

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗВУКОРАССЕИВАЮЩИХ СЛОЕВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ ГИДРОЛОКАТОРОМ БОКОВОГО ОБЗОРА

© 2023 г. В. И. Каевицер^а, А. П. Кривцов^а, И. В. Смольянинов^{а, *}, А. В. Элбакидзе^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. академика Введенского, 1, Фрязино, 141190 Россия

*e-mail: ilia159@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 16.03.2023 г.

Принята к публикации 18.05.2023 г.

Рассмотрен метод и разработан алгоритм дистанционного обнаружения звукорассеивающих слоев в морях и океанах по данным полосовой съемки рельефа дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора (ИГБО). На основе математического моделирования фазоразностных измерений ИГБО для многослойных рассеивающих плоскостей в морской воде, продемонстрированы возможности обнаружения звукорассеивающих слоев и измерения глубин их расположения с помощью предлагаемого алгоритма. Проведена оценка точности вычисления глубин звукорассеивающих слоев при постоянном значении скорости звука и определены требования к ИГБО для обеспечения необходимой точности обнаружения отдельных слоев, расположенных на различных глубинах. Продемонстрирована эффективность предложенного метода на примере обработки по разработанному алгоритму экспериментальных данных, полученных при исследованиях рельефа дна с помощью ИГБО диапазона 85 кГц.

Ключевые слова: интерферометрический гидролокатор бокового обзора, звукорассеивающие слои, вертикальный профиль скорости звука

DOI: 10.31857/S0320791923600439, EDN: QUGVWM

ВВЕДЕНИЕ

Акустические методы нашли широкое применение для изучения звукорассеивающих слоев (ЗРС) в водах Мирового океана, открытых в конце 1940-х гг. [1]. Первоначально ЗРС изучались в диапазоне относительно низких частот звуковых сигналов 2–20 кГц [2], показавших, что они имеют биологическую природу. Использование специализированных высокочастотных научных эхолотов с борта судна с 1980-х гг. показало, что ЗРС могут также формироваться неоднородностями водной среды, в частности неоднородностями солености, температуры и др. Появление погружного прибора (SVP), использующего для измерения вертикального профиля скорости звука (ВПСЗ) прямой контактный метод [3], позволило обнаружить в морях и океанах слой на определенной глубине, связанный со скачком скорости звука из-за скачка температуры. Для повышения производительности обнаружения слоя скачка в [4] предложен акустический метод с применением промерного эхолота, позволяющий производить дистанционные измерения ВПСЗ на ходу судна. С началом коммерческого выпуска акустических доплеровских профилометров течений (ADCP), измеряющих одновременно как профили скоро-

сти течений, так и профили интенсивности эхосигнала, появились новые возможности в исследовании акустических свойств вод Мирового океана, продемонстрированные, например, при изучении ЗРС в Черном море [5, 6].

Рассмотренные методы исследований слоистости сред имеют как определенные достоинства, так и недостатки, что заставляет продолжать исследования и разработки для создания более совершенных и производительных средств диагностики слоистых сред [7, 8]. В последние годы большое внимание исследователей уделяется интерферометрической диагностике гидродинамических возмущений в морской среде [9–12]. В этих исследованиях по пеленгованию широкополосного излучателя акустических сигналов показано, что интерферометрические методы позволяют обнаружить, определять расстояние и скорость движения источника с высокой точностью с высокой защищенностью от помех. Для детальных исследований протяженных объектов (морского дна) широкое применение нашли гидролокационные комплексы площадного картирования грунта и рельефа морского дна, с использованием высокоэнергетических сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [13, 14]. В состав комплексов входят интерферомет-

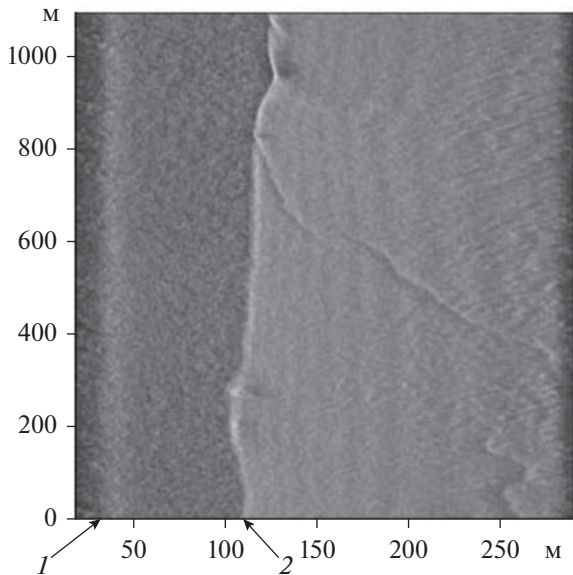


Рис. 1. Гидролокационное изображение участка дна в зависимости от наклонной дальности по данным съемки ИГБО.

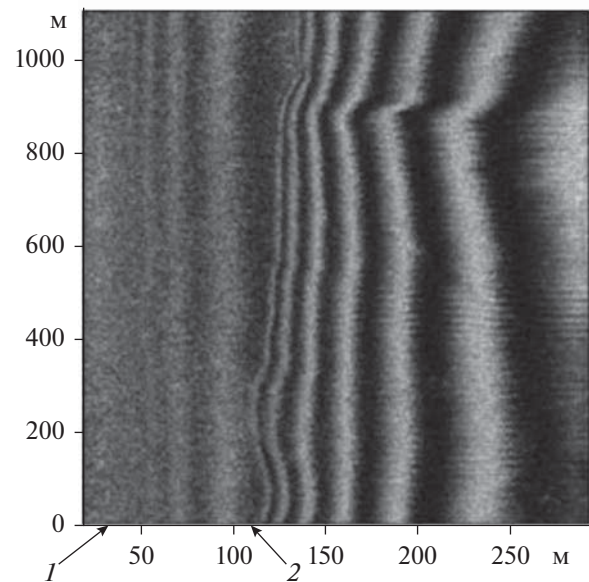


Рис. 2. Интерферометрическая разность фаз эхосигналов в полутонном отображении в зависимости от наклонной дальности.

рические гидролокаторы бокового обзора, предназначенные для изучения рельефа дна на основе измерения в лучевом приближении наклонной дальности до рассеивающих элементов дна и вычисления углов прихода эхосигналов с учетом профиля вертикальной скорости звука [15–17]. При наличии протяженных в горизонтальной плоскости частично прозрачных для акустических волн ЗРС в водной толще они также, как и жесткое дно, рассеивают зондирующие сигналы и при достаточной интенсивности эхосигналов могут быть обнаружены и становится возможным вычисление глубины их расположения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проанализируем процедуру вычисления интерферометрической разности фаз эхосигналов в ИГБО с вертикальным расположением антенн для двух горизонтально расположенных ЗРС (для примера на глубине 20 и 100 м), используя методику, приведенную в работе [17]. Для обоснования эффективности предлагаемой методики для диагностики ЗРС проведем моделирование алгоритма для двухслойной среды в условиях лучевого приближения при постоянном значении скорости звука. В процессе модельных расчетов рассмотрим параметры, влияющие на точность диагностики, и проверим работу алгоритма на экспериментальных данных, полученных ИГБО при исследованиях участка морского дна, приведенного на рис. 1, 2, в Балтийском море.

Исследования проводились с помощью ИГБО диапазона частот 85 кГц и зондирующим сигналам

лом с ЛЧМ [13]. На рис. 1 и 2 по оси абсцисс отложена линия движения судна, на котором установлено ИГБО. На рис. 1 цифрой 1 обозначен звукорассеивающий слой. На рис. 1, 2 цифрой 2 обозначена глубина моря под судном.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ СЛОЕВ

Интерферометрическую разность фаз сигналов, рассеянных плоской горизонтальной отражающей поверхностью, для данных, соответствующих одному циклу излучения и приема сигнала, можно записать в следующем виде:

$$\varphi_n(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\alpha_n(t)), \quad (1)$$

где

$$\alpha_n(t) = \arccos\left(\frac{2H_n}{ct}\right).$$

Здесь H_n – расстояние до слоя n , c – скорость звука, t – время прихода эхосигнала, d – расстояние между приемными антеннами интерферометра, λ – длина волны. На рис. 3, в качестве примера, приведены графики интерферометрической разности фаз, рассчитанные в зависимости от времени прихода эхосигналов от рассеивающих элементов горизонтальной поверхности при вертикальной ориентации базы интерферометра ($d/\lambda = 20$). Графики построены для двух звукорассеивающих слоев на глубинах $H_1 = 20$ м (верхний) и $H_2 = 100$ м (нижний).

На приведенных графиках видно, что зависимость интерферометрической разности фаз от времени прихода эхосигналов, рассеянных каждым слоем, имеет вид сигнала с частотной модуляцией. Функцию (1) можно рассматривать как сигнал с частотной модуляцией, разрешающая способность которого определяется автокорреляционной функцией, имеющей пик и спадающие по уровню боковые лепестки [17]. Отметим, что частотная модуляция для разных слоев на рис. 3 имеет разный вид (полосу частот). Оценим изменение разрешающей способности полученной функции от глубины слоя. На рис. 3 видно, что период разности фаз меняется от некоторого начального значения и, в предельном случае, до бесконечности. Таким образом, полосу частот такого сигнала ΔF можно оценочно считать равной максимальной частоте, соответствующей первому периоду. Для $d/\lambda \gg 1$,

$$\Delta F \approx \frac{cd}{2H_n\lambda}.$$

Полученное соотношение показывает, что полоса частот увеличивается пропорционально базе интерферометра и уменьшается пропорционально глубине слоя. Соответственно, разрешение по глубине составит:

$$\Delta H \approx 2H_n \frac{\lambda}{d}.$$

Если рассматривать интерферометрическую фазу $\varphi(t)$ как сигнал, зависящий от глубины H как от параметра, то корреляционная функция (КФ) сигнала $\varphi_n(t)$ при определенном H_n и модели $\varphi(t)$ по всем глубинам может быть записана в следующем виде:

$$\rho_n(H_n, H) = \frac{1}{T} \int_0^T \varphi(H_n, t) \varphi(H, t) dt, \quad (2)$$

где T – время приема отраженного сигнала ИГБО.

Для заданного значения H_n нормированная КФ является функцией, зависящей только от глубины H :

$$\rho_n(H) = \frac{\int_0^T \varphi(H_n, t) \varphi(H, t) dt}{\int_0^T \varphi^2(H_n, t) dt}.$$

На рис. 4 представлен модуль этой функции при наличии двух звукорассеивающих слоев на глубинах 20 и 100 м соответственно. Для вычислений шаг по глубине взят равным 5 см. Как видно по результатам модельных расчетов, максимумы функций расположены точно на глубинах, заложенных в модель, а пики имеют высокое соотно-

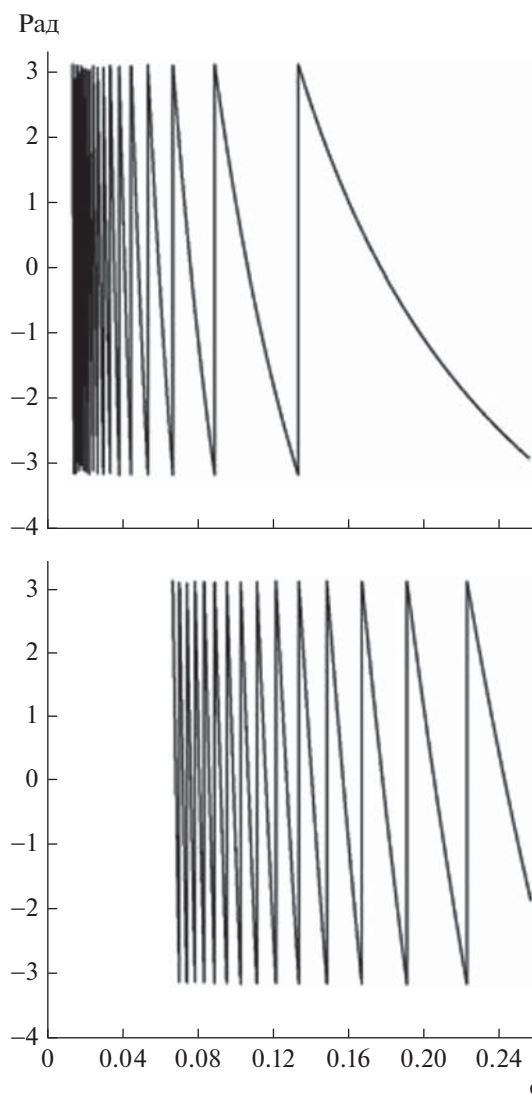


Рис. 3. График интерферометрической разности фаз в зависимости от времени прихода эхосигналов.

шение сигнал/шум и достаточно узкие, что подтверждает возможность разрешения слоев по глубинам их расположения.

Отметим, что разрешающая способность алгоритма увеличивается при увеличении базы интерферометра, что позволяет на практике получать требуемое разрешение ЗРС по глубинам.

Приведенный на рис. 4 график показывает, что звукорассеивающие поверхности на заданных глубинах хорошо фиксируются и могут быть выделены с высокой точностью при применении рассмотренного алгоритма (1), (2).

ПРОВЕРКА РАБОТЫ АЛГОРИТМА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим работу разработанного алгоритма по возможности обнаружения и оценке положе-

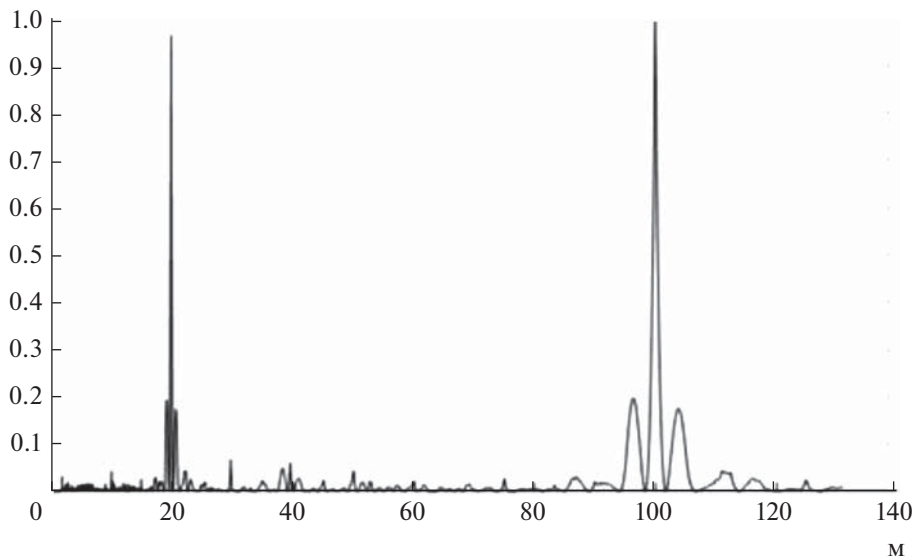


Рис. 4. Модуль нормированной корреляционной функции для случая двух звукорассеивающих слоев.

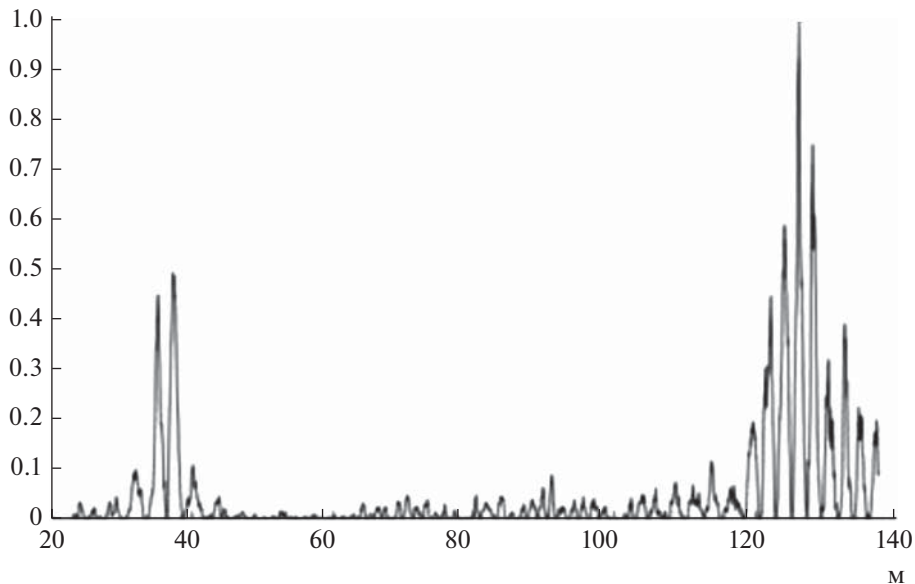


Рис. 5. Результаты обработки экспериментальных измерений ИГБО в зависимости от глубины H .

ния звукорассеивающих слоев в морской среде. С этой целью используем результаты работы ИГБО, приведенные на рис. 1, 2. На акустическом изображении водной толщи рис. 1 отметим ЗРС на глубине около 25–50 м и акустическое изображение дна с слабо расчлененным рельефом, изменяющееся по глубине в зоне первого вступления эхосигналов в пределах 100–140 м. На рис. 2 хорошо просматривается интерферометрическая разность фаз сигналов, рассеянных поверхностью дна, отражающая характер донного рельефа. Кроме того, в толще воды слабо просматривается ин-

терферометрическая разность фаз, обусловленная наличием плоского звукорассеивающего слоя (интерферометрические линии расположены параллельно и без изгибов). Съемка проводилась при $d/\lambda = 13$. Применим разработанный алгоритм к приведенным на рис. 1, 2 экспериментальным данным, в районе отметки 100 м. На рис. 5 показаны результаты расчета усредненной по 100 строкам корреляционной функции, полученные при применении разработанного алгоритма к экспериментальным измерениям ИГБО.

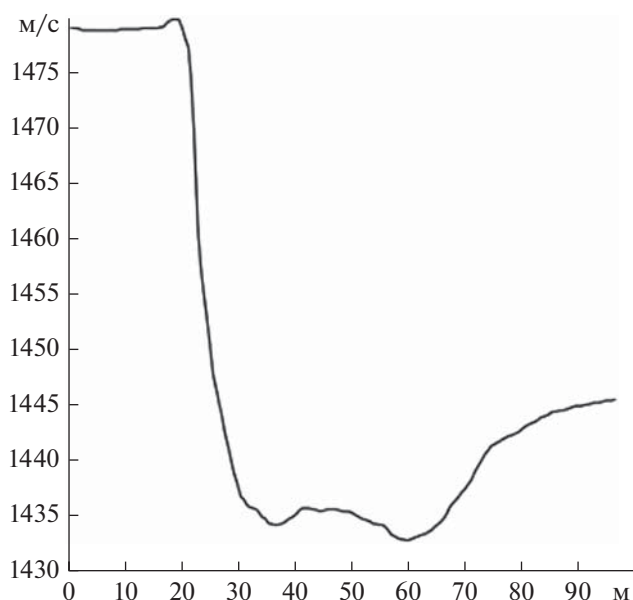


Рис. 6. Профиль вертикальной скорости звука.

На рисунке хорошо просматривается слой, обусловленный донным рассеянием на глубинах 120–140 м, что связано с рельефом дна. Если проанализировать более слабые максимумы в водной толще, то можно отметить ЗРС в районе глубин 30–35 м, который может быть обусловлен как изменением геофизических параметров водной среды (рис. 6), так и биологическими объектами, скапливающимися в области слоя скачка скорости звука.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ и разработан алгоритм, основанный на применении ИГБО и позволяющий дистанционно на ходу судна обнаруживать протяженные полупрозрачные для звуковых волн используемого диапазона частот ЗРС и определять глубину их положения в морской среде. Проведено опробование алгоритма на математических моделях, подтвердившее его эффективность для решения поставленной задачи. Алгоритм проверен на примере обработки экспериментальных данных, полученных ИГБО диапазона 85 кГц при съемке рельефа на участке морского дна в Балтийском море. Обоснована возможность применения разработанного алгоритма для обнаружения звукорассеивающих слоев и их структуры при исследованиях морей и океанов.

Работа выполнена по государственному заданию ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева И.Б. Звукорассеивающие слои – акустические неоднородности толщи вод океана // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 4. С. 437–444.
2. Мозговой В.А. О статистических характеристиках объемного рассеяния звука в океане // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 5. С. 927–929.
3. Микушин И.И., Серавин Г.Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб.: Судостроение, 2012. 224 с.
4. Каевицер В.И., Захаров А.И., Смольянинов И.В. Исследование фазовых характеристик эхо-сигналов при вертикальном зондировании воды сигналами с линейной частотной модуляцией // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 2. С. 175–179.
5. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Федоров С.В. Звукорассеивающие слои Черного моря по данным АД-СР-наблюдений // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 5. С. 513–522.
6. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 639–648.
7. Белов А.И., Кузнецов Г.Н. Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 194–202.
8. Лебедев А.В., Манаков С.А. Точность оценки параметров слоистой среды при использовании когерентного векторного приема поверхностной волны Рэлея // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 1. С. 68–82.
9. Кузнецов Г.Н., Лебедев О.В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 5. С. 628–638.
10. Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А., Просоветский Д.Ю. Помехоустойчивость интерферометрического метода оценки скорости источника звука в мелком море // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 5. С. 556–572.
11. Кузькин В.М., Куцов М.В., Пересёлков С.А. Пространственная интерференция нормальных волн в океанических волноводах // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 376–383.
12. Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. Оценка расстояния до источника в глубоком море с использованием пространственно-частотных характеристик интерференционного инварианта и эффективных фазовых и групповых скоростей // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 6. С. 603–616.
13. Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю. Разработка и результаты испытаний гидроакустического комплекса для исследования дна шельфовой зоны Арктических морей // Журн. Радиоэлектроники. 2016. № 11. <http://jre.cplire.ru/jre/nov16/1/text.pdf> (Дата обращения 19.07.2023)
14. Каевицер В.И., Назаров Л.Е., Смольянинов И.В. Методы повышения точности вычисления разности

- фаз сигналов интерферометрического гидролокатора бокового обзора // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 65. № 8. С. 791–797.
15. *Каевицер В.И., Разманов В.М.* Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами // Успехи физ. наук. 2009. Т. 179. № 2. С. 218–224.
16. *Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В.* Оценка сходимости глубин при площадной съемке рельефа дна многолучевым эхолотом и интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журн. Радиоэлектроники. 2017. № 4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/2/text.pdf> (Дата обращения 19.07.2023)
17. *Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Алгоритм коррекции батиметрических измерений интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журн. Радиоэлектроники. 2022. № 10. <http://jre.cplire.ru/jre/oct22/7/text.pdf> (Дата обращения 19.07.2023)