АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2000, том 46, № 5, с. 624–631

УДК 551.463

ПОГЛОЩЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА В МОРСКОЙ СРЕДЕ

© 2000 г. Р. А. Вадов

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

Поступила в редакцию 25.11.99 г.

Рассматриваются оригинальные экспериментальные материалы по затуханию низкочастотного звука в Средиземном, Черном, Японском, Балтийском морях и северо-западной части Тихого океана. Воды этих регионов заметно различаются температурой и соленостью. Анализ представленных материалов проводится с целью получения выражения, пригодного для расчета коэффициента поглощения низкочастотного звука в морской воде. При этом учитываются опубликованные ранее результаты измерений времени релаксации низкочастотного процесса, связанного с присутствием бора в морской воде (выполненные методом температурного скачка), выявленная в 70-х годах зависимость поглощения от водородного показателя, а также результаты экспериментальных исследований поглощения звука на частотах выше 5–10 кГц. В результате проведенного (в предположении существования низкочастотного релаксационного процесса) анализа предлагается соотношение, связывающее низкочастотное поглощение с температурой, соленостью и водородным показателем pH, одинаково хорошо описывающее экспериментально полученную частотную зависимость затухания для четырех рассмотренных регионов (кроме Балтийского моря). Отмечаются повышенные коэффициенты затухания для мелких морей, а также для глубоководных регионов, воды которых подвержены влиянию сильных течений, проливных зон, зон смешения разнородных вод, где помимо поглощения существенную роль играет рассеяние звука на неоднородностях морской среды, утечка звуковой энергии в дно.

Одной из основных характеристик среды, определяющих энергетику звукового поля, является коэффициент поглощения звука. Этот параметр является количественной оценкой той части звуковой энергии, которая при распространении звука переходит в тепло. Морская вода представляет собой сложный электролит, в котором периодическое изменение давления приводит к сложным процессам периодического (с некоторым сдвигом по фазе) изменения его ионного состава. Для описания поглощения звука в такой среде помимо сдвиговой вязкости следует учитывать объемную вязкость, которая носит релаксационный характер и приводит к специфической частотной зависимости коэффициента поглощения.

На высоких (более 10 кГц) частотах спад уровня звукового поля с дистанцией в морской среде практически полностью объясняется геометрическим расхождением (с учетом рефракционных явлений) и поглощением звука в среде. На низких частотах в отдельных случаях помимо поглощения существенную роль играет рассеяние звука на неоднородностях среды. Для учета этих "суммарных" потерь было введено понятие затухания звука, определяемого экспоненциальной частью в спаде уровня звукового поля, дополняющей геометрическое расхождение до наблюдаемого в экспериментах закона спадания уровня звукового поля с дистанцией. Понятие затухания звука использовалось экспериментаторами так же и в тех случаях, когда его причины были не ясны. Вопрос о разделении отдельных составляющих затухания решался по мере выяснения их физической природы.

При проведении экспериментальных исследований затухания низкочастотного (ниже 5 кГц) звука в океане, как правило, регистрировался спад звукового поля в подводном звуковом канале (ПЗК) при расположении источника и приемника у его оси. Коэффициент затухания определялся по отклонению экспериментально полученного закона спадания от цилиндрического. На частотах 1–5 кГц, где для определения коэффициента затухания достаточна 100–150-километровая трасса распространения, такая методика вполне оправдана. Морская среда в этом случае (за исключением районов смешения разнородных вод) может рассматриваться как горизонтально-слоистая, закон спадания уровня звукового поля в канале с дистанцией – цилиндрическим. На частотах ниже 0.5–1.0 кГц, где для оценки значений коэффициента затухания требуются трассы протяженностью 500–1000 км и более, задача определения затухания усложняется. Морская среда при таких горизонтальных протяженностях, как правило, не может рассматриваться горизонтально-слоистой.

Профили $c(z)$ вдоль такой трассы претерпевают заметные изменения, что приводит к отличию закона геометрического расхождения звукового поля в канале на таких трассах от цилиндрического. Это отличие в отдельных случаях достигает 7–12 дБ на 1000 км [1]. Оно связано с перераспределением звуковой энергии по глубине и никакого отношения к поглощению звука не имеет. Эти отклонения могут рассматриваться как систематическая ошибка в определении затухания. Однако исключить ее не просто. Казалось бы, достаточно рассчитать звуковое поле с учетом переменных вдоль трассы распространения гидрологических условий и определить коэффициент затухания по отклонению экспериментального спада звукового поля не от цилиндрического закона, а от расчетного. К сожалению, экспериментатор, как правило, не обладает достаточной информацией о пространственной изменчивости поля скорости звука, тем более на момент проведения опыта. Обычно на 1000-километровой трассе проводится 5–7 гидрологических станций до или после проведения акустического эксперимента. По результатам таких замеров можно судить лишь о степени изменчивости профиля $c(z)$ по трассе, о характере возможных отклонений геометрического расхождения уровня звукового поля от цилиндрического закона – не более. Для исключения такой систематической ошибки в определении β экспериментаторами в отдельных случаях применялся "дифференциальный" метод определения коэффициента затухания. Этот метод предполагает использование широкополосного сигнала (например, взрывного сигнала). Отличный от цилиндрического закон геометрического расхождения исключается рассмотрением спадов уровня звукового поля на разных частотах, приведенных к спаду на некоторой "реперной" частоте f_0. В результате "дифференциального" метода определяются превышения коэффициента затухания на отдельных частотах относительно его значения на "реперной" частоте f_0. Переход к абсолютным значениям коэффициента затухания возможен при допущении достаточно монотонной зависимости коэффициента β от частоты, стремящегося к нулевому значению при $f = 0$. Такой метод применялся в работах [2, 3] и др.

Для экспериментальных исследований затухания звука в морской среде в их развитии характерны постепенное снижение исследуемых частот, переход от лабораторных методов измерения к натурным, а также постоянный поиск физического объяснения "повышенных" (по сравнению с ожидаемыми, экстраполируемыми с высоких частот) значений коэффициента поглощения (затухания). Так в 30–40-х годах основной проблемой было объяснить трехкратное превышение экспериментальных значений коэффициента поглощения звука в пресной воде над результатами расчета по Кирхгофу–Стоксу. Эта проблема была решена рассмотрением механизма структурной релаксации молекул воды (с частотой релаксации 10^{10}–10^{11} Гц), введением понятия объемной вязкости [4]. На частотах ниже 1 МГц поглощение звука в пресной воде пропорционально квадрату частоты, коэффициент пропорциональности может быть описан выражением:

$$K = 1.42 \times 10^{-8} \times 10^{1240/T} \text{ дБ/кмкГц}^2, \qquad (1)$$

где T – абсолютная температура, °К.

В конце 40-х, начале 50-х годов необходимо было объяснить 10-кратное превышение затухания звука в морской воде на частотах около 100 кГц над поглощением в пресной воде. Причина такого превышения была выяснена, появилась теория релаксации степени диссоциации сернокислого магния [5, 6]. В результате цикла лабораторных исследований, проведенных в конце 50-х–начале 60-х годов в Акустическом институте АН СССР, а также с учетом экспериментальных материалов, опубликованных к этому времени в литературе, для описания поглощения звука в морской воде на частотах 5–10 кГц и выше было предложено выражение

$$\beta = \frac{A_{\mathrm{MgSO_4}} f}{f/f_{r\mathrm{MgSO_4}} + f_{r\mathrm{MgSO_4}}/f} + Kf^2, \qquad (2)$$

где параметры релаксационного поглощения, обусловленного сернокислым магнием, определяются как

$$f_{r\mathrm{MgSO_4}} = 1.125 \times 10^{(9 - 2038/T)} \text{ кГц},$$

$$A_{\mathrm{MgSO_4}} = 6.25ST \times 10^{-6} \text{ дБ/кмкГц};$$

второй член в правой части соотношения (2) описывает поглощение в пресной воде, значение коэффициента K определено выражением (1), S – соленость морской воды, ‰.

В 60–70-х годах повышенное затухание звука в морской среде на низких (<3–5 кГц) частотах явилось причиной рассмотрения и глубокого анализа ряда физических процессов – потенциальных источников наблюдаемого явления. В связи с этим в литературе в эти годы обсуждались такие гипотезы, как рассеяние звука на тепловых неоднородностях, биоорганизмах, "несовершенство" ПЗК, добавочное затухание из-за нелинейных эффектов (при работе со взрывными источниками), низкочастотные релаксационные процессы, связанные с турбулентной вязкостью, со структурной перестройкой молекул воды, с сернокислым бериллием и т.д.

Наиболее близкой к достоверному объяснению наблюдаемого затухания оказалась низкочастотная релаксация, связанная с присутствием бора в морской воде. Эта гипотеза появилась в 1972–1974 гг. Основным доводом в ее пользу были и остаются до настоящего времени результаты

Таблица 1

Регион	С-з.ч. Тихого ок.	Средиз. море	Черное море	Японское море	Балт. море
Глуб. оси ПЗК	50–100 м	150–250 м	40–60 м	120–180 м	40–50 м
t° у оси ПЗК	1–2°C	12.5–13°C	8.5–9°C	0.5–1°C	4–5°C
S‰ у оси ПЗК	33–33.5‰	38–39‰	18–20‰	34–34.5‰	6–10‰
pH у оси ПЗК	8.1–8.25	8.0–8.17	8.15–8.25	8.1–8.25	7.8–8.0
pH_{eff}	8.2	8.1	8.17	8.22	7.85

измерений времени релаксации, выполненных методом температурного скачка для морской воды, содержащей и не содержащей бор [7]. К сожалению, других надежных данных, подтверждающих ее справедливость, получено не было, хотя отдельные авторы пытались привлечь к рассмотрению в качестве решающих результаты лабораторных измерений коэффициента поглощения звука в морской воде на частотах выше 6–10 кГц [8]. Единственно надежными экспериментальными данными по коэффициентам затухания звука в диапазоне частот 0.2–5 кГц следует считать результаты натурных измерений, выполненных в подводном звуковом канале.

В конце 70-х–начале 80-х гг. в литературе появились рекомендованные для расчета низкочастотного поглощения звука в океане соотношения, учитывающие его релаксационный характер [9, 10 и др.]. Как правило, достаточно хорошо описывая экспериментальные данные, полученные в одном регионе Мирового океана, рассчитанные по ним значения коэффициента поглощения для других регионов зачастую не подтверждаются экспериментально.

Ниже с позиций гипотезы низкочастотного релаксационного поглощения, обусловленного бором, нами рассмотрены экспериментальные данные, полученные в пяти регионах Мирового океана, существенно различающихся такими параметрами, как температура, соленость вод. В качестве таких "контрольных" регионов были выбраны: северо-западная (глубоководная) часть Тихого океана, Средиземное, Черное, Японское и Балтийское моря. Некоторые характеристики этих регионов приведены в табл. 1.

Для всех этих регионов характерно неглубокое залегание ПЗК (50–250 м) при большом их различии по солености (6–39‰) и температуре (0.5–13°) вод. Один из этих регионов (Балтийское море) – мелководный. Эти регионы достаточно

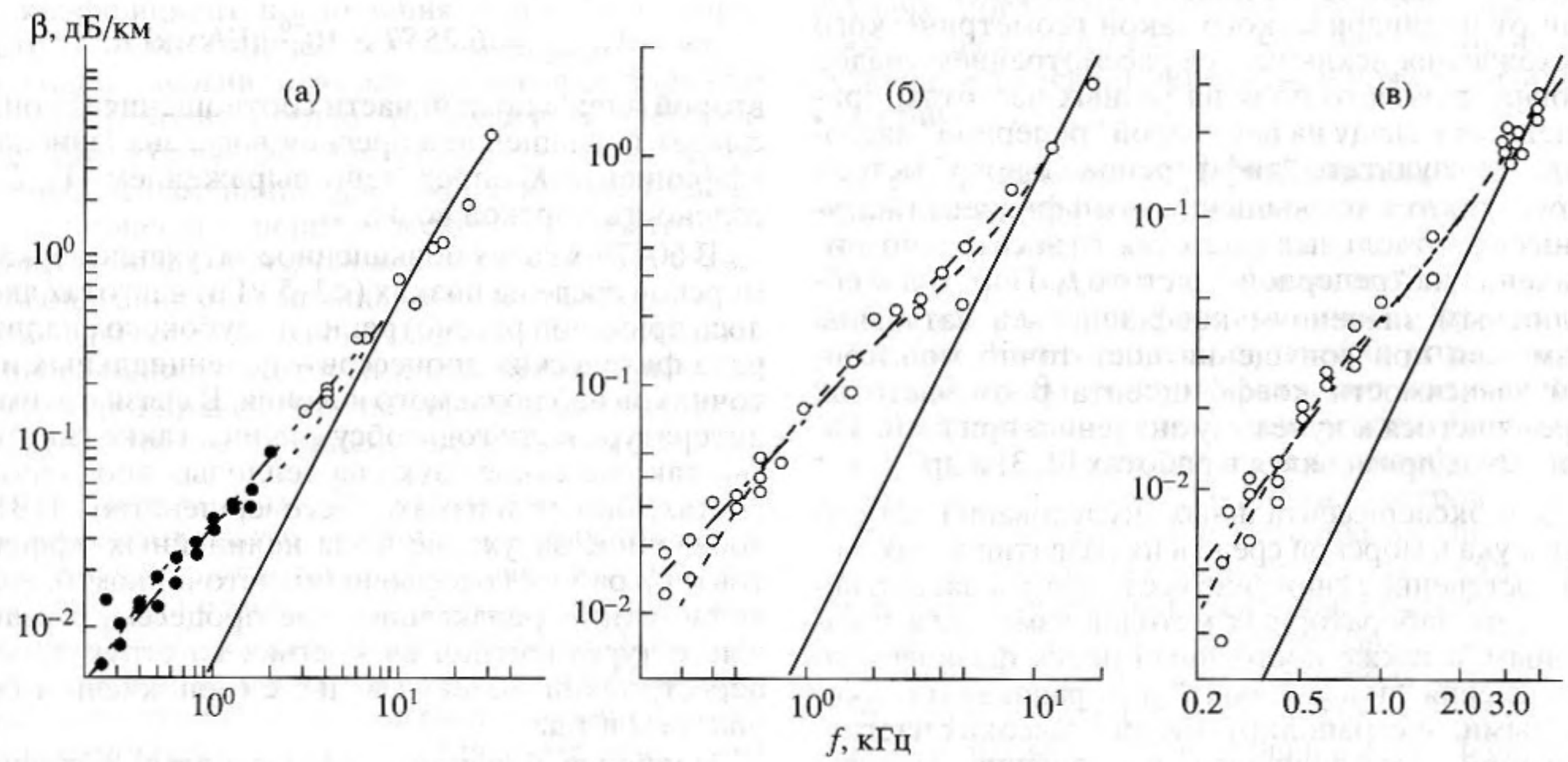

Рис. 1. Экспериментальные данные по затуханию низкочастотного звука в Черном (а), Средиземном (б) и Японском (в) морях, существенно различающихся температурой и соленостью вод.
– – – – – – аппроксимация частотной зависимости затухания релаксационной кривой,
–·–·–·– аппроксимация затухания степенной функцией,
——— – частотная зависимость поглощения, обусловленного релаксацией степени диссоциации сернокислого магния.

Таблица 2. Характеристика низкочастотного затухания (по экспериментальным данным)

Регион:	С-з.ч. Тихого ок.	Средиз. море	Черное море	Японское море	Балт. море
p, дБ/кмкГц^n	0.0275	0.071	0.035	0.04	0.04
n	1.35	1.1	1.25	1.28	0.65
f_{rB}, кГц	0.844	1.230	0.640–0.683	0.848	0.290
A_B, дБ/кмкГц	0.044	0.147	0.06	0.058	0.120
A_B/S	0.00132	0.00382	0.00316	0.00169	0.015
$A_B/S10^{(0.78pH-5)}$	0.000053	0.000184	0.000133	0.000065	0.00123

хорошо обследованы – для них получен достаточно представительный материал по затуханию звука в диапазоне частот 0.2–5 кГц.

В качестве примера экспериментальные данные по трем из них приведены на рис. 1а, 1б, 1в. Для каждого из выбранных регионов частотная зависимость коэффициента затухания в диапазоне 0.2–5 кГц достаточно хорошо может быть описана как степенным законом $\beta = pf^n$, так и выражением (2), дополненным функцией

$$\Delta\beta = \frac{A_B f}{f/f_{rB} + f_{rB}/f}, \qquad (3)$$

описывающей низкочастотный релаксационный процесс при соответствующем выборе параметров A_B и f_{rB}. Зависимостью поглощения от гидростатического давления при анализе экспериментальных данных, полученных для этих регионов, можно пренебречь из-за неглубокого залегания оси ПЗК. Значения коэффициента p и степени n, а также параметров A_B и f_{rB}, определенных нами для каждого из выбранных регионов, приведены в табл. 2. Как правило, зарубежные исследователи каждому району Мирового океана приписывают свои значения параметров A_B и f_{rB} без строгого обоснования сделанного выбора. Нами выбор параметров релаксационной кривой для описания той или иной совокупности данных был произведен на основе объективного их анализа, проведенного с привлечением метода наименьших квадратов.

Предварительно была проанализирована острота минимума суммы квадратичных отклонений экспериментальных значений β от расчетных, оценена изменчивость параметра A_B аппроксимирующей релаксационной кривой в зависимости от принудительного выбора значения f_{rB}. Для Средиземного моря, например, вариации значения f_{rB} в пределах ±30% привели к изменению оптимизированного параметра A_B всего лишь в пределах ±3–6%. При определении параметров релаксационной кривой по экспериментальным значениям β надежность оценки параметра A_B заметно выше надежности оценки релаксационной частоты f_{rB}. Учитывая тот факт, что зависимости релаксационной частоты от температуры и концентрации бора были посвящены специальные исследования [7], было решено при выборе параметров релаксационной кривой для описания частотной зависимости затухания для оценки f_{rB} использовать данные, полученные методом температурного скачка, в то время как для оценки значения A_B использовать материалы, полученные из опытов по дальнему распространению звука в ПЗК.

Напомним результаты измерений времени релаксации, выполненных методом температурного скачка авторами работы [7]: релаксационная частота процесса, ответственного (предположительно) за поглощение низкочастотного звука, зависит от температуры морской воды, концентрации бора и не зависит от водородного показателя pH.

Бор входит в состав основных солевых компонент морской воды, отношение его концентрации к хлорности или солености морской воды в Мировом океане изменяется в пределах, не превышающих ±10%. Для выбранных регионов на глубинах, близких к оси ПЗК, отношение концентраций бора и хлора (В мг/кг : Cl‰) составляет 0.23–0.24, исключением являются воды Черного моря, для которых это отношение достигает 0.25–0.27. Основываясь на результатах замеров времени релаксации методом температурного скачка при двух температурах (9.7°C и 25.5°C) и трех значениях солености стандартной морской воды (соответствующих 35‰, 17.5‰, и 7‰), нетрудно получить соотношение, связывающее значение релаксационной частоты с температурой и соленостью морской воды:

$$f_{rB} = 37.9S^{0.8}e^{-1800/T} \text{ кГц}. \qquad (4)$$

На рис. 2 представлены результаты этих измерений и аппроксимирующие их зависимости от температуры и солености, которые учитывались при конструировании соотношения (4). При определении зависимости релаксационной частоты от солености было отдано предпочтение экспериментальным данным, хотя некоторые теоретические соображения [11] приводят к пропорциональности $f_{rB} \sim S^{0.5}$.

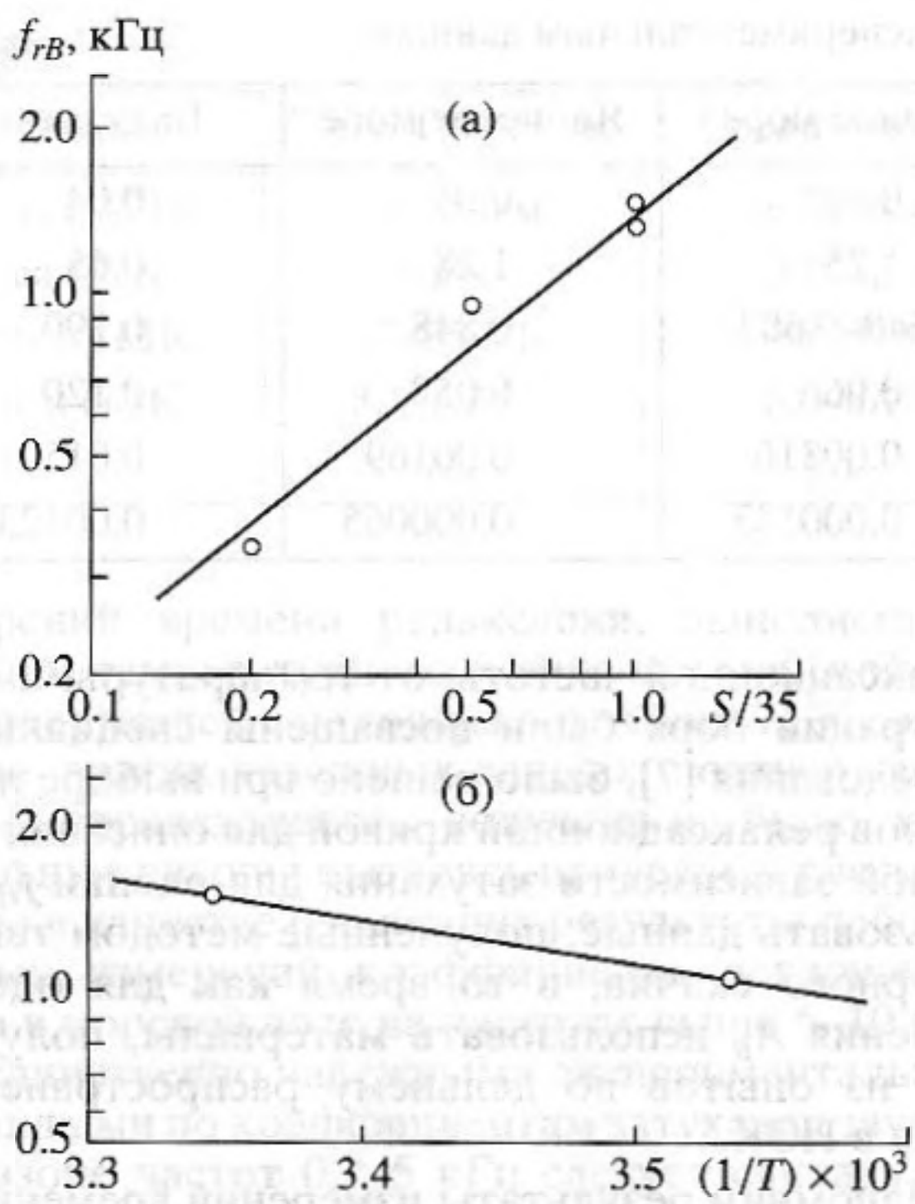

Рис. 2. Результаты измерений релаксационной частоты (связанной с бором), выполненных методом температурного скачка [7]:

а – зависимость частоты релаксации от солености морской воды, б – зависимость частоты релаксации от температуры морской воды.

На основании полученного соотношения для северо-западной части Тихого океана (t = 1–2°C, S = 33–33.5‰), Средиземного моря (t = 13°C, S = = 38–39‰), Черного моря (t = 8.5–9°C, S = 18–20‰), Японского моря (t = 0.5–1°C, S = 34–34.5‰) и Балтики (t = 4–5°C, S = 6–12‰) были приняты значения релаксационной частоты, приведенные в табл. 2. Для этих же регионов по экспериментальным значениям β с учетом принятых значений f_{rB} методом наименьших квадратов были определены значения параметра A_B аппроксимирующей кривой (3), приведенные там же.

Релаксационная частотная зависимость затухания, полученная при этих параметрах для Японского, Черного и Средиземного морей, нанесена штриховой линией на рисунках 1а–1в. Можно говорить о хорошем подборе этих параметров для описания экспериментальных данных по затуханию.

На этих рисунках представлена также эмпирическая степенная зависимость, предложенная для оценки затухания в этих регионах (штрих-пунктирная линия). Ее согласие как с релаксационной частотной зависимостью, так и с экспериментальными данными по затуханию вполне приемлемо. Таким образом, с точки зрения достоверности описания частотной зависимости затухания звука в этих регионах оба соотношения – релаксационное и степенное – равнозначны. Однако релаксационное соотношение помимо этого претендует на описание физических процессов, ответственных за затухание.

Аналогичное согласие экспериментальных данных с кривой, рассчитанной с учетом параметров f_{rB} и A_B, получено как для Балтийского моря так и для северо-западной части Тихого океана (на рисунках не представлены).

Для поиска соотношения, одинаково хорошо описывающего поглощение в выбранных нами регионах, попытаемся последовательно вычленить наиболее вероятные функциональные связи коэффициента поглощения с характеристиками морской воды.

При теоретических и экспериментальных исследованиях релаксационного поглощения в водных растворах электролитов была установлена пропорциональность параметра A концентрации. Разумно было бы допустить справедливость такого соотношения и для низкочастотной релаксации, обусловленной присутствием бор-боратных комплексов в морской воде.

Нормированные к солености значения параметра A_B представлены в табл. 2. Эта нормировка привела к выводу о явном выпадении Балтийского моря из общего ряда рассматриваемых регионов. Действительно, значение A_B/S, определенное для Балтики в 5–10 раз превосходит значения определенные для других регионов. По-видимому, при распространении звука в Балтийском море, несмотря на хорошо сформированный ПЗК, сказалась малая глубина моря, что привело к заметной утечке звуковой энергии в дно.

В своих работах зарубежные исследователи отмечали двукратное различие между данными по затуханию в Атлантике [12] и в Тихом океане [13]. Со ссылкой на информацию Национального Центра океанографических данных США для этих океанов приводились заметно различающиеся срединные значения водородного показателя pH: 8.09 и 7.67 [11]. На этом основании было высказано предположение о связи параметра A_B с величиной pH. Для объяснения отмеченного различия между Атлантикой и Тихим океаном была предложена зависимость [14]

$$A_B \approx 10^{(0.78\mathrm{pH} - 5)}.$$

Для различных регионов в это соотношение, как правило, подставлялось значение водородного показателя на оси ПЗК. Однако известна сильная изменчивость pH по глубине. Для Черного моря, например, пределы измерения pH с увеличением глубины достигают 0.8. Такое различие приводит к изменению параметра A_B (а, следовательно, и коэффициента поглощения Δβ) в 3–4 раза. При использовании архивных материалов не следует

также забывать, что в различных источниках публикуются значения pH, приведенные к атмосферному давлению и температуре 0°C (pH_0) или 18°C ($pH_в$). Различия в их значениях могут достигать 0.2–0.3. Далее индекс В всюду опустим, подразумевая под pH значение $pH_в$. При учете водородного показателя также следовало бы использовать его эффективное значение, среднее по лучу (по его полному циклу), пересекающему разные слои океана. В первом приближении такое значение pH_{eff} может быть определено из соотношения

$$10^{(0.78\mathrm{pH}_{eff}-5)} = \frac{1}{L}\int\limits_{(L)} 10^{(0.78\mathrm{pH}(z)-5)}dl,$$

где интегрирование производится вдоль луча, L – длина луча (его полного цикла).

Для северо-западной части Тихого океана, Средиземного, Черного и Японского морей, для тех акваторий, в которых проводились эксперименты, были взяты архивные данные по зависимости pH от глубины и по этим данным для кривых $c(z)$, полученных во время проведения опытов в этих регионах, были произведены расчеты pH_{eff} для различных водных лучей.

Полный диапазон изменений значений pH_{eff} составил от 0.06 (для Средиземного моря) до 0.4 (для Черного моря). Ограничение углового диапазона водных лучей первой третью (которая содержит основные энергонесущие лучи) сокращает диапазон изменений pH_{eff} до 0.04–0.07 для всех четырех регионов, что приводит к изменению коэффициента затухания за счет вариации pH в пределах 10–15%.

Уточненные таким образом значения pH_{eff} приведены в табл. 1. Учитывая разброс значений pH, приводимых в разных источниках по одному и тому же региону, следует отметить приемлемое согласие эффективных значений pH_{eff} со значениями pH на оси ПЗК.

С учетом уточненных значений водородного показателя на следующем этапе проводимого анализа была учтена зависимость низкочастотного поглощения от pH. В табл. 2 приведены значения $A_B/S \times 10^{(0.78\mathrm{pH}-5)}$ для всех пяти регионов. Нетрудно заметить определенную тенденцию изменения этих значений от региона к региону. Практически не различающиеся для Японского моря и Тихого океана (температура вод которых на оси ПЗК практически одинакова), эти значения увеличиваются с повышением температуры вод. Подобная зависимость параметра A от температуры (но не столь сильная) отмечалась при проведении исследований на частотах десятки–сотни кГц.

На рис. 3 представлены значения $A_B/S \times 10^{(0.78\mathrm{pH}-5)}$ для четырех глубоководных регионов в зависимости от обратной величины абсолютной температуры вод ($1/T$). По наклону линии регрессии для экспериментальных точек нетрудно определить наилучшую форму температурной зависимости параметра A_B:

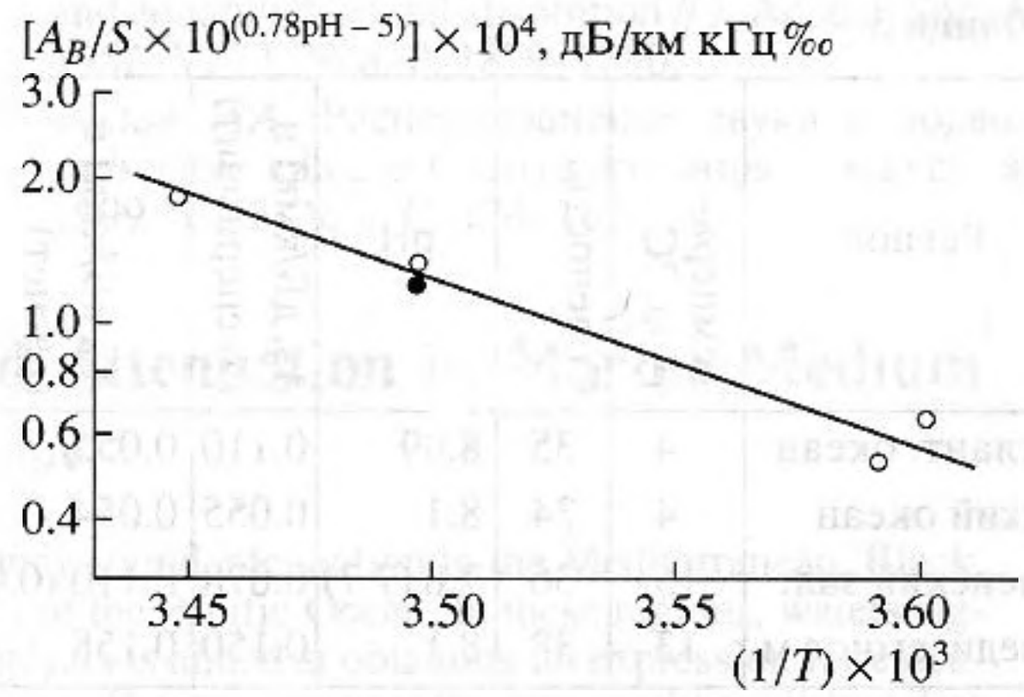

Рис. 3. Температурная зависимость параметра $A_B/S \times 10^{(0.78\mathrm{pH}-5)}$ низкочастотного релаксационного поглощения по материалам экспериментальных исследований, проведенных в Черном, Средиземном, Японском морях и в северо-западной части Тихого океана. Для Черного моря приведены два значения этого параметра: одно – для реальной солености вод (○), другое – для солености скорректированной на концентрацию бора (●), соответствующую отношению В мг/кг : Cl‰ = = 0.24.

$$A_B/S \times 10^{(0.78\mathrm{pH}-5)} = 1.65 \times 10^{(9-3696/T)}.$$

Таким образом, при допущении такой формы температурной зависимости параметра A_B удается согласовать между собой экспериментальные данные по затуханию звука для четырех глубоководных регионов, существенно различающихся температурой и соленостью вод.

Приведем окончательное соотношение для расчета низкочастотного поглощения, которое появилось в результате проведенного анализа экспериментальных данных:

$$\beta = \frac{A_B f}{f/f_{rB} + f_{rB}/f} + \frac{A_{\mathrm{MgSO_4}} f}{f/f_{r\mathrm{MgSO_4}} + f_{r\mathrm{MgSO_4}}/f} + Kf^2, \quad (5)$$

где f – частота, кГц, $K = 1.42 \times 10^{-8} \times 10^{1240/T}$, дБ/кмкГц^2,

$$f_{r\mathrm{MgSO_4}} = 1.125 \times 10^{(9-2038/T)} \text{ кГц},$$

$$A_{\mathrm{MgSO_4}} = 62.5ST \times 10^{-6} \text{ дБ/кмкГц},$$

$$f_{rB} = 37.9S^{0.8} \times 10^{-780/T} \text{ кГц},$$

$$A_B = 1.65S \times 10^{(4+0.78\mathrm{pH}-3696/T)} \text{ дБ/кмкГц},$$

S – соленость, ‰, T – температура, °K, pH – водородный показатель (его эффективное значение).

Таблица 3

Регион	Температура, °С	Соленость, ‰	pH	A_B, дБ/кмкГц (эксперимент)	A_B, дБ/кмкГц (расчет)
Атлант. океан	4	35	8.09	0.110	0.055
Тихий океан	4	34	8.1	0.055	0.054
Аденский зал.	15	36	7.8 (7.7)	0.078	0.110 (0.09)
Средиземное м.	13	38	8.1	0.150	0.158

Первый член в правой части соотношения (5) характеризует релаксационное поглощение, связанное с бором, второй – релаксационное поглощение, связанное с сернокислым магнием, третий определяет поглощение звука в пресной воде.

Полученное соотношение для расчета низкочастотного поглощения было проверено на экспериментальных данных, приведенных в работе [9], по Атлантике, Тихому океану, Аденскому заливу и Средиземному морю. В табл. 3 для этих регионов приведены температура, соленость, *pH* и значения A_B, оцененные Мелленом и Браунингом по экспериментальным материалам, а также значения A_B, рассчитанные по приведенным выше формулам. Значения *pH* были определены в соответствии с нашими представлениями. Они несколько отличаются от предложенных ранее в работе [10]. Так, для Средиземного моря было принято значение, приведенное в табл. 1, для Тихого океана – значение 8.1, соответствующее глубинам 50–80 м, где располагалась ось ПЗК при проведении одного из двух опытов Ловетта [13]. Для Аденского залива расчет проводился для двух значений *pH*: 7.82, заимствованного из работы [10], и 7.7, заметно снижающего различие расчетного и экспериментального значений A_B.

Рассчитанные значения A_B достаточно хорошо согласуются с экспериментальными для всех четырех регионов кроме Атлантики, где эксперимент проводился вдоль трассы Эльютера–Бермуды, пересекающей обширную зону действия Антильского течения, что по-видимому и явилось причиной повышенных значений коэффициента затухания.

Наивно было бы полагать, что для всех регионов Мирового океана удастся объяснить экспериментальные данные по затуханию низкочастотного звука только поглощением, обусловленным присутствием в морской воде бора. Такие регионы, для которых низкочастотное затухание заметно превышает значения, прогнозируемые на основе приведенных соотношений, действительно существуют. К таким регионам следует отнести акватории глубоководных морей, расположенные вблизи мощных течений, вблизи фронтальных зон, зон активного смешения вод, различающихся температурой, соленостью, например, глубоководная часть Охотского моря (район близкий к Курильским проливам) [15], Гренландское море (район смешения полярных и атлантических вод) [3]. В таких регионах затухание звука определяется не только его поглощением, но и рассеянием на тепловых неоднородностях водной среды типа тонкослойных образований. К таким регионам, как мы убедились выше, следует также отнести мелководные моря, для которых даже в условиях хорошо сформированного ПЗК (так, например, в Балтийском море) не удается избавиться от утечки звуковой энергии в дно.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 99-02-18359).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вадов Р.А.* Затухание низкочастотного звука в океане // Проблемы акустики океана. М.: Изд-во Наука, 1984. С. 31–42.
2. *Sheehy M.J., Halley R.* Measurement of attenuation of low-frequency underwater sound // J. Acoust. Soc. Amer. 1957. V. 29. № 4. P. 464–469.
3. *Вадов Р.А.* Некоторые результаты опыта по дальнему распространению звука в Гренландском море // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 47–59.
4. *Hall L.* The origin of ultrasonic absorption in water // Phys. Rev. 1948. V. 73. № 7. P. 775.
5. *Kurtze G., Tamm K.* Measurement of sound absorption in water and in aqueous solutions of electrolytes // Acustica. 1953. V. 3. № 1. P. 33–48.
6. *Глотов В.П.* К теории релаксационного поглощения и дисперсии звука в сильных не полностью диссоциированных электролитах // Акуст. журн. 1957. Т. 3. № 3. С. 220–229.
7. *Yeager E., Fisher F.H., Miceli J., Bressel R.* Origin of the low-frequency sound absorption in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 53. № 6. P. 1705–1707.
8. *Mellen R.H., Browning D.G., Simmons V.P.* Investigation of chemical sound absorption in sea water. Pt I–III // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 68. № 1. P. 248–257; 1981. V. 69. № 6. P. 1660–1662; 1981. V. 70. № 1. P. 143–148.
9. *Fisher F.H., Simmons V.P.* Sound absorption in sea water // J. Acoust. Soc. Amer. 1977. V. 62. № 3. P. 558–564.
10. *Shulkin M., Marsh H.W.* Low-frequency sound absorption in the ocean // J. Acoust. Soc. Amer. 1978. V. 63. № 1. P. 43–48.
11. *Глотов В.П.* Влияние микроэлементов бериллия и бора на объемную вязкость воды и на низкочастотное затухание звука в океане // Акуст. журн. 1976. Т. 22. № 1. С. 125–126.
12. *Thorp W.H.* Deep-ocean sound attenuation in the sub- and low-kilocycle per second region // Acoust. Soc. Amer. 1965. V. 38. № 4. P. 648–654.

13. *Lovett J.R.* Northeastern Pacific sound attenuation using low-frequency CW sources // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 58. № 3. P. 620–625.
14. *Francois R.E., Garrison G.R.* Sound absorption based on ocean measurement. Part 2: Boric acid contribution and equation for total absorption // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 72. № 6. P. 1879–1890.
15. *Вадов Р.А.* Распространение звука в подводном звуковом канале Охотского моря // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 2. С. 174–182.

Low-Frequency Sound Absorption and Attenuation in Marine Medium

R. A. Vadov

Original experimental data are analyzed on the low-frequency sound attenuation in the Mediterranean, Black, and Baltic Seas, Sea of Japan, and the north-western region of the Pacific Ocean. In these regions, waters significantly differ in their temperatures and salinities. The analysis is aimed at obtaining an expression for calculating the low-frequency absorption coefficient in the sea water. The analysis uses the previously published data on the measured (by the temperature discontinuity method) low-frequency relaxation times associated with boron present in the sea water. The dependence of the absorption on the pH value (which was revealed in the seventies) and the experimental data on sound absorption at frequencies higher than 5–10 kHz are also taken into account. As a result of the analysis based on the assumption that the low-frequency relaxation takes place, an expression is proposed that relates the low-frequency absorption to the temperature, salinity, and pH value and equally well describes the experimental frequency dependences of attenuation for the four regions at hand (except for the Baltic Sea). Increased attenuation coefficients are noticed for shallow seas and deep-water regions where waters are influenced by intense currents, strait zones, and zones of mixing waters of different origin, i.e., for the ocean areas where, in addition to the attenuation, the sound scattering by inhomogeneities of the marine medium and the sound energy leakage into the sea floor are significant.