

УДК 551.463

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ

© 1998 г. Р. А. Вадов

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

Поступила в редакцию 14.06.96 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований поглощения и затухания звука в Черном море, проводившихся в Акустическом институте с начала 50-х годов. Отмечается их особая роль в выявлении основных закономерностей изменения поглощения звука в водах Мирового океана. Приводятся экспериментальные данные по поглощению и затуханию звука, полученные в диапазоне частот 200 Гц–210 кГц.

Черное море представляет собой классическую с акустической точки зрения модель океана: глубокое море, летом – подводный звуковой канал с перепадом скорости звука от его оси до дна около 45 м/с, в зимнее время – приповерхностный канал с взволнованной верхней границей, континентальный склон, переходящий в шельф. Размеры Черного моря дают возможность проведения исследований дальнего (до 650 км) распространения звука и наблюдений на стационарных трассах за флуктуациями звукового сигнала, связанными с изменчивостью морской среды.

Вместе с тем, Черное море по некоторым своим характеристикам заметно отличается от других районов Мирового океана [1]. Соленость его вод составляет 17–22‰, т.е. в 1.5–2 раза ниже солёности океанских вод. На глубинах, превышающих 125–175 м, воды насыщены сероводородом (так называемая “сероводородная зона”) и практически не содержат растворенный кислород. Значение водородного показателя на разных глубинах в Черном море изменяется от 8.4 (у поверхности) до 7.6–7.7 (на глубине 2000 м). Профиль изменения скорости звука с глубиной формируется как за счет зимнего охлаждения приповерхностных вод – ядро холодных вод летом находится на глубине 40–60 м, так и за счет сильного опреснения – солёность вод изменяется от 17–18‰ (у поверхности) до 22‰ (на глубинах 150–200 м и более). Своеобразие профиля $C(z)$ и связанные с этим особенности формирования структуры звукового поля в подводном звуковом канале Черного моря обсуждались в работах [2, 3]. Здесь пойдет речь о некоторых результатах экспериментальных исследований поглощения и затухания звука в условиях Черного моря.

В 50-х годах исследования поглощения звука в морской воде проводились на высоких частотах, при которых диссипация звуковой энергии обус-

ловлена релаксационными процессами, связанными с сернистым магнием, и частотная зависимость коэффициента поглощения может быть описана формулой:

$$a = \frac{Af}{f/f_p + f_p/f} + kf^2 \quad (1)$$

где kf^2 – поглощение звука в пресной воде, f – частота, f_p и A – параметры релаксационного поглощения.

В Акустическом институте первые измерения коэффициента поглощения звука в черноморской воде были выполнены в начале 50-х годов В.П. Готовым с помощью реверберационного бака. Им были также проведены экспериментальные исследования влияния различных солей на поглощение в водном растворе сернистого магния, теоретические исследования поглощения звука в электролитах и в морской воде [4, 5]. Была создана морская корабельная установка, позволяющая проводить измерения поглощения звука методом реверберационного бака в натуральных условиях [6].

В середине 50-х годов от метода реверберационного бака, при котором возбуждение реверберационного сосуда с водой производилось шумовым (в полосе частот 5–10%) сигналом, перешли к резонансно-реверберационному методу, при котором в реверберационном сосуде возбуждались отдельные “наиболее долгозвучащие” моды, реверберационный сосуд поместили в вакуумный контейнер, перед измерениями производилась деаэрация морской воды. Все эти меры были предприняты для снижения погрешностей проводимых измерений. После такой модификации методики в лабораторных условиях была проведена серия измерений коэффициента поглощения с реальной черноморской водой. Полученные на частотах от 30 до 210 кГц значения коэффициента

поглощения отличались от опубликованных к этому времени данных по океану в 1.6–1.8 раз.

Были проведены контрольные измерения с океанской водой, с балтийской водой (соленость 6–8‰), а также с образцами искусственной морской воды, различающимися соленостью. Измерения проводились при одной и той же температуре (20°C). Было установлено, что релаксационная частота f_p не зависит от солености ($f_p = 125$ кГц), параметр релаксационного поглощения A растет пропорционально солености, изменявшейся при проведении исследований в пределах от 3 до 40‰. Результаты этих измерений представлены на рис. 1.

С целью определения зависимости релаксационного поглощения от температуры была выполнена следующая серия лабораторных измерений. Реверберационная колба с морской водой была помещена в термостат, в котором последовательно устанавливалась и поддерживалась температура 4, 10, 15, 20, 25 и 30°C. В результате этой серии измерений была выявлена функциональная зависимость релаксационной частоты f_p от температуры (см. рис. 2), а также слабое (пропорциональное температуре) изменение параметра A .

На основе полученных экспериментальных материалов, с учетом теоретических представлений о релаксационных процессах в растворах электролитов была предложена формула для оценки коэффициента поглощения звука в морской воде с учетом ее температуры и солености. Для частотной зависимости, задаваемой в виде (1), были определены значения параметров:

$$A = 62.5ST \times 10^{-6}, \quad \text{дБ/км кГц}, \quad (2)$$

$$f_p = 1.125 \times 10^{(9 - 2038/T)}, \quad \text{кГц}, \quad (3)$$

где S – соленость, промилле, T – температура, К, f в формуле (1) – частота в кГц.

По результатам обобщения опубликованных [7] экспериментальных данных по поглощению звука в пресной воде выражение для параметра k было записано в виде

$$k = 1.42 \times 10^{(-8 + 1240/T)}, \quad \text{дБ/км кГц}^2. \quad (4)$$

Опубликованные экспериментальные данные по поглощению ультразвука в морской воде за редким исключением (см., например, [8]) достаточно хорошо описываются приведенными формулами. Более того, данные 70-х годов Гаррисона и др. [9], полученные при отрицательных (по шкале Цельсия) температурах, также хорошо согласуются с полученными соотношениями.

Экспериментально установленной пропорциональности электролитического поглощения солености морской воды было дано разумное объяснение, которое строилось на принципе Марсета [10] и законе смешения электролитов. В начале 50-х го-

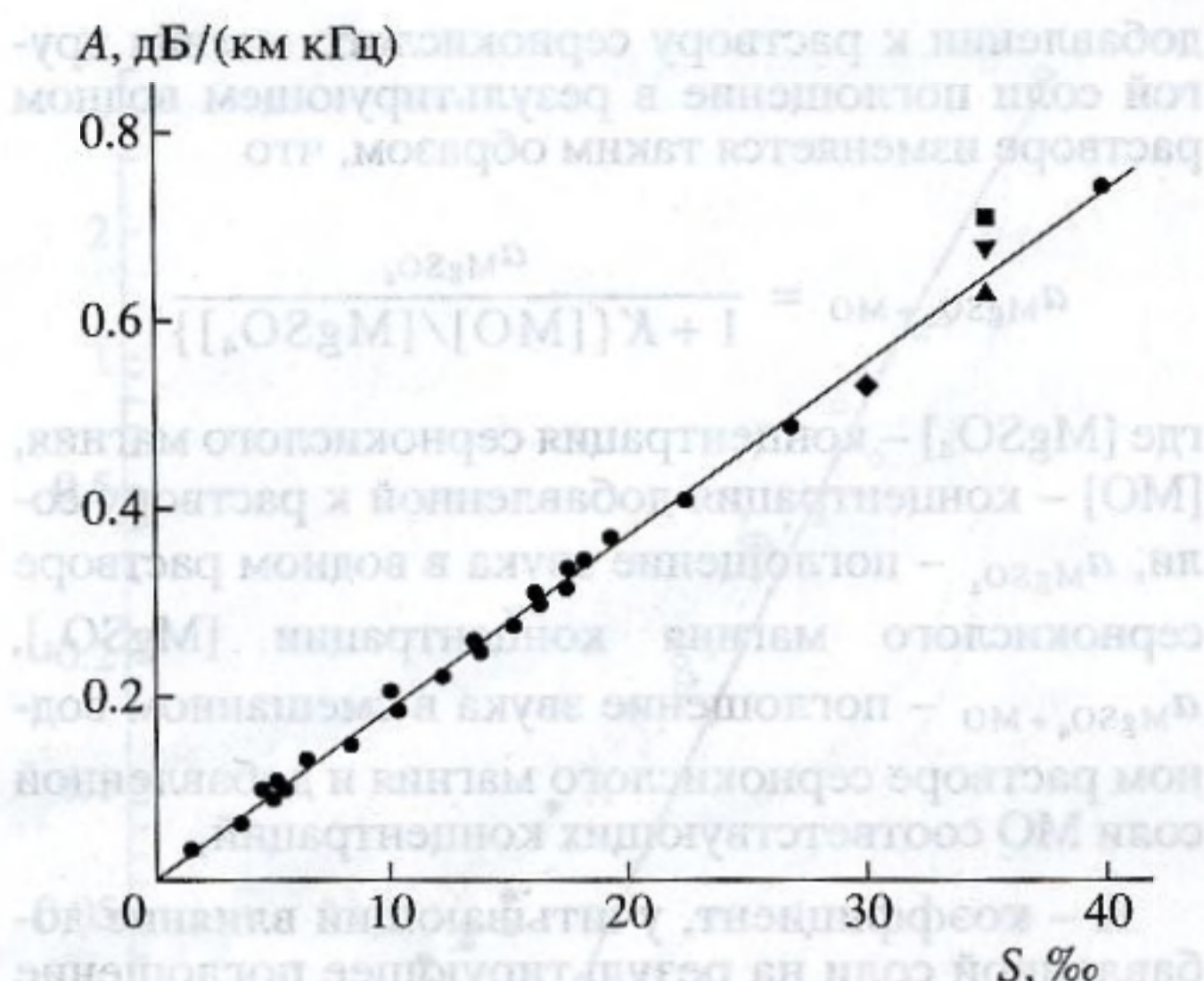


Рис. 1. Зависимость параметра релаксационного поглощения A от солености морской воды (—).

Экспериментальные данные:

- – К. Тамм (1952 г.).
- ▲ – О. Уилсон, Р. Леонард (1954 г.).
- ▼ – И. Хортон (1957 г.).
- ◆ – С. Мюрфи, Г. Гаррисон, Д. Поттер (1958 г.).
- – П. Вадов (1959–1962 гг.).

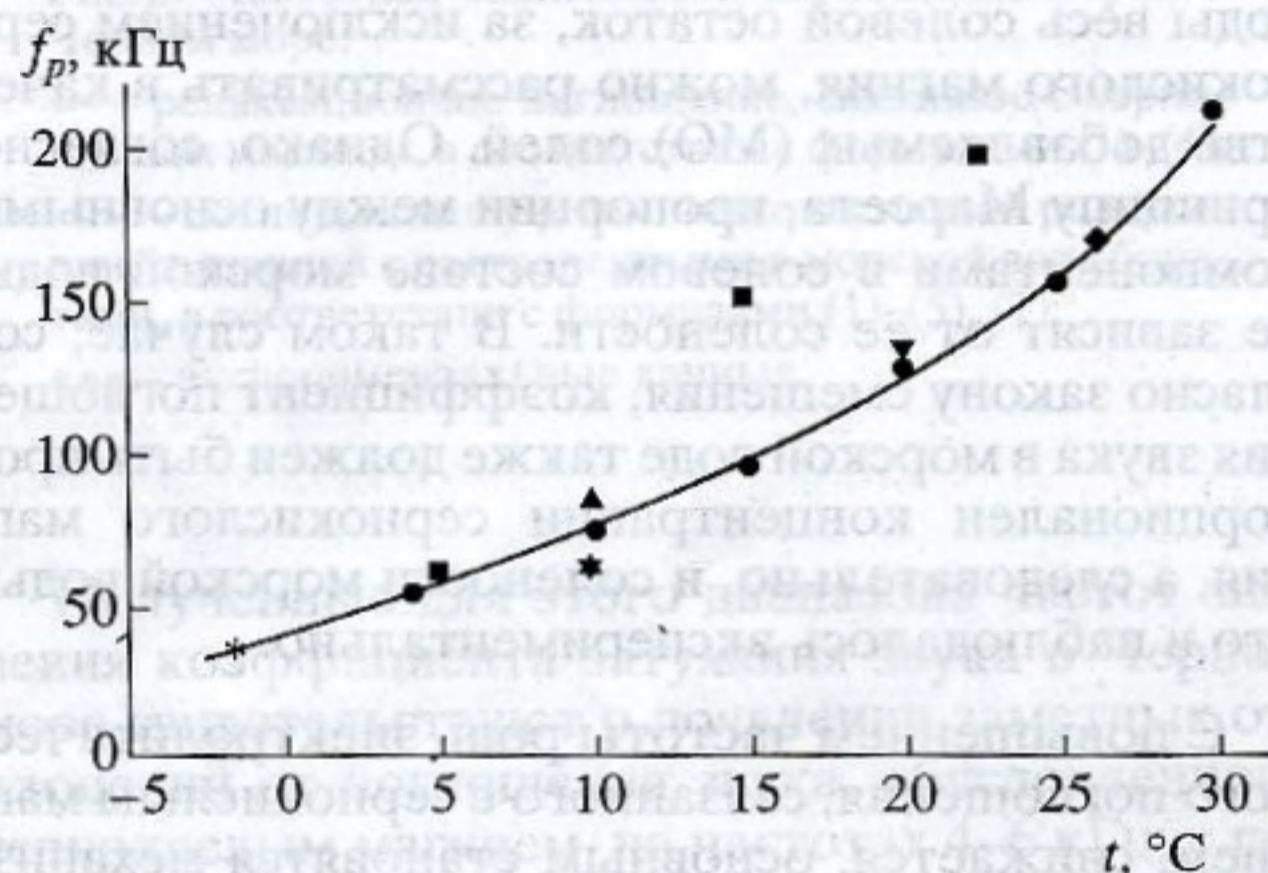


Рис. 2. Температурная зависимость релаксационной частоты, связанной с сернокислым магнием (—).

Экспериментальные данные:

- ▼ – К. Тамм (1952 г.).
- – О. Уилсон, Р. Леонард (1954 г.).
- ★ – И. Хортон (1957 г.).
- ▲ – С. Мюрфи, Г. Гаррисон, Д. Поттер (1958 г.).
- ◆ – В. Глотов, Р. Вадов (1960 г.).
- – П. Вадов (1961 г.).
- * – Г. Гаррисон, Е. Эarly, Т. Вен (1976 г.).

дов при исследовании поглощения звука в водном растворе сернокислого магния Куртцем и Таммом [11] была получена пропорциональность электролитического поглощения концентрации раствора, для смешанных электролитов был выведен закон смешения, который сводится к следующему. При

добавлении к раствору сернокислого магния другой соли поглощение в результирующем водном растворе изменяется таким образом, что

$$a_{\text{MgSO}_4 + \text{MO}} = \frac{a_{\text{MgSO}_4}}{1 + K\{[\text{MO}]/[\text{MgSO}_4]\}},$$

где $[\text{MgSO}_4]$ – концентрация сернокислого магния, $[\text{MO}]$ – концентрация добавленной к раствору соли, a_{MgSO_4} – поглощение звука в водном растворе сернокислого магния концентрации $[\text{MgSO}_4]$, $a_{\text{MgSO}_4 + \text{MO}}$ – поглощение звука в смешанном водном растворе сернокислого магния и добавленной соли MO соответствующих концентраций,

K – коэффициент, учитывающий влияние добавленной соли на результирующее поглощение звука в растворе, зависящий от типа ионов и катионов, составляющих эту соль.

Если соотношение между концентрациями сернокислого магния и добавляемой соли не меняется, то поглощение в таком растворе изменяется пропорционально концентрации сернокислого магния, а следовательно, и суммарной концентрации растворенных солей. Для морской воды весь солевой остаток, за исключением сернокислого магния, можно рассматривать в качестве добавляемых (MO) солей. Однако, согласно принципу Марсета, пропорции между основными компонентами в солевом составе морской воды не зависят от ее солёности. В таком случае, согласно закону смешения, коэффициент поглощения звука в морской воде также должен быть пропорционален концентрации сернокислого магния, а следовательно, и солёности морской воды, что и наблюдалось экспериментально.

С повышением частоты роль электролитического поглощения, связанного с сернокислым магнием, снижается, основным становятся механизмы поглощения, общие для морской и пресной воды. В связи с этим следует отметить, что при получении соотношения (4) были обобщены все экспериментальные данные по поглощению звука в пресной воде, опубликованные в литературе к концу 50-х годов. Таким образом, соотношения (1)–(4) вполне применимы для расчета коэффициента поглощения звука в морской воде и на частотах выше 200 кГц. Границы применимости этих соотношений на частотах ниже 30 кГц следовало еще уточнить.

Первые оценки коэффициента затухания звука в Черном море на частотах 10, 15 и 30 кГц (по материалам акустических опытов с цепочкой притопленных сферических буев) были получены в начале 50-х годов (Сухаревский Ю.М., Агеева Н.С.). Эти данные неплохо согласуются с приведенными формулами.

Вместе с тем для проведения систематических исследований поглощения звука на частотах 10–25 кГц был разработан метод, основанный на анализе многократных донно-поверхностных отражений. Суть его заключалась в следующем.

В районе глубокого (с глубинами 2000 м и более) моря с выровненным рельефом дна, в условиях слабого волнения с борта судна под поверхность моря опускался излучатель. С того же судна последовательно на разные по глубине горизонты опускалось приемное устройство. Излучался импульсный (с тональным заполнением) сигнал. Многократно (до 2–3 раз) отраженный от дна и поверхности этот сигнал принимался и регистрировался на магнитную и фотопленку. Размещение приемной системы последовательно на различных глубинах (от 100–200 м до 1800–1900 м и более) позволяет по изменению с глубиной отношения амплитуд отдельных пар сигналов, различающихся на одно отражение от дна (поверхности), исключить коэффициент отражения и определить коэффициент поглощения звука в водной среде.

Результаты измерений коэффициента поглощения на частотах от 10 до 25 кГц, выполненных по этой методике в Черном море (в начале 60-х годов) позволили сделать вывод о возможности экстраполяции приведенных выше соотношений на частоты вплоть до 10 кГц. Позднее этот вывод был полностью подтвержден аналогичными результатами, полученными в Средиземном море, Индийском и Тихом океанах.

На частотах ниже 10 кГц для измерений коэффициента затухания звука использовалась методика, впервые примененная для этой цели в середине 40-х годов Ивингом и Ворцелем [12]. Затухание определялось по отклонению экспериментального закона спада уровня звукового поля в подводном канале от цилиндрического закона геометрического расхождения, характерного для таких условий. При размещении излучающей и приемной систем на оси подводного звукового канала регистрируются уровни звукового поля при их дрейфовке или при расхождении приемного и передающего судов. Работа проводится либо “по точкам”, либо при непрерывной буксировке излучателя. Исходным рабочим материалом для определения затухания являются экспериментально полученные законы спада уровня звукового поля в подводном звуковом канале.

Спад уровня звукового поля с дистанцией обычно описывается как

$$I = I_0 R^{-2} A(R) \times 10^{-0.1\beta R},$$

где I_0 – уровень излучения, приведенный к единичному расстоянию от источника в безграничной однородной среде, $A(R)$ – аномалия распространения, β – коэффициент затухания.

В подводном звуковом канале (при расположении источника и приемника у оси канала) на достаточно большом расстоянии от источника $A(R) = \gamma R$ и

$$I = I_0 R^{-1} \gamma \times 10^{-0.1\beta R} = I_0 (RR_n)^{-1} \times 10^{-0.1\beta R},$$

где $R_n = 1/\gamma$ – переходное расстояние.

Цилиндрический закон геометрического расхождения звукового поля в канале можно считать полностью сформировавшимся на расстояниях от источника, существенно (в 10–20 раз) превышающих переходное расстояние. Для этих расстояний экспериментальный спад звукового поля, скорректированный на цилиндрический закон, аппроксимируется прямой, тангенс угла наклона которой к оси абсцисс и определяет коэффициент затухания.

На частотах от 1 до 10 кГц экспериментальные исследования проводились с использованием пьезокерамических излучателей, на частотах от 100 до 2000 Гц использовались взрывные источники звука. Применение взрывных источников имеет ряд преимуществ перед тональными. Широкополосность дает возможность измерения коэффициента затухания в диапазоне частот от десятков Гц до нескольких кГц. Мощность взрывного источника достаточна для обеспечения протяженных трасс дальнего распространения звука, необходимых для определения коэффициента затухания на низких частотах. Удобство использования зарядов ВВ со взрывателями гидростатического действия, возможность их сброса и подрыва с судна при обычной скорости его движения дает существенную экономию времени, необходимого для проведения эксперимента. Вместе с тем применяемые при проведении исследований взрывные источники обладают достаточно высокой стабильностью. Дисперсия спектрально-энергетических их характеристик не превышает 1 дБ.

При использовании взрывных источников в качестве характеристики звукового поля, эквивалентной энергии сигнала в полосе частот Δf , принимается значение

$$E_f = \int_0^T P_f^2(t) dt,$$

где T – длительность принятого (многолучевого) взрывного сигнала, $P_f(t)$ – давление во взрывном сигнале, приведенное к полосе частот Δf . Спектрально-энергетический анализ принятых и зарегистрированных на магнитной пленке сигналов производился с использованием прибора типа 2131 фирмы Vguel & Kjer, обеспечивающего расфилтровку сигнала в 1/3-октавных полосах и определение значения E_f .

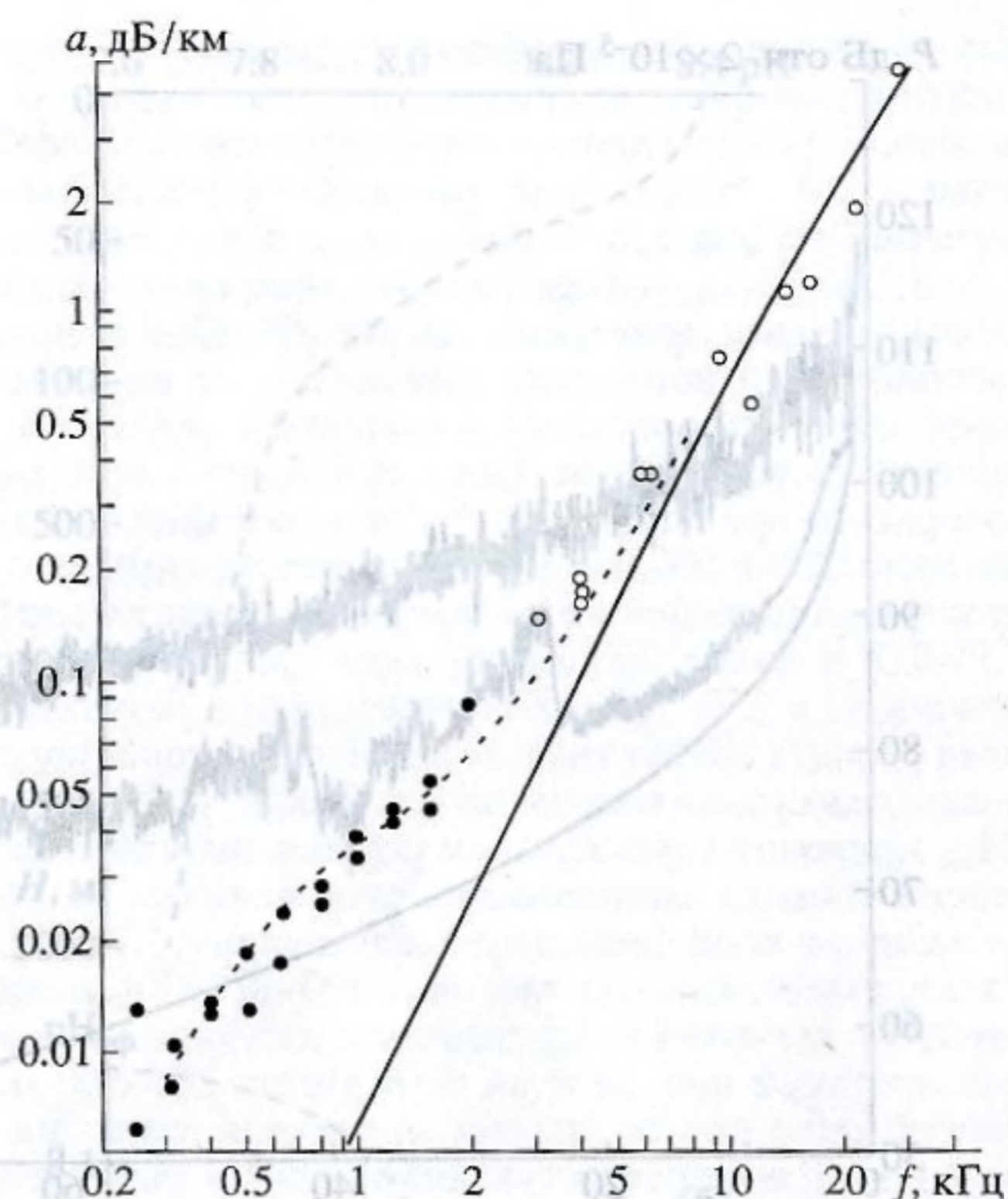


Рис. 3. Частотная зависимость поглощения звука в Черном море:

- — релаксационное поглощение, связанное с сернистым магнием, в соответствии с формулами (1)–(4);
- - - поглощение с учетом низкочастотной релаксации, связанной с растворенными в морской воде боратами, в соответствии с формулами (1)–(5), (7);
- — экспериментальные данные.

Полученные для этого диапазона частот значения коэффициента затухания звука в Черном море свидетельствуют о появлении заметных отклонений от поглощения звука, обусловленного сернистым магнием, на частотах 4–6 кГц; с понижением частоты эти отклонения увеличиваются (см. рис. 3).

По результатам проведенных исследований для расчета коэффициента затухания в Черном море на частотах 0.2–10 кГц было предложено эмпирическое соотношение:

$$B = 0.035 f^{1.25}, \quad \text{дБ/км (при } f \text{ в кГц).}$$

Материалы опытов по измерению затухания звука в Черном море представляются весьма интересными из-за своеобразия химического состава его вод, в первую очередь низкой солености, большого перепада в значениях рН, их загрязненности сероводородом. Благодаря этим особенностям Черное море всегда привлекало исследователей уникальными возможностями методом сравнения, полученных для него и для океана данных по затуханию оценить правдоподобность гипотез,

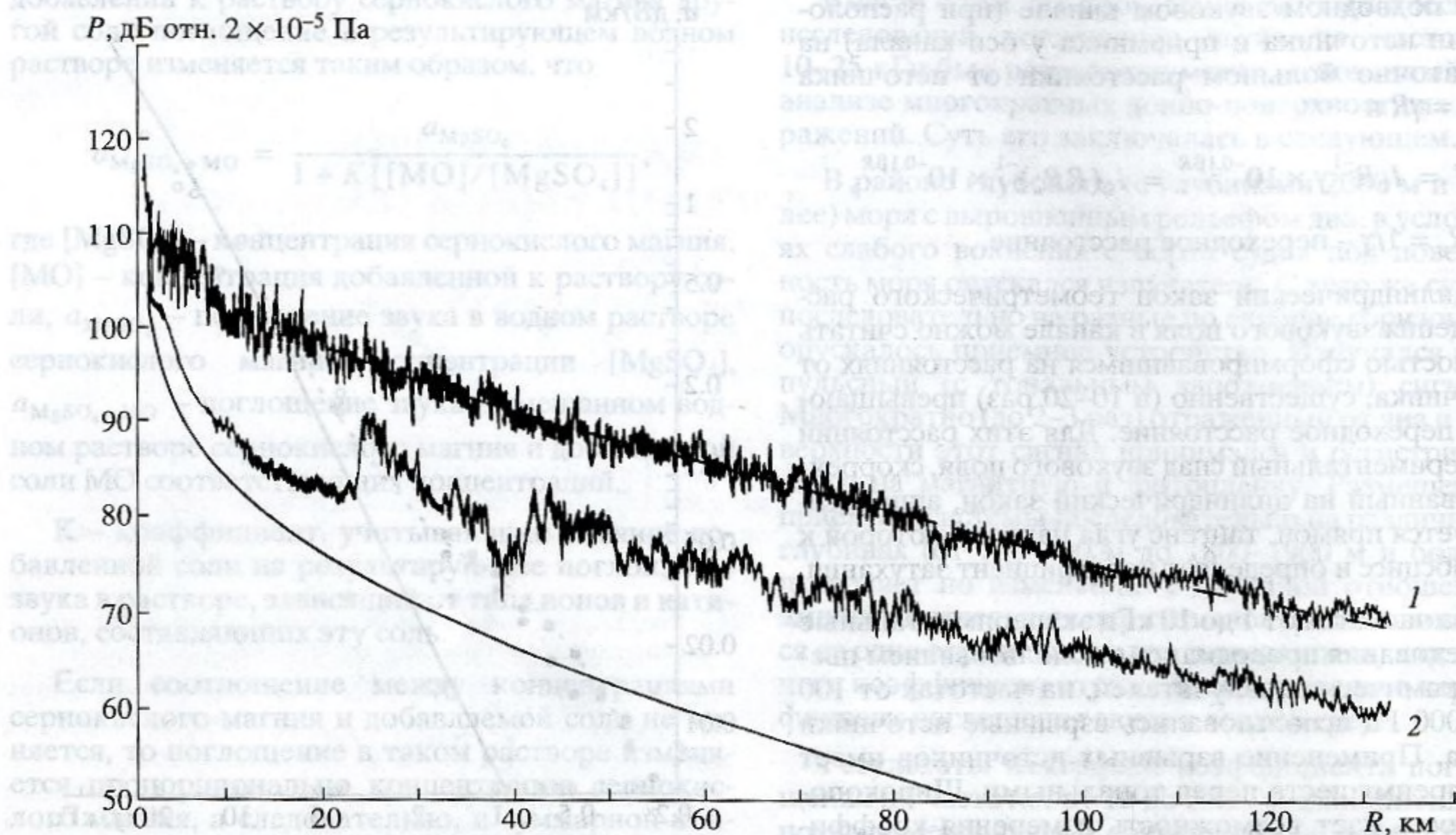


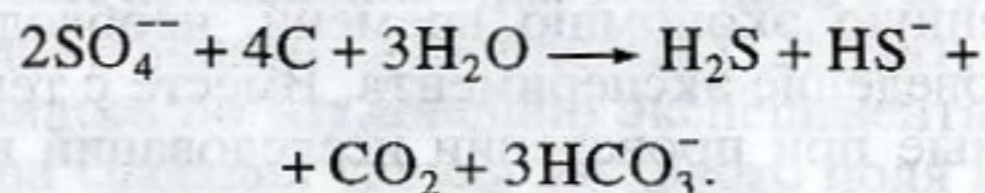
Рис. 4. Экспериментальные законы спада уровня звукового поля с дистанцией в Черном море, $f = 4$ кГц, $Z_{ист} = 60$ м, $1 - Z_{пр} = 60$ м, $2 - Z_{пр} = 500$ м:
 — сферический закон,
 - - - цилиндрический закон с дополнительным затуханием 0.19 дБ/км (при переходном расстоянии 250 м).

выдвигаемых для их объяснения. Такое сопоставление было бы также полезно при анализе других явлений, связанных с временной и пространственной изменчивостью Мирового океана (см. например [13]).

На рис. 4 приведены полученные в одном из черноморских опытов экспериментальные спады уровня звукового поля с дистанцией. Буксировка излучателя в этом опыте производилась на глубине 60 м, излучался шумовой (в $1/3$ – октавной полосе) сигнал с центральной частотой 4 кГц. Прием осуществлялся на глубинах 60 и 500 м. Горизонты приема и излучения были выбраны из соображения разделения эффекта поглощения звука для приосевых и для глубокорефрагированных лучей. По экспериментальным спадам были определены значения переходного расстояния. Для глубин приема 60 и 500 м они оказались равными 250 и 3000 м, соответственно. Коэффициент затухания определялся по спадающему звуковому полю на горизонте 60 м (в канале).

Этот опыт был поставлен для выяснения влияния “сероводородной зоны” на поглощение звука. В свете современных представлений в водах Черного моря 99.5% сероводорода образуется за счет реакции сульфатов и только 0.5% за счет

процессов гниения. По О.А. Алекину схема реакции сульфатов [1] такова:



Эта схема реализуется в результате жизнедеятельности сульфат-редуцирующих бактерий. При отсутствии кислорода на глубинах, превышающих 150 м, окисление углерода идет за счет кислорода, входящего в состав ионов SO_4^{2-} . Таким образом, образование сероводорода влияет на состояние сернокислого магния, ответственного за поглощение звука на исследуемых частотах.

По результатам проведенного опыта следует отметить, что для кривых спада, полученных на горизонтах приема 60 и 500 м, несмотря на различие в уровнях звукового поля до 10 – 12 дБ, крутизна спада уровня на дистанциях, превышающих 40 – 60 км, практически одна и та же. Более того, при соответствующем их взаимном смещении (по вертикали) нетрудно получить для этих дистанций их достаточно хорошее (с учетом погрешностей измерений) совмещение. По-видимому, влияние растворенного сероводорода на затухание звука в Черном море, если оно и есть, то

весьма незначительное и связано лишь с незначительным уменьшением концентрации ионов (в частности, SO_4^{--}), участвующих в процессе релаксационного поглощения звука, связанного с сернокислым магнием.

Одновременно с этим опытом был проведен аналогичный опыт со взрывными источниками звука для выяснения степени влияния водородного показателя рН на низкочастотное поглощение, объясняемое в настоящее время релаксацией бор-боратных комплексов [14]. В середине 60-х годов для объяснения повышенного (по сравнению с экстраполированным с высоких частот) затухания звука на частотах ниже 3–5 кГц была выдвинута гипотеза низкочастотной релаксации. Реальность этой гипотезы была подтверждена результатами измерений времени релаксации процесса, связанного с присутствием в морской воде бора, выполненных методом “температурного скачка” [15]. Была исследована зависимость времени релаксации от концентрации бора в воде, температуры раствора, от рН. По результатам этих исследований для оценки значения релаксационно частоты можно пользоваться соотношением

$$f_{pB} = 37.9S^{0.8} \times 10^{-780/T} \text{ кГц}, \quad (5)$$

которое для Черного моря приводит к значению $f_{pB} = 800$ Гц.

Путем сопоставления значений коэффициента затухания, определенных на частотах 0.5–3.0 кГц для различных регионов Мирового океана Мелленом и Браунингом [16] была замечена связь релаксационного (за счет бора) поглощения с водородным показателем рН, характеризующим воды этих регионов, которая в аналитическом виде была определена как

$$a \sim 10^{0.78pH} \quad (6)$$

В качестве характерного для того или иного региона значения рН ими принималось значение, соответствующее глубине расположения оси подводного звукового канала. Такой выбор значений водородного показателя, характеризующих тот или иной регион, связан со спецификой методики проведения измерений коэффициента затухания – по спаду звукового поля в канале.

В конце 70-х–начале 80-х годов по материалам экспериментальных исследований разными авторами [17–19] были предложены различающиеся между собой аналитические выражения, связывающие низкочастотное поглощение с температурой, соленостью и с водородным показателем. Следует отметить, что экспериментальные значения коэффициента затухания, полученные в Черном море, заметно отличались от рассчитанных по предлагаемым в этих работах формулам.

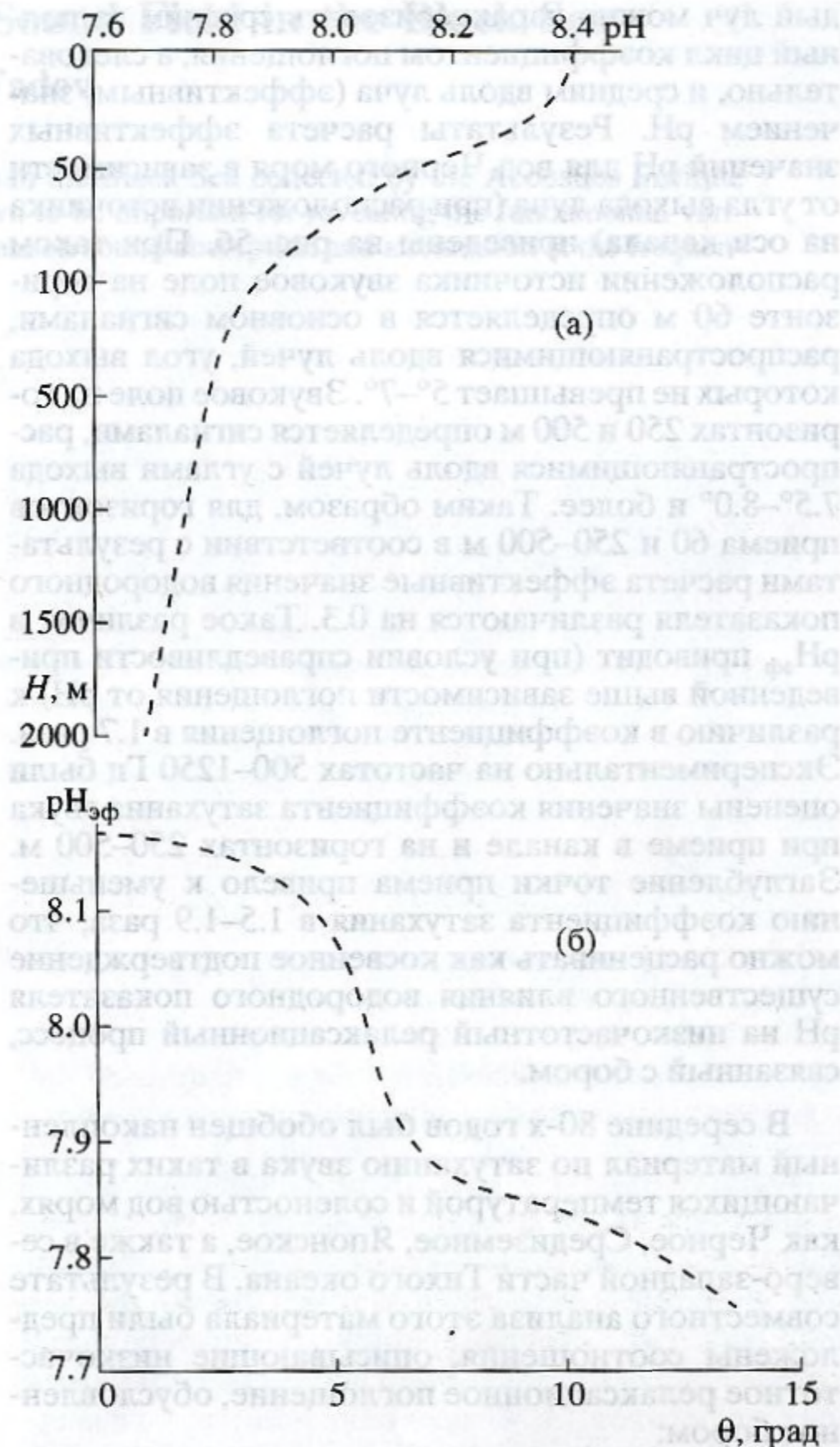


Рис. 5. Изменение водородного показателя в Черном море:

- а – обобщенные данные многолетних наблюдений [1] за водородным показателем на различных глубинах;
- б – зависимость эффективного значения водородного показателя от угла выхода лучей при расположении излучателя у оси подводного звукового канала.

В 80-х годах автором была реализована реальная возможность проверки выполнимости соотношения (6). Для этого использовалась сильная изменчивость значений рН по глубине (см. рис. 5а), характерная для Черного моря. Максимальные изменения рН достигают 0.8. Таким образом, если приведенная выше зависимость низкочастотного поглощения от рН выполняется, то существуют в Черном море слои, которые различаются по коэффициенту поглощения в 4 раза. Реально сигнал распространяется вдоль того или иного луча, пересекая водные слои, различающиеся значениями рН, значениями коэффициента поглощения. Каж-

дый луч можно характеризовать средним за полный цикл коэффициентом поглощения, а следовательно, и средним вдоль луча (эффективным) значением pH . Результаты расчета эффективных значений pH для вод Черного моря в зависимости от угла выхода луча (при расположении источника на оси канала) приведены на рис. 5б. При таком расположении источника звуковое поле на горизонте 60 м определяется в основном сигналами, распространяющимися вдоль лучей, угол выхода которых не превышает $5^\circ-7^\circ$. Звуковое поле на горизонтах 250 и 500 м определяется сигналами, распространяющимися вдоль лучей с углами выхода $7.5^\circ-8.0^\circ$ и более. Таким образом, для горизонтов приема 60 и 250–500 м в соответствии с результатами расчета эффективные значения водородного показателя различаются на 0.3. Такое различие в $pH_{эф}$ приводит (при условии справедливости приведенной выше зависимости поглощения от pH) к различию в коэффициенте поглощения в 1.7 раза. Экспериментально на частотах 500–1250 Гц были оценены значения коэффициента затухания звука при приеме в канале и на горизонтах 250–500 м. Заглубление точки приема привело к уменьшению коэффициента затухания в 1.5–1.9 раза, что можно расценивать как косвенное подтверждение существенного влияния водородного показателя pH на низкочастотный релаксационный процесс, связанный с бором.

В середине 80-х годов был обобщен накопленный материал по затуханию звука в таких различающихся температурой и соленостью вод морях, как Черное, Средиземное, Японское, а также в северо-западной части Тихого океана. В результате совместного анализа этого материала были предложены соотношения, описывающие низкочастотное релаксационное поглощение, обусловленное бором:

$$a_B = \frac{1.65 S f \times 10^{(4 + 0.78 pH_{эф} - 3696/T)}}{f/f_{pB} + f_{pB}/f} \text{ дБ/км.} \quad (7)$$

При этом значения f_{pB} определялось соотношением (5).

При выводе соотношения (7) использовались архивные данные по зависимости водородного показателя pH от глубины (для разных районов Мирового океана), а также учитывались результаты работ [14, 16].

На рис. 3 рассчитанная с учетом соотношений (5), (7) частотная зависимость поглощения звука в Черном море представлена пунктирной линией. Аналогичное согласие экспериментальных данных с расчетом, выполненным по предлагаемым формулам, получено и для Японского, Средиземного морей, северо-западной части Тихого океана.

В заключение выражаю искреннюю признательность профессору Ю.М. Сухаревскому за ин-

терес к проведенным мной исследованиям и обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопинцев Б.А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. Л.: Гидрометеоздат, 1975.
2. Вадов Р.А. Спектроанализирующие свойства подводного звукового канала. XI Всесоюзная Акустическая конференция: Сб. докладов, секция Д. М.: Наука, 1991. С. 47–50.
3. Вадов Р.А. О временах затягивания сигнала в различных районах океана // Акуст. ж. Т. 40. № 6. 1994. С. 930–934.
4. Глотов В.П. К теории релаксационного поглощения и дисперсии звука в сильных не полностью диссоциированных электролитах // Акуст. ж. 1957. Т. 3. Вып. 3. С. 220–229.
5. Глотов В.П. Расчет температурной зависимости времени релаксации степени диссоциации сернокислого магния в пресной и морской воде // Акуст. ж. 1964. Т. 10. Вып. 1. С. 40–47.
6. Глотов В.П. Метод реверберационного бака для исследования поглощения звука в море // Акуст. ж. 1958. Т. 4. Вып. 3. С. 239–243.
7. Hall L. The origin of ultrasound absorption in water // Phys. Rev. V. 73. № 7. 1948. P. 775.
8. Wilson O.B., Leonard R.W. Measurement of sound absorption in aqueous salt solution by a resonator method // JASA. 1954. V. 26. № 2. P. 223–226.
9. Garrison G.R., Early E.W., Wen T. Additional sound absorption measurements in near-freezing sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1976. V. 59. № 6. P. 1278.
10. Хорн Р. Морская химия. М.: Мир, 1972. С. 121.
11. Kurtze G., Tamm K. Measurement of sound absorption in water and in aqueous solution of electrolytes // Acustica, 1953. V. 3. № 1. P. 33–48.
12. Ewing M., Worzel J. Long-range sound transmission // Geol. Soc. Amer. Mem. 1948. V. 27. Pt. 3. P. 1–32.
13. Browning D.G., Mellen R.H. Paleo-ocean acoustics: The historical variation of low-frequency sound absorption in the world oceans and the implications for sea mammals // JASA. 1995. V. 98. № 5. P. 2915.
14. Fisher F.H., Yeager E., Bressel R., Miceli J. Origin of the relaxation sound absorption in sea water below 1 kHz // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 53. № 1. P. 364.
15. Cherlinski G., Eigen M. Eine Temperature-sprungmethode zur Untersuchung chemischer Relaxation // Z. Elektrochem. 1959. V. 63. P. 652.
16. Mellen R.H., Browning D.G. Variability of low-frequency sound absorption in the ocean: pH-dependence // J. Acoust. Soc. Amer. V. 61. № 3. 1977. P. 704–706.
17. Fisher F.H., Simmons V.P. Sound absorption in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. V. 62. № 3. 1977. P. 558–564.
18. Shulkin M., Marsh H.W. Low-frequency sound absorption in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. V. 63. № 1. 1978. P. 43–48.
19. Francois R.F., Garrison G.R. Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption // J. Acoust. Soc. Amer. V. 72. № 6. 1982. P. 1879–1890.

Intensity Characteristics of a Sound Field in the Black Sea

R. A. Vadov

Experimental data on sound attenuation and absorption in the Black Sea collected by the Acoustics Institute from the early fifties are discussed. These data are shown to be important for revealing the fundamental variability of sound absorption in the ocean. Experimental data on sound absorption and attenuation at the frequencies 200 Hz–210 kHz are presented.

В статье рассмотрены экспериментальные данные по затуханию и поглощению звука в Черном море, собранные Институтом акустики в начале пятидесятых годов. Показано, что эти данные важны для выявления фундаментальной изменчивости звукового поглощения в океане. Представлены экспериментальные данные по звуковому поглощению и затуханию на частотах 200 Гц–210 кГц.

Вспомогательная задача. Пусть $\Delta u = 0$ в области G , $u = 0$ на S_1 , $\partial u / \partial n = 0$ на S_2 . Тогда $u = 0$ в G .

$$(5) \quad \Delta u = 0, \quad u = 0 \text{ на } S_1, \quad \partial u / \partial n = 0 \text{ на } S_2.$$

Примем $u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(x, y, z)$, где $\Delta \psi_n = 0$ в G , $\psi_n = 0$ на S_1 , $\partial \psi_n / \partial n = 0$ на S_2 . Тогда $\Delta u = 0$ в G .

Отметим, что интегральное уравнение вида (6) для несмешанной задачи при помощи формулы (7) можно переписать в виде (8). Проанализируем основные свойства и недостатки уравнения (6).

1. Заметим, что интегральные уравнения для классических задач Дирихле и Неймана получают вид (6) при $\alpha = 0$ и $\alpha = \infty$ соответственно. Отметим, что уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода. Отметим, что уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

2. Важным достоинством ГИУ (6) является то обстоятельство, что оно является уравнением Вольтерра второго рода.

Заметим, что уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.

Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода.