

УДК 534.231

## ПОСТРОЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МОРСКОГО ДНА МЕЛКОВОДНОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ЗВУКА

© 1998 г. А. И. Белов, А. Г. Комаров

Северный филиал Акустического института им. Н.Н. Андреева  
184600 г. Североморск Мурманской области, ул. Почтовая, 3

Поступила в редакцию 25.04.95 г.

На основании геолого-геофизических данных и результатов исследований характеристик звуковых полей и отражательных свойств морского дна в мелководном районе построена акустическая модель дна. Модель состоит из двух жидких поглощающих слоев и твердого полупространства. Приведено сравнение результатов расчетов и данных экспериментов по распространению звука в широком частотном диапазоне.

Результаты исследований в мелком море показали насколько велико влияние морского дна на распространение звука [1, 2]. Поэтому значительное число работ было направлено на построение геоакустических моделей дна в мелководных районах, которые могут быть использованы для прогнозирования характеристик звуковых полей в широком частотном диапазоне [3–8]. Настоящая работа также посвящена построению модели дна мелководного района моря.

Как правило, основу геоакустической модели составляют данные, полученные методами отраженных и преломленных волн, и результаты исследования поверхностных слоев донных отложений геологическими ударными трубками [4–6]. Однако геолого-геофизические методы сами по себе не позволяют определить параметры геоакустической модели с необходимой для акустических задач точностью. Поэтому уточнение имеющихся и определение недостающих параметров модели осуществляется путем подгонки результатов расчетов к данным экспериментов по распространению звука в водном слое [4–8]. В каждой из этих работ экспериментальные исследования проводились по единой методике, направленной на получение либо зависимости пространственного спада среднего уровня поля от частоты [4–6], либо частотной зависимости характеристик отдельных мод, формирующих звуковое поле [7, 8]. Отличием данной работы является то, что для построения единой геоакустической модели дна исследуемого района в ней были использованы самые разные характеристики звуковых полей. А именно: дисперсия импульсных сигналов, характеристики модового состава инфразвуковых тональных сигналов и пространственные зависи-

мости среднего уровня поля в низкочастотном диапазоне. Кроме того, использовались данные экспериментов по измерению модулей коэффициентов отражения звука от морского дна в килогерцовом частотном диапазоне.

Построение геоакустической модели дна выполнялось для мелководного района с глубиной места 190–200 м. В соответствии с геологическими данными морское дно в районе до глубин в сотни метров состоит из слоя осадков четвертичного возраста и коренных пород мелового возраста. Скорость продольных волн  $C_L$  в коренных породах, оцененная методом преломленных волн, лежит в пределах 2300–2400 м/с. Результаты одноканального сейсмоакустического профилирования показали, что время пробега зондирующего импульса в толще четвертичных отложений составляет 8–12 мс. Грунтовое опробование верхней части четвертичных отложений установило наличие тонкого слоя голоценовых осадков мощностью до 0,4 м, представленных глинисто-алевритовыми илами. Плотность  $\rho$  голоценовых осадков в нескольких точках исследуемого района составила 1730–1790 кг/м<sup>3</sup>. Плотность самой верхней части донных отложений, залегающих под голоценовыми осадками, лежит в пределах 1910–2050 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, геолого-геофизические данные позволили представить модель дна в виде двух слоев, лежащих на полупространстве, и определить пределы изменений некоторых ее параметров. Окончательная оценка всех параметров модели проводилась на основе данных экспериментов по распространению звука в водном слое.

Методики экспериментальных работ были реализованы с использованием двух судов, с борта

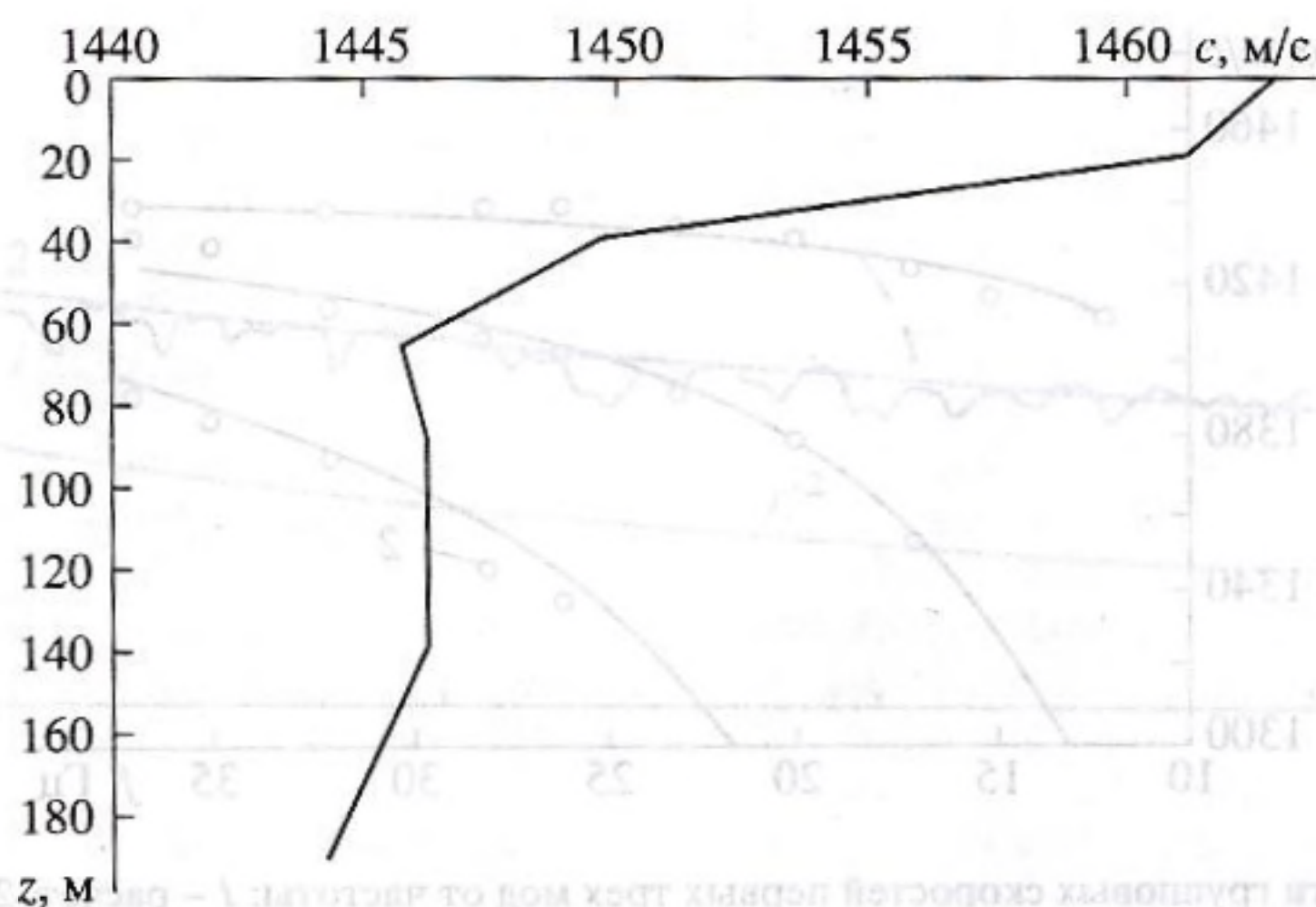


Рис. 1. Вертикальное распределение скорости звука в воде.

одного из которых опускались источники звука, а на другом осуществлялась регистрация сигналов, принятых на вертикальную цепочку из ненаправленных гидрофонов. Расстояние между судами определялось с помощью судовых навигационных систем. Вертикальное распределение скорости звука в воде, измеренное во время опытов, показано на рис. 1.

Для исследования дисперсии импульсных сигналов использовались взрывные источники звука, подрывы которых производились на глубине 100 м. Три точки подрыва располагались на расстояниях 25–33 км к югу, западу и северу относительно точки приема. В каждой точке было выполнено пять подрывов. Узкополосный спектральный анализ позволил выделить первые три моды в частотном диапазоне 12–37 Гц. Были определены задержки моментов прихода мод относительно высокочастотной части сигнала. Оценка групповых скоростей мод  $v$  выполнялась в предположении, что высокочастотная часть сигнала на частотах в несколько сотен герц распространяется со скоростью звука на глубине излучения.

Изучение модового состава инфразвуковых тональных сигналов проводилось методом синтезированной апертуры. Излучатель сигнала частотой 17.44 Гц буксировался на глубине 32 м в радиальном направлении от точки приема. Длина измерительной трассы составляла около 25 км. В результате обработки зарегистрированных горизонтальных разрезов звукового поля были выделены четыре моды и определены их продольные волновые числа. Длина синтезированной апертуры равнялась 7 км. Оценки фазовых скоростей мод составили 1469, 1568, 1782 и 2242 м/с.

Определение потерь при распространении низкочастотных сигналов проводилось для частот 100 и 300 Гц. Тональные ненаправленные излу-

тели буксировались на глубине 35 м в радиальном направлении от точки приема. Длина измерительной трассы составляла около 25 км. Во время опыта были зарегистрированы уровни звукового поля  $J(r)$  при изменении расстояния  $r$  между корреспондирующими точками.

Измерение угловой зависимости модулей коэффициентов отражения звука от морского дна  $|R(\chi)|$  выполнялось стандартным методом сравнения при тонально-импульсном излучении [9] на частотах 2 и 3 кГц. Значения модулей коэффициентов отражения были определены при изменении углов скольжения  $\chi$  в диапазоне  $8^\circ$ – $70^\circ$ .

Для вычисления характеристик звуковых полей при подгонке результатов расчетов к данным экспериментов использовалась модовая программа [10]. Значения модуля коэффициента отражения вычислялись по известным формулам [11].

Ввиду некорректности задачи определения акустических характеристик донных отложений по результатам измерений звуковых полей при подгонке использовались следующие ограничения:

1. удовлетворение критерия простоты, т.е. модель должна включать в себя минимально возможное число параметров;
2. модель не должна противоречить имеющимся геолого-геофизическим данным;
3. соотношение значений скорости продольных волн и плотности не должно противоречить известным регрессионным соотношениям [12, 13].

Последовательность построения модели дна была следующей:

1. На основании экспериментальных оценок групповых и фазовых скоростей мод были подобраны скорости продольных волн в полупространстве и основной толще четвертичных отложений, значения которых составили 2400 и 1750 м/с, соответственно. Одновременно была оценена толщи-

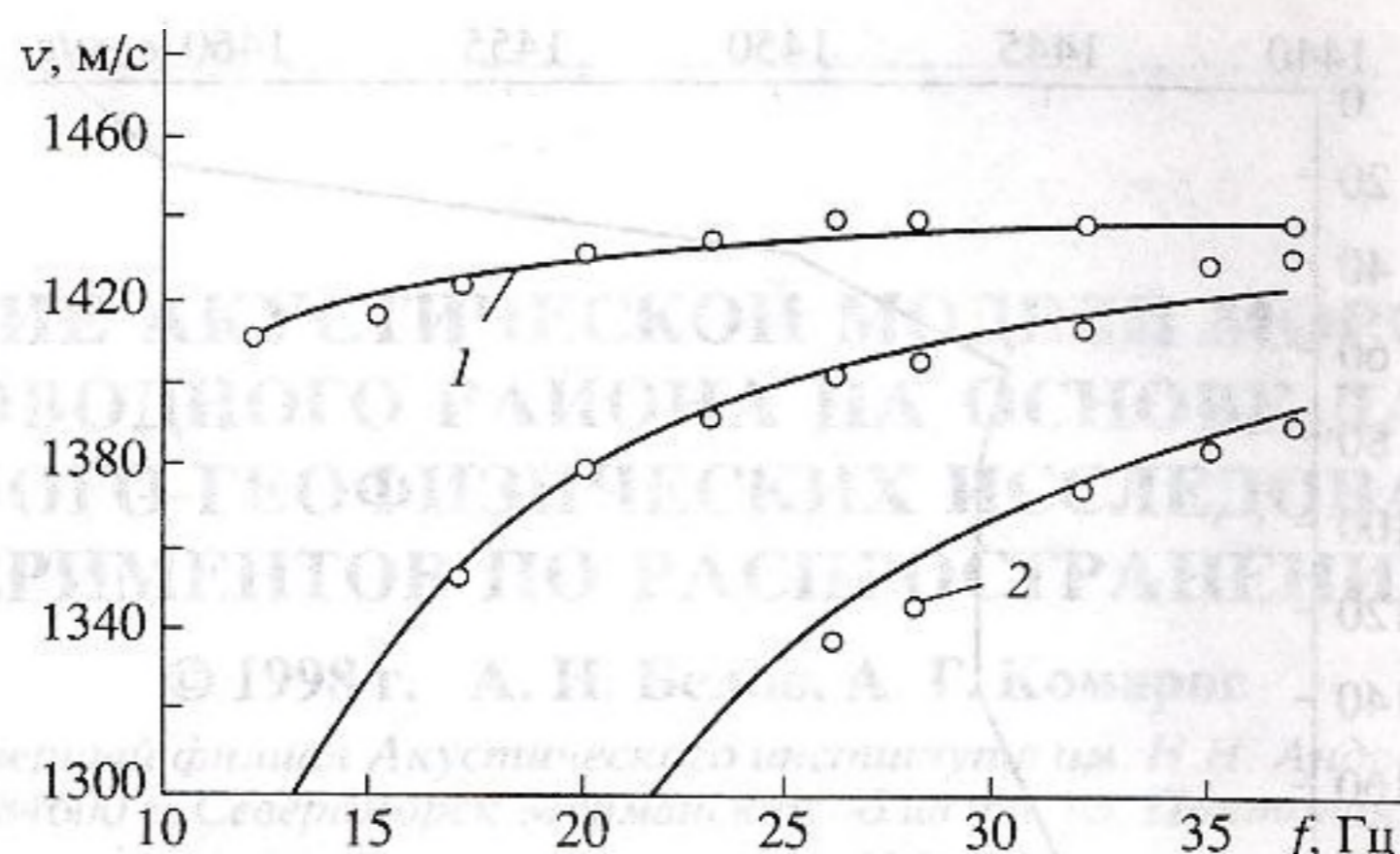


Рис. 2. Зависимости групповых скоростей первых трех мод от частоты: 1 – расчет, 2 – эксперимент.

на слоя четвертичных отложений, толщина которой оказалась равной 16 м. Варьирование величин плотности полупространства и слоя в достаточно широких пределах не оказывает существенного значения на групповые и фазовые скорости мод. Поэтому значения  $\rho$  были определены по найденным значениям скорости продольных волн с помощью регрессионных соотношений [13] и составили 2000 и 2170 кг/м<sup>3</sup> для слоя и полупространства, соответственно.

2. Значительная, превышающая длину волны на частоте 300 Гц толщина слоя четвертичных отложений позволила рассматривать этот слой как полупространство для этой частоты. Коэффициент потерь продольных волн (тангенс угла потерь)  $\eta$  в четвертичных осадках был найден при подгонке рассчитанных пространственных распределений усредненного уровня звукового поля к измеренному в эксперименте. При этом вычисления проводились при энергетическом суммировании мод, а экспериментальные зависимости были сглажены пространственным окном длиной 0.5 км. Величина  $\eta$  составила 0.0075.

3. Поглощающие свойства полупространства определялись путем подгонки рассчитанного пространственного распределения усредненного уровня звукового поля к экспериментально измеренному для частоты 17.44 Гц с учетом найденного коэффициента потерь продольных волн в слое четвертичных отложений. При этом оказалось, что возможны два варианта модели дна, для которых рассчитанные кривые удовлетворительно описывают экспериментальные данные. Во-первых, это модель с жидким полупространством. В таком случае коэффициент потерь продольных волн в полупространстве составляет 0.03. Во-вторых, это модель с твердым полупространством без потерь. Для него значение скорости поперечных волн равняется 450 м/с. Оба варианта не противоречат ни исходным данным, ни критериям, принятым при построении модели дна, и потому

являются равноправными. Вместе с тем полученное значение  $\eta$  представляется слишком большим. Поэтому в данной работе предпочтение было отдано модели с твердым полупространством.

4. Проверка найденных параметров модели дна проводилась путем сравнения рассчитанных и экспериментальных зависимостей усредненного уровня звукового поля  $J(r)$  на частоте 100 Гц. При этом оказалось, что для достижения удовлетворительного совпадения экспериментальных данных с расчетными не требуется никаких изменений параметров модели.

5. Акустические характеристики самого верхнего слоя голоценовых осадков были найдены при подгонке рассчитанных угловых зависимостей модуля коэффициента отражения к экспериментально измеренным в килогерцовом частотном диапазоне. Параметры этого слоя оказались следующими: толщина  $h = 0.3$  м, плотность  $\rho = 1750$  кг/м<sup>3</sup>, скорость продольных волн  $C_L = 1460$  м/с, их коэффициент потерь  $\eta = 0.01$ .

Следует отметить, что на разных этапах построения модели дна использовались разные критерии совпадения рассчитанных и экспериментальных данных. При этом процедура подгонки была не формализована. Соответствие рассчитанных и экспериментальных значений групповых скоростей мод считалось достигнутым тогда, когда разница между этими значениями не превышала погрешностей измерений, которые составляли 2% на частоте 12 Гц и 0.6% на частоте 37 Гц. Условием совпадения фазовых скоростей мод было требование, чтобы разница между рассчитанными и измеренными значениями продольных волновых чисел не превышала ширины одного спектрального канала, равнявшейся  $9 \times 10^{-4}$  м<sup>-1</sup>. В остальных случаях производилась визуальная оценка совпадения результатов расчетов и экспериментальных данных.

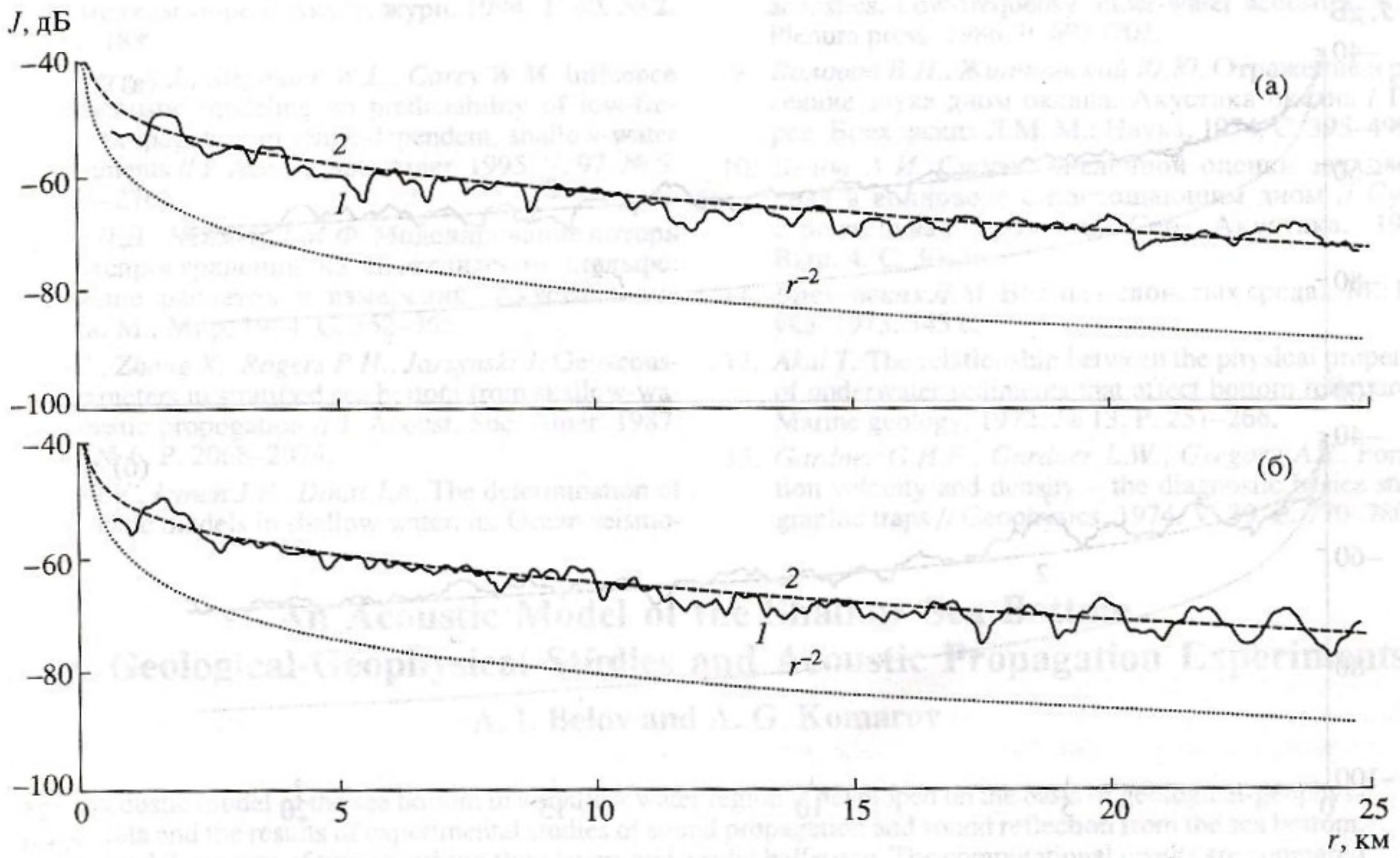


Рис. 3. Зависимость усредненного уровня звукового поля от расстояния,  $f = 17.44$  Гц: 1 – эксперимент, 2 – расчет. Глубина источника – 32 м, а – глубина приема 30 м, б – глубина приема 110 м.

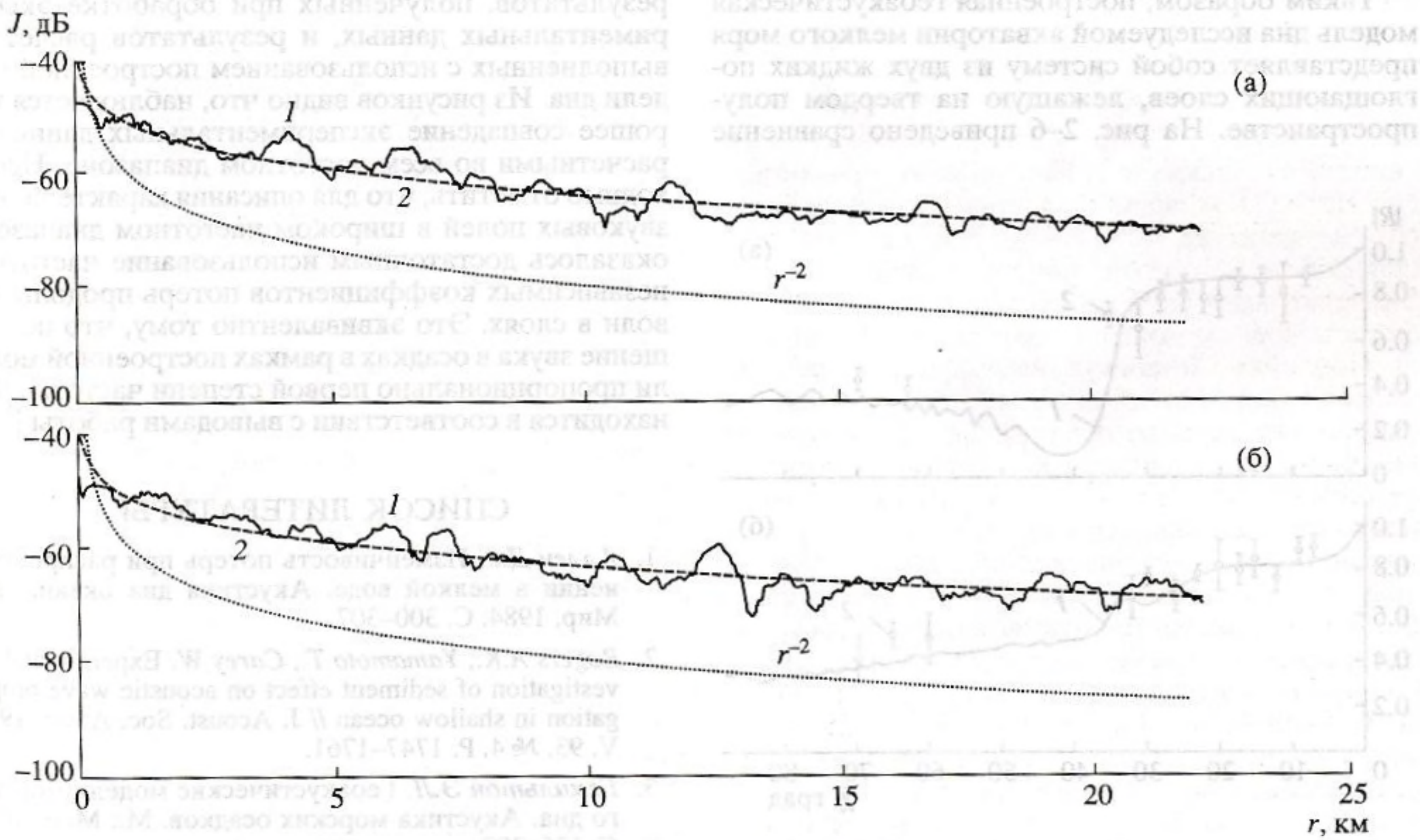


Рис. 4. Зависимость усредненного уровня звукового поля от расстояния,  $f = 100$  Гц: 1 – эксперимент, 2 – расчет, а – глубина приема 30 м, б – глубина приема 110 м.

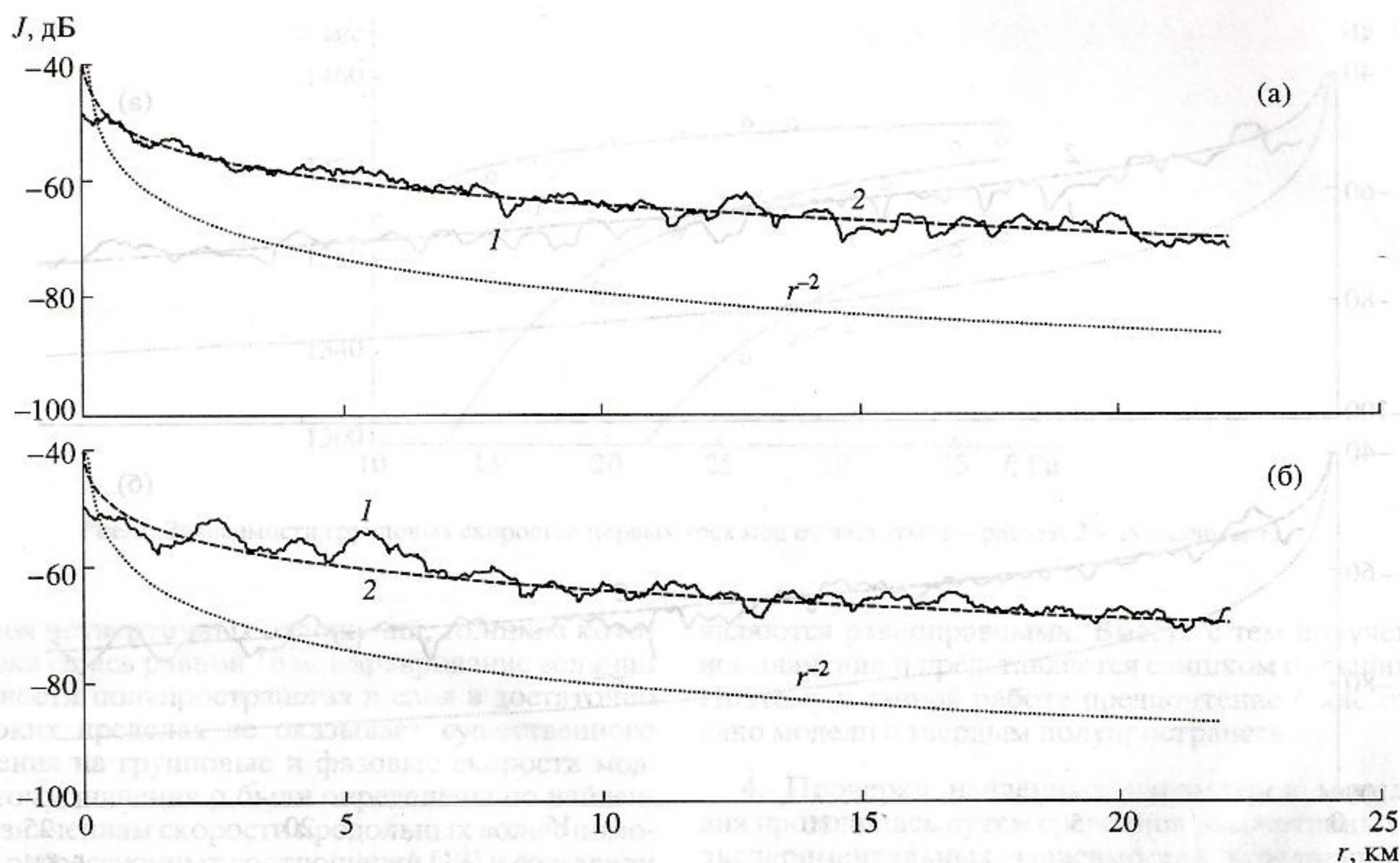


Рис. 5. Зависимость усредненного уровня звукового поля от расстояния,  $f = 300$  Гц: 1 – эксперимент, 2 – расчет, а – глубина приема 30 м, б – глубина приема 110 м.

Таким образом, построенная геоакустическая модель дна исследуемой акватории мелкого моря представляет собой систему из двух жидких поглощающих слоев, лежащую на твердом полупространстве. На рис. 2–6 приведено сравнение

результатов, полученных при обработке экспериментальных данных, и результатов расчетов, выполненных с использованием построенной модели дна. Из рисунков видно что, наблюдается хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными во всем частотном диапазоне. Необходимо отметить, что для описания характеристик звуковых полей в широком частотном диапазоне оказалось достаточным использование частотно-независимых коэффициентов потерь продольных волн в слоях. Это эквивалентно тому, что поглощение звука в осадках в рамках построенной модели пропорционально первой степени частоты, что находится в соответствии с выводами работы [3].

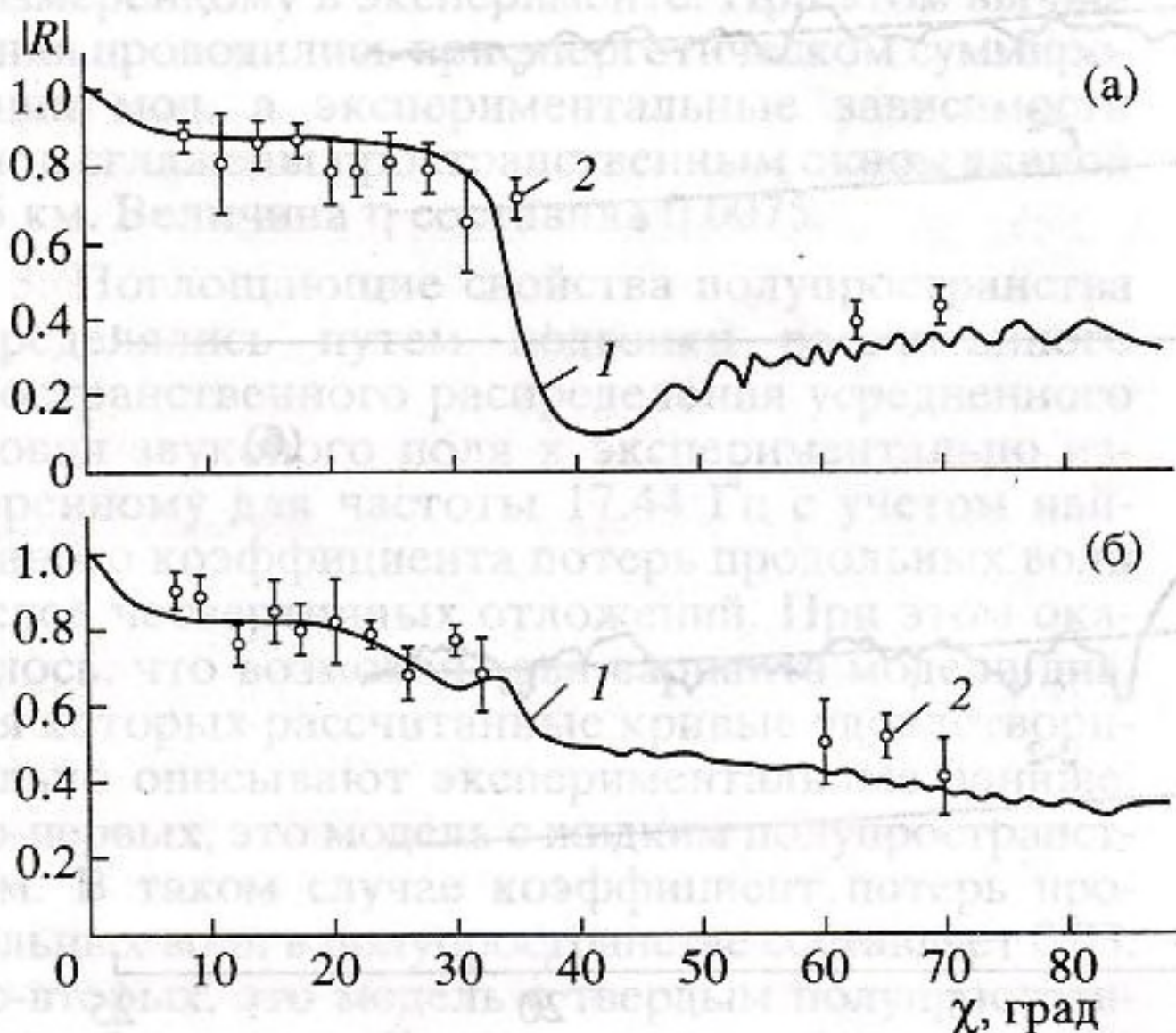


Рис. 6. Угловая зависимость модуля коэффициента отражения звука от дна: 1 – расчет, 2 – эксперимент, а – частота 2 кГц, б – частота 3 кГц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен Дж. Изменчивость потерь при распространении в мелкой воде. Акустика дна океана. М.: Мир, 1984. С. 300–307.
2. Rogers A.K., Yamamoto T., Carey W. Experimental investigation of sediment effect on acoustic wave propagation in shallow ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 93. № 4. P. 1747–1761.
3. Гамильтон Э.Л. Геоакустические модели морского дна. Акустика морских осадков. М.: Мир, 1977. С. 176–200.
4. Агеева Н.С., Крупин В.Д., Перельгин В.П., Студеничник Н.В. Построение геоакустической модели

- дна в мелком море // *Акуст. журн.* 1994. Т. 40. № 2. С. 181–188.
5. *Cederberg R.J., Siegmann W.L., Carey W.M.* Influence of geoacoustic modeling on predictability of low-frequency propagation in range-dependent, shallow-water environments // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1995. V. 97. № 5. P. 2754–2766.
  6. *Эллис Д.Д., Чепмен Д.М.Ф.* Моделирование потерь при распространении на Шотландском шельфе: сравнение расчетов и измерений. *Акустика дна океана*. М.: Мир, 1984. С. 352–365.
  7. *Zhou J., Zhang X., Rogers P.H., Jarzynski J.* Geoacoustic parameters in stratified sea bottom from shallow-water acoustic propagation // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1987. V. 82. № 6. P. 2068–2074.
  8. *Frisk G.V., Lynch J.F., Doust J.A.* The determination of geoacoustic models in shallow water. in: *Ocean seismoacoustics. Low-frequency under-water acoustics*. N.Y.: Plenum press, 1986. P. 693–702.
  9. *Воловов В.И., Житковский Ю.Ю.* Отражение и рассеяние звука дном океана. *Акустика океана* / Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 395–490.
  10. *Белов А.И.* Способ численной оценки звукового поля в волноводе с поглощающим дном // *Судостроительная пром-сть. Сер. Акустика*. 1989. Вып. 4. С. 30–36.
  11. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
  12. *Akal T.* The relationship between the physical properties of underwater sediments that affect bottom reflection // *Marine geology*. 1972. № 13. P. 251–266.
  13. *Gardner G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R.* Formation velocity and density – the diagnostic basics stratigraphic traps // *Geophysics*. 1974. V. 39. P. 770–780.

## An Acoustic Model of the Shallow Sea Bottom from Geological-Geophysical Studies and Acoustic Propagation Experiments

A. I. Belov and A. G. Komarov

An acoustic model of the sea bottom in a shallow water region is developed on the basis of geological-geophysical data and the results of experimental studies of sound propagation and sound reflection from the sea bottom. The model consists of two absorbing fluid layers and a solid halfspace. The computational results are compared with the experimental data on sound propagation in a wide frequency range.