

АВТОНОМНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ПО ГЛУБИНЕ УСТАНОВКИ

А.Е. Малащенко, П.А. Молчанов, М.С. Ким, Е.С. Кондрашова

Применение быстро разворачиваемых на позиции автономных и кабельных гидроакустических станций позволяет решать широкий круг задач по контролю морских акваторий, наблюдению за крупными морскими млекопитающими, контролю технического состояния подводных добычных комплексов. Размеры контролируемой зоны гидроакустических станций зависят от гидрологических условий в районе применения и глубины установки станции. Определение оптимального положения станции при заданной гидрологии или определение контролируемой зоны при заданной глубине положения станции выполняются с помощью системы гидроакустических расчетов. Изменение гидрологии и изменение положения станции по глубине существенно влияют на размеры контролируемой зоны. Включение в состав гидроакустической станции датчика скорости звука, специальной лебедки для изменения положения станции по глубине, а также системы гидроакустических расчетов в аппаратно-программный модуль станции позволяет значительно повысить эффективность системы наблюдения за подводной обстановкой в условиях меняющейся гидроакустической обстановки. Конструкция гидроакустической станции, адаптивная к изменению гидрологии, обеспечивает максимальную контролируемую зону в течение своего рабочего цикла. В работе рассмотрены алгоритм работы и конструктивные решения автономной гидроакустической станции с автоматической установкой на оптимальную глубину по критерию достижения максимальной эффективности.

Ключевые слова: автономная гидроакустическая станция, система контроля морской зоны, вертикальное распределение скорости звука, вероятность обнаружения, аномалия распространения звука в море.

Введение

Применение быстро разворачиваемых на позиции автономных и кабельных гидроакустических станций (ГАС) с эффективными приемными звукопрозрачными антеннами и секторными излучающими антеннами позволяет решать широкий круг задач по контролю морских акваторий, наблюдению за крупными морскими млекопитающими, контролю технического состояния подводных добычных комплексов [1–6]. Эффективность автономных быстро разворачиваемых гидроакустических станций зависит от гидрологических условий в районе применения, сезонная изменчивость которых существенно влияет на размеры контролируемой зоны. Экспериментальные данные, полученные в Охотском море, подтверждают изменчивость не только сезонную, но и в пределах нескольких суток [2]. Установка ГАС по глубине определяется по результатам моделирования эффективности ГАС в контролируемой акватории на основе

усредненных данных вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). Изменение гидрологии в районе установки ГАС приводит к кратному изменению площади контролируемой акватории [2]. Конструкция ГАС, адаптивная к изменению гидрологии, обеспечивает максимальную контролируемую зону при изменении ВРСЗ в течение рабочего цикла станции. Система ГАС, работающих в мультистатическом режиме, с автоматической адаптацией к изменению гидрологии обеспечивает высокую надежность и эффективность при решении задач контроля морских акваторий.

■ Конструктивные особенности ГАС с автоматической установкой на оптимальную глубину

Технический облик автономной быстро разворачиваемой на позиции ГАС с автоматической установкой на оптимальную глубину представлен на рис. 1.

Адаптивное к гидрологии позиционирование ГАС (или системы ГАС) по глубине достигается за счет перемещения станции встроенной лебедкой на оптимальную глубину по критерию максимальной засветки подводной зоны. Технический облик специальной лебедки, устойчивой к воздействию гидростатического давления, показан на рис. 2. Лебедка с большим запасом кевларового троса выполнена по двухдвигательной схеме.

Электроприводы (3, 5) на базе бесколлекторного встраиваемого синхронного электродвигателя JCM115x75T однотипны и выполнены в маслonaполненных герметичных корпусах с компенсатором давления. Выходной вал электропривода герметизирован армированной манжетой. Механизмы торможения вынесены за пределы герметичного корпуса.

Двухдвигательная конструкция лебедки обеспечивает распределение тягового усилия при намотке троса между фрикционным тяговым барабаном и намоточным барабаном. Для поддержания стабильного натяжения троса на намоточном барабане при изменении диаметра намотки между тяговым барабаном и намоточным барабаном установлен датчик контроля натяжения троса, включенный в систему управления моментом двигателя намоточного барабана, которая поддерживает стабильное натяжение троса при укладке на барабан. Механизм тросоукладчика обеспечивает осевое перемещение барабана для перекрестной укладки троса и предотвращает его закусывание между витками. При остановке электродвигателей нормально замкнутый тормоз надежно удерживает барабаны лебедки и предотвращает самопроизвольное разматывание троса. При всплытии ГАС нормально замкнутые механизмы торможения отключаются и трос разматывается с намоточного барабана под действием положительной плавучести станции.

■ Критерии определения оптимальной глубины установки ГАС

Метод оценки оптимальной глубины положения станций в контролируемом районе основан на оценке вероятности обнаружения как для режима гидролокации, так и для режима шумопеленгования. Вероятность обнаружения для каждой ГАС определяется из уравнений энергетической дальности [8].

Максимизация зон (объема) области засветки определяется из условия:

$$V = \int_{h_1}^{h_2} S_0(h) dh \rightarrow \max \{V_0 : P_{M0}(h, \vec{r}) \geq P_{\text{проб}}, \vec{r} \in V_0\}$$

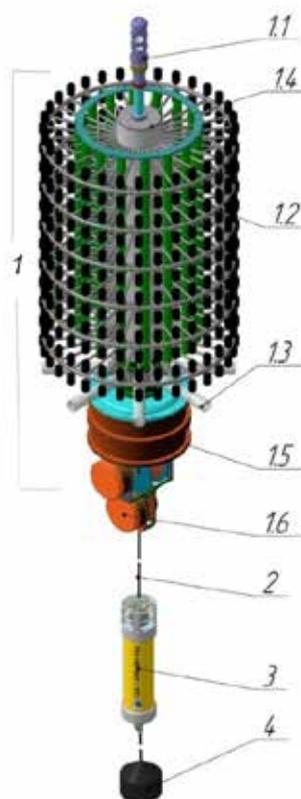


Рис. 1. Технический облик автономной гидроакустической станции с системой автоматического позиционирования по глубине: 1 — гидроакустическая станция в составе: 1.1 — измеритель скорости звука и гидростатического давления; 1.2 — приемная звукопрозрачная антенна цилиндрического типа [7]; 1.3 — секторная излучающая антенна; 1.4 — аппаратно-программный модуль; 1.5 — модуль электропитания; 1.6 — лебедка для автоматического позиционирования станции по глубине; 2 — кевларовый трос; 3 — автономный размыкатель якорь-балласта с управлением по гидроакустическому каналу связи; 4 — якорь-балласт

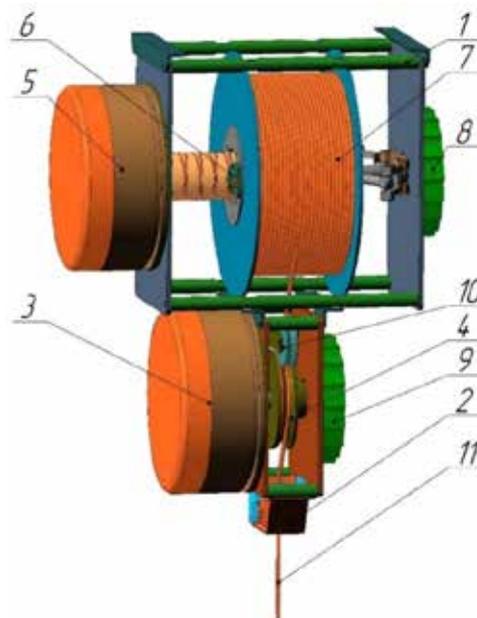


Рис. 2. Технический облик лебедки для автоматической установки ГАС на оптимальную глубину: 1 — рама, на которой размещены: 2 — направляющее устройство кевларового троса; 3 — электропривод фрикционного тягового барабана (4); 5 — электропривод барабана с тросом (7); 6 — тросоукладчик; 8, 9 — механизмы торможения барабана с тросом и тягового барабана; 10 — датчик натяжения кевларового троса (11)

где площадь $S_0(h)$ при фиксированной глубине определяется множеством точек, удовлетворяющих неравенству $P_{M0}(h, \vec{r}) \geq P_{\text{преб}}$:

$$P_M = \frac{1}{(h_2 - h_1)} \int_{S_0} \int_{h_1}^{h_2} P_{M0}(h, \vec{r}) dh d\vec{r} \rightarrow$$

$$\rightarrow \max \{ P_{M0}(h, \vec{r}) \geq P_{\text{преб}}, \vec{r} \in S_0 \},$$

где P_M средняя по заданной площади и глубинам вероятность мультистатистического обнаружения с выполнением условия $P_{M0}(h, \vec{r}) \geq P_{\text{преб}}$.

Искать условный экстремум можно методом Эйлера–Лагранжа [9].

Задача на условный экстремум:

$$\begin{aligned} \varphi_0(x) &\rightarrow \text{extr}, \\ \varphi_i(x) &= 0, i = 1, \dots, m \\ \varphi_i(x) &< 0, i = m+1, \dots, m+k. \end{aligned}$$

Область определения (допустимое множество) Ω имеет вид:

$$\Omega = \{x \in R^n | \varphi_i(x) = 0, i = 1, \dots, m, \varphi_i(x) < 0, i = m+1, \dots, m+k\}.$$

Функция Лагранжа:

$$L(x, \lambda) = \sum_{i=0}^m \lambda_i \varphi_i(x).$$

Необходимое условие экстремума:

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = \sum_{i=0}^m \lambda_i \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x_j} = 0, j = 1, \dots, n$$

$$\varphi_i(x) = 0, i = 1, \dots, m,$$

$$\lambda_{m+j} \varphi_{m+j}(x) < 0, j = 1, \dots, k.$$

Здесь $\varphi_0(x) \rightarrow \text{extr}$ – функционал, для которого ищется экстремум (например V – объем области засветки), $\varphi_i(x)$ – условия связи (например, $P_{M0}(h, \vec{r}) \geq P_{\text{преб}}$), Ω – допустимое множество, на котором ищется решение, λ_i – множители Лагранжа.

Алгоритм определения оптимальной глубины положения ГАС показан на рис. 3.

Порядок установки на позицию быстро развертываемой автономной ГАС (рис. 1) следующий:

– ГАС (поз.1), имеющая положительную плавучесть, выводится за борт и свободно дрейфует на поверхности моря;

– трос лебедки (поз. 2) свободно разматывается на всю длину, равную не менее 1,5 глубины места постановки;

– к тросу лебедки через автономный гидроакустический размыкатель (поз. 3) крепится якорь-балласт (поз. 4), который в заданной точке постановки выводится за борт и свободно погружается на дно, ГАС находится на поверхности моря;

– по программе, в соответствии с заданным циклом работы, включается лебедка, и ГАС погружается на дно со скоростью 1,0 м/с;

– в процессе погружения производится непрерывное измерение скорости звука, глубины и температуры окружающей среды;

– данные вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), измеренные в процессе погружения ГАС, поступают в аппаратно-программный модуль (поз. 1.4);

– в соответствии с алгоритмом (рис. 3) по результатам расчета зон (объема) засветки на различных глубинах положения ГАС определяется значение глубины, соответствующее экстремуму;

– расчетное значение глубины вводится в систему контроля глубины положения станции, механизмы торможения лебедки отключаются, и ГАС всплывает на расчетную глубину под действием собственной положительной плавучести.

При высокой изменчивости гидрологических условий цикл измерений ВРСЗ, расчет новой оптимальной глубины и изменение положения ГАС могут быть заданы программно с периодическим повторением всплытия станции на поверхность моря и погружением на новую оптимальную глубину.



Рис. 3. Алгоритм определения оптимальной глубины установки ГАС

■ Результаты моделирования зон обнаружения при различной гидрологии и различной глубине установки ГАС

На рис. 4 приведены результаты измерения вертикального распределения скорости звука, измеренные в осенний период с 30 октября по 2 ноября 2015 года в районе шельфа юго-восточной части о-ва Сахалин.

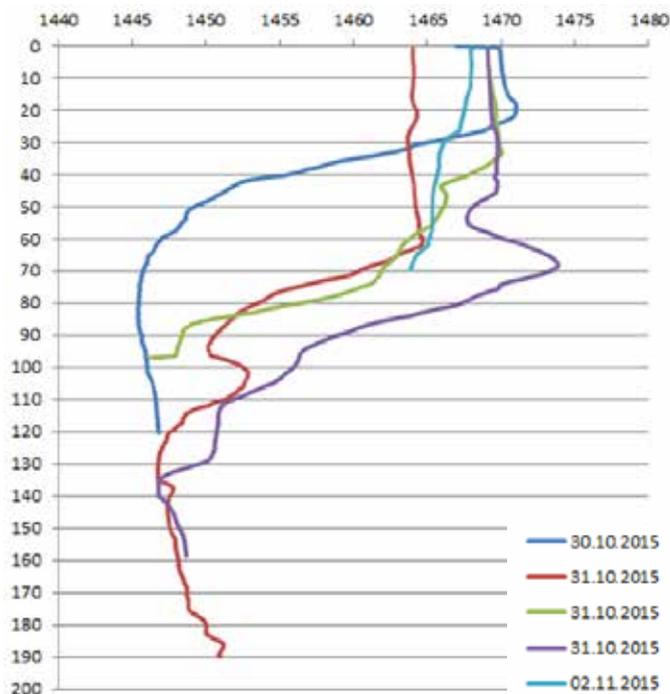


Рис. 4. Серия профилей ВРСЗ, измеренных в южной части Охотского моря в осенний период с 30.10.2015 г. по 02.11.2015 г.

Характерные размеры зоны обнаружения по пространству при различной глубине H положения одной ГАС (при глубине объекта наблюдения $H_{ц} = 110$ м) для гидрологических условий, измеренных 31.10.2015 г. приведены в таблице.

Глубина положения ГАС, м	Глубина положения объекта наблюдения, м	Расчетный радиус зоны обнаружения объекта наблюдения, км
60	110	1,7
70	110	1,8
80	110	1,9
90	110	1,9
110	110	4,4
120	110	3,7

Зависимость зоны обнаружения от глубины положения ГАС для гидрологии, измеренной 31.10.2015 г. (рис. 4).

Приведенный пример иллюстрирует известный факт, что в зависимости от глубины положения станции дальность обнаружения может сильно меняться и существует оптимальная глубина, обеспечивающая максимальный объем засветки (максимальную зону обнаружения).

При учете переменной по пространству ВРСЗ и профиля дна оптимальное распределение станций может быть довольно сложным как по пространству, так и по глубине, и имеет зональную структуру, показанную на рис. 5.

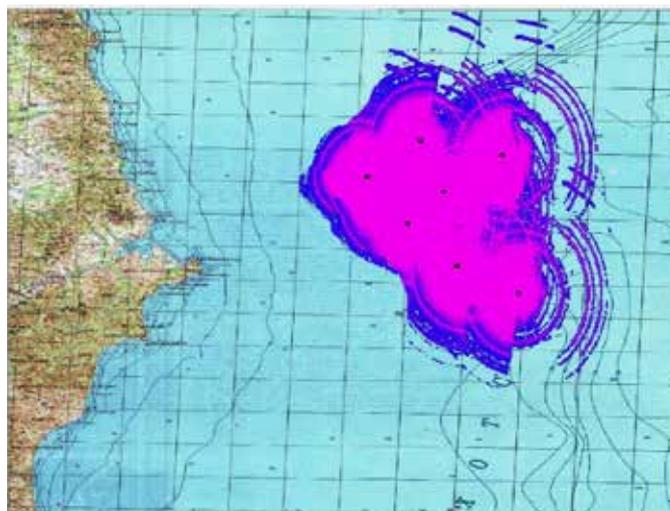


Рис. 5. Результат моделирования зоны засветки для 7 ГАС, работающих в мультистатическом режиме, при оптимальном распределении ГАС по глубине установки в районе со сложным рельефом дна

Характерные расстояния от ГАС до внешней границы зоны засветки – от 3,7 до 6,2 км. Для получения максимума объема области засветки станции должны быть расположены на различных глубинах от 105 до 120 м.

Выводы

Оперативно развертываемые на позиции автономные гидроакустические станции, предназначенные для решения широкого круга задач по контролю морских акваторий и подводных объектов, позволяют создавать сетевые структуры, работающие в мультистатическом режиме. Результаты моделирования и экспериментальные данные подтверждают существенную зависимость эффективности таких структур от гидрологических условий и расположения станций по глубине установки. Для достижения максимальной эффективности в условиях сезонной изменчивости гидрологии требуется оперативная корректировка положения ГАС по глубине в соответ-

ствии с результатами моделирования эффективности ГАС на основе оперативных данных вертикального распределения скорости звука. Конструкция ГАС, имеющая в своем составе дополнительные модули измерения профиля скорости звука и перемещения по глубине, а также аппаратно-программный модуль с подсистемой гидроакустических расчетов, позво-

ляет создавать сетевые мультистатические системы, адаптивные к изменению гидрологии, обеспечивающие кратное увеличение контролируемой подводной зоны.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания СКБ САМИ ДВО РАН (FWWW-2021-0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельяненко В.Ф., Малашенко А.Е. Непрерывный независимый гидроакустический контроль подводного добычного комплекса // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 32–37.
2. Малашенко А.Е., Молчанов П.А., Ким А.И. Мультистатическая система наблюдения на базе автономных гидроакустических станций с автоматической адаптацией по глубине установки // Инженерная физика. 2023. № 5. С. 70–75.
3. Карачун Л.Э., Кондрашова Е.С., Малашенко А.Е. Метод оперативного акустического наблюдения за поведением серых китов в зоне морских нефтегазовых объектов // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 38–43.
4. Емельяненко В.Ф., Ким А.И., Кондрашова Е.С., Малашенко А.Е., Молчанов П.А. Автономная радиогидроакустическая система обеспечения безопасности мореплавания в районах северного морского пути // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4. С. 16–22.
5. Емельяненко В.Ф., Малашенко А.Е. Непрерывный независимый гидроакустический контроль подводного добычного комплекса // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 32–36.
6. Карачун Л.Э., Кондрашова Е.С., Малашенко А.Е. Метод оперативного пассивного акустического наблюдения за поведением серых китов в зоне морских нефтегазовых объектов // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 86–96.
7. Патент № 2547218 Российская Федерация, МПК G01S 7/52(2006.01), H01Q 9/46(2006.01). Приёмная цилиндрическая антенна гидроакустической станции кругового обзора: № 2014106036: заявл. 18.02.2014; опубл. 10.04.2015 / Калёнов Е.Н., Малашенко А.Е., Емельяненко В.Ф.; заявитель СКБ САМИ ДВО РАН.
8. Евтюгов А.П., Митько В.Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Ленинград: Судостроение, 1981. 255 с.
9. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: Факториал-Пресс, 2002. 317 с.

Сведения об авторах

МАЛАШЕНКО Анатолий Емельянович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: морское приборостроение, глубоководные автономные приборы и системы, гидроакустические комплексы и системы, средства морской робототехники.

E-mail: a.malashenko@skbsami.ru

МОЛЧАНОВ Павел Александрович, старший научный сотрудник, кандидат физико-механических наук.

ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: морское приборостроение, гидроакустические системы и комплексы.

Тел.: 8(4242) 750-570, доб. 405, **факс:** +74242236966

E-mail: skb@skbsami.ru

КИМ Мен Себ, младший научный сотрудник.

ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований дальневосточного отделения Российской академии Наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д. 25

Область научных интересов: морское приборостроение, проектирование автономных глубоководных приборов и систем.

Тел.: 8(4242) 750-570, доб. 405, **факс:** +74242236966

E-mail: skb@skbsami.ru

КОНДРАШОВА Елена Сергеевна, младший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН)

Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. А.М. Горького, д. 25.

Область научных интересов: морское приборостроение, проектирование автономных глубоководных приборов и средств морской робототехники.

Тел.: 8(4242) 750-570, доб. 405, **факс:** +74242236966

E-mail: skb@skbsami.ru

Для цитирования:

Малашенко А.Е., Молчанов П.А., Ким М.С., Кондрашова Е.С. АВТОНОМНАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ ПО ГЛУБИНЕ УСТАНОВКИ // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 3 (45). С. 14–19. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_02. EDN: RPSAАН.



AUTONOMOUS SONAR STATION WITH AUTOMATIC ADAPTATION TO THE DEPTH OF INSTALLATION

A.E. Malashenko, P.A. Molchanov, M.S. Kim, E.S. Kondrashova

The use of autonomous and cable sonar stations quickly deployed to the position makes it possible to solve a wide range of tasks for monitoring marine areas, monitoring large marine mammals, and monitoring the technical condition of underwater production complexes. The dimensions of the controlled zone of hydroacoustic stations depend on the hydrological conditions in the area of application and the depth of installation of the station. Determination of the optimal position of the station at a given hydrology or determination of the controlled zone at a given depth of the station position is performed using a system of hydroacoustic calculations. Hydrology change and changeThe position of the station in depth significantly affects the size of the monitored area. The inclusion of a sound velocity sensor, a special winch for changing the position of the station in depth, as well as a system of hydroacoustic calculations in the hardware and software module of the station can significantly increase the efficiency of the underwater monitoring system in a changing hydrological environment. The design of the sonar station, adaptive to changes in hydrology, provides the maximum controlled area during its operating cycle. The paper considers the algorithm of operation and design solutions of an autonomous hydroacoustic station with automatic installation to the optimal depth according to the criterion of achieving maximum efficiency.

Keywords: autonomous sonar station, marine zone control system, vertical distribution of sound velocity, probability of detection, anomaly of sound propagation in the sea.

References

1. Emelianenko V.F., Malashenko A.E. Continuous independent hydroacoustic control of the underwater mining complex. *Ecological Systems and Devices* 2021, No. 11, pp. 32-37.
2. Malashenko A.E., Molchanov P.A., Kim A.I. Multistatic surveillance system based on autonomous sonar stations with automatic adaptation to the depth of installation. *Engineering Physics*, 2023. No. 5, pp. 70-75.
3. Karachun L.E., Kondrashova E.S., Malashenko A.E. Method of operational acoustic observation of the behavior of gray whales in the area of offshore oil and gas facilities. *Ecological systems and devices* No. 11. 2021, pp. 38-43.
4. Emelianenko V.F., Kim A.I., Kondrashova E.S., Malashenko A.E., Molchanov P.A. Autonomous radiohydroacoustic system for ensuring the safety of navigation in the areas of the Northern Sea Route. *Underwater Research and Robotics* 2022, No. 4, pp. 16-22.
5. Emelianenko V.F., Malashenko A.E. Continuous independent sonar monitoring of the subsea production complex. *Ecological systems and devices* No. 11. 2021, pp. 32-36.
6. Karachun L.E., Kondrashova E.S., Malashenko A.E. A method of operational passive acoustic observation of the behavior of gray whales in the area of offshore oil and gas facilities. *Ecological systems and devices* No. 11. 2021, pp. 86-96.
7. Patent of the Russian Federation No. 2547218. 2014-02-18 Receiving cylindrical antenna of a hydroacoustic station of all-round visibility.
8. Evtyutov A.P., Mitko V.B. Examples of engineering calculations in hydroacoustics. Leningrad. Shipbuilding. Series «Library of the hydroacoustic engineer», 1981. 255 p. (in Russian).
9. Vasiliev F.P. Optimization methods. Moscow. Factorial-Press. 2002, 317 p.).

Recommended citation:

Malashenko A.E., Molchanov P.A., Kim M.S., Kondrashova E.S. AUTONOMOUS SONAR STATION WITH AUTOMATIC ADAPTATION TO THE DEPTH OF INSTALLATION. *UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS*. 2023. No. 3 (45). P. 14–19. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_45_03_02. EDN: RPSAAH.