

Об учете вертикального распределения скорости звука при измерении глубины водоема

А. С. Воротынцева✉, Д. Б. Островский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ avorotynceva@yandex.ru

Аннотация. Исследуются методы учета влияния вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) при определении глубины водоема. Приведены различные алгоритмы вычисления глубины расположения отражающего объекта при учете изменения значения скорости звука, предложен оптимальный с точки зрения обеспечения наименьшей погрешности алгоритм. На примере расчета дистанции до отражающего объекта в условиях зимней гидрологии мелких северных морей и летней гидрологии глубоководных морей северной части Тихого океана выполнен сравнительный анализ возникающих погрешностей измерения глубины отражающего объекта.

Ключевые слова: скорость звука, ВРСЗ, дистанционный метод измерения скорости звука

Для цитирования: Воротынцева А. С., Островский Д. Б. Об учете вертикального распределения скорости звука при измерении глубины водоема // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 9. С. 30–37. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-30-37.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

On Accounting the Vertical Distribution of Sound Velocity when Measuring the Depth of a Water Body

A. S. Vorotyntseva✉, D. B. Ostrovskiy

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ avorotynceva@yandex.ru

Abstract. Investigates methods for taking into account the influence of the vertical distribution of sound velocity (VDSV) in determining of reservoir depth. Various algorithms for determining the depth of the reflecting object location are given, taking into account the changing of the sound velocity value, and an optimal algorithm in terms of the smallest error is proposed. Using the example of calculating the distance to the reflecting object in the conditions of winter hydrology of shallow northern seas and summer hydrology of deep seas of the North Pacific Ocean, a comparative analysis of the inaccuracy in measuring the depth of the reflecting object is performed.

Keywords: sound velocity, VDSV, remote method of measuring the sound velocity

For citation: Vorotyntseva A. S., Ostrovskiy D. B. On Accounting the Vertical Distribution of Sound Velocity when Measuring the Depth of a Water Body // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 9. P. 30–37. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-9-30-37.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Безальтернативным решением задачи по определению глубины водоема является применение гидроакустических средств, поскольку

ку [1] акустические волны распространяются в водной среде с наименьшими потерями. Для проведения эффективных и высокопроизводительных

исследований по измерению глубин водоемов необходимо обеспечить высокую точность и безошибочность получаемых результатов – достижению такого эффекта препятствует ряд внешних факторов, каждый из которых вносит некоторую погрешность в измерение глубины водоема: скорость ветра на поверхности воды, волнения и течения, эффект реверберации, шумы, а также изменение значения скорости звука в зависимости от различных факторов [2], [3]. Изменение скорости звука по глубине называют вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ).

Явление ВРСЗ определяется зависимостью значения скорости звука от изменений температуры воды, ее солёности и гидростатического давления (глубины). Основным влияющим на распределение скорости звука фактором служит изменение температуры, но в случае глубоководных морей и водоемов с сильно выраженным распределением солёности определенное влияние на скорость звука оказывают и два других фактора [4].

Как показано в [5]–[7], на ранних этапах исследования ВРСЗ ограничивались наблюдением за гидрофизическими параметрами океана – солёностью, температурой и гидростатическим давлением, что не обеспечивало достаточного объема информации для получения полномерных сведений о ВРСЗ. В дальнейшем были предложены новые бесконтактные методы, позволяющие определять изменения скорости звука при вертикальном зондировании, основанные на определении времени прохождения акустическим сигналом некоторого расстояния. На основе многолетних исследований [8]–[10] были сформированы банки данных, содержащие сведения о характере изменения скорости звука в различных районах Мирового океана, использование которых позволяет достоверно оценивать влияние ВРСЗ при решении всевозможных гидроакустических задач различной применимости, где требуется знание глубины водоема.

В предлагаемой статье представлены различные алгоритмы вычисления глубины отражающего объекта при учете изменения значения скорости звука, предлагается оптимальный в плане обеспечения наименьшей погрешности алгоритм. На основе предложенных вычислительных процедур выполняются расчеты, по результатам которых проводится сравнительный анализ возникающих погрешностей измерения глубины расположения отражающего объекта.

Учет влияния ВРСЗ при использовании гидроакустической аппаратуры обуславливает увеличение точности и надежности получаемых результатов и, как следствие, повышение эффективности применения таких средств, что определяет актуальность данных исследований.

Основы определения скорости звука при дистанционном зондировании. Дистанционное определение глубины акватории осуществляется с помощью акустических эхолотов [11]. Излученный акустический сигнал отражается от дна или другого отражателя; при этом фиксируется время прихода эхосигнала, а дистанция H до отражающего объекта определяется по известной формуле

$$H = cT/2, \quad (1)$$

где c – скорость звука; T – время от начала излучения до приема эхосигнала.

В (1) скорость звука считается постоянной на всей траектории.

Известно [12], [13], что скорость звука не постоянна, а зависит от физико-химических свойств среды распространения, из которых можно выделить температуру, гидростатическое давление, наличие примесей [13], а также зависимость от времени года. Поскольку параметры среды зависят от координат, локальная скорость звука также есть величина, зависящая от координат. Ряд аналитических и таблично-графических зависимостей скорости звука от различных физико-химических параметров воды, а также от глубины представлен в [12]–[14].

При нормальном зондировании (эхологировании) полагают, что локальная скорость звука зависит только от координаты по вертикали z [15]. Тогда в общем случае (1) трансформируется в интеграл

$$H = \frac{1}{2} \int_0^H ds = \frac{1}{2} \int_0^T c(z) dt, \quad ds = c[z(t)] dt, \quad (2)$$

где $c(z)$ – локальная скорость звука в точке с координатой z , которая считается известной.

Функция $c(z)$ непрерывна, однако в базах данных [16]–[18] зависимость скорости звука от глубины представляется в табличном виде:

$$c_n(z) = c_n \Big|_{z=H_n}^{z=H_{n-1}}, \quad \text{причем } z = 0 \text{ соответствует по}$$

верхности моря, n – номер водного слоя. Типовые эпюры вертикального распределения скорости звука, построенные по данным [16], [17] для различных регионов, представлены на рис. 1.

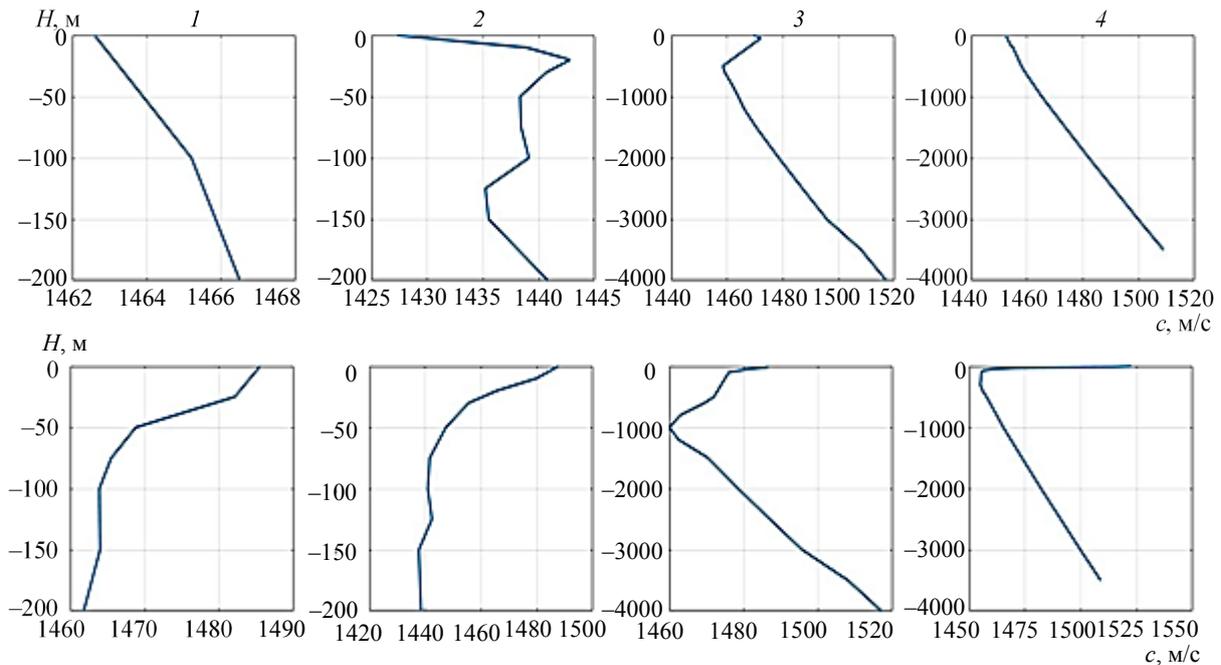


Рис. 1. Типовые эпюры ВРСЗ для различных регионов: 1, 2 – мелководные северные моря; 3, 4 – глубоководные моря Северной Атлантики (3) и северной части Тихого океана (4); верхний ряд – зимняя гидрология, нижний ряд – летняя гидрология
Fig. 1. The typical plots of VDSV for different regions: 1, 2 – shallow northern seas; 3, 4 – deep seas of the North Atlantic (3) and the North Pacific Ocean (4); the upper row – winter hydrology, the bottom row – summer hydrology

Из представленных эпюров видно, что перепад скоростей с изменением глубины может составлять до 50 м/с и в целом отличается от обычно принимаемого значения $c_b = 1500$ м/с. Поскольку имеется зависимость $c(z)$, в [15] предлагается при использовании формулы (1) брать среднюю скорость звука по глубине, но не поясняется, как ее вычислять, так как исходные таблицы $c(z)$ неравномерны по z , а измеряемая глубина H может быть ближе к поверхности, в том числе в глубоководном регионе, для которого используются таблицы.

Выражение (2) при дискретном задании $c(z)$ преобразуется в сумму:

$$H = \sum_n c_n t_n \quad \text{или} \quad H = \sum_n h_n, \quad h_n = c_n t_n,$$

где h_n – известная из таблиц [16], [17] толщина n -го слоя; t_n – время прямого (или обратного) распространения в слое.

Таблицы ВРСЗ строятся таким образом, что последний (нижний) слой – «открытый». Считается, что в нижних слоях изменение скорости звука замедляется и далее остается неизменным, что, в основном, связано со стабилизацией температуры воды в глубоких слоях [12], [13].

Алгоритмы определения глубины отражающего объекта. Рассмотрим процесс измерения глубины с помощью однолучевого эхолота с зондированием по нормали к дну, обозначив искомую глубину места $H_{\text{изм}}$, а границу нижнего слоя, указанного в таблицах для исследуемой акватории, – H_{max} . Будем рассматривать два случая:

- а) $H_{\text{изм}} > H_{\text{max}}$;
- б) $H_{\text{изм}} < H_{\text{max}}$.

В процессе измерений глубины места оператор имеет данные об интервале времени от начала посылки зондирующего сигнала до его приема, которое обозначим T . Пусть отражающий объект находится в слое с номером M . Тогда $T = 2 \sum_n t_n + \Delta T$, где ΔT – интервал времени прохождения сигнала от нижней границы слоя с номером $M-1$ до отражателя и обратно.

Рассмотрим последовательно процедуры определения $H_{\text{изм}}$ для случаев а и б.

При расчетах будем использовать ВРСЗ в виде таблицы, пример которой представлен в табл. 1 и соответствует ВРСЗ на рис. 1 для акватории 2 (зимняя гидрология).

Табл. 1. Данные ВРСЗ для акваторий мелководных северных морей (зимняя гидрология)
 Tab. 1. Data on the VDSV for the waters of the shallow northern seas (winter hydrology)

Номер слоя n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина слоя H_n , м	10	20	30	50	75	100	125	150	200	> 200
Толщина слоя h_n , м	10	10	10	20	25	25	25	25	50	–
Скорость звука c_n , м/с	1427.3	1438.9	1442.8	1440.7	1438.3	1438.4	1439.1	1435.1	1435.5	1440.8

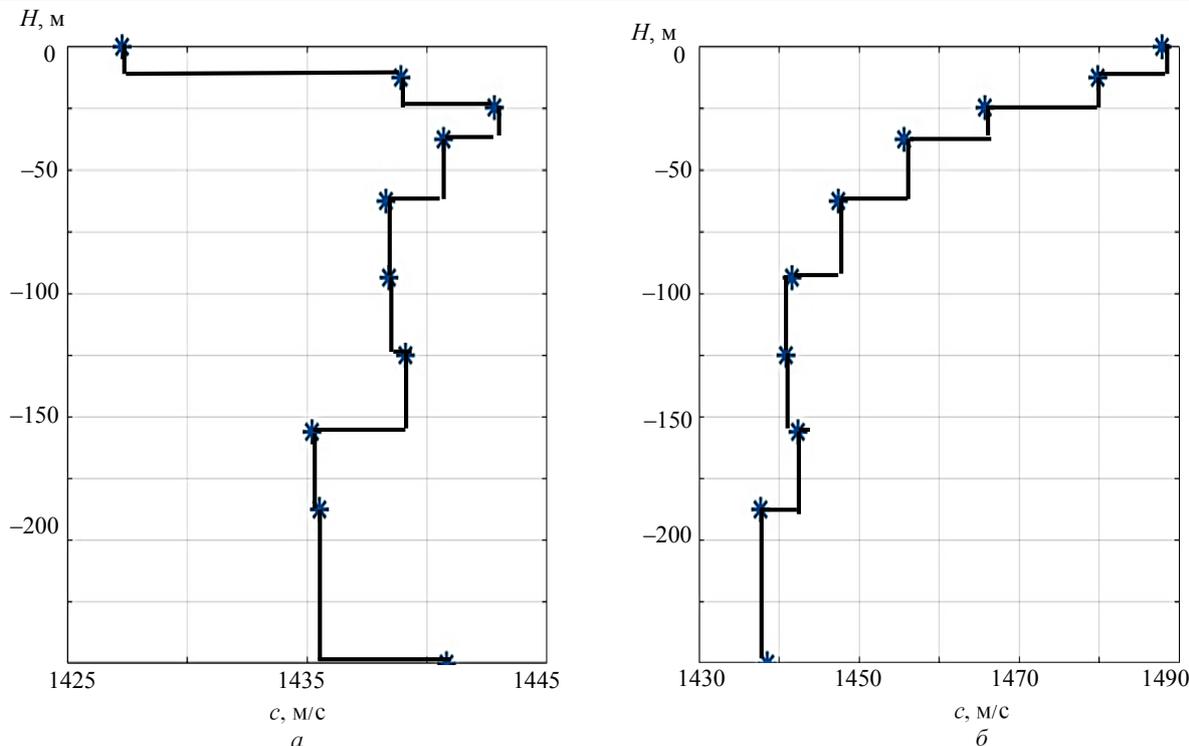


Рис. 2. Представление ВРСЗ в виде ступенчатой функции: а – зимняя гидрология; б – летняя гидрология
 Fig. 2. Representation of the VDSV as a stepwise function: а – winter hydrology; б – summer hydrology

Считая, что в пределах n -го слоя скорость звука $c_n = \text{const}(n)$, ВРСЗ, соответствующее ВРСЗ № 2 на рис. 1, представляется в виде ступенчатой функции (рис. 2).

В случае $H_{\text{изм}} > H_{\text{max}}$

$$H_{\text{изм}} = H_N + \Delta H, \quad (3)$$

$$H_N = \sum_{n=1}^N h_n = \sum_{n=1}^N c_n t_n, \quad \Delta H = c_N t_N,$$

где ΔH – добавка по глубине к нижней границе N -го слоя, $H_N = H_{\text{max}}$.

Общее время T , регистрируемое оператором, можно представить в виде

$$T = T_N + \Delta T, \quad (4)$$

$$T_N = 2 \sum_{n=1}^N h_n / c_n, \quad \Delta T = 2 \Delta H / c_N,$$

откуда

$$\Delta H = c_N \Delta T / 2. \quad (5)$$

Подставив (5) в (3) и используя (4), получаем

$$H_{\text{изм}} = \sum_{n=1}^N h_n + \frac{c_N}{2} \left(T - 2 \sum_{n=1}^N h_n / c_n \right), \quad (6)$$

где входящие в (6) значения h_n, c_n берутся из таблицы типа табл. 1 или из базы данных ВРСЗ для обследуемого водоема, а T фиксируется эхолотом.

Рассмотрим далее случай $H_{\text{изм}} < H_{\text{max}}$, т. е. отражающий объект расположен менее глубоко, чем самый глубокий горизонт H_N имеющейся таблицы ВРСЗ. Пусть отражатель находится в слое с номером $M < N$, где N – номер предельного (нижнего) слоя из банка данных $c(z)$ для обследуемой акватории. Тогда $H_M > H_{\text{изм}} > H_{M-1}$ или

$$\sum_{n=1}^M c_n t_n > H_{\text{изм}} > \sum_{n=1}^{M-1} c_n t_n. \quad (7)$$

Из (7) видно, что измеренное время T находится в диапазоне

$$T_M > T > T_{M-1}, \quad (8)$$

а $T = T_{M-1} + \Delta T$, где $T_{M-1} = 2 \sum_{n=1}^{M-1} h_n/c_n$ определяется из таблиц ВРСЗ. Очевидно, что

$$H_{\text{изм}} = H_{M-1} + \Delta H, \quad \Delta H = c_M \Delta T/2. \quad (9)$$

Окончательно

$$\begin{aligned} H_{\text{изм}} &= H_{M-1} + \Delta H = \\ &= \sum_{n=1}^{M-1} h_n + \frac{c_M}{2} \left(T - 2 \sum_{n=1}^{M-1} h_n/c_n \right). \end{aligned} \quad (10)$$

В (10) имеется единственное неизвестное – табличный номер слоя $M-1$, ниже которого, но в слое с номером M , находится отражатель.

Определить номер слоя M можно, последовательно вычисляя величину $T_Q = \sum_{n=1}^Q h_n/c_n$, $Q = 2, 3, \dots$ и подставляя полученные значения в (8). Если найдено $T_Q > T$, то найденное значение $Q = M$.

Выражение (10) принципиально годится для ситуации, когда $H_{\text{изм}} > H_{\text{max}}$, но расчет по (6) требует меньше вычислительных операций.

Сопоставим получаемые по (10) оценки дистанции с данными по дистанции, когда заранее вводится средняя скорость звука \bar{c} [15], или постоянная скорость $c = 1500$ м/с. Среднюю скорость звука можно рассчитывать двумя способами:

$$\bar{c} = c_1 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N c_n \quad \text{или} \quad \bar{c} = c_2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{c_m + c_{m+1}}{2},$$

где слой с номером $m = N + 1$ – это водный слой ниже предельного горизонта, указанного в банке данных ВРСЗ, причем $c(z > H_{\text{max}}) = c_N$. При линейной аппроксимации $c(z)$, как это сделано на рис. 1, можно показать, что $c_1 = c_2$.

Результаты сопоставления, представленные в табл. 2, соответствуют приведенным на рис. 1 типовым эюграм ВРСЗ – расчет выполнен для условий зимней гидрологии в акваториях мелких северных морей (№ 2) и летней гидрологии глубоководных морей северной части Тихого океана (№ 4).

Из табл. 2 видно, что погрешности при использовании постоянной скорости звука $c = 1500$ м/с наибольшие. Значительно меньшие погрешности измерения глубины получаются, если в ПО эхолота вводится средняя скорость. В расчетах, представленных в табл. 2, средняя скорость определялась вне зависимости от неравномерности

шкалы по горизонтам значений скорости звука. Можно предположить, что величина погрешности зависит не только от ВРСЗ обследуемой акватории, но и от глубины до отражающего объекта, что показано при конкретных расчетах в табл. 2.

Процедуру вычисления глубины расположения отражающего объекта можно разделить на два этапа. На первом этапе вычисляется приближенное значение глубины $H_1 = \bar{c} T/2$ (или, более грубо, $H_2 = 1500 \cdot T/2$) и сопоставляется с номером слоя. Пусть выполняется условие: $H_M < H_1$ или $H_M < H_2$, откуда следует, что отражающий объект находится в слое с номером M . Далее для расчета $H_{\text{изм}}$ используется (10). Предлагаемая процедура основана на том, что по результатам вычислений, представленным в табл. 2, замена ступенчатой функции $c(z)$ на среднюю или на значение 1500 м/с для различных гидрологий не приводит к существенным ошибкам в определении $H_{\text{изм}}$. Если окажется, что вычисленное значение H_1 находится в непосредственной близости от границ слоя, следует дополнительно выполнить приближенный расчет H_1 , заменив

$$-M \rightarrow M-1, \quad \text{если } H_1 \text{ находится вблизи } H_M$$

или

$$-M \rightarrow M+1, \quad \text{если } H_1 \text{ находится вблизи } H_{M+1},$$

после чего выполнить вычисления по (10).

Погрешность измерения дистанции по формуле (10) можно уменьшить, если ломаную кривую типа рис. 2 заменить отрезками прямых, аналогично способу, предложенному в [13] для определения скорости звука. В каждом слое функция $c(z)$ будет иметь вид

$$\begin{aligned} c(z) &= c_n + \frac{(z - H_n)(c_n - c_{n+1})}{h_n}, \\ z &\in (H_n, H_{n+1}), \quad n = 1, N-1, \end{aligned} \quad (11)$$

где H_n, H_{n+1} – верхняя и нижняя границы n -го слоя.

Для определения $H_{\text{изм}}$ неравенство (8) представим в виде

$$\sum_{n=1}^{M+1} t_n > T/2 > \sum_{n=1}^M t_n, \quad (12)$$

а время t_n будем определять по формуле

$$t_n = \int_{H_n}^{H_{n+1}} \frac{dz}{c_n(z)}. \quad (13)$$

После подстановки в (13) выражения для $c_n(z)$ (11) и элементарных преобразований получаем

$$t_n = \frac{1}{b} \ln \left| \frac{y_2}{y_1} \right|, \quad (14)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} y &= a + bz, \quad y_1 = a + bH_n, \quad y_2 = a + bH_{n+1}, \\ a &= h_n c_n - bH_n, \quad b = c_n - c_{n+1}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из (12) с учетом (13) следует, что время, необходимое для прохождения сигнала от известного горизонта H_M до глубины, где находится отражатель, $H_{изм}$, составит

$$\Delta T = 2 \int_{H_M}^{H_{изм}} \frac{dz}{c_M(z)},$$

т. е. получено уравнение, где известна левая часть и не известен верхний предел интеграла.

Используя (14) и (15), получим

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{2}{b} \ln \left| \frac{y_2}{y_1} \right|, \quad b = (c_M - c_{M+1})/h_M, \quad y_1 = c_M, \\ y_2 &= c_M + \frac{1}{h_M} (H_{изм} - H_M)(c_M - c_{M+1}). \end{aligned}$$

После ряда преобразований получаем

$$\begin{aligned} H_{изм} &= H_M + \frac{h_M c_M}{c_M - c_{M+1}} \times \\ &\times \left(\exp \left[\frac{\Delta T (c_M - c_{M+1})}{2h_M} \right] - 1 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Отметим, что при $H_{изм} > H_{max}$ необходимо пользоваться формулой типа (6):

$$H_{изм} = \sum_{n=1}^N h_n + \frac{c_N}{2} \left(T - 2 \sum_{n=1}^N t_n \right),$$

причем время прохождения звуковой волной n -го слоя следует считать по (13).

Табл. 2. Результаты вычислений дистанции по различным алгоритмам
Tabl. 2. Results of distance calculations using various algorithms

ВРСЗ	№ 2, зима	№ 4, лето	№ 4, лето
T, c	0.178	0.3444	0.6714
$H_{изм}, M; c(z)$ по (16)	127.96	252.88	493.13
$H_{изм}, M; c(z)$ по (10)	128	252	490
$H_{изм}, M; c(z) = \bar{c}$	127.95	253.95	495.12
$H_{изм}, M; c(z) = 1500 \text{ м/с}$	133.49	258.29	503.58

Из сопоставления формул (10) и (16) видно, что вариант с линейной аппроксимацией ВРСЗ требует значительно больше вычислительных операций. При использовании формулы (10) вычисления сводятся к подсчету сумм, входящих в нее, а при линейной аппроксимации необходимо предварительно определить уровень M с помощью неравенства, аналогичного (8). При этом представленный в табл. 2 расчет, выполненный с использованием формулы (16), показал, что определение расстояния до отражающего объекта данным методом вычислений имеет наименьшие погрешности, – поэтому можно полагать, что предлагаемый алгоритм линейной аппроксимации профиля скорости звука оптимален, поскольку обеспечивает наибольшую точность при определении глубины водоема.

Заключение. Из представленного материала видно, что погрешность определения глубины по предлагаемым алгоритмам связана с погрешностями исходных данных по ВРСЗ, которые используются в расчетах. Методы и средства измерения ВРСЗ представлены в [12], [13]. Предполагается, что оператор эхолота использует ВРСЗ, который имеется в доступном банке данных (справочнике) скорости звука, например указанный в [18]. В этих справочниках приводятся не измеренные значения скорости звука, а параметры водной среды. ВРСЗ получают пересчетом с применением различных аналитических выражений [12]–[14]. Оценка погрешностей и достоверности данных ВРСЗ по справочникам не была задачей авторов статьи и, видимо, не будет оцениваться большинством пользователей прецизионных эхолотов.

Авторы выражают благодарность К. П. Львову и К. В. Манову за консультации и представление данных по ВРСЗ.

Список литературы

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
2. Гидролокационные системы вертикального зондирования дна / В. Барник, Г. Вендт, Г. П. Каблов, А. Н. Яковлев. Новосибирск: изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1992. 217 с.

3. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 409 с.
4. Андреева И. Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 190 с.
5. Попов Н. Н. Методы сопряжения эмпирических данных и данных дистанционного зондирования при разработке геоинформационной системы прогнозирования гидрофизических характеристик мелкого моря: Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Рос. гос. гидрометеорологический ун-т, 2014. 134 с.
6. Сташкевич А. П. Акустика моря. Л.: Судостроение 1966. 334 с.
7. Серавин Г. Н. Измерение скорости звука в океане. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 136 с.
8. Петухов В. И., Желдак Е. М., Буренин А. В. Оценка точности прогнозирования ВРСЗ с использованием натуральных данных // Сб. тр. конф. «Современные технологии и развитие политехнического образования». Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2016. С. 745–748.
9. World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72 / T. P. Boyer, J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman. NOAA: Silver Spring, 2013. 209 p.
10. Carnes M. R. Description and evaluation of GDEM-V 3.0, Naval Research Laboratory: Stennis Space Center, 2009. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Description-and-Evaluation-of-GDEM-V-3.0-Carnes/9d18eeb42a4b59299c40edac5b07cfd7453017c1> (дата обращения 03.02.2023).
11. Судовые эхолоты / А. А. Хребтов, К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев, Б. М. Манулис, Б. А. Осюхин. Л.: Судостроение, 1982. 232 с.
12. Микушин И. И., Серавин Г. Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб.: Судостроение, 2012. 224 с.
13. Комляков В. А. Корабельные средства измерения скорости звука и моделирование акустических полей в океане. СПб.: Наука, 2003. 357 с.
14. Львов К. П., Манов К. В. Некоторые оценки вертикального распределения скорости звука в районе м. Куркиниemi Ладожского озера // Гидроакустика. 2022. Вып. 50(2). С. 47–53.
15. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 244 с.
16. Ладожское озеро. URL: <http://www.ladoga-lake.ru> (дата обращения 10.03.2023).
17. Портал Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). URL: <http://www.esimo.net/atlas> (дата обращения 10.03.2023).
18. Львов К. П. Оперативный справочник вертикального распределения скорости звука Мирового океана // Гидроакустика. 2022. Вып. 51 (3). С. 25–28.

Информация об авторах

Воротынцева Алена Сергеевна – студентка магистратуры, гр. 8583, кафедры ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». E-Mail: avorotynceva@yandex.ru

Островский Дмитрий Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры ЭУТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ». E-mail: odb111@rambler.ru

References

1. Urik R. Dzh. Osnovy gidroakustiki / per. s angl. L.: Sudostroenie, 1978. 448 s. (In Russ.).
2. Gidrolokacionnye sistemy vertikal'nogo zondirovaniya dna / V. Barnik, G. Vendt, G. P. Kablov, A. N. Jakovlev / Novosibirsk: izd-vo Novosib. gos. un-ta, 1992. 217 s. (In Russ.).
3. Korjakin Ju. A., Smirnov S. A., Jakovlev G. V. Korabel'naja gidroakusticheskaja tehnika. Sostojanie i aktual'nye problemy. SPb.: Nauka, 2004. 409 s. (In Russ.).
4. Andreeva I. B. Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 190 s. (In Russ.).
5. Popov N. N. Metody soprjazhenija jempiricheskikh dannyh i dannyh distancionnogo zondirovaniya pri razrabotke geoinformacionnoj sistemy prognozirovaniya gidrofizicheskikh harakteristik melkogo morja: Dis. ... kand. tehn. nauk. SPb.: Ros. gos. gidrometeorologicheskij un-t, 2014. 134 s. (In Russ.).
6. Stashkevich A. P. Akustika morja. L.: Sudostroenie 1966. 334 s. (In Russ.).
7. Seravin G. N. Izmerenie skorosti zvuka v okeane. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 136 s. (In Russ.).
8. Petuhov V. I., Zheldak E. M., Burenin A. V. Ocenka tochnosti prognozirovaniya VRSZ s ispol'zovaniem naturnyh dannyh // Sb. tr. konf. «Sovremennye tehnologii i razvitie politehnicheskogo obrazovaniya». Vladivostok: Dal'nevost. feder. un-t, 2016. S. 745–748. (In Russ.).
9. World Ocean Database 2013, NOAA Atlas NESDIS 72 / T. P. Boyer, J. I. Antonov, O. K. Baranova, C. Coleman. NOAA: Silver Spring, 2013. 209 p.
10. Carnes M. R. Description and evaluation of GDEM-V 3.0, Naval Research Laboratory: Stennis Space Center, 2009. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Description-and-Evaluation-of-GDEM-V-3.0-Carnes/9d18eeb42a4b59299c40edac5b07cfd7453017c1> (data obraschenija 03.02.2023).
11. Sudovye jeholoty / A. A. Hrebtov, K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev, B. M. Manulis, B. A. Osjuhin. L.: Sudostroenie, 1982. 232 s. (In Russ.).

12. Mikushin I. I., Seravin G. N. Metody i sredstva izmerenija skorosti zvuka v more. SPb.: Sudostroenie, 2012. 224 s. (In Russ.).

13. Komljakov V. A. Korabel'nye sredstva izmerenija skorosti zvuka i modelirovanie akusticheskikh polej v okeane. SPb.: Nauka, 2003. 357 s. (In Russ.).

14. L'vov K. P., Manov K. V. Nekotorye ocenki vertikal'nogo raspredelenija skorosti zvuka v rajone m. Kurkiniemi Ladozhskogo ozera // Gidroakustika. 2022. Vyp. 50(2). S. 47–53. (In Russ.).

15. Bogorodskij A. V., Ostrovskij D. B. Gidroakusticheskie navigacionnye i poiskovo-obsledovatel'skie sredstva. SPb.: izd-vo SPbGjeTU «LJeTI», 2009. 244 s. (In Russ.).

16. Ladozhskoe ozero. URL: <http://www.ladogalake.ru> (data obraschenija 10.03.2023). (In Russ.).

17. Portal Edinoj gosudarstvennoj sistemy informacii ob obstanovke v Mirovom okeane (ESIMO). URL: <http://www.esimo.net/atlas> (data obraschenija 10.03.2023).

18. L'vov K. P. Operativnyj spravocnik vertikal'nogo raspredelenija skorosti zvuka Mirovogo okeana // Gidroakustika. 2022. Vyp. 51 (3). S. 25–28. (In Russ.).

Information about the authors

Alena S. Vorotyntseva – master's student gr. 8583 of Department EUT of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Dmitriy B. Ostrovskiy – Dr Sci. (Eng.), Professor of Department EUT of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: odb111@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; принята к публикации после рецензирования 14.07.2023; опубликована онлайн 23.11.2023.

Submitted 30.05.2023; accepted 14.07.2023; published online 23.11.2023.
