

УДК 534.286

EDN: WZQNGI DOI: 10.31429/vestnik-20-2-70-81

Затухание звука в морской среде (обзор)

А. А. Ярошенко  , А. Д. Дегтяр 

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Россия

✉ Ярошенко Александр Александрович; ORCID 0000-0002-6471-0162; e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Аннотация. Одним из факторов, влияющих на дальность распространения звука в морской среде, является поглощение звука. Многие исследователи внесли свой вклад в современное знание о затухании звука в морской воде. В статье представлен краткий исторический обзор работ, посвященных исследованию поглощению звука в морской воде. Приведен ряд эмпирических формул для расчета коэффициента поглощения звука в морской среде. Рассматривается современное состояние проблемы. Поглощение звука зависит от температуры, давления, солености, кислотности (водородного показателя pH) и частоты. Для высоких частот поглощение звука намного выше, чем для низких. При увеличении гидростатического давления снижается поглощение. Повышение температуры, солености и водородного показателя увеличивает поглощение. Поглощение звука в морской воде обусловлено наличием растворенных в ней солей магния, бора и брома. В морской воде происходит большое количество процессов, но только на две релаксации приходится большая часть поглощения. Это релаксация сульфата магния $MgSO_4$ (частота релаксации $f_r \sim 100$ кГц) и борной кислоты $B(OH)_3$ ($f_r \sim 1$ кГц). Выявлена еще третья релаксация с участием карбоната магния $MgCO_3$ ($f_r \sim 10$ кГц). На частотах от 0,2 до 10 кГц основной вклад в поглощение вносит борная кислота $B(OH)_3$. На частотах ниже 1 кГц коэффициент поглощения в океане зависит от pH . Зависимость от pH связывают с релаксацией видов: $B(OH)_3$ — борной кислоты и $MgCO_3$ — карбоната магния. В диапазоне частот от 10 до 1000 кГц основной вклад в затухание вносит сульфат магния $MgSO_4$. На высоких частотах (> 1000 кГц) поглощение зависит от вязкости. На частотах ниже 200 Гц наблюдается разброс экспериментальных данных. Этот разброс связывают с региональной зависимостью.

Ключевые слова: морская среда, затухание звука, коэффициент поглощения, частота, температура, соленость, водородный показатель, гидростатическое давление, вязкость, частота релаксации.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Ярошенко А. А., Дегтяр А. Д. Затухание звука в морской среде (обзор) // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 2. С. 70–81. EDN: WZQNGI. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-70-81

Поступила 13 июня 2023 г. После доработки 23 июня 2023 г. Принято 26 июня 2023 г. Публикация 30 июня 2023 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи.

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Sound Attenuation in the Marine Environment (Review)

А. А. Yarochenko , А. Д. Degtyar

Sevastopol State University, Univesitetskaya st. 33, Sevastopol, 299053, Russia

✉ Alexander A. Yarochenko; ORCID 0000-0002-6471-0162; e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Abstract. One of the factors affecting the range of sound propagation in the marine environment is sound absorption. Many researchers have contributed to the current knowledge of sound attenuation in seawater. The article presents a brief historical overview of the studies about the sound absorption in seawater. A number of empirical formulas for calculating the sound absorption coefficient in the marine environment are given. The current state of the problem is analyzed. Sound absorption depends on temperature, pressure, salinity, acidity (hydrogen pH) and frequency. For high frequencies, the sound absorption is much higher than for low frequencies. With an increase in hydrostatic pressure, absorption decreases. An increase in temperature, salinity and hydrogen index increases absorption. Sound absorption in seawater is caused by the presence of magnesium, boron and bromine salts dissolved in it. A large number of processes occur in seawater, but only two relaxations account for most of the absorption. This is the relaxation of magnesium sulfate $MgSO_4$ (relaxation frequency $f_r \sim 100$ kHz) and boric acid $B(OH)_3$ ($f_r \sim 1$ kHz). A third relaxation involving magnesium carbonate $MgCO_3$ ($f_r \sim 10$ kHz) was revealed. At frequencies from 0.2 to 10 kHz, boric acid $B(OH)_3$ makes the main contribution to absorption. At frequencies below 1 kHz, the absorption

coefficient in the ocean depends on the pH . Dependence on pH is associated with relaxation of the following types: $B(OH)_3$ – boric acid and $MgCO_3$ – magnesium carbonate. In the frequency range from 10 to 1000 kHz, magnesium sulfate $MgSO_4$ makes the main contribution to attenuation. At high frequencies (> 1000 kHz), the absorption depends on the viscosity. At frequencies below 200 Hz, there is a spread of experimental data. This variation is associated with regional dependence.

Keywords: marine environment, sound attenuation, absorption coefficient, frequency, temperature, salinity, hydrogen index, hydrostatic pressure, viscosity, relaxation frequency.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Yarochenko, A. A., Degtyar, A. D., Sound attenuation in the marine environment (review). *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 70–81. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-70-81

Received 13 June 2023. Revised 23 June 2023. Accepted 26 June 2023. Published 30 June 2023.

The authors declare no competing interests. The authors contributed equally.

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Акустические волны являются единственным видом излучения, способным распространяться в морской воде на значительные расстояния. Системы подводной связи требуют детального изучения распространения акустических волн в морской среде. Специфика задач, связанных с исследованием звуковых полей в океане, заключается в необходимости комплексного учета многих факторов, влияющих на процесс распространения звуковых волн. Одним из таких факторов является затухания звука в морской воде.

Затухание звука в морской воде — это поглощение (переход звуковой энергии в тепло) и рассеяние (уход звуковой энергии в другие направления). Оба эти явления приводит к одному и тому же эффекту — экспоненциальному убыванию амплитуды звуковой волны по мере её удаления от излучателя. Это делает иногда невозможным разделение эффектов поглощения и рассеяния в природных условиях в океане.

Поглощение звука в морской воде во много раз больше, чем в пресной, и объясняется релаксационной теорией Мандельштама Л.И. и Леонтовича М.А. [1] взаимодействием между молекулами жидкости и растворенных солей магния, бора, брома.

Время, необходимое для перестройки молекул из-за изменения давления, называется временем релаксации. Три известных в морской воде релаксационных процесса имеют следующее время релаксации: 10^{-11} с для молекул пресной воды, 10^{-5} с для молекул сульфата магния, 10^{-3} с для боратов, растворенных в морской воде [2].

Еще одной из причин убывания интенсивности звука при распространении его в океане является рассеяние звуковой энергии на различного рода неоднородностях океанической среды и ее границ. Дифракционные потери существенны только на очень низких частотах. Обычно удается измерить только суммарный эффект поглощения и рассеяния, который называется затуханием звука, поэтому потери при распространении чаще всего оценивают с помощью коэффициента пространственного затухания β .

1. Основные этапы исследований поглощения звука

Первые исследования по изучению поглощения звука в жидкости были проведены в середине XIX в. Стоксом в Англии и Кирхгофом в Германии. Первые измерения коэффициента поглощения звука в морской воде были проведены Стефенсоном (1931–1934 гг.) [3].

Мандельштамом и Леонтовичем в 1937 г. разработана релаксационная теория поглощения звука [1]. Либерман [4, 5], следуя релаксационной теории Мандельштама и Леонтовича, сделал предположение, что избыточное поглощение обусловлено присутствием в морской воде солей $MgSO_4$. Им получены экспериментальные данные для коэффициента затухания в пресной и морской воде. Было обнаружено, что поглощение в морской воде на частотах от 5 до 50 кГц почти в 30 раз больше, чем в пресной [4]. Этот факт отнесен на счет химической реакции, которая идет в морской воде под действием акустических колебаний. Релаксационная теория

Либермана [5] дает в целом удовлетворительное совпадение с результатами эксперимента, хотя в сравнении с экспериментальными данными для морской воды она дает несколько завышенные значения коэффициента поглощения [6]. Уилсон и Леонард [7, 8] в своих экспериментах по распространению звука обнаружили избыток поглощения, который связали с гидратацией сульфата магния $MgSO_4$.

В результате многочисленных натуральных измерений был получен ряд эмпирических формул для расчета коэффициента затухания звука в океане. Одна из первых эмпирических формул для коэффициента затухания в подводном звуковом канале была предложена Шехи и Хэйли (1957 г.) [9] для частот 20–60 кГц. Они проводили измерения коэффициента затухания в районе Сан-Диего и показали, что затухание звука в глубоких слоях моря существенно меньше, чем в приповерхностных. Это объясняется тем, что приповерхностные слои менее однородны по сравнению с глубоководными слоями.

Влияние гидростатического давления на поглощение звука было исследовано теоретически и экспериментально Фишером [10] резонансным методом. В работе изучается влияние на поглощение сернистого магния с учетом высокого давления. В диапазоне гидростатических давлений, характерных для моря, коэффициент поглощения уменьшается с глубиной на величину $1-6,54 \cdot 10^{-4} p$. В статье приводится формула для расчета коэффициента поглощения на глубине h : $\alpha_h = \alpha_0(1 - 6,54 \cdot 10^{-5} h)$, где α_0 — значение коэффициента поглощения при $h = 0$.

В своих работах Шулькин и Марш [11, 12] на основе анализа лабораторных и натуральных экспериментальных данных предложили эмпирическую формулу для расчета коэффициента затухания, обусловленного наличием в морской воде $MgSO_4$ (на частотах 3–500 кГц). Формула хорошо согласуется с экспериментальными данными для диапазона частот 3–4 кГц. Для частот ниже 1 кГц эта формула плохо согласуется с экспериментальными данными.

В 1965 г. Торпом при измерениях в океане на более низких частотах была обнаружена вторая аномалия, которая обусловлена релаксацией борной кислоты $B(OH)_3$ [13, 14]. Низкочастотная релаксация $B(OH)_3$ также была установлена Йегером, Фишером и Бресселем при лабораторных исследованиях (1973 г.) [15]. Торп и Браунинг (1973) [16] предложили для низких частот (0,1–3 кГц) формулу для расчета поглощения звука, в которой учли член, обусловленный релаксацией борной кислоты $B(OH)_3$. В статье представлены обобщенные экспериментальные данные о частотной зависимости коэффициента затухания, полученные в Атлантическом, Индийском и Тихом океанах, а также в Средиземном и Красном морях. Показано, что на частотах выше 3 кГц экспериментальные данные хорошо совпадают с результатами расчета по формуле Шулькина и Марша [17]. Однако ниже 0,1 кГц экспериментальные значения существенно превышают теоретические и имеют большой разброс, поскольку при таких частотах большая часть звуковой энергии уходит в дно.

Фишер и Симмонс (1977 г.) [18] показали, что поглощение будет соответствовать концентрации бора, экспоненциально возрастая с ростом водородного показателя pH в диапазоне, соответствующем морской воде (от 7,7 до 8,3). Меллен и Браунинг (1977 г.) [19], анализируя имеющиеся натурные данные, показали ожидаемую корреляцию поглощения с pH . Однако при этом остались некоторые необъясненные расхождения.

Шулькин и Марш (1978 г.) [17] показали, что коэффициент поглощения, обусловленный релаксацией $B(OH)_3$, имеет региональную изменчивость, связанную с разным содержанием pH в морской воде в разных районах Мирового океана.

Анализ региональной (Атлантический, Индийский и Тихий океаны) изменчивости поглощения, обусловленного бором, выполнен Ловеттом в работах [20–22].

Кибблуайт и Хэмптон [23] проанализировали все имеющиеся данные по низкочастотному поглощению звука в подводном звуковом канале (ПЗК), предложили формулу для коэффициента затухания в ПЗК на частотах ниже 1 кГц.

В статье Меллена [24] показано, что поглощение звука в океане объясняется химическими релаксационными процессами. В работе показано, что большая часть поглощения звука в интересующем акустиков частотном диапазоне объясняется релаксацией $MgSO_4$ (частота релаксации $f_r \sim 100$ кГц) и борной кислоты $B(OH)_3$ ($f_r \sim 1$ кГц). Выявленный третий

релаксационный процесс, который проходит с участием MgCO_3 ($f_r \sim 10$ кГц), объясняет небольшую аномалию поглощения на средних частотах.

В работах Франсуа и Гаррисона [25, 26] поглощение звука рассматривается как сумма трех вкладов: вкладов чистой воды, сульфата магния и борной кислоты. В работе [25] исследуется вклад сульфата магния MgSO_4 , а в [26] — борной кислоты для построения уравнения поглощения в зависимости от температуры, солености, глубины и частоты от 200 Гц до 1 МГц.

В работах Меллена, Браунинга, Симмонса и Шайфеле [19, 27–35] исследуется поглощение звука, вызванное химическими релаксациями. В поглощении звука в морской воде преобладает химическая релаксация с участием сульфата магния на высоких частотах и борной кислоты — на более низких. В [27] отмечается, что поглощение низкочастотного звука зависит от химического состава океанов. В [19] показано, что коэффициент поглощения сильно зависит от водородного показателя pH . Предложен поправочный коэффициент для формулы Торпа. Поглощение ниже 1 кГц имеет региональную зависимость. В [31] обнаружена третья релаксация с участием магния и уголекислоты. В [32] показано, что магний, кальций и карбонат также участвуют в низкочастотном поглощении в морской воде.

В работе Эйнсли и Макколма [36] представлена упрощенная формула, основанная на более сложной формуле Франсуа и Гаррисона [25, 26]. В формуле сохранена зависимость от температуры, давления, солености и кислотности. Приведено сравнение с исходной формулой Франсуа–Гаррисона.

Первые измерения коэффициента поглощения в Черном море были выполнены сотрудниками Акустического института в начале 50-х годов (Готовым В.П., Сухаревским Ю.М., Агеевой Н.С.) [37, 38].

К началу 60-х годов в Акустическом институте была предложена полуэмпирическая формула для расчета коэффициента поглощения звука в морской воде для частот 5–10 кГц [38–40].

В работах Вадова [37, 39–42] рассматриваются экспериментальные данные по затуханию низкочастотного звука (0,2–5 кГц) в морях и океане, а также результаты экспериментальных исследований поглощения звука на частотах 5–10 кГц и выше. Представлены формулы для расчета коэффициента поглощения низкочастотного звука в морской воде. Предлагается соотношение, связывающее низкочастотное поглощение с температурой, соленостью и водородным показателем pH . В [37] приводятся экспериментальные данные по поглощению и затуханию звука в Черном море, полученные в диапазоне частот от 200 Гц до 210 кГц. Исследуется степень влияния водородного показателя pH на низкочастотное поглощение. Предложены соотношения, описывающие низкочастотное поглощение, обусловленное бором. В [41] рассматриваются экспериментальные материалы по низкочастотному поглощению в Средиземном, Черном, Японском, Балтийском морях и северо-западной части Тихого океана. На основании экспериментальных данных по затуханию звука приведены соотношения для расчета низкочастотного поглощения звука в морской воде. В [42] обсуждаются результаты экспериментальных исследований в приповерхностном звуковом канале. Проводится сравнение результатов проведенных исследований с аналогичными результатами других авторов.

В работе ван Молла, Эйнсли М. и ван Воссена (2009) [43] предложена новая формула для расчета поглощения звука в морской воде, основанная на формуле Эйнсли и Макколма [36]. Эта формула проще по сравнению с формулой Франсуа и Гаррисона [25, 26].

В работе Mohite-Patil T.V. и др. (2010) [44] предложена имитационная модель распространения акустических волн с использованием уравнения Франсуа и Гаррисона [25, 26]. Исследуется поглощение с помощью моделирования в среде MATLAB. Результаты моделирования сопоставлены с практическими измерениями в Аравийском море и Атлантическом океане. Модель используется для определения поглощения при заданных значениях глубины, солености, температуры, pH и частоты.

В работе Neighbors (2017) [45] обсуждается поглощение звука в зависимости от таких факторов как соленость, температура, водородный показатель и давление. Обсуждаются экспериментальные результаты, полученные за несколько десятилетий. Обобщены формулы, разработанные Франсуа и Гаррисоном [25, 26] и Эйнсли и Макколмом [36], в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц.

В монографии Акуличева и Буланова (2017) [46] и статье Буланова (2018) [47] изучается влияние различных мелкомасштабных неоднородностей, вносящих вклад в акустические характеристики морской среды. Обсуждаются особенности линейных и нелинейных характеристик морской воды на поглощение звука на различных глубинах. Предлагается вычислять коэффициент поглощения по приближенной формуле, предложенной в [46].

2. Уравнения, описывающие процессы акустического поглощения в морской воде

Большое разнообразие факторов, влияющих на затухание звука в морской среде, не поддается строгому теоретическому расчету. Поэтому большое значение имеют экспериментальные исследования, на основании анализа которых получают эмпирические формулы для расчета коэффициента затухания в морской воде.

Существует ряд эмпирических формул, аппроксимирующих накопленные разными исследователями массивы экспериментальных данных. Однако коэффициенты поглощения, рассчитанные по экспериментальным данным в одном районе Мирового океана, не подтверждаются для других районов. Исследованию затухания звука в океане посвящено немало экспериментальных работ.

В работе Шехи и Хэлли (1957) [9] была предложена простая эмпирическая формула для вычисления коэффициента затухания в подводном звуковом канале для диапазона частот от 20 Гц до 60 кГц: $\beta = 0,036^{3/2} f$, f — частота в кГц.

Торп (1965) [13] предложил для интервала частот 0,3–2 кГц другую зависимость:

$$\beta = 0,0595 f^{3/2}.$$

Урик (1966) [48] для интервала частот 0,02–1,6 кГц предложил следующую эмпирическую формулу:

$$\beta = (1,65 + 9,02f) \cdot 10^{-3}.$$

Сташкевич [6] сделал вывод, что в диапазоне частот от 20 до 1600 Гц убывание звука происходит по цилиндрическому закону с затуханием, определяемым формулой: $\beta = (1,7 + 9f) \cdot 10^{-3}$. Он показал, что затухание в области звукового канала на частоте 20 Гц превышает затухание, определяемое формулой Шехи–Хэлли в 20 раз, а при частоте 200 Гц формулы дают приблизительно одинаковые результаты.

Либерман в своих работах [4, 5] предложил формулу для расчета коэффициента поглощения в зависимости от частоты

$$\alpha = A \frac{f_r f^2}{f_r^2 + f^2} + B f^2,$$

где A и B — эмпирические постоянные ($A = 2,05 \cdot 10^{-2}$, $B = 2,95 \cdot 10^{-2}$); f — частота, кГц; f_r — частота релаксации ($f_r = 21,9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)}$, кГц); T — температура воды, °С.

Шулькин и Марш [12, 17], обработав более 30 тыс. наблюдений, проведенных в море в частотном диапазоне от 2 до 25 кГц, предложили формулу

$$\alpha = A \frac{S f_r^2 f^2}{f_r^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_r^2} \text{ дБ/км},$$

где S — соленость, ‰.

На низких частотах [48] ($f \ll f_r$) поглощение в основном определяется первым членом формулы, которая в связи с этим принимает вид $\alpha = (AS/f_r) f^2$. На высоких частотах ($f \gg f_r$) преобладает второй член и соответственно $\alpha = (B/f_r) f^2$. В обоих предельных случаях поглощение в значительной степени определяется температурой воды, при 30 °С поглощение втрое меньше, чем при 4 °С. На промежуточных частотах коэффициент поглощения имеет сложную зависимость от температуры воды и частоты сигнала.

На основе большого объема лабораторных и экспериментальных данных Шулькин и Марш [11, 49] получили для коэффициента затухания следующую эмпирическую формулу:

$$\beta = 8,68 \cdot 10^3 \left(A \frac{S f_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T} \right) (1 - 6,54 \cdot 10^{-4} P), \text{ дБ/км},$$

где $A = 2,3 \cdot 10^{-6}$ (постоянная ионной релаксации); $B = 3,38 \cdot 10^{-6}$ (постоянная вязкости пресной воды); S — соленость, ‰; f — частота звука, кГц; $f_T = 21,9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)}$ — частота релаксации при атмосферном давлении, при $0 < T < 30$ °С, $59 \text{ кГц} < f_T < 210 \text{ кГц}$, T — температура, °С; P — гидростатическое давление (атм.).

Первый член в первой скобке описывает поглощение, обусловленное релаксацией MgSO_4 , второй член обусловлен вязким поглощением. Вторая скобка дает зависимость поглощения от гидростатического давления. Коэффициент поглощения уменьшается с глубиной на величину $1-6,54 \cdot 10^{-4} p$ (p — давление, атм.) или $\alpha_0(1-6,54 \cdot 10^{-5} h)$, где α_0 — коэффициент поглощения при $h = 0$. Приведенная релаксационная формула полнее отражает происходящие в морской воде процессы, однако она требует усреднения эффекта затухания по всей трассе акустического луча [6].

Для низких частот 0,3–3 кГц Торпом и Браунингом [16] для расчета коэффициента поглощения звука была предложена формула

$$\alpha = \frac{0,11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2},$$

Первое слагаемое описывает поглощение, обусловленное релаксацией борной кислоты $\text{B}(\text{OH})_3$, второе — сернокислого магния MgSO_4 .

Обобщенные данные Торпа вместе с более поздними данными для частот 0,1–100 кГц можно аппроксимировать выражением [48]

$$\alpha = \frac{0,11 f^2}{1 + f^2} + \frac{44 f^2}{4100 + f^2} + 3,1 \cdot 10^{-4} f^2 \text{ дБ/км.}$$

Третье слагаемое в этой формуле обусловлено вязкостью. При частотах ниже 100 Гц ситуация менее определена. Функция $\alpha(f)$ имеет тенденцию к спаду до значения $\alpha \approx 0,9 \cdot 10^{-3}$ дБ/км, а затем — к росту на частотах ниже 30 Гц [23]. Некоторые авторы подвергают сомнению наличие минимума у кривой $\alpha(f)$.

Для низких частот рядом авторов предложены новые эмпирические формулы, удовлетворительно аппроксимирующие частотную зависимость коэффициента поглощения.

Формула Libermann–Shulkin–Marsh [4, 5, 11, 12, 17, 50]

$$\alpha = A \cdot \frac{S \cdot f_T \cdot f^2}{f_T^2 + f^2} + B \cdot \frac{f^2}{f_T^2}, \quad (2.1)$$

где $A = 1,86 \cdot 10^{-2}$, $B = 2,68 \cdot 10^{-2}$, $f_T = 21,9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)}$, f (Гц).

Уравнение Либермана было изменено Шулькиным и Маршем, чтобы соответствовать эмпирическим данным. В математическую модель добавили влияние солености. Это уравнение (2.1) связывает коэффициент поглощения с температурой и соленостью. Предлагается по величине изменения коэффициента поглощения оценивать температуру водного слоя.

Формула Mellen–Browning [19, 27, 50]

$$\alpha = \frac{S}{35} A_1 \frac{f^2 \cdot f_1}{f^2 + f_1^2} + \frac{S}{35} A_2 \frac{f^2 \cdot f_2}{f^2 + f_2^2} + \frac{S}{35} A_3 \frac{f^2 \cdot f_3}{f^2 + f_3^2}, \quad (2.2)$$

где $A_1 = 0,5 \cdot 10^{h/20}$, $A_2 = 0,1 \text{ К}$, $A_3 = 0,03 \text{ К}$, $K = 10^{(pH-8)}$, $f_1 = 50 \cdot 10^{T/60}$, $f_2 = 0,9 \cdot 10^{T/70}$, $f_3 = 4,5 \cdot 10^{T/30}$, pH — водородный показатель. Для морской воды изменяется от 7,5 до 8,4.

В уравнение Меллена–Браунинга, по сравнению с более ранними работами, добавлен эффект релаксации MgCO_3 . Это уравнение показывает экстремальные изменения коэффициента поглощения в зависимости от водородного показателя. Было показано, что при относительно небольших изменениях pH воды, могут наблюдаться большие изменения коэффициента поглощения. Влияние pH на значения коэффициента поглощения уменьшается с увеличением частоты. Первое слагаемое в уравнении характеризует поглощение, связанное с сульфатом магния (MgSO_4), второе — с борной кислотой ($\text{B}(\text{OH})_3$ или H_3BO_3), третье — с карбонатом

магния (MgCO_3). Эффект MgSO_4 становится доминирующим по мере увеличения частоты. На более низких частотах сказывается влияние $\text{B}(\text{OH})_3$.

Уравнение Fisher-Simmons [10, 18, 50]

$$\alpha = \frac{8686A_1P_1f_1f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{8686A_2P_2f_2f^2}{f_2^2 + f^2} + 8686A_3P_3f^2, \quad (2.3)$$

$$A_1 = 1,03 \cdot 10^{-8} + 2,36 \cdot 10^{-10}T - 5,22 \cdot 10^{-12}T^2, \quad A_2 = 5,62 \cdot 10^{-8} + 7,52 \cdot 10^{-10}T,$$

$$A_3 = (55,9 - 2,37T + 4,77 \cdot 10^{-2}, \quad T^2 - 3,48 \cdot 10^{-4}T^3) \cdot 10^{-15},$$

$$P_1 = 1, \quad P_2 = 1 - 10,3 \cdot 10^{-4} \cdot P_1 + 3,7 \cdot 10^{-7} \cdot (P_1)^2, \quad P_3 = 1 - 3,84 \cdot 10^{-4} \cdot P_1 + 7,57 \cdot 10^{-8} \cdot (P_1)^2,$$

$$f_1 = 1,32 \cdot 10^3 \cdot (T + 273,1) \cdot e^{-1700/(T+273,1)}, \quad f_2 = 1,55 \cdot 10^7 \cdot (T + 273,1) \cdot e^{-3052/(T+273,1)}.$$

Первое слагаемое связывают с влиянием борной кислоты $\text{B}(\text{OH})_3$, второе — с сульфатом магния MgSO_4 и третье — с пресной водой (H_2O).

Уравнение Francos-Garrison [25, 26, 50] для частот от 200 Гц до 10 кГц дает

$$\alpha = \frac{A_1P_1f_1f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2P_2f_2f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3P_3f^2,$$

$$A_1 = (8,86/c) \cdot 10^{(0,78pH-5)}, \quad A_2 = 21,44(S/c) \cdot (1 + 0,025T),$$

$$A_3 = (4,937 \cdot 10^{-4}) - 2,59 \cdot 10^{-5}T + 9,11 \cdot 10^{-7}T^2 - 1,50 \cdot 10^{-8}T^3 \quad \text{для } T < 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$A_3 = 3,964 \cdot 10^{-4} - 1,146 \cdot 10^{-5}T + 1,45 \cdot 10^{-7}T^2 - 6,5 \cdot 10^{-10}T^3 \quad \text{для } T > 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$c = 1412 + 3,21T + 1,19S + 0,0167h,$$

$$P_1 = 1, \quad P_2 = 1 - 1,37 \cdot 10^{-4}h + 6,2 \cdot 10^{-9}h^2, \quad P_3 = 1 - 3,83 \cdot 10^{-5}h + 4,9 \cdot 10^{-10}h^2,$$

где

$$f_1 = 2,8 \cdot \left(\frac{S}{35}\right)^{0,5} \cdot 10^{(4-1245/(T+273))}, \quad f_2 = \frac{8,17 \cdot 10^{(8-1990/(T+273))}}{1 + 0,0018(S-35)},$$

f — частота, (кГц), h — глубина, (км).

Поглощение звука в морской воде рассматривается как сумма трех вкладов: вкладов борной кислоты (первое слагаемое), сульфата магния (второе слагаемое) и чистой воды (третье слагаемое). Здесь f_1 — частота релаксации борной кислоты, f_2 — сульфата магния. P_1 , P_2 , P_3 — факторы зависимости давления. Уравнение применимо ко всем океаническим условиям и частотам от 200 Гц до 1 МГц.

Формула Ainslie M.A., McColm J.G. [36] для частот от 100 Гц до 1000 кГц имеет вид

$$\alpha = 0,106 \frac{f_1f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0,56} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-h/6} + 0,00049f^2 e^{-(T/27+h/17)}, \quad (2.4)$$

где $f_1 = 0,78(S/35)^{0,5} \cdot e^{T/26}$ кГц, $f_2 = 42 \cdot e^{T/17}$ кГц — частоты релаксации борной кислоты и сернокислого магния соответственно.

Эта формула сохраняет точность в пределах 10 % по сравнению с формулой Francos-Garrison (2.3), упрощенный вариант которой она представляет.

Для коэффициента затухания звука в ПЗК на частотах ниже 1 кГц Кибблудайт и Хэмптон [23, 49] предложили следующую формулу:

$$\beta = \beta_s + 011f^2K(1 + f^2)^{-1} + 0,011f^2,$$

где β_s — не зависящий от частоты коэффициент затухания звука на низких частотах ($0,2 \cdot 10^{-3}$ дБ/км $< \beta_s < 4,2 \cdot 10^{-3}$ дБ/км); K — множитель, зависящий от pH ($0,5 < K < 1,1$).

Для описания поглощения звука в морской воде на частотах 5–10 кГц и выше в Акустическом институте АН СССР в конце 50-х начале 60-х годов была предложена формула для расчета коэффициента затухания [38,41]

$$\beta = \frac{A_{\text{MgSO}_4} f}{f/f_{r\text{MgSO}_4} + f_{r\text{MgSO}_4}/f} + K f^2,$$

где $f_{r\text{MgSO}_4} = 1,125 \cdot 10^{(9-2038/T)}$ кГц, $A_{\text{MgSO}_4} = 6,25 \cdot ST \cdot 10^{-6}$ дБ/кмкГц — параметры релаксационного поглощения, обусловленного сернокислым магнием; $K = 1,42 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{1240/T}$, дБ/км кГц², T — абсолютная температура °К. Второй член в правой части формулы описывает поглощение в пресной воде.

Частотная зависимость коэффициента затухания в диапазоне 0,2–5 кГц может быть описана степенным законом: $\beta = p f^n$ (для Черного моря $p = 0,035$, $n = 1,25$) либо выражением (формула Вадова [41]):

$$\beta = \frac{A_B f}{f/f_{rB} + f_{rB}/f} + \frac{A_{\text{MgSO}_4} f}{f/f_{\text{MgSO}_4} + f_{\text{MgSO}_4}/f} + K f^2, \quad (2.5)$$

где $f_{rB} = 37,9 \cdot S^{0,8} \cdot 10^{-780/T}$ кГц, $A_B = 1,65 \cdot S \cdot 10^{(4+0,78pH-3696/T)}$ дБ/км кГц. Для Черного моря $f_{rB} = 0,640 - 0,683$ кГц, $A_B = 0,06$ дБ/км кГц.

Водородный показатель (pH) в поверхностных Черноморских водах меняется от 8,1 до 8,5. Минимум pH отмечается зимой, а максимум — летом. Водородный показатель зависит от растворенных в воде компонентов — в основном от двуокси углерода, а в глубинных черноморских водах — и от сероводорода (верхний слой до 200 м содержит кислород, а глубже 200 м сероводород). Поэтому в глубинных водах pH уменьшается до 7,6.

Первый член в правой части соотношения, предложенного Вадовым, характеризует релаксационное поглощение, связанное с бором, второй — с сернокислым магнием, третий определяет поглощение звука в пресной воде.

На частотах 1–5 кГц для определения коэффициента затухания достаточна 100–150-километровая трасса [39]. Морская среда в этом случае может рассматриваться как горизонтально-слоистая, закон спадания уровня звукового поля в канале с дистанцией — цилиндрический.

На частотах 0,5–1,0 кГц для оценки значений коэффициента затухания требуются трассы протяженностью 500–1000 км и более [39]. Морская среда при таких горизонтальных протяженностях не может рассматриваться горизонтально-слоистой. Черное море с запада на восток простирается на 1150 км, с севера на юг его длина составляет 580 км, а в самом узком месте — 265 км.

3. Частотная зависимость коэффициента затухания

Поглощение звука в морской воде рассматривается как сумма трех вкладов: вкладов борной кислоты, сульфата магния и чистой воды.

На рис. 1 изображена частотная зависимость коэффициента затухания для морской воды. Зависимости, обусловленные наличием сульфата магния и боратов, на рис. 1 изображены штриховыми линиями. Штриховая линия справа — зависимость для пресной воды. Частотная зависимость коэффициента затухания в морской воде (сумма трех компонент) изображена сплошной линией.

В зоне I (< 100 Гц) затухание обусловлено утечкой звуковой энергии из звукового канала. На частотах меньше 100 Гц затухание обусловлено рассеянием звука на крупномасштабных неоднородностях (фронты, боры, вихри). На частотах порядка единиц герц основную роль играют дифракционные потери, связанные с утечкой энергии из канала.

В зоне II (100 Гц – 10 кГц) затухание обусловлено химической релаксацией $\text{B}(\text{OH})_3$ (частота релаксации $f_r \sim 1$ кГц). На частотах ниже 1 кГц коэффициент поглощения зависит от pH . Условия, зависящие от pH , относятся к релаксации видов $\text{B}(\text{OH})_3$ и MgCO_3 (карбонат магния, $f_r \sim 10$ кГц).

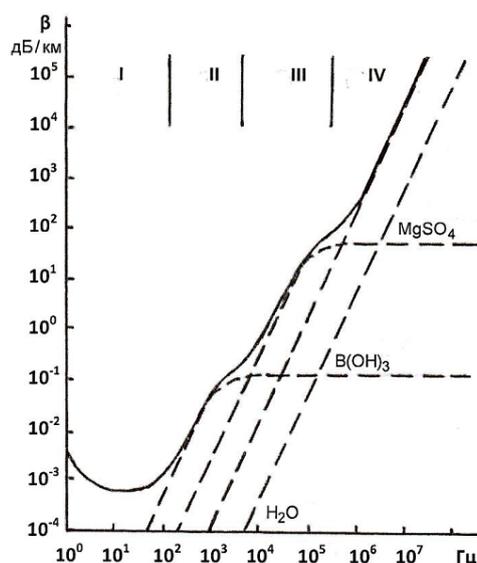


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента затухания

Fig. 1. Frequency dependence of the attenuation coefficient

В зоне III (10–100 кГц) затухание обусловлено химической релаксацией MgSO_4 ($f_r \sim 100$ кГц).
В зоне IV затухание обусловлено сдвиговой и объемной вязкостью.

Знание коэффициента затухания в океанической среде необходимо для проведения расчетов параметров гидроакустической аппаратуры.

На рис. 2 приведены частотные зависимости коэффициента поглощения, рассчитанные по формулам Libermann–Shulkin–Marsh (кривая 1), Mellen–Browning (кривая 2), Fisher–Simmons (кривая 3), Ainslie M.A., McCole J.G. (кривая 4), формула Вадова (кривая 5).

Расчет коэффициентов поглощения приведен для параметров, характерных для Черного моря. Формула Вадова была предложена для расчета коэффициента затухания в Черном море.

Приведенные кривые расчета коэффициента поглощения дают разные результаты (рис. 2). Это связано с тем, что предложенные формулы (2.1)–(2.5) были основаны на результатах экспериментальных данных, проведенных в различных точках мирового океана. На низких частотах (рис. 2а) расхождения менее значительны, чем на высоких (рис. 2б).

Заключение

Уравнение для коэффициента поглощения должно включать переменные для температуры, солености, частоты, pH (водородного показателя) и гидростатического давления.

В связи с тем, что на затухание звука в океане влияет большое число факторов, теоретически установить соответствующие зависимости трудно, особенно для затухания, обусловленного влиянием неоднородностей среды.

В результате анализа теоретических и экспериментальных работ многих исследователей установлены четыре основных механизма затухания звука:

1) На частотах < 100 Гц основной причиной затухания является рассеяние звука на крупномасштабных неоднородностях и утечка звуковой энергии из подводного звукового канала (на частотах < 10 Гц). Существует экспериментально установленное правило: если расстояние между осью канала и дном превышает 1,0 км, потери на частотах 10 Гц незначительны.

2) На частотах 100 Гц – 10 кГц основной вклад в затухание дает релаксация бора B(OH)_3 (время релаксации 10^{-3} с).

3) На частотах от 10 кГц до 100 кГц основной вклад дает релаксация MgSO_4 (время релаксации 10^{-5} с).

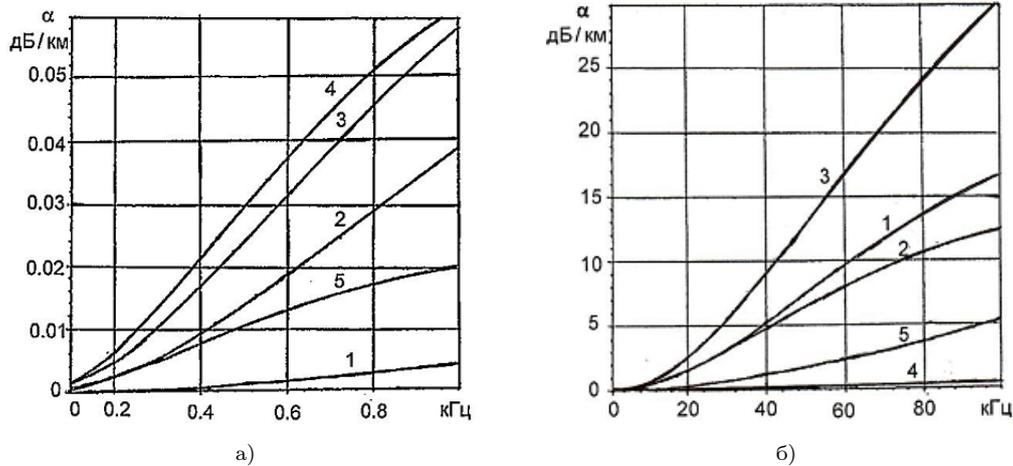


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента поглощения, рассчитанная по формулам: Libermann–Shulkin–Marsh – 1, Mellen–Browning – 2, Fisher–Simmons – 3, Ainslie M.A., McColm J.G. – 4, Вадов Р.А. – 5

Fig. 2. Frequency dependence of the absorption coefficient calculated by the formulas: Libermann–Shulkin–Marsh – 1, Mellen–Browning – 2, Fisher–Simmons – 3, Ainslie M.A., McColm J.G. – 4, Vadov R.A. – 5

4) На частотах от 100 кГц основной вклад в затухание вносит поглощение. В этом случае коэффициент поглощения выражается соотношением: $\alpha = 0,036f^{3/2}$ дБ/км (f — частота в кГц).

Литература [References]

1. Мандельштам, Л.И., Леонтович, М.А., К теории поглощения звука в жидкостях. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1937, № 7, вып. 3, с. 438–449. [Mandelstam, L.I., Leontovich, M.A., On the theory of sound absorption in liquids. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1937, vol. 7, iss. 3, pp. 438–449. (in Russian)]
2. Клей, К., Медвин, Г., *Акустическая океанография. Основы и применение*. Мир, Москва, 1980. [Clay, K., Medvin, G., *Akusticheskaya okeanografiya. Osnovy i primeneniye = Acoustic oceanography. Fundamentals and application*. Mir, Moscow, 1980. (in Russian)]
3. Stephenson, E.B., Transmission of sound in sea water: absorption and reflection coefficients and temperature gradients. *U.S. Nav. Res. Lab. Rep.*, 1935, S-1204. Corpus ID: 128645907
4. Liebermann, L.N., The origin of sound absorption in water and in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1948, vol. 20, no. 6, pp. 868–873. DOI: [10.1121/1.1906450](https://doi.org/10.1121/1.1906450)
5. Liebermann L.N. Sound propagation in chemically active media. *Phys. Rev.*, 1949, vol. 76, pp. 1520–1524. DOI: [10.1103/PhysRev.76.1520](https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1520)
6. Сташкевич, А.П., *Акустика моря*. Судостроение, Ленинград, 1966. [Stashkevich, A.P., *Akustika moray = Acoustics of the sea*. Sudostroenie, Leningrad, 1966. (in Russian)]
7. Wilson, O.B., Leonard, R.W., Sound absorption in aqueous solutions of magnesium sulfate and in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1951, vol. 23, no. 5, p. 624. DOI: [10.1121/1.1917342](https://doi.org/10.1121/1.1917342)
8. Wilson, O.B., Leonard, R.W., Measurements of sound absorption in aqueous salt solutions by a resonator method. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1954, vol. 26, no. 2, pp. 223–226. DOI: [10.1121/1.1907312](https://doi.org/10.1121/1.1907312)
9. Sheehy, M.J., Halley, M.R., Measurement of the attenuation of low-frequency sound. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1957, vol. 29, no. 4, pp. 464–469. DOI: [10.1121/1.1908930](https://doi.org/10.1121/1.1908930)
10. Fisher, F.H., Effect of high pressure of sound absorption and chemical equilibrium. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1958, vol. 30, no. 5, pp. 442–448.
11. Schulkin, M., Marsh, H.W., Sound absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1962, vol. 34, no. 6, pp. 864–865. DOI: [10.1121/1.1918213](https://doi.org/10.1121/1.1918213)

12. Schulkin, M., Marsh, H.W., Absorption of sound in sea-water. *J. Radio and Electronic Engineer*, 1963, vol. 25, no. 6, pp. 493–500. DOI: [10.1049/ree.1963.0065](https://doi.org/10.1049/ree.1963.0065)
13. Thorp, W.H., Deep-ocean sound attenuation in the sub- and low- kilocycle-per-second region. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1965, vol. 38, no. 4, pp. 648–654. DOI: [10.1121/1.1909768](https://doi.org/10.1121/1.1909768)
14. Thorp, W.H., Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1967, vol. 42, no. 1, p. 270. DOI: [10.1121/1.1910566](https://doi.org/10.1121/1.1910566)
15. Yeager, E., Fisher, F.H., Miceli, J., Bressel, R., Origin of low frequency sound absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1973, vol. 53, no. 6, pp. 1705–1707. DOI: [10.1121/1.1913523](https://doi.org/10.1121/1.1913523)
16. Thorp, W.H., Browning, D.G., Attenuation of low frequency sound in the ocean. *J. Sound and Vibration*, 1973, vol. 26, no. 4, pp. 576–578.
17. Schulkin, M., Marsh, H.W., Low-frequency sound absorption in the ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1978, vol. 63, no. 1, pp. 43–48. DOI: [10.1121/1.381692](https://doi.org/10.1121/1.381692)
18. Fisher, F.H., Simmons, V.P., Sound absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1977, vol. 62, no. 3, pp. 558–564. DOI: [10.1121/1.2015423](https://doi.org/10.1121/1.2015423)
19. Mellen, R.H., Browning, D.G., Variability of low-frequency sound absorption in the ocean: pH dependence. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1977, vol. 61, no. 3, pp. 704–706. DOI: [10.1121/1.381357](https://doi.org/10.1121/1.381357)
20. Lovett, J.R., Northeastern Pacific sound attenuation using low-frequency CW sources. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1975, vol. 58, no. 3, pp. 620–625. DOI: [10.1121/1.380700](https://doi.org/10.1121/1.380700)
21. Lovett, J.R., Geographic variation of low frequency sound absorption in the Pacific Ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1979, vol. 65, no. 1, pp. 253–254. DOI: [10.1121/1.382243](https://doi.org/10.1121/1.382243)
22. Lovett, J.R., Geographic variation of low-frequency sound absorption in the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1980, vol. 67, no. 1, pp. 253–254. DOI: [10.1121/1.384468](https://doi.org/10.1121/1.384468)
23. Kibblewhite, A.C., Hampton, L.D., A review of deep ocean sound attenuation data at very low frequencies. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1980, vol. 67, no. 1, pp. 147–157. DOI: [10.1121/1.384473](https://doi.org/10.1121/1.384473)
24. Меллен, Р., Химическое поглощение звука в море. В: Бьёрнё, Л. (ред.), *Подводная акустика и обработка сигналов*. Мир, Москва, 1985, с. 69–78. [Mellen, R., Chemical absorption of sound in the sea. In: Bjerne, L. (ed.), *Podvodnaya akustika i obrabotka signalov = Underwater acoustics and signal processing*. Mir, Moscow, 1985, pp. 69–78. (in Russian)]
25. Francois, R.E., Garrison, G.R., Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1982, vol. 72, no. 3, pp. 896–907. DOI: [10.1121/1.38817](https://doi.org/10.1121/1.38817)
26. Francois, R.E., Garrison, G.R., Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1982, vol. 72, no. 6, pp. 1879–1890. DOI: [10.1121/1.388673](https://doi.org/10.1121/1.388673)
27. Mellen, R.H., Browning, D.G., Low frequency attenuation in the pacific ocean. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1976, vol. 59, no. 3, pp. 700–702. DOI: [10.1121/1.380897](https://doi.org/10.1121/1.380897)
28. Mellen, R.H., Browning, D.G., Simmons, V.P., Investigation of chemical sound absorption in seawater by the resonator method: Part I. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1980, vol. 68, no. 1, pp. 248–257. DOI: [10.1121/1.384632](https://doi.org/10.1121/1.384632)
29. Mellen, R.H., Browning, D.G., Simmons, V.P., Investigation of chemical sound absorption in sea water: Part II. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981, vol. 69, no. 6, pp. 1660–1662. DOI: [10.1121/1.385944](https://doi.org/10.1121/1.385944)
30. Mellen, R.H., Browning, D.G., Simmons, V.P., Investigation of chemical sound absorption in sea water. Part IV. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1983, vol. 74, no. 3, pp. 987–993. DOI: [10.1121/1.389845](https://doi.org/10.1121/1.389845)
31. Mellen, R.H., Simmons, V.P., Browning, D.G., Sound absorption in sea water: a third chemical relaxation. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1979, vol. 65, no. 4, pp. 923–925. DOI: [10.1121/1.382595](https://doi.org/10.1121/1.382595)
32. Mellen, R.H., Simmons, V.P., Browning, D.G., Low-frequency sound absorption in sea water: a borate-complex relaxation. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1980, vol. 67, no. 1, pp. 341–342. DOI: [10.1121/1.384469](https://doi.org/10.1121/1.384469)
33. Mellen, R.H., Scheifele, P.M., Browning, D.G., Global model for sound absorption in sea water. *Naval Underwater Systems Center. Technical Report 7923. 14 May 1987*. Project: attenuation of sound in the sea.
34. Mellen, R.H., Scheifele, P.M., Browning, D.G., Global Model for Sound Absorption in Sea Water. Part 3. Arctic Regions. *Naval Underwater Systems Center. Technical Report 7969. 14 May 1987*. Project: attenuation of sound in the sea.

35. Scheifele, P.M., Mellen, R.H., Browning, D.G., Global Model for Sound Absorption in Sea Water: Impact Study. Part 1. *Naval Underwater Systems Center. Technical Report 8323. 7 September 1988.* Project: attenuation of sound in the sea.
36. Ainslie, M.A., McColm, J.G., A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1998, vol. 103, no. 3, pp. 1671–1672. DOI: [10.1121/1.421258](https://doi.org/10.1121/1.421258)
37. Вадов, Р.А., Энергетические характеристики звуковых полей в Черном море. *Акустический журнал*, 1998, т. 44, № 3, с. 318–325. [Vadov, R.A., Energy characteristics of sound fields in the Black Sea. *Akusticheskij zhurnal = Acoustic zhurnal*, 1998, vol. 44, no. 3, pp. 318–325. (in Russian)]
38. Бреховских, Л.М., Андреевой, И.П. (ред.), *Проблемы акустики океана*. Наука, Москва, 1984. [Brekhovskikh, L.M., Andreeva, I.P. (eds.), *Problemy akustiki okeana = Problems of ocean acoustics*. Nauka, Moscow, 1984. (in Russian)]
39. Вадов, Р.А., Открытие подводного звукового канала, экспериментальные исследования, региональные различия. *Акустический журнал*, 2007, т. 53, № 3, с. 313–328. [Vadov, R.A., Discovery of the underwater sound channel, experimental studies, regional differences. *Akusticheskij zhurnal = Acoustic Journal*, 2007, vol. 53, no. 3, pp. 313–328. (in Russian)]
40. Вадов, Р.А., Глотов, В.П., О влиянии гидростатического давления на электролитическое поглощение звука в морской воде. *Акустический журнал*, 1998, т. 44, № 1, с. 25–31. [Vadov, R.A., Glotov, V.P., On the effect of hydrostatic pressure on the electrolytic absorption of sound in seawater. *Akusticheskij zhurnal = Acoustic Journal*, 1998, vol. 44, no. 1, pp. 25–31. (in Russian)]
41. Вадов, Р.А., Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде. *Акустический журнал*, 2000, т. 46, № 5, с. 624–631. [Vadov, R.A., Absorption and attenuation of low-frequency sound in the marine environment. *Akusticheskij zhurnal = Acoustic Journal*, 2000, vol. 46, no. 5, pp. 624–631. (in Russian)]
42. Вадов, Р.А., Распространение звука в приповерхностном канале. *Акустический журнал*, 2006, т. 52, № 1, с. 10–22. [Vadov, R.A., Sound propagation in the near-surface channel. *Akusticheskij zhurnal = Acoustic Journal*, 2006, vol. 52, no. 1, pp. 10–22. (in Russian)]
43. van Moll, C.A.M., Ainslie, M., van Vossen, R., A simple and accurate formula for the absorption of sound in seawater. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2009, vol. 34, iss. 4, pp. 610–616. DOI: [10.1109/JOE.2009.2027800](https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2027800)
44. Mohite-Patil, T.B., Saran, A.K., Sawant, S.R., Chile, R.H., Mohite-Pati, T.T., Modeling of acoustic wave absorption in ocean. *International Journal of Computer Applications*, 2010, vol. 9, no. 12, pp. 19–24.
45. Neighbors, T.H., Chapter 4 - Absorption of sound in seawater. *Applied Underwater Acoustics*, 2017, pp. 273–295. DOI: [10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811240-3.00004-7)
46. Акуличев, В.А., Буланов, В.А., *Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде*. ТОИ ДВО РАН, Владивосток, 2017. [Akulichev V.A., Bulanov V.A. *Akusticheskie issledovaniya melkomasshtabnyh neodnorodnostej v morskoy srede = Acoustic studies of small-scale inhomogeneities in the marine environment*. TOI FEB RAS, Vladivostok, 2017. (in Russian)]
47. Буланов, В.А., Акустическая нелинейность верхнего слоя океана и мелкого моря и особенности рассеяния и поглощения звука. *Океанологические исследования*, 2018, т. 46, № 2, с. 15–27. [Bulanov, V.A., Acoustic nonlinearity of the upper layer of the ocean and shallow sea and features of sound scattering and absorption. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological research*, 2018, vol. 46, no. 2, pp. 15–27. (in Russian)]. DOI: [10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(2\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).2)
48. Урик, Р.Дж., *Основы гидроакустики*. Судостроение, Ленинград, 1978. [Urik, R.J., *Osnovy gidroakustiki = Fundamentals of hydroacoustics*. Sudostroenie, Leningrad, 1978. (in Russian)]
49. Бреховских, Л.М., Лысанов, Ю.П., *Теоретические основы акустики океана*. Наука, Москва, 2007. [Brekhovskikh, L.M., Lysanov, Yu.P., *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana = Theoretical foundations of ocean acoustics*. Nauka, Moscow, 2007. (in Russian)]
50. Ruffa, A., Simpson, P.K., Automated broadband acoustic sound velocity profiler. *Final Technical Report for Phase I Small Business Innovation Research Project*, 1998.