

УДК 534.231

EDN: TTM CJG DOI: 10.31429/vestnik-23-3-55-67

Скорость звука в морской среде и ее вычисление (обзор)

О. Р. Ластовенко ¹, В. А. Лисютин ¹, Ж. В. Маленко ², А. А. Ярошенко ^{1,2}✉

¹ Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Россия

² Морской институт им. вице-адмирала В.А. Корнилова – филиал Государственного морского университета им. адм. Ф.Ф. Ушакова, ул. Героев Севастополя, д. 11, корпус 8/22, Севастополь, 299001, Россия

✉ Ярошенко Александр Александрович; ORCID 0000-0002-6471-0162; SPIN 3250-2019;
e-mail: yaroshenko.575@yandex.ru

Аннотация. Для распространения звука в морях и океанах важно знать не абсолютное значение скорости звука, а форму его профиля. От формы профиля зависит дальность распространения звука. Скорость распространения звука сильно зависит от температуры (T , °C), солености (S , ‰) и гидростатического давления (P , атм.). В статье приведены среднемесячные вертикальные профили температуры, скорости звука и сезонные профили солености для центральной части Черного моря. Наибольшее влияние на скорость звука в море оказывает температура. Ось подводного звукового канала (ПЗК) совпадает с минимальным значением температуры. Ось ПЗК находится на глубине 35–55 м. В зимний период ПЗК выражен слабо, практически отсутствует. Ось ПЗК в Черном море в зависимости от сезона находится на глубине 30–80 м. В работе приведены основные эмпирические формулы для вычисления профиля скорости звука в морской воде. Выполнен их анализ. Каждое из приведенных уравнений имеет свою погрешность при вычислении скорости звука. Выбор того или иного уравнения зависит от приемлемой точности для конкретного его применения.

Ключевые слова: скорость распространения звука, температура, соленость, гидростатическое давление, морская вода, подводный звуковой канал.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Ластовенко О. Р., Лисютин В. А., Маленко Ж. В., Ярошенко А. А. Скорость звука в морской среде и ее вычисление (обзор) // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2026. Т. 23, № 3. С. 55–67. EDN: TTM CJG. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-55-67

Поступила 1 февраля 2026 г. После доработки 21 сентября 2026 г. Принято 23 сентября 2026 г.
Публикация 25 сентября 2026 г.

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

© Автор(ы), 2026. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](#).

The Speed of Sound in the Marine Environment and Its Calculation (Review)

O. R. Lastovenko ¹, V. A. Lisutyn ¹, Zh. V. Malenko ², A. A. Yaroshenko ^{1,2}✉

¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia

² Vice Admiral V.A. Kornilov Maritime Institute – branch of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 11 Geroev Sevastopol str., bld. 8/22, Sevastopol, 299001, Russia

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

Abstract. For sound propagation in the seas and oceans, it is important to know not the absolute value of the speed of sound, but the shape of its profile. The range of sound propagation depends on the shape of the profile. The speed of sound propagation strongly depends on temperature (T , °C), salinity (S , ‰), and hydrostatic pressure (P , atm.). The article presents monthly average vertical profiles of temperature, sound velocity, and seasonal salinity profiles for the central part of the Black Sea. Temperature has the greatest effect on the speed of sound at sea. The axis of the underwater sound channel coincides with the minimum temperature value. The axis of the underwater sound channel is located at a depth of 35–55 m. In winter, the underwater sound channel is poorly expressed, practically absent. The axis of the underwater sound channel in the Black Sea, depending on the season, is located at a depth of 30–80 m. The paper presents the main empirical formulas for calculating the sound velocity profile in seawater. The analysis of empirical formulas is performed. Each of the above equations has its own error in calculating the speed of sound. The choice of an equation depends on the acceptable accuracy for its particular application.

Keywords: sound propagation velocity, temperature, salinity, hydrostatic pressure, sea water, underwater sound channel.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Lastovenko, O. R., Lisyutin, V. A., Malenko, Zh. V., Yaroshenko, A. A., The speed of sound in the marine environment and its calculation (review). *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2026, vol. 23, no. 3, pp. 55–67. DOI: 10.31429/vestnik-23-3-55-67

Received 1 February 2026. Revised 21 September 2026. Accepted 23 September 2026. Published 25 September 2026.

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

© The Author(s), 2026. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\) license](#).

Введение

Анализ звуковых полей, создаваемых подводными источниками, широко используется как при исследованиях океана, так и при решении многих прикладных задач акустики океана. Для того чтобы применять звук в качестве инструмента при изучении моря, необходимо знать скорость, с которой он распространяется, его коэффициент затухания, как он отражается и рассеивается на границах и как проходит через них. Все эти акустические явления зависят от физических характеристик водного слоя, его поверхности и дна.

Специфика задач, связанных с исследованием звуковых полей в океане, заключается в необходимости комплексного учета многих факторов, влияющих на процесс распространения звуковых волн, таких как профиль скорости звука, геоакустические свойства дна и его неровности, поверхностные волны, гидродинамические процессы, внутренние локальные неоднородности среды. Наиболее существенными из этих факторов являются скорость звука в океане, геологические и геометрические свойства дна.

В некоторых случаях, например, в глубоком море, при достаточном удалении источника и приемника от поверхности и дна, влияние границ можно не учитывать. В других случаях можно ограничиться учетом влияния одной границы.

Для вычисления скорости звука в морской среде существует большое количество формул. Одними из первых являются формулы Del Grosso V.A. (1952 г.) и Wood A.B. (1955 г.) [1]. Формула Del Grosso V.A. является более точной по сравнению с формулой Wood A.B. так как в ней учитывается большее количество зависимостей. Однако одним из существенных недостатков этих формул является то, что в формулах не учитывается гидростатическое давление. В 1974 г. Del Grosso V.A. [2] предложил более точную формулу, в которой учел гидростатическое давление. Наибольшее распространение получила формула Wilson W.D. [3]. Формула Wilson W.D. была усовершенствована Полосиным А.С. [4], Leroy C.C. [5], Frye H.W. и Pugh J.D. [6] и Chen C.-T. и Millero F.J. [7]. Разработанный Chen C.-T. и Millero F.J. [7] алгоритм для вычисления скорости звука в воде был принят UNESCO в качестве международного стандарта и уточнялся в работах Fofonoff N.P. и Millard Jr. R.C. [8], а также Wong G.S.K. и Zhu S. [9]. Алгоритм UNESCO является международным стандартом, однако многие исследователи отдают предпочтение алгоритму Del Grosso V.A. Выбор уравнения зависит от точности необходимой для конкретного применения. В работах [10–16] обсуждается вопрос о применимости того или иного уравнения.

Среди последних работ, посвященных вычислению скорости звука в морской воде, можно отметить работы [17, 18]. В [17] предложено уравнение скорости звука для аномальных районов морей и океанов. В [18] предложены два полиномиальных уравнения для вычисления скорости звука в морской воде в зависимости от температуры, гидростатического давления и абсолютной солености. Уравнения получены аппроксимацией стандартного Международного термодинамического уравнения состояния морской воды TEOS-10 [19]. Первое уравнение предназначено для использования в технических целях. Второе уравнение предназначено для применения в научных целях. Полученные уравнения предлагается использовать для решения обратных задач. В обратной задаче по измеренным значениям скорости звука и каким-либо двум из трех параметров (температура, давление, соленость) определять третий. Например,

в работах [20, 21] предлагается определять солёность морской воды по известным значениям скорости звука, температуры и давления.

В [19, стр. 22] скорость звука выражается через частные производные функции Гиббса — по температуре, солёности и давлению. Считается, что формула универсальна и работает в диапазоне параметров: температура от $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; солёность до 42 г/кг ; давление до 100 МПа . В TEOS-10 [19] для описания солёности морской воды используется абсолютная солёность (г/кг), а не практическая солёность (‰, промилле), которая является мерой электропроводности морской воды. В TEOS-10 предусмотрена корректировка этого параметра.

Среди последних работ зарубежных авторов, посвященных оценке профиля скорости звука, можно отметить статьи [22–26]. В [22] авторы проанализировали данные о скорости звука в морской воде, собранные с помощью CTD-зонда (*Conductivity* (электропроводность), *Temperature* (температура), *Depth* (глубина)) в южных прибрежных водах Каспийского моря. Результаты расчета скорости звука проводились на основе полевых измерений температуры, солёности и давления. Для расчета скорости звука применялись эмпирические формулы, в том числе алгоритм UNESCO. В работе [23] сравниваются результаты измерения скорости звука в воде при помощи устройства SVP (Sound Velocity Profiler) с результатами, полученными с помощью эмпирических формул. В [24] представлены результаты лабораторного исследования коммерческих времяпролетных датчиков, предназначенных для океанографических натурных измерений скорости звука. В [25] авторы предлагают для восстановления профиля скорости звука использовать данные с поверхности моря (температуру, высоту морской поверхности, данные альтиметров). Идея состоит в том, чтобы по параметрам с поверхности «достраивать» информацию о скорости звука в водном слое. В [26] предложен упрощенный метод определения скорости звука в воде для мелководных акваторий. Для расчетов использовались эмпирические формулы, широко известные в гидроакустике. В статье [27] исследуется возможность использования шумов океанических судов для оценки профиля скорости звука в океане для толщины слоя до 200 м .

Кроме скорости звука (профиля скорости звука), на дальность распространения сигнала в морской среде существенно влияет затухание звука. В [28] представлен обзор работ, посвященных исследованию поглощения звука в морской воде. Приведен ряд эмпирических формул для расчета коэффициента поглощения звука.

1. Основные факторы, влияющие на скорость звука в Черном море

Наиболее существенным фактором, влияющим на процесс распространения звуковых волн, является скорость звука. Это важнейшая первичная акустическая характеристика водной среды, определяющая условия распространения в ней акустических колебаний. Основными величинами, от которых зависит скорость распространения звука в море, являются температура (T , $^{\circ}\text{C}$), солёность (S , ‰) и гидростатическое давление (P , Па, кг/см^2 , атм.). Скорость звука возрастает с увеличением температуры воды, солёности и давления. Наибольшее влияние на скорость звука оказывает изменение температуры воды. Повышение температуры воды на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличивает скорость звука на $2\text{--}4\text{ м/с}$. Солёность также оказывает влияние на скорость звука. Изменение солёности на 1 ‰ приводит к увеличению скорости звука на $\sim 1\text{--}1,2\text{ м/с}$. Повышение гидростатического давления на 1 атм. приводит к увеличению скорости на $0,2\text{ м/с}$. Таким образом, скорость звука будет меняться в зависимости от времени года, времени суток, глубины, географического местоположения, близости рек и тающего льда.

Среднегодовая температура приповерхностных вод в Черном море $13\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$, в северо-западной части $12\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$, в Азовском море $12\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Минимальная среднемесячная температура поверхностных вод в феврале ($7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Максимальная среднемесячная температура поверхностных вод в августе ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). На глубине 100 м температура $\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 200 м $\sim 8,2\text{--}8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. С глубины 200 м и до дна (максимальная глубина Черного моря 2211 м) температура воды не меняется и равна $8,6\text{--}9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 приведены среднемесячные профили температуры (кривые 1–12 — месяц) для центральной части Черного моря ($43,50^{\circ}$ с.ш., $32,5^{\circ}$ в.д.) до глубины 200 м . Видно, что

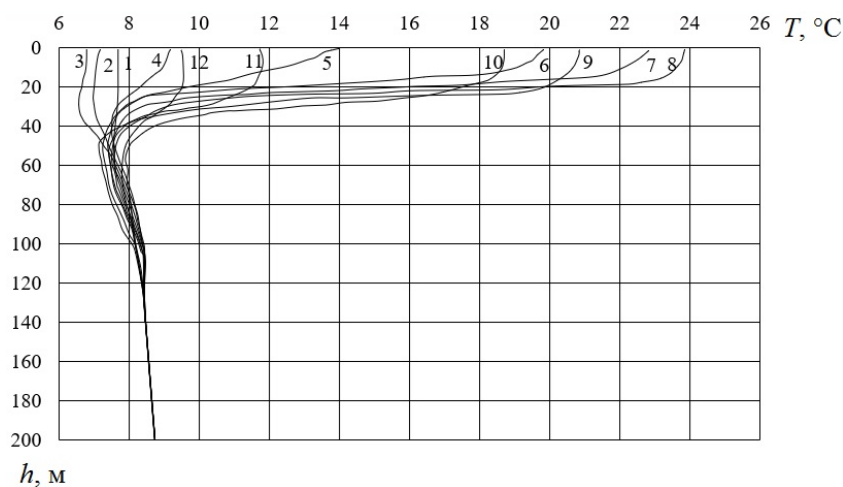


Рис. 1. Среднемесячные профили температуры для центральной части Черного моря

Fig. 1. Average monthly temperature profiles for the central part of the Black Sea

с увеличением глубины происходит охлаждение (кривые 4–12). Более холодные поверхностные водные массы опускаются и замещаются расположенными глубже чуть более теплыми водными массами. Ниже перемешанного слоя лежит «термоклин», в котором температура быстро уменьшается с увеличением глубины. Ниже термоклина находится область практически постоянной температуры.

Средняя солёность прибрежных вод Черного моря изменяется в пределах от 16 до 17 ‰, а самая низкая в северо-западной части от 13 до 15 ‰, где в море поступает основное количество речной воды. Солёность поверхностных вод в центральной части моря составляет 18–18,5 ‰. Азовское море — 11,5 ‰. Керчь, Феодосия — 17 ‰. Евпатория, Севастополь, Южный берег — 18 ‰. Солёность океана — 35 ‰ (максимальное значение 40 ‰), что соответствует изменению скорости звука в 45 м/с [1].

На рис. 2 приведены типичные профили распределения солёности в центральной части Черного моря до глубины 200 м. Солёность в центральной части Черного моря возрастает с увеличением глубины и достигает максимального значения 22,4 ‰ на дне. Максимальные изменения солёности в слое от 75 до 200 м. Сезонные изменения солёности в глубоководных районах заметны до глубины 75 м. Минимальное среднее значение солёности у поверхности в мае (17,4 ‰), а максимальное в феврале (18,1 ‰). Зимой солёность выше. Наибольшее изменение солёности с глубиной наблюдается весной, когда вертикального перемешивания почти нет. В этот период на поверхности солёность минимальна, но с глубиной резко увеличивается.

В зависимости от температуры и солёности плотность воды в Черном море значительно изменяется. В верхних слоях весной и летом она уменьшается. В центральных районах моря средняя плотность воды в поверхностном слое близка к 1,0123 кг/м³. На максимальных глубинах она достигает 1,0173 кг/м³. В прибрежных районах Черного моря плотность уменьшается, ее среднее значение примерно 1,0115 кг/м³.

Среднее значение величины скорости звука в Мировом океане принято считать равным 1500 м/с, а возможный диапазон изменения на поверхности от 1430 до 1550 м/с [29]. В Гренландском море среднее значение скорости звука равно 1411 м/с, а в Красном 1618 м/с. Наибольшая изменчивость наблюдается в приповерхностном слое воды с глубинами до 100–200 м.

Среднее значение скорости звука у поверхности по акватории Черного моря изменяется от 1430 до 1520 м/с, а для центральной части от 1445 до 1512 м/с (рис. 3). Значительная изменчивость скорости звука от 1440 до 1520 м/с в слое воды 0–75 м обусловлена изменением температуры воды, меньшая изменчивость от 1455 до 1472 м/с в слое 75–150 м обусловлена влиянием солёности. Ниже 200 м скорость звука практически постоянна (от 1469 до 1502 м/с) [30–32]. Максимальное значение скорости звука у поверхности (июль – август)

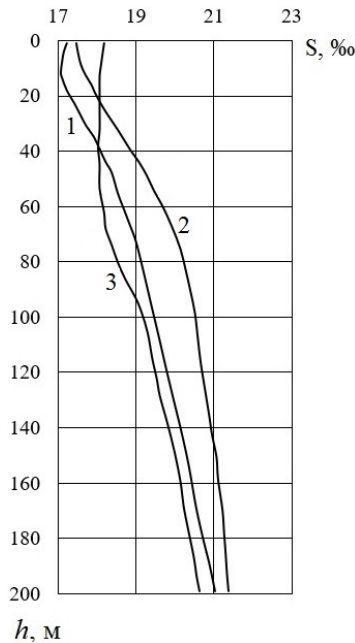


Рис. 2. Средние данные вертикального распределения солёности в центральной части Чёрного моря (1 — весна, 2 — лето, 3 — зима)

Fig. 2. Average data of vertical salinity distribution in the deep-water parts of the Black Sea (1 — spring, 2 — summer, 3 — winter)

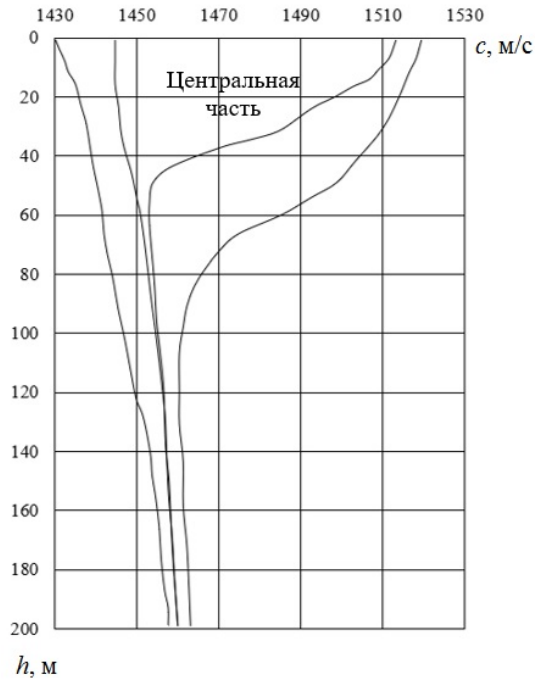


Рис. 3. Изменчивость скорости звука в Чёрном море

Fig. 3. Variability of the speed of sound in the Black Sea

изменяется от 1507 до 1514 м/с, а минимальное (январь — март) изменяется от 1463 до 1458 м/с.

2. Эмпирические формулы для вычисления скорости звука

Величину скорости звука можно найти расчетным путем по данным измерений температуры, солёности и глубины по эмпирическим формулам, представляющими собой зависимости вида:

$$c = c_0 + \Delta c(T) + \Delta c(S) + \Delta c(P) + \Delta c(T, S, P),$$

где c_0 — опорное значение скорости звука, а остальные члены — поправки приращения, учитывающие раздельное и совместное влияние различных факторов: температуры T , солёности S и гидростатического давления P . Разработано несколько теорий распространения звука в морской воде.

Формула Del Grosso V.A. (1952) [1]:

$$c = 1448,6 + 4,618T - 0,0523T^2 + 0,00023T^3 + 1,25(S - 35) - 0,011(S - 35)T + 0,0027 \cdot 10^{-5}(S - 25)T^4 - 2 \cdot 10^{-7}(S - 35)^4(1 + 0,577T - 0,0072T^2). \quad (2.1)$$

Формула (2.1) справедлива для скорости звука у поверхности моря. Чтобы учесть влияние статического давления, возрастающего с глубиной линейно, необходимо к формуле приписать слагаемое, учитывающее изменение скорости звука с глубиной. Согласно Wood A.B., это слагаемое равно $0,0175h$. Погрешность расчета по формуле (2.1) не превышает 0,5–0,8 м/с в зависимости от солёности. Если солёность $S > 15 ‰$, то ошибка составляет 0,5 м/с. При солёности $S < 15 ‰$ ошибка составляет 0,8 м/с [1].

Эмпирическая формула Wood A.B. (1955) [1]:

$$c = 1450 + 4,206T - 0,0366T^2 + 1,137(S - 35) + 0,0175h. \quad (2.2)$$

Ошибка расчета по этой формуле минимальна при температурах близких к 10 °C, и различных значениях солености. При этих условиях разность между измеренными и расчетными значениями скорости звука не превышает 1,5 м/с [1].

Формула Del Grosso V.A. (1974) [2]:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1402,392 \text{ м/с}; \\ \Delta c(T) &= 5,01109398873T - 5,50946843172 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,21535969240 \cdot 10^{-4}T^3; \\ \Delta c(S) &= 1,329522907815S + 1,25955756814 \cdot 10^{-4}S^2; \\ \Delta c(P) &= 1,59136154 \cdot 10^{-1}P + 2,547548 \cdot 10^{-7}P^2 - 9,3668 \cdot 10^{-12}P^3; \\ \Delta c(T, S, P) &= -1,27562783426 \cdot 10^{-2}TS + 6,47715186 \cdot 10^{-4}TP + \\ &\quad + 2,760566 \cdot 10^{-10}T^2P^2 + 1,656949 \cdot 10^{-8}TP^2 + 5,53611 \cdot 10^{-13}TP^3 - \\ &\quad - 4,4666741 \cdot 10^{-8}T^3P - 1,681125 \cdot 10^{-11}S^2P^2 + 9,68403156410 \cdot 10^{-5}T^2S + \\ &\quad + 4,95214594 \cdot 10^{-7}TS^2P - 3,47312322 \cdot 10^{-5}TSP, \quad (2.3) \end{aligned}$$

P (дбар), 1 дбар = 10^4 Па.

Эта формула позволяет производить расчеты с точностью до 0,05 м/с. Для более высокой точности расчетов (0,01 м/с) по этой формуле пользуются таблицей поправок коэффициентов.

Наибольшее практическое применение получила формула Wilson W.D. (1962) [3]:

$$\begin{aligned} c_0 &= 1449,14; \\ \Delta c(T) &= 4,5721T - 4,4532 \cdot 10^{-2}T^2 - 2,6045 \cdot 10^{-4}T^3 + 7,9851 \cdot 10^{-6}T^4; \\ \Delta c(S) &= 1,39799(S - 35) + 1,69202 \cdot 10^{-3}(S - 35)^2; \\ \Delta c(P) &= 1,60272 \cdot 10^{-1}P + 1,0268 \cdot 10^{-5}P^2 + 3,5216 \cdot 10^{-9}P^3 - 3,3603 \cdot 10^{-12}P^4; \\ \Delta c(T, S, P) &= (S - 35)(-1,1244 \cdot 10^{-2}T + 7,7711 \cdot 10^{-7}T^2 + 7,7016 \cdot 10^{-5}P - \\ &\quad - 1,2943 \cdot 10^{-7}P^2 + 3,1580 \cdot 10^{-8}PT + 1,5790 \cdot 10^{-9}PT^2) + P(-1,8607 \cdot 10^{-4}T + \\ &\quad + 7,4812 \cdot 10^{-6}T^2 + 4,5283 \cdot 10^{-8}T^3) + P^2(-2,5294 \cdot 10^{-7}T + 1,8563 \cdot 10^{-9}T^2) - \\ &\quad - P^3 \cdot 1,9646 \cdot 10^{-10}T. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Она позволяет рассчитывать скорость звука в зависимости от температуры, солености и гидростатического давления с ошибкой 0,22 м/с для $-4^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C}$, $1 \text{ кг/см}^2 < P < 1000 \text{ кг/см}^2$, $0 < S < 37 \text{ ‰}$ [33].

Формула Wilson W.D. (2.4) была принята Национальным центром сбора океанографических данных (NODC) США для машинной обработки гидрологической информации. В СССР по этой формуле в 1965 г. были составлены и изданы Гидрографической службой ВМФ «Таблицы для расчета скорости звука в морской воде».

В своей работе [34] Lovett J.R. предложил свою модель скорости звука, где зависимость от давления взята из работ Wilson W.D., а зависимость от температуры и солености — из работ Del Grosso V.A. В результате им были получены три новых уравнения. Автор отметил, что третье уравнение является наиболее практичным для большинства прикладных задач.

Для практических расчетов Полосин А.С. [4] предложил вместо поправки скорости звука на давление $\Delta c(P)$ использовать поправку на глубину $\Delta c(h)$. Он предложил следующую

зависимость давления P от глубины h : $P = 1,033 + 1,028126 \cdot 10^{-1}h + 2,38 \cdot 10^{-7}h^2 - 6,8 \cdot 10^{-17}h^4$, а поправку скорости звука на давление преобразовать в поправку на глубину:

$$\Delta c(h) = 0,1656 + 1,64802 \cdot 10^{-2}h + 1,4680 \cdot 10^{-7}h^2 + 4,315 \cdot 10^{-12}h^3 - 3,48 \cdot 10^{-16}h^4 - 3,4 \cdot 10^{-21}h^5 - 1,2 \cdot 10^{-26}h^6.$$

Leroy С.С. (1969) предложил более простые выражения для расчета скорости звука:

$$c = 1492,9 + 3(T - 10) - 6 \cdot 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \cdot 10^{-2}(T - 18)^2 + 1,2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + h/61.$$

Упрощенная формула Leroy С.С. во многих случаях вполне приемлема для практических целей. Считается, что эта формула обеспечивает точность 0,1 м/с для $T < 20^\circ\text{C}$ и $h < 8000$ м [35].

Leroy С.С. [5] показал, что формула Wilson W.D. (2.4) для скорости звука в морской воде может быть представлена в следующем виде:

$$c = V_o + V_a + V_b + V_c + V_d,$$

$$V_o = 1493,0 + 3(T - 10) - 6 \cdot 10^{-3}(T - 10)^2 - 4 \cdot 10^{-2}(T - 18)^2 + 1,2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + h/61; \quad (2.5)$$

$$V_a = 10^{-7}h^2 + 2 \cdot 10^{-10}h^2(T - 18)^2 + 10^{-4}h\phi/90; \quad V_b = 2,6 \cdot 10^{-4}T(T - 5)(T - 25);$$

$$V_c = -10^{-9}h^2(10^{-3}h - 4)(10^{-3}h - 8);$$

$$V_d = 1,5 \cdot 10^{-3}(S - 35)(1 - 10^{-3}h) + 3 \cdot 10^{-6}T^2(T - 30)(S - 35),$$

где ϕ — географическая широта места в градусах. Эта формула дает среднее квадратичное отклонение для скорости звука от измеренных Wilson W.D. значений, 0,07 м/с практически для всех случаев морской воды [36]. Учет только первого слагаемого дает ошибку не более 0,2 м/с при $T \leq 25^\circ\text{C}$. Учет первых трех слагаемых дает ошибку не более 0,2 м/с при $-2^\circ\text{C} < T < 34^\circ\text{C}$.

В работе Frye H.W., Pugh J.D. (1971) [6] дана еще одна более простая формула для вычисления скорости звука по измеренным величинам температуры и солености, основанная на данных Wilson W.D. [3]:

$$c_0 = 1449,30;$$

$$\Delta c(T) = 4,587T - 5,356 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,604 \cdot 10^{-4}T^3;$$

$$\Delta c(S) = 1,19(S - 35) + 9,6 \cdot 10^{-2}(S - 35)^3;$$

$$\Delta c(P) = 1,5848 \cdot 10^{-1} + 1,572 \cdot 10^{-5}P^2 - 3,46 \cdot 10^{-12}P^4;$$

$$\Delta c(T, S, P) = 1,354 \cdot 10^{-5}T^2P - 7,19 \cdot 10^{-7}TP^2 - 1,2 \cdot 10^{-2}(S - 35)T,$$

для $-3^\circ\text{C} < T < 30^\circ$, $33,1\text{‰} < S < 36,6\text{‰}$, $1,033 \text{ кг/см}^2 < P < 984,3 \text{ кг/см}^2$.

Среднеквадратичная ошибка расчета скорости звука по этой формуле составляет 0,1 м/с [37].

Менее точная, но зато более простая формула Medwin H. (1975) [38] имеет вид

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016h. \quad (2.6)$$

Формула справедлива для $0 \leq T \leq 30^\circ\text{C}$, $0 \leq S \leq 45\text{‰}$, $0 \leq h \leq 1000$ м [29].

Уравнение UNESCO (Chen C.-T., Millero F.J. (1977) [7], Fofonoff N.P., Millard Jr.R.C. (1983) [8], Wong G.S.K., Zhu S. (1995) [9]):

$$c = c_o + C + AS + BS^{3/2} + DS^2, \quad c_o = 1402,388 \text{ м/с};$$

$$C = 5,03830T - 5,81090 \cdot 10^{-2}T^2 + 3,3432 \cdot 10^{-4}T^3 - 1,47797 \cdot 10^{-6}T^4 + \\ + 3,1419 \cdot 10^{-9}T^5 + (0,153563 + 6,8999 \cdot 10^{-4}T - 8,1829 \cdot 10^{-6}T^2 + \\ + 1,3632 \cdot 10^{-7}T^3 - 6,1260 \cdot 10^{-10}T^4)P + (3,1260 \cdot 10^{-5} - 1,7111 \cdot 10^{-6}T + \\ + 2,5986 \cdot 10^{-8}T^2 - 2,5353 \cdot 10^{-10}T^3 + 1,0415 \cdot 10^{-12}T^4)P^2 + \\ + (-9,7729 \cdot 10^{-9} + 3,8513 \cdot 10^{-10}T - 2,3654 \cdot 10^{-12}T^2)P^3; \quad (2.7)$$

$$A = 1,389 - 1,262 \cdot 10^{-2}T + 7,166 \cdot 10^{-5}T^2 + 2,008 \cdot 10^{-6}T^3 - 3,21 \cdot 10^{-8}T^4 + \\ + (9,4742 \cdot 10^{-5} - 1,2583 \cdot 10^{-5}T - 6,4928 \cdot 10^{-8}T^2 + 1,0515 \cdot 10^{-8}T^3 - \\ - 2,0142 \cdot 10^{-10}T^4)P + (-3,9064 \cdot 10^{-7} + 9,1061 \cdot 10^{-9}T - 1,6009 \cdot 10^{-10}T^2 + \\ + 7,994 \cdot 10^{-12}T^3)P^2 + (1,100 \cdot 10^{-10} + 6,651 \cdot 10^{-12}T - 3,391 \cdot 10^{-13}T^2)P^3; \\ B = -1,922 \cdot 10^{-2} - 4,42 \cdot 10^{-5}T + (7,3637 \cdot 10^{-5} + 1,7950 \cdot 10^{-7}T)P; \\ D = 1,727 \cdot 10^{-3} - 7,9836 \cdot 10^{-6}P.$$

Формула справедлива при $0 < T < 40$ °C, $0 < S < 40$ ‰, $0 < P < 1000$ кг/см² [9].

В своей работе Leroy C.C., Parthiot F. (1998) [39] предложили в формулах Del Grosso V.A. (1974) (2.3) и Chen C.-T., Millero F.J. (1977) [7] следующую зависимость давления от глубины и широты:

$$P = (1,00818 \cdot 10^{-2}h + 2,465 \cdot 10^{-8}h^2 - 1,25 \cdot 10^{-13}h^3 + 2,8 \cdot 10^{-19}h^4) \times \\ \times (9,7803(1 + 5,3 \cdot 10^{-3} \sin^2 \phi) - 2 \cdot 10^{-5}h) / (9,80612 - 2 \cdot 10^{-5}h) - \\ - 1,0 \cdot 10^{-2}h / (h + 100) + 6,2 \cdot 10^{-6}h.$$

Формула Mackenzie K.V. (1981) [40]:

$$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4}T^3 + \\ + 1,340(S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2}h + 1,675 \cdot 10^{-7}h^2 - 1,025 \cdot 10^{-2}T(S - 35) - \\ - 7,139 \cdot 10^{-13}Th^3. \quad (2.8)$$

Формула справедлива для: $2^\circ < T < 30$ °C, 25 ‰ $< S < 40$ ‰, $0 < h < 8000$ м.

Формула Correns A.B. (1981) [41]:

$$c = 1449,05 + 45,7 \cdot 10^{-1}T - 5,21 \cdot 10^{-2}T^2 + 0,23 \cdot 10^{-3}T^3 + \\ + (1,333 - 0,126 \cdot 10^{-1}T + 0,009 \cdot 10^{-2}T^2)(S - 35) + \\ + (16,23 + 0,253 \cdot 10^{-1}T) \cdot 10^{-3}h + (0,213 - 0,1 \cdot 10^{-1}T) \cdot 10^{-6}h^2 + \\ + (0,016 + 0,0002(S - 35))(S - 35) \cdot 10^2Th, \quad (2.9)$$

для $0 < T < 35$ °C, $0 < S < 45$ ‰, $0 < h < 4000$ м.

Формула Leroy C.C. et. al. (2008) [30]:

$$c = 1402,5 + 5T - 5,44 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,1 \cdot 10^{-4}T^3 + 1,33S - 1,23 \cdot 10^{-2}ST + \\ + 8,7 \cdot 10^{-5}ST^2 + 1,56 \cdot 10^{-2}h + 2,55 \cdot 10^{-7}h^2 - 7,3 \cdot 10^{-12}h^3 + \\ + 1,2 \cdot 10^{-6}h(\phi - 45) - 9,5 \cdot 10^{-13}Th^3 + 3 \cdot 10^{-7}T^2h + 1,43 \cdot 10^{-5}Sh. \quad (2.10)$$

В формуле (2.10) Leroy C.C. et. al. учитывают и широту места ϕ . Авторы предлагают использовать это уравнение для расчёта скорости звука в морской воде во всех океанах и открытых морях, включая Балтийское и Чёрное моря.

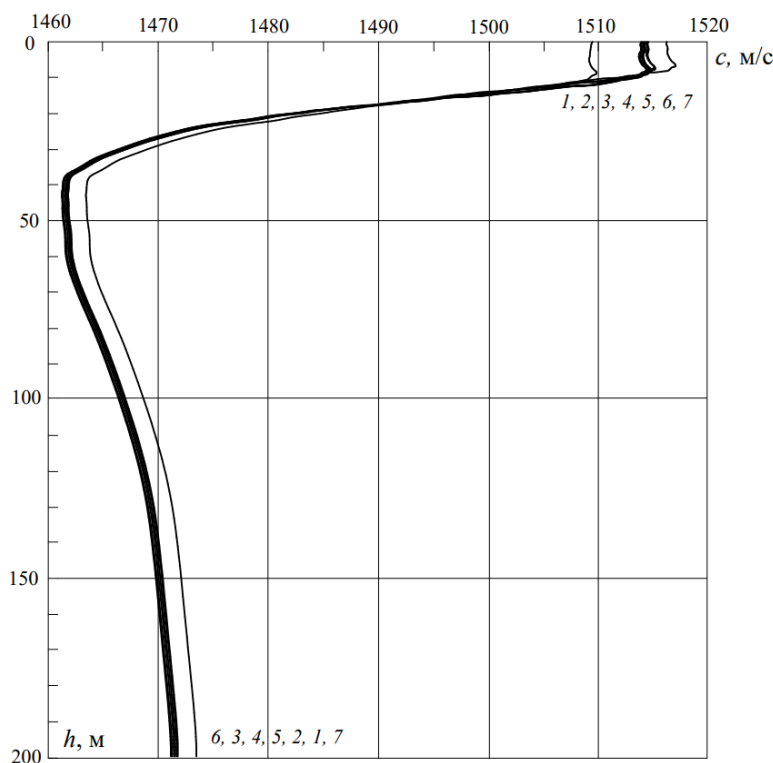


Рис. 4. Профили скорости звука

Fig. 4. Sound velocity profiles

Прямые измерения скорости звука в настоящее время могут быть осуществлены с помощью скоростеметров [42]. Скоростеметры имеют значительные преимущества в скорости и непрерывности получения данных. Погрешность измерений с помощью современных скоростеметров составляет 0,1 м/с. Такова же примерно и точность наиболее полных эмпирических формул.

На рис. 4 представлены профили скорости звука, рассчитанные по формулам: Wood G.S.K. (1955), линия 1, формула (2.2); UNESCO, линия 2, формула (2.7); Leroy C.C. (1969), линия 3, формула (2.5); Medwin H. (1975), линия 4, формула (2.6); Coppens A.B. (1981), линия 5, формула (2.9); Mackenzie K.V. (1981), линия 6, формула (2.8); Del Grosso V.A. (1952), линия 7, формула (2.1).

Каждое из приведенных уравнений имеет свою погрешность при вычислении скорости звука. Выбор того или иного уравнения зависит от приемлемой точности для конкретного его применения.

Алгоритм UNESCO (2.7) является международным стандартом, однако многие исследователи предпочитают применять уравнение Дель Del Grosso V.A. (2.3) или Wilson W.D. (2.4). Для расчета скорости звука в Черном море можно предложить формулу Leroy C.C. et. al. (2008) (2.10).

3. Черноморский подводный звуковой канал

Подводный звуковой канал в Черном море существенно отличается от океанического [29]. Его ширина на порядок меньше, а ось располагается не в глубинных слоях, а в деятельном слое вод [32, 43–45].

В Черном море ПЗК образуется вследствие увеличения скорости звука в приповерхностном слое и образования минимума на глубине 30–80 м. Нижняя часть канала практически не изменяется в течение года, рост скорости звука происходит за счет увеличения гидростатического

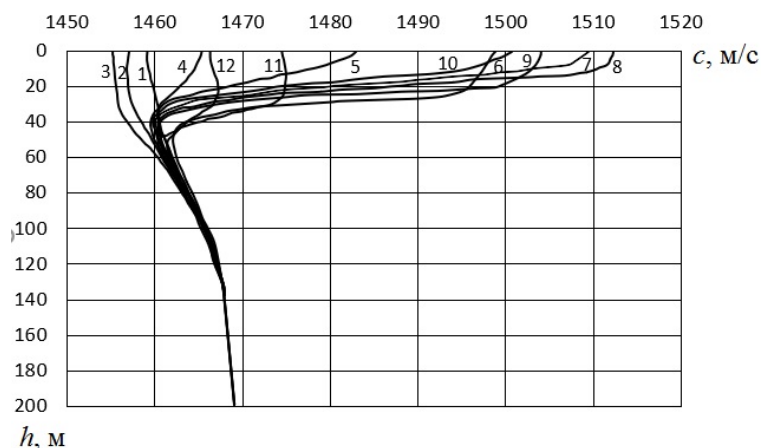


Рис. 5. Среднемесячные профили скорости звука для центральной части Черного моря

Fig. 5. Monthly average sound velocity profiles for the central part of the Black Sea

давления. Образование и исчезновение ПЗК в Черном море обусловлено исключительно формированием и трансформацией верхней части ПЗК. По своему происхождению Черноморский ПЗК является термическим.

На рис. 5 приведены среднемесячные профили скорости звука для центральной части Черного моря (43,5° с.ш., 32,5° в.д.) до глубины 200 м, рассчитанные по формуле Wilson W.D. (2.4). Кривым 1–12 соответствует месяц года. Летом, когда поверхностные слои воды прогреваются, а число штормовых дней резко сокращается, температура воды в верхних слоях увеличивается (рис. 1), а с нею увеличивается и скорость звука. С увеличением глубины происходит понижение температуры, а, следовательно, и уменьшение скорости звука. На глубине 40 м наблюдается минимум скорости звука. С увеличением глубины происходит повышение температуры, а, следовательно, и повышение скорости звука. Ниже 100 м температура практически постоянна и не зависит от сезонных изменений, сохраняясь постоянной в течение всех времен года (рис. 5), отчего профиль скорости звука для данного места не меняется, так как на больших глубинах он определяется лишь ростом гидростатического давления и солёности. Во время зимних месяцев температура воды у поверхности понижается, а частые шторма приводят к перемешиванию водных масс, что приводит к исчезновению слоя скачка температуры и исчезновению ПЗК (рис. 5 — кривые 1, 2, 3). В ноябре – декабре, как видно из кривых 11–12, возможно образование двухосевого ПЗК. Одна ось канала находится на поверхности, другая на глубине. В апреле ось ПЗК находится на глубине 35 м., в мае – сентябре на 40 м., в декабре на 45 м., в ноябре – декабре на 50 м. Ниже 120 м профиль скорости звука практически постоянен.

Зимой подводный звуковой канал выражен слабо. Перепад скорости звука не превышает 3–5 м/с. Наибольшая ширина ПЗК 200–330 м. Ось располагается на глубине 30–80 м. Величины градиентов скорости не превышают $0,05 \text{ с}^{-1}$. Весной и летом по мере прогрева воды ось канала смещается вверх до глубин 50–65 м, ширина канала достигает 1500 м. Значения градиентов скорости в интервале глубин от 20 до 30 м равны $2,2\text{--}3,5 \text{ с}^{-1}$. Здесь образуется ярко выраженный слой скачка скорости звука.

При проведении численных расчетов профилей температуры, солёности и скорости звука (рис. 1, 2, 5) использовались данные Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [46].

Заключение

Скорость звука является основным исходным параметром, необходимым для расчета звуковых полей в океане. Знать вертикальное распределение скорости звука в море необходимо

для определения дальности действия гидроакустических приборов связи, гидролокаторов, гидроакустических систем, для повышения точности измерения глубины эхолотами и др.

При проектировании и эксплуатации гидроакустических каналов передачи информации, особенно в мелком море, необходимо учитывать сезонные, а иногда и суточные, изменения профиля скорости и вероятность возникновения неблагоприятных гидроакустических явлений.

В зависимости от географического положения и времени года распределение скорости звука $c(z)$ по глубине океана может принимать различные формы. Форма профиля $c(z)$ определяет структуру звукового поля. Разнообразие профилей $c(z)$ весьма велико. Поэтому необходимо в каждом конкретном случае производить либо численный расчет скорости звука, либо ее измерение с помощью скоростемера.

Определяющий вклад в формирование звуковых полей в Черном море оказывает температура воды. Ось ПЗК в Черном море, как правило, совпадает с глубиной залегания минимальной температуры воды.

Универсального уравнения для вычисления скорости звука нет. Все формулы эмпирические и основаны на обработке реальных измерений. Их точность ограничена диапазоном параметров, входящих в формулы. Выбор зависит от нужной точности и диапазонов параметров — температура, соленость, глубина.

Литература [References]

1. Сташкевич, А.П., *Акустика моря*. Ленинград, Судостроение, 1966. [Stashkevich A.P. *Akustika moray = Sea acoustics*. Leningrad, Sudostroenie, 1966. (in Russian)]
2. Del Grosso, V.A., New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations). *Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, vol. 56, iss. 4, pp. 1084–1091. DOI: [10.1121/1.1903388](https://doi.org/10.1121/1.1903388)
3. Wilson, W.D., Extrapolation of the Equation for the Speed of Sound in Sea Water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, vol. 34, iss. 6, pp. 866. DOI: [10.1121/1.1918215](https://doi.org/10.1121/1.1918215)
4. Полосин, А.С., Вычисление скорости звука в морской воде. *Вестник МГУ. Сер. 5, География*, 1967, № 3, с. 101–106. [Polosin, A.S., Calculation of the speed of sound in sea water. *Vestnik MGU. Ser. 5, Geografiya = Bulletin of Moscow State University. Series 5, Geography*, 1967, iss. 3, pp. 101–106. (in Russian)]
5. Leroy, C.C., Development of Simple Equations for Accurate and More Realistic Calculation of the Speed of Sound in Seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1969, vol. 46, iss. 1B, pp. 216–226. DOI: [10.1016/0041-624x\(69\)90929-9](https://doi.org/10.1016/0041-624x(69)90929-9)
6. Frye, H.W., Pugh, J.D., A New Equation for the Speed of Sound in Seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1971, vol. 50, iss. 1B, pp. 384–386. DOI: [10.1121/1.1912645](https://doi.org/10.1121/1.1912645)
7. Chen, C.-T., Millero F.J., Speed of sound in seawater at high pressures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, vol. 62, iss. 5, pp. 1129–1135. DOI: [10.1121/1.381646](https://doi.org/10.1121/1.381646)
8. Fofonoff, N.P., Millard Jr, R.C., Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *UNESCO technical papers in marine science*, 1983, no. 44, pp. 44–54. DOI: [10.25607/OBP-1450](https://doi.org/10.25607/OBP-1450)
9. Wong, G.S.K., Zhu, S., Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, vol. 97, iss. 3, pp. 1732–1736. DOI: [10.1121/1.413048](https://doi.org/10.1121/1.413048)
10. Dushaw, B.D., Worcester, P.F., Cornuelle, B.D., Howe B.M., On equations for the speed of sound in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, vol. 93, iss.1, pp. 255–275. DOI: [10.1121/1.405660](https://doi.org/10.1121/1.405660)
11. Meinen, C.S., Watts, D.R., Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, vol. 102, iss. 4, pp. 2058–2062. DOI: [10.1121/1.419655](https://doi.org/10.1121/1.419655)
12. Millero, F.J., Li, Xu., Comments on “On equations for the speed of sound in seawater”. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994, vol. 95, iss. 5, pp. 2757–2759. DOI: [10.1121/1.409844](https://doi.org/10.1121/1.409844)
13. Speisberger, J.L., Metzger, K., New estimates of sound speed in water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, vol. 89, iss. 4, pp. 1697–1700. DOI: [10.1121/1.401002](https://doi.org/10.1121/1.401002)
14. Speisberger, J.L., Metzger, K., A new algorithm for sound speed in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, vol. 89, iss. 6, pp. 2677–2687. DOI: [10.1121/1.400707](https://doi.org/10.1121/1.400707)

15. Speisberger, J.L., Is Del Grosso's sound-speed algorithm correct? *Journal of the Acoustical Society of America*, 1993, vol. 93, iss. 4, pp. 2235–2237. DOI: [10.1121/1.406686](https://doi.org/10.1121/1.406686)
16. Pike, J.M., Beiboer, F.L., A comparison between algorithms for the speed of sound in seawater. *The Hydrographic Society, Special Publication*, 1993, iss. 34.
17. Греков, А.Н., Греков, Н.А., Сычев, Е.Н., Уравнение скорости звука для аномальных зон океанов и морей. *Системы контроля окружающей среды*, 2016, № 4(24), с. 27–31. [Grekov, A.N., Grekov, N.A., Sychev, E.N., Equation for the speed of sound in anomalous zones of oceans and seas. *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy = Environmental control systems*, 2016, no. 4(24), pp. 27–31. (in Russian)]
18. Греков, А.Н., Греков, Н.А., Сычев, Е.Н., Кузьмин, К.А., Метод расчета скорости звука в морской воде для измерения быстроменяющихся океанических процессов. *Океанологические исследования*, 2022, т. 50, № 2, с. 5–33. [Grekov, A.N., Grekov, N.A., Sychev, E.N., Kuzmin, K.A., A method for calculating the speed of sound in seawater to measure rapidly changing ocean processes. *Okeanologicheskie issledovaniya = Oceanological research*, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 5–33. (in Russian)] DOI: [10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).1)
19. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO (English). URL: https://www.teos-10.org/pubs/old_TEOS-10_manuals/TEOS-10_Manual_3rd_September_2010.pdf
20. Толстосшеев, А.П., Лунев, Е.Г., Мотыжев, С.В., Дыкман, В.З., Модуль оценивания солёности морской воды на основе измерений скорости звука. *Морской гидрофизический журнал*, 2021, т. 37, № 1(217), с. 132–142. [Tolstosheev, A.P., Lunev, E.G., Motyzhev, S.V., Dykman, V.Z., Module for estimating seawater salinity based on sound velocity measurements. *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal = Marine Hydrophysical Journal*, 2021, vol. 37, no. 1(217), pp. 132–142. (in Russian)] DOI: [10.22449/0233-7584-2021-1-132-142](https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-1-132-142)
21. Коротаев, Г.К., Толстосшеев, А.П., Лунев, Е.Г., Мотыжев, С.В., Дыкман, В.З., Пряхина, С.Ф., Долговременные автономные наблюдения солёности морской воды по измерениям температуры и скорости звука в поверхностном слое Чёрного моря. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*, 2022, т. 503, № 2, с. 166–171. [Korotayev, G.K., Tolstosheev, A.P., Lunev, E.G., Motyzhev, S.V., Dykman, V.Z., Pryakhina, S.F., Long-term autonomous observations of seawater salinity based on measurements of temperature and sound velocity in the surface layer of the Black Sea. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2022, vol. 503, no. 2, pp. 166–171. (in Russian)] DOI: [10.31857/S2686739722040077](https://doi.org/10.31857/S2686739722040077)
22. Jamshidi, S., Abu Bakar, M.N.B., An Analysis on Sound Speed in Seawater using CTD Data. *Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 10, iss. 2, pp. 132–138. DOI: [10.3923/jas.2010.132.138](https://doi.org/10.3923/jas.2010.132.138)
23. Talib, K., Yusof, O., Sulaiman, S., Azizan, A., Determination of speed of sound using empirical equations and SVP. In *Proceedings of the IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications*, CSPA2011, Penang, Malaysia, 4–6 March 2011, pp. 252–256. DOI: [10.1109/CSPA.2011.5759882](https://doi.org/10.1109/CSPA.2011.5759882)
24. Von Rohden, C., Fehres, F., Rudtsch., S., Capability of pure water calibrated time-of-flight sensors for the determination of speed of sound in seawater. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, vol. 138, iss. 2, pp. 651–662. DOI: [10.1121/1.4926380](https://doi.org/10.1121/1.4926380)
25. Chen, C., Ma, Y., Liu, Y., Reconstructing sound speed profiles worldwide with sea surface data. *Applied Ocean Research*, 2018, vol. 77, pp. 26–33. DOI: [10.1016/j.apor.2018.05.002](https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.05.002)
26. Makar, A., Simplified Method of Determination of the Sound Speed in Water on the Basis of Temperature Measurements and Salinity Prediction for Shallow Water Bathymetry. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, iss. 3, art. 636, pp. 1–20. DOI: [10.3390/rs14030636](https://doi.org/10.3390/rs14030636)
27. Walker, J.L., Zeng, Z., ZoBell, V.M., Frasier, K.E., Underwater sound speed profile estimation from vessel traffic recordings and multi-view neural networks. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2024, vol. 155, iss. 5, pp. 3015–3026. DOI: [10.1121/10.0025920](https://doi.org/10.1121/10.0025920)
28. 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. [Yarochenko A.A., Degtyar, A.D. Sound attenuation in the marine environment (review). *Ecological Bulletin of the scientific centers of the Black Sea Economic Cooperation = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 70–81. (in Russian)] DOI: [10.31429/vestnik-20-2-70-81](https://doi.org/10.31429/vestnik-20-2-70-81) EDN: WZQNGI
29. Бреховских, Л.М., Лысанов, Ю.П., *Теоретические основы акустики океана*. Москва, Наука, 2007.

- [Brekhovskih, L.M., Lysanov, Yu.P., *Teoreticheskie osnovy akustiki okeana* = *Theoretical Foundations of Ocean Acoustics*. Moscow, Nauka, 2007. (in Russian)]
30. Leroy, C.C., Robinson, S.P., Goldsmith, M.J., A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, vol. 124, no. 5, pp. 2774–2782. DOI: [10.1121/1.2988296](https://doi.org/10.1121/1.2988296)
 31. Белокопытов, В.Н., Климатические характеристики скорости звука в северо-восточной части Черного моря. *Морской гидрофизический журнал*, Севастополь, 2004, № 3, с. 67–72. [Belokopytov, V.N., Climatic characteristics of the speed of sound in the northeastern part of the Black Sea. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* = *Marine Hydrophysical Journal*, Sevastopol, 2004, no. 3, pp. 67–72. (in Russian)]
 32. Дивизинюк, М.М., Акустические поля Черного моря. Севастополь, НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАН Украины, 1998. [Divizinyuk, M.M., *Akusticheskie polya Chernogo morya* = *Acoustic fields of the Black Sea*. Sevastopol, Research Center “State Oceanarium” of the Ministry of Defense of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, 1998. (in Russian)]
 33. Толстой, И., Клей, К.С., *Акустика океана. Теория и эксперимент в подводной акустике*. Москва, Мир, 1969. [Tolstoj, I., Klej, K.S., *Akustika okeana. Teoriya i eksperiment v podvodnoj akustike* = *Ocean acoustics. Theory and experiment in underwater acoustics*. Moscow, Mir, 1969. (in Russian)]
 34. Lovett, J.R., Merged seawater sound-speed equations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1978, vol. 63, no. 6, pp.1713–1718. DOI: [10.1121/1.381909](https://doi.org/10.1121/1.381909)
 35. Урик, Р.Дж., *Основы гидроакустики*. Ленинград, Судостроение, 1978. [Urik, R.Dzh., *Osnovy gidroakustiki* = *Fundamentals of hydroacoustics*. Leningrad, Shipbuilding, 1978. (in Russian)]
 36. Бреховских, Л.М., *Акустика океана*. Москва, Наука, 1974. [Brekhovskih, L.M., *Akustika okeana* = *Ocean acoustics*. Moscow, Nauka, 1974. (in Russian)]
 37. Каменкович, В.М., Мони́на, А.С., *Физика океана. Гидродинамика океана. Т. 2*. Москва, Наука, 1978. [Kamenkovich, V.M., Monina, A.S., *Fizika okeana. Gidrodinamika okeana. T. 2* = *Physics of the ocean. Ocean hydrodynamics. Vol. 2*. Moscow, Nauka, 1978. (in Russian)]
 38. Medwin, H., Speed of Sound in water: A simple equation for realistic parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, vol. 58, no. 6, pp. 1318–1319. DOI: [10.1121/1.380790](https://doi.org/10.1121/1.380790)
 39. Leroy, C.C., Parthiot, F., Depth-pressure relationship in the oceans and seas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, vol. 103, no. 3, pp. 1346–1352. DOI: [10.1121/1.2534201](https://doi.org/10.1121/1.2534201)
 40. Mackenzie, K.V., Nine-term equation for sound speed in the oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, vol. 70, no. 3, pp. 807–812. DOI: [10.1121/1.386920](https://doi.org/10.1121/1.386920)
 41. Coppens, A.B., Simple equation for the speed of sound in Neptunian waters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, vol. 69, no. 3, pp. 862–863. DOI: [10.1121/1.385486](https://doi.org/10.1121/1.385486)
 42. Бабий, В.И., Проблемы и перспективы измерения скорости звука в океане. Севастополь, НИЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2009. [Babiy, V.I., *Problemy i perspektivy izmereniya skorosti zvuka v okeane* = *Problems and prospects of measuring the speed of sound in the ocean*. Sevastopol, SPC “EKOSI-Hydrophysics”, 2009. (in Russian)]
 43. Булгаков, Н.П., Белокопытов, В.Н., Ломакин, П.Д., Сезонная изменчивость гидроакустических характеристик на шельфе Черного моря у южного побережья Крыма. *Морской гидрофизический журнал*, 1996, № 3, с. 41–47. [Bulgakov, N.P., Belokopytov, V.N., Lomakin, P.D., Seasonal variability of hydroacoustic characteristics on the Black Sea shelf near the southern coast of Crimea. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal* = *Marine Hydrophysical Journal*, 1996, no. 3, pp. 41–47. (in Russian)]
 44. Архипкин, В.С., Деев, М.Г., Особенности поля скорости звука в Черном море. Вестник Московского университета, 2008, № 6, сер. 5, География, с. 30–33. [Arkhipkin, V.S., Deev, M.G., Features of the sound velocity field in the Black Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta* = *Bulletin of the Moscow University*, 2008, no. 6, ser. 5, Geography, pp. 30–33. (in Russian)]
 45. Иванов, В.А., Белокопытов, В.Н., Океанография Черного моря. Севастополь, Морской гидрофизический институт НАНУ, 2011. [Ivanov, V.A., Belokopytov, V.N., *Okeanografiya Chernogo morya* = *Oceanography of the Black Sea*. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute of NASU, 2011. (in Russian)]
 46. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИ-МО) [Unified State Information System on the Ocean Environment (ESIMO)]. URL: <http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/main>