. *Микрюков А.В., Попов О.Е.* Акустический метод определения границы фронтальной зоны в океане // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 3. С. 401–406.
4. *Авилов К.В.* Псевдодифференциальные параболические уравнения распространения звука в океане, плавно неоднородном по горизонтали, и их численные решения // Акуст. журн. 1995. Т. 41. № 1. С. 5–12.

The Energy Variability of Bottom Reflections as an Indicator of Crossing the Frontal Zone by an Acoustic Path

A. V. Mikryukov and O. E. Popov

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia
e-mail: po5791@aport.ru

Abstract—A considerable energy variability is observed for the quartets of doubly bottom-reflected signals when the acoustic path crosses the frontal zone of the Gulf Stream. The experimental curves exhibit a local increase by a factor of more than two in the energy of individual bottom-reflected signals. According to the data of numerical modeling, the position and magnitude of the energy maxima prove to be highly sensitive to the position of the frontal zone, its horizontal and vertical sizes, and the values of the horizontal sound speed gradients. A conclusion is drawn that the observed phenomenon can be used as an indicator of the position of the frontal zone and as a tool for estimating its parameters.