

Расчет энергетических характеристик гидролокационных систем вертикального зондирования при учете сложности излучаемого сигнала

А. В. Вагин, А. С. Воротынцева✉

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

✉ avorotynceva@yandex.ru

Аннотация. Представлен алгоритм энергетического расчета для трех гидролокационных систем вертикального зондирования: эхолота, системы измерения толщины льда и профилографа донного грунта с учетом использования сложного широкополосного сигнала в качестве зондирующего. Показано, что при увеличении сложности (базы) сигнала снижается уровень требуемого акустического давления, развиваемого антенной. Определены выражения оптимальных частот для расчетов эхолота, системы измерения толщины льда и профилографа донного грунта, приведены примеры расчетов оптимальных и рабочих частот для каждого рассматриваемого гидроакустического средства.

Ключевые слова: энергетический расчет, широкополосный сигнал, активная гидролокация, вертикальное зондирование

Для цитирования: Вагин А. В., Воротынцева А. С. Расчет энергетических характеристик гидролокационных систем вертикального зондирования при учете сложности излучаемого сигнала // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 19–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-19-25.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Calculation of the Energy Characteristics of Vertical Sonar Sensing Systems Taking into Account the Complexity of the Radiated Signal

A. V. Vagin, A. S. Vorotyntseva✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ avorotynceva@yandex.ru

Abstract. Presents an energy calculation algorithm for three vertical sonar sensing systems: an echosounder, an ice thickness measurement system and a bottom soil profiling device, taking into account the use of a complex broadband signal as a sounding one. It is shown that as the complexity (base) of the signal increases, the level of required acoustic pressure developed by the antenna decreases. Expressions of optimal frequencies for calculations of the echosounder, ice thickness measurement system and bottom soil profiling device are determined, examples of calculations of optimal and operating frequencies for each considered sonar are given.

Keywords: energy calculation, broadband signal, active sonar, vertical sensing

For citation: Vagin A. V., Vorotyntseva A. S. Calculation of the Energy Characteristics of Vertical Sonar Sensing Systems Taking into Account the Complexity of the Radiated Signal // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 19–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-19-25.

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

Введение. В настоящее время гидроакустические средства имеют широкое применение во всевозможных сферах деятельности. Актуаль-

ность использования таких средств для решения задач различного назначения обусловлена потребностью освоения пространств и ресурсов

Мирового океана. Физические законы, заложенные в принцип действия гидроакустической аппаратуры, позволяют эффективно решать задачи исследования морского пространства – акустические волны распространяются в водной среде с наименьшими потерями энергии [1].

Как показано в [2], одно из самых распространенных на сегодняшний день гидроакустических средств – это эхолот, средство активной гидролокации вертикального зондирования, обеспечивающее получение батиметрической информации неконтактным способом. Такие средства могут применяться в навигационных задачах, гидротехнических работах, исследованиях рельефа, для составления электронных карт и т. п. В зависимости от решаемых задач принята следующая классификация эхолотовых систем [3]:

- навигационные эхолоты (измерители глубин под килем носителя, а также в упрежденной точке; сигнализаторы опасной глубины);
- промерные эхолоты (однолучевые с нормальным и наклонным зондированием; многолучевые);
- специализированные средства (системы измерения толщины льда, волнографы, профилографы донного грунта);
- рыбопоисковые эхолоты.

Эхолотный промер – один из базовых методов изучения Мирового океана, дающий основу для последующих публикаций, в том числе геологических и геофизических [4].

В настоящее время развитие современных эхолотовых систем достигается цифровыми методами генерации и обработки сигналов, а также применением современной элементной базы [5]. Улучшение технических характеристик эхолотов (дальность действия, разрешающая способность, помехоустойчивость и т. п.) обусловлено использованием сложных зондирующих сигналов – их применение обеспечило значительное повышение эффективности решения задач в сложных помехосигнальных условиях [6]. Эффективность использования сложных зондирующих сигналов в гидроакустических средствах активной локализации отражена в [7]–[10].

Главным образом, эффективность использования гидроакустических средств (ГАС) для решения каких-либо задач оценивается вероятностью выполнения определенных функций на заданном расстоянии от установленной точки. Качественным показателем эффективности работы ГАС служат энергетические характеристики,

определяемые минимальным значением отношения сигнал/помеха (ОСП) на входе приемного тракта, при котором вероятность правильного обнаружения сигнала на выходе тракта равна заданному значению дальности действия при обеспечении требований к вероятности ложных тревог. На практике эффективность ГАС оценивается дальностью действия в неограниченной и однородной среде – энергетической дальностью действия [11].

Цель настоящей статьи состоит в теоретическом обосновании применения сложных (широкополосных) сигналов для повышения энергоэффективности гидроакустических средств вертикального зондирования. Объектом исследования служит методика расчета энергетических характеристик.

Уравнение активной гидролокации. Основным этапом проектирования любого гидроакустического средства служит энергетический расчет. Основной задаваемый параметр – энергетическая дальность действия.

Энергетический расчет выполняется на основе известного уравнения гидролокации, которое применительно к активным гидроакустическим средствам записывается следующим образом [2]:

$$I_c > \delta^2 p_{\Pi}^2 / \rho c, \quad (1)$$

где I_c – интенсивность эхосигнала на входе приемной антенны; δ – коэффициент распознавания; p_{Π} – давление помех; ρ – плотность среды распространения сигнала; c – скорость распространения звука.

Прием полезного эхосигнала сопровождается воздействием помех, которые в общем можно разделить на два типа: внутренние (шумы преобразователей, элементов электрических цепей) и внешние (шумы моря, собственные шумы носителя ГАС, гидродинамический шум, возникающий при движении носителя, реверберация). В соответствии с [11] давление помех можно определить по формуле

$$p_{\Pi} = \frac{p_0}{f} \sqrt{\frac{\Delta f}{K_{\text{пр}}}}, \quad (2)$$

где p_0 – приведенный уровень помех, Па/ $\sqrt{\text{Гц}}$; f – рабочая частота, Гц; Δf – полоса пропускания приемного тракта, Гц; $K_{\text{пр}} = (2\pi a_{\text{пр}} f / c)^2$ – коэффициент концентрации приемной антенны радиусом $a_{\text{пр}}$ (обычно антенны эхолота имеют конфигурацию раскрыва «плоский диск»).

Интенсивность эхосигнала I_c для эхолота определяется следующим образом [12]:

$$I_c = \frac{W_{ак} K_{изл} c \tau \mu^2}{8\pi H^3} 10^{-0.2\beta H}, \quad (3)$$

где $W_{ак}$ – излучаемая антенной акустическая мощность, Вт; $K_{изл}$ – коэффициент концентрации излучающей антенны; τ – длительность зондирующего импульса, с; μ – коэффициент отражения от дна, H – измеряемая глубина: в знаменателе – в метрах, в показателе – в километрах; β – коэффициент пространственного затухания звука в воде, дБ/км.

Коэффициент β имеет зависимость от различных физико-химических свойств среды (температура, соленость, гидростатическое давление) и описывается множеством выражений с разной степенью точности [13]. Как показано в [12], широко применяется формула Шихи–Хелли, с использованием которой можно получить достаточно точное значение коэффициента пространственного затухания:

$$\beta = 0.036 f^{3/2}. \quad (4)$$

Коэффициент отражения от дна μ в общем случае зависит от угла падения акустической волны, но при расчете параметров гидроакустических систем вертикального зондирования рассматривается только нормальное падение и коэффициент μ принимается постоянным, не зависящим от угла падения.

Важно отметить, что различные донные поверхности (ил, глины, пески, скальное основание и проч.) имеют разную отражающую способность. В табл. 1 приведены значения μ для некоторых типов грунтов [3].

Табл. 1. Коэффициенты отражения от различных типов донного грунта
Tab. 1. Reflection coefficients from various types of bottom soil

Тип грунта	Коэффициент отражения μ
Ил	0.10...0.20
Пески	0.30
Гравий	0.35...0.40
Глины	0.25...0.42
Скальное основание	0.40...0.62

Для пересчета акустической мощности в акустическое давление используем следующую формулу:

$$W_{ак} = \frac{4\pi p_f^2}{\rho c K_{изл}}, \quad (5)$$

и тогда при помощи элементарных преобразований, используя (1)–(3), (5), получим выражение для расчета акустического давления

$$p_f = \frac{\delta p_0}{f \mu} \sqrt{\frac{2H^3 \Delta f}{K_{пр} c \tau}} 10^{0.2\beta H}. \quad (6)$$

Энергетический расчет эхолота. Как было показано выше, в связи с необходимостью повышения энергоэффективности целесообразно применять широкополосный сигнал. Используя подход, описанный в [2], преобразуем формулу (6) с учетом сложности (базы) сигнала Q , которая определяется как частотно-временное произведение [2]

$$Q = \tau \Delta f. \quad (7)$$

Коэффициент распознавания δ может быть определен следующим образом [2]:

$$\delta = q / \sqrt{2Q}, \quad (8)$$

где q – параметр обнаружения, равный отношению сигнал/помеха (для автоматического обнаружения принимается $q = 5$, при обнаружении оператором $q = 2$).

Длительность импульса τ определяется как [2]

$$\tau = Q \tau_0 f_0 / f, \quad (9)$$

где τ_0 – парциальный импульс; f_0 – верхнее значение частоты спектра парциального импульса.

Учитывая (7) и (9), а также что $\Delta f = (1.2 \div 1.4) / \tau$ [12], полоса частот может быть определена следующим образом [2]:

$$\Delta f = \frac{1.37 f}{\tau_0 f_0}. \quad (10)$$

Тогда, учитывая (7)–(10) и проводя элементарные преобразования и расчет коэффициентов, перепишем (6) с учетом сложности излучаемого сигнала:

$$p_f = \frac{186 q p_0 \sqrt{c H^3}}{\mu \tau_0 f_0 a_{пр} f Q} 10^{0.1\beta H}, \quad (11)$$

где f_0, f – частоты, кГц; H – глубина: в числителе – в метрах, в показателе степени – в километрах.

Из (11) видно, что акустическое давление, необходимое для обеспечения промера глубины H , имеет обратно-пропорциональную зависимость от параметра сложности сигнала Q – следовательно, при увеличении полосы частот сигнала Δf и/или длительности зондирующего импульса τ (т. е. базы сигнала), требуется создавать меньшее

(в сравнении с системой, имеющей меньшую базу) акустическое давление для определения глубин в заданной гидрологической обстановке.

Для определения оптимальной частоты $f_{\text{опт}}$ необходимо найти экстремум (11). Введем следующее обозначение: $p_f = \tilde{C}Y(f)$, где \tilde{C} – численный коэффициент, $Y(f)$ – функция, зависящая от частоты. Тогда учитывая

$$p_f = \tilde{C}Y10^{0.1fH}/f,$$

а также принимая во внимание (2) и производя вычисления, найдем экстремум выражения (11):

$$f_{\text{опт}} = \left(\frac{185.185}{H \ln 10} \right)^{2/3}, \quad (12)$$

где $f_{\text{опт}}$ измеряется в кГц, H – в километрах.

В [2] показано, что на практике для уменьшения размеров акустической антенны рабочие частоты могут быть увеличены примерно в два раза, следовательно, рабочую частоту следует принимать равной примерно в два раза большей рассчитанной оптимальной частоты: $f_p \approx 2f_{\text{опт}}$.

К примеру, приведем расчеты оптимальной $f_{\text{опт}}$ и рабочей f_p частоты эхолота, если задан параметр дальности действия: $H = 1000$ м, 6000 м, $12\,000$ м:

$$\begin{cases} H = 1000 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 18.63 \text{ кГц}; f_p \approx 37.26 \text{ кГц}; \\ H = 6000 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 5.64 \text{ кГц}; f_p \approx 11.29 \text{ кГц}; \\ H = 12\,000 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 3.55 \text{ кГц}; f_p \approx 7.11 \text{ кГц}. \end{cases}$$

Энергетический расчет системы измерения толщины льда и профилографа донного грунта. Энергетический расчет гидроакустической системы измерения толщины льда представлен в [2] – различие состоит в дополнительной задаче зондирования слоя льда, которая учитывается в уравнении гидролокации введением соответствующих компонентов в показатель выражения (3):

$$I_c = \frac{W_{\text{ак}} K_{\text{изл}} c \tau \mu^2}{8\pi H^3} 10^{-0.2(\beta_v H_{\text{п}} + \beta_l H_{\text{л}})},$$

где $H_{\text{п}}$ – глубина погружения акустической антенны; $H_{\text{л}}$ – толщина льда (обозначения на рис. 1); β_v, β_l – коэффициенты пространственного затухания акустического сигнала в воде и во льду соответственно, $\beta_v = 0.036f^2$, $\beta_l \cong f$.

Тогда (11) применительно к системе измерения толщины льда будет иметь вид [2]

$$p_f = \frac{186qp_0 \sqrt{cH^3}}{\mu \tau_0 f_0 a_{\text{пр}} f Q} 10^{0.1(\beta_v H_{\text{п}} + \beta_l H_{\text{л}})}. \quad (13)$$

Аналогично энергетическому расчету эхолота определяется экстремум выражения (13), причем затухание акустического сигнала в воде от антенны до нижней границы поверхности льда и обратно (100...400 м) не учитывается. Тогда оптимальная частота системы измерения толщины льда определяется по следующей формуле [2]:

$$f_{\text{опт}} = \frac{10}{H_{\text{л}} \ln 10}, \quad (14)$$

где $H_{\text{л}}$ – в метрах, $f_{\text{опт}}$ – в кГц.

В [2] также приведен расчет оптимальных частот для конкретных значений толщины льда $H_{\text{л}} = 1, 2, 3$ м:

$$\begin{cases} H_{\text{л}} = 1 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 4.34 \text{ кГц}; f_p \approx 8.68 \text{ кГц}; \\ H_{\text{л}} = 2 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 2.17 \text{ кГц}; f_p \approx 4.34 \text{ кГц}; \\ H_{\text{л}} = 3 \text{ м}; f_{\text{опт}} \approx 1.45 \text{ кГц}; f_p \approx 2.90 \text{ кГц}. \end{cases}$$

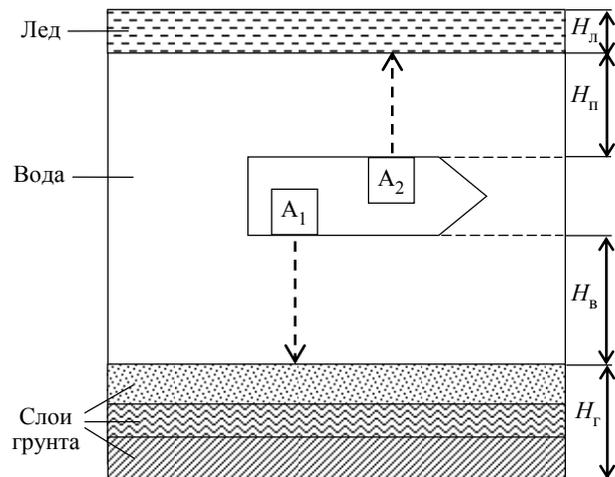


Рис. 1. Пояснение обозначений
Fig. 1. Explanation of the designations

На рис. 1 приведены обозначения, используемые в формулах. Символами A_1 и A_2 обозначены антенны эхолота (профилографа) и системы измерения толщины льда соответственно.

При энергетическом расчете профилографа донного грунта можно воспользоваться формулами (13), (14) с соответствующей заменой компонентов: $H_{\text{п}} \rightarrow H_{\text{в}}$ – расстояние от активной поверхности антенны до границы раздела «вода–дно»; $H_{\text{л}} \rightarrow H_{\text{г}}$ – толщина грунтового слоя; $\beta_{\text{л}} \rightarrow \beta_{\text{г}}$ – коэффициент поглощения в грунте, причем

$$\beta_{\text{г}} = \beta_0 f, \quad (15)$$

где β_0 – константа, зависящая от физико-механических характеристик слоя грунта и служащая классификационным признаком при зондировании донного грунта [2].

Формулы (13), (14) пригодны для расчета в том случае, когда относительно мало расстояние от активной поверхности антенны до границы раздела «вода–дно» (100...400 м) и затуханием акустического сигнала по трассе распространения в воде можно пренебречь. Однако при больших расстояниях от активной поверхности антенны до границы раздела затухание звука по воде необходимо учитывать. Тогда, принимая во внимание (4) и (15), найдем экстремум выражения (13) с соответствующей заменой компонентов и получим условие для оптимальной частоты профилографа:

$$\frac{0.054}{\beta_0} \frac{H_B}{H_T} f_{\text{опт}}^{3/2} + f_{\text{опт}} = \frac{10}{\beta_0 H_T \ln 10}, \quad (16)$$

причем H_B измеряется в километрах; H_T – в метрах; $f_{\text{опт}}$ – в килогерцах.

Следуя предыдущим примерам, проведем расчет по (16) при следующих параметрах: расстояние от активной поверхности антенны до границы раздела «вода–дно» $H_B = 6000$ м; толщина грунта $H_T = 1; 10$ м:

$$\begin{cases} H_B = 6000 \text{ м}; H_T = 1 \text{ м}; \\ f_{\text{опт}} \approx 5.45 \text{ кГц}; f_p \approx 10.90 \text{ кГц}; \\ H_B = 6000 \text{ м}; H_T = 10 \text{ м}; \\ f_{\text{опт}} \approx 4.10 \text{ кГц}; f_p \approx 8.20 \text{ кГц}. \end{cases}$$

Анализ результатов. В различных источниках по проектированию гидроакустических средств [2], [11], [12], [14] приведены формулы для расчета оптимальной частоты, где основные параметры, определяющие эту частоту, – глубина зондирования по воде при определенном значении коэффициента затухания (для эхолота):

$$f_{\text{опт}} = \frac{39}{H^{2/3}}. \quad (17)$$

Проведем сравнительный анализ для расчета оптимальной частоты эхолота по предлагаемой в данной статье формуле (12) и по общепринятой расчетной формуле (17) при измерении различных глубин (табл. 2).

Табл. 2. Результаты расчета оптимальных частот по различным формулам

Tab. 2. The results of calculating the optimal frequencies according to various formulas

Глубина промера H , м	Оптимальная/рабочая частота $f_{\text{опт}}/f_p$, кГц, расчет по (12)	Оптимальная частота $f_{\text{опт}}$, кГц, расчет по (17)
400	34.32/68.65	71.84
500	29.58/59.16	61.91
1000	18.63/37.26	39.00
6000	5.64/11.28	11.81
12 000	3.55/7.10	7.44

Представленные в табл. 2 результаты показывают, что расчеты по формулам (12) и (17) различаются, особенно при расчете на промер дистанций менее 1 км. Различия в расчетах объясняются множественными допущениями, полученными при выводе приближенной формулы (17). Полученные в данной статье формулы позволяют в дальнейшем точнее определять рабочую частоту при проектировании гидролокационных систем вертикального зондирования.

Опыт проектирования и разработки гидроакустических средств различного назначения показывает, что результаты расчета по формулам (12), (14), (16) можно считать целесообразными для применения на практике в разработках.

Заключение. В статье представлен алгоритм энергетического расчета для трех гидролокационных систем вертикального зондирования: эхолота, системы измерения толщины льда и профилографа донного грунта при учете использования сложного широкополосного сигнала в качестве зондирующего. Показано, что при увеличении полосы частот сигнала и/или длительности зондирующего импульса (т. е. базы сигнала), требуется создавать меньшее (в сравнении с системой с меньшей базой) акустическое давление для определения глубин в заданной гидрологической обстановке.

Определены выражения оптимальных частот для расчета энергетических характеристик эхолота, системы измерения толщины льда и профилографа донного грунта, приведены примеры расчетов оптимальных и рабочих частот для каждого рассматриваемого гидроакустического средства.

Список литературы

1. Урик Р. Д. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 455 с.
2. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследова-

тельские средства. СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 244 с.

3. 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.

4. Корякин В. И., Хребтов А. А. От астролябии к навигационным комплексам. СПб.: Судостроение, 1994. 234 с.

5. Скарня А., Тутынин Е., Климов М. Отечественные гидролокаторы со сложными сигналами производства НИИ приборостроения имени В. В. Тихомирова // Морской сб. 2011. № 3. С. 47–51.

6. Бровин А. В. Средства и методы подводных исследований прибрежной зоны // Морской сб. 2011. № 5. С. 33–41.

7. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981. 264 с.

8. Карabanов И. В., Миронов А. С. Алгоритмы обработки гидроакустических сигналов. Хабаровск: изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 140 с.

9. Параметрический эхолот-профилограф с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала / В. И. Каевичер, А. П. Кривцов, И. В. Смольянинов, А. В. Элбакидзе // Журн. радиоэлектроники. 2021. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (дата обращения: 29.04.2024).

10. Воронин В. А., Тарасов С. П., Тимошенко В. И. Использование методов нелинейной акустики в современных гидролокационных технологиях // Изв. ТРТУ. 2005. № 2(46). С. 51–56.

11. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с.

12. Судовые эхолоты / А. А. Хребтов, К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев, Б. М. Манулис, Б. А. Осюхин. Л.: Судостроение, 1982. 232 с.

13. Андреева И. Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 192 с.

14. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.

Информация об авторах

Вагин Антон Владимирович – ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

Воротынцева Алена Сергеевна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

References

1. Urik R. D. Osnovy gidroakustiki. L.: Sudostroenie, 1978. 455 s. (In Russ.).

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

3. Gidrolokacionnye sistemy vertikal'nogo zondirovanija dna / V. Barnik, G. Vendt, G. P. Kablov, A. N. Jakovlev. Novosibirsk: izd-vo Novosib. gos. un-ta, 1992. 217 s. (In Russ.).

4. Korjakin V. I., Hrebtov A. A. Ot astroljabii k navigacionnym kompleksam. SPb.: Sudostroenie, 1994. 234 s. (In Russ.).

5. Sknarja A., Tutynin E., Klimov M. Otechestvennye gidrolokatory so slozhnymi signalami proizvodstva NII priborostroenija imeni V. V. Tihomirova // Morskoj sb. 2011. № 3. S. 47–51. (In Russ.).

6. Brovin A. V. Sredstva i metody podvodnyh issledovanij pribrezhnoj zony // Morskoj sb. 2011. № 5. S. 33–41. (In Russ.).

7. Novikov B. K., Rudenko O. V., Timoshenko V. I. Nelinejnaja gidroakustika. L.: Sudostroenie, 1981. 264 s. (In Russ.).

8. Karabanov I. V., Mironov A. S. Algoritmy obrabotki gidroakusticheskikh signalov. Habarovsk: izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2018. 140 s. (In Russ.).

9. Parametricheskij jeholot-profilograf s linejnoj chastotnoj moduljaciej zondirujushhego signala / V. I. Kaevicer, A. P. Krivcov, I. V. Smol'janinov, A. V. Jelbakidze // Zhurn. radiojelektroniki. 2021. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov21/11/text.pdf> (data obrashhenija: 29.04.2024). (In Russ.).

10. Voronin V. A., Tarasov S. P., Timoshenko V. I. Ispol'zovanie metodov nelinejnoj akustiki v sovremennyh gidrolokacionnyh tehnologijah // Izv. TRTU. 2005. № 2(46). S. 51–56. (In Russ.).

11. Sverdlin G. M. Gidroakusticheskie preobrazovately i anteny. L.: Sudostroenie, 1980. 232 s. (In Russ.).

12. Sudovye jeholoty / A. A. Hrebtov, K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev, B. M. Manulis, B. A. Osjuhin. L.: Sudostroenie, 1982. 232 s. (In Russ.).

13. Andreeva I. B. Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane. L.: Gidrometeizdat, 1975. 192 s. (In Russ.).

14. Korjakin Ju. A., Smirnov S. A., Jakovlev G. V. Korabel'naja gidroakusticheskaja tehnika: Sostojanie i aktual'nye problemy. SPb.: Nauka, 2004. 410 s. (In Russ.).

Information about the authors

Anton V. Vagin – Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Alena S. Vorotyntseva – postgraduate student of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: avorotynceva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; принята к публикации после рецензирования 10.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 29.10.2024; accepted 10.12.2024; published online 28.02.2025.
