

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ДНЕ

Б.А. Касаткин, Г.В. Косарев

Анализируется опыт применения акустического профилографа с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала, размещенного на борту автономного необитаемого подводного аппарата и предназначенного для поиска малоразмерных объектов в верхнем слое морского дна. Для увеличения разрешающей способности профилографа использованы алгоритмы синтеза апертуры. Описана методика проведения профилографической съемки морского дна. Выполнена оценка размеров обнаруженных целей при помощи алгоритма синтеза апертуры. Произведен расчет производительности профилографической съемки с учетом времени обследования заданной площади и затрат на первичную и вторичную обработку полученных данных.

Ключевые слова: акустический профилограф, профилирование морского дна, метод синтеза апертуры, автономный необитаемый подводный аппарат, алгоритм синтеза апертуры.

Введение

Одним из важных применений акустического профилографа (АП), помимо изучения геологической структуры морского дна, является поиск и обнаружение малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных, в толще дна. Эта проблема особенно актуальна при использовании АП для поиска и обнаружения заиленных донных мин, а также мин, самозакапывающихся в морской грунт.

Использование АП в составе бортовой аппаратуры автономного необитаемого аппарата (АНПА) позволяет заглубить антенну АП на оптимальную высоту над дном (уменьшить энергетические потери на пространственное расхождение фронта сферической волны, уменьшить влияние реверберации). Кроме того, при размещении АП на борту АНПА можно получать синхронно информацию о координатах места от навигационной системы АНПА и других устройств, таких как ГБО, эхолот, датчики глубины.

Как правило, большинство АНПА оснащено профилографами с ЛЧМ-модуляцией зондирующего сигнала. Использование сложных ЛЧМ-сигналов с уве-

личением длительности импульса с одновременным расширением полосы сигнала позволяет улучшить энергетику зондирующего сигнала, а следовательно, увеличить глубину проникновения сигнала в грунт. Кроме того, использование алгоритмов согласованной фильтрации позволяет добиться хорошего разрешения по глубине, улучшить помехоустойчивость и уменьшить энергопотребление АП. Малые габариты и малое энергопотребление делают ЛЧМ-профилограф наиболее эффективным устройством для использования его в составе бортовой аппаратуры АНПА по поиску заиленных донных и самозакапывающихся в грунт мин, а также для изучения геологической структуры морского дна.

В целях повышения эффективности гидроакустических средств и систем в настоящее время одной из главных задач является оснащение существующих гидроакустических комплексов и станций антеннами с синтезированной апертурой. Использование новых алгоритмов, таких как синтезирование апертуры антенны для обработки принятой гидролокационной информации, позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики изделия.

Синтезирование апертуры антенны первоначально использовалось в радиолокации. В дальнейшем этот метод нашел свое применение и в гидроакустике. Компания «*Dynamics Technology Inc.*», работающая по программе *DARPA*, разработала и создала ГБО с синтезированной апертурой. Гидролокатор бокового обзора американской фирмы «*QinetiQ GeoAcoustics Ltd*» применяется на борту подводных аппаратов «*Hugen*». Вопросы синтеза апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах рассматривались в работе [1]. Однако предложенные ими алгоритмы не учитывают различия в скорости распространения звука в воде и донных отложениях и связанного с этим преломления звуковых лучей на границе раздела вода – морское дно, а потому являются весьма приближенными. Учет этих недостатков был устранен в работах [2]–[5].

■ Методика поиска малоразмерных объектов с использованием акустического профилографа с синтезированной апертурой

Для полного перекрытия обследуемого участка дна необходимо, чтобы расстояние между галсами составляло 18–28 м при высоте носителя антенны АП над дном 20–30 м и ширине диаграммы направленности антенны 55° С. При необходимости очень подробного выделения локальных объектов сеть галсов уплотняется, а расстояние между галсами уменьшается до 5–10 м, зоны обследования по соседним галсам перекрывают друг друга, а исследуемый объект может наблюдаться и на соседних профилях [6].

Время съемки АНПА морского дна площадью на 1 км² при минном поиске с расстоянием между галса-

ми 10 м и скорости АНПА 1 м/с составляет примерно 29 часов с учетом времени на повороты. При увеличении расстояния между галсами до 28 м время обследования уменьшается до 11 часов. При обследовании протяженных участков дна в районе залегания трубопроводов, кабелей и т.д. поперечные профили выполняются в направлении, перпендикулярном основному направлению их расположения [7].

Выбор направления профилей съемки и последовательность их выполнения позволяет оптимизировать время съемки и в определенной степени влияет на получаемый результат. Разведочные съемки в большинстве случаев проводятся по сети согласно параллельных профилей [8]. После завершения профиля АНПА разворачивается и заходит на профиль, расположенный на некотором удалении от текущего (рис. 1, а), что позволяет оптимизировать временные затраты. Вследствие этого изучаемая площадь разделяется на два крупных блока с различным направлением профилей съемки [9]. Встречно-параллельные съемки, при которых ориентировка профилей чередуется, лишены этих недостатков, но для захода на соседний профиль, особенно при небольшом межпрофильном расстоянии, необходимо совершать дополнительные маневры (рис. 1, б). Поскольку именно этот тип съемки используется при проведении инженерно-геофизических исследований, например гидролокации бокового обзора, то его использование предпочтительно и при проведении комплексированных измерений с применением профилографа [9, 10].

Как показывают опыт измерений и различные теоретические подтверждения, такие как эффект сверхфокусировки [11], для акустического профилографа наиболее оптимальной является высота над дном на

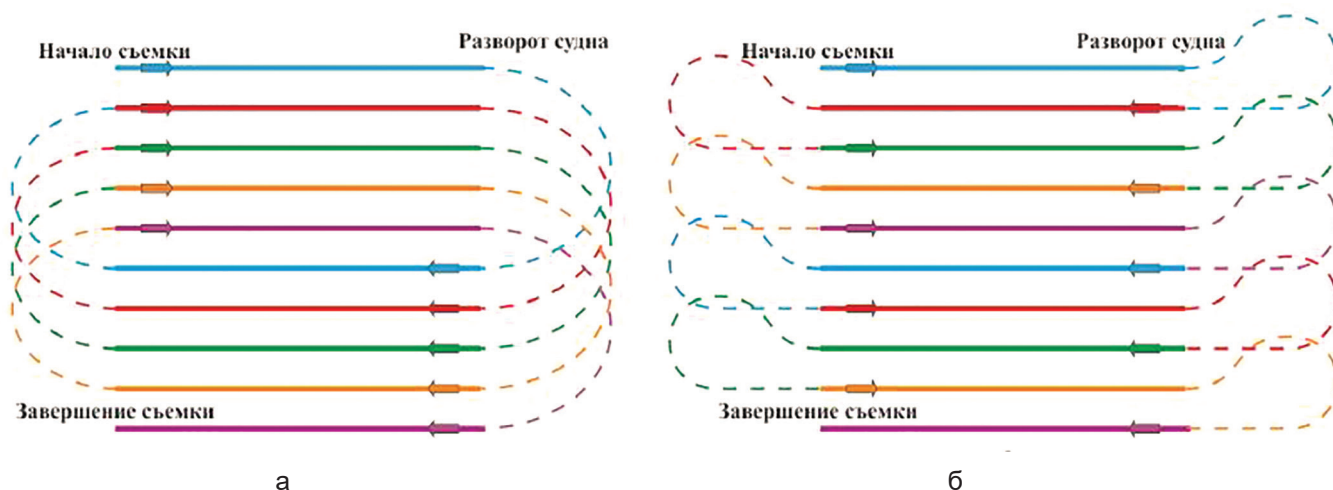


Рис. 1. Согласно-параллельная (а) и встречно-параллельная (б) съемка

борту АНПА 20–30 м. Как правило, на таких высотах одновременно с профилографической съемкой ведется НЧ ГБО съемка, поскольку рабочая высота над дном при этом у них совпадает. В случае очень мелкого моря АНПА ведет съемку с поверхности моря, за исключением случаев, когда длительность излучаемого импульса больше времени распространения отраженного от донной поверхности сигнала.

Отражения, присутствующие на профилограммах в виде параболических сигнатур, как показали многочисленные исследования, наблюдаются при обследовании трубопроводов, валунов, техногенных объектов, мин, неразорвавшихся снарядов – визитная карточка для выявления неоднородных включений этих объектов в менее плотный по составу в сравнении с ними морской грунт. Обработка профилографических данных методом синтеза апертуры позволяет получить более реалистичную картину изображения донных профилей, давая изображения локальных объектов почти в реальном размере.

■ Результаты поиска заиленных малоразмерных объектов и обработка полученных экспериментальных данных методом синтеза апертуры

Подробное описание теоретических исследований было приведено авторами в работах [2, 3, 4, 5]. Для анализа эффективности применения методов синтеза апертуры были использованы результаты измерений, полученные при обследовании различных участков дна с помощью АП. На рис. 2, а представлен участок дна длиной 195 м, имеющий двухслойную структуру, где в районе второго слоя заметна хорошо

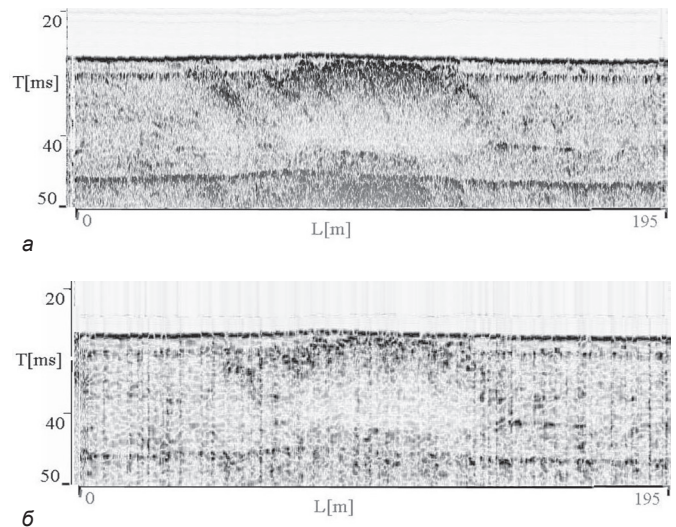


Рис. 2. Исходное изображение профиля дна (а), размер апертуры антенны -0.4м и обработанное изображение (б), размер синтезированной апертуры 7.4 м

консолидированная структура, состоящая из группы пирамидальных холмов. После обработки (рис. 2, б) с применением алгоритма синтеза апертуры структура принимает зернистый и уже не такой монолитный характер.

На рис 3, а представлен участок дна протяжённостью 214 м с ярко выраженной слоистой структурой. Верхний илистый слой, лежащий на более плотном основании, содержит множество малоразмерных объектов техногенного происхождения, погруженных в ил на глубину порядка 1 м. Под искомым объектом на рис. 3 понимается объект с известными геометрическими размерами (фрагмент трубы диаметром 0.4 м и длиной 3 м). Под другими объектами понимается различный металлический мусор. На профи-

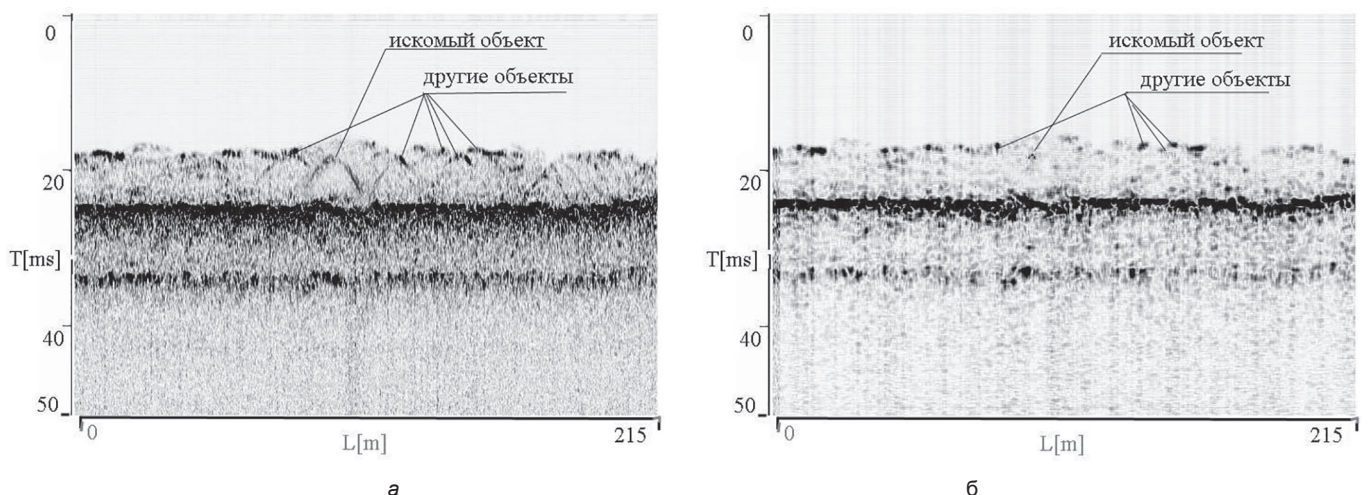


Рис.3. Исходное изображение профиля дна (а), размер апертуры антенны 0.4м и обработанное изображение (б), размер синтезированной апертуры 2.72 м

лограмме (рис 3, а) одиночные объекты регистрируются как протяжённые объекты в виде парабол, вершина которых соответствует реальному малоразмерному объекту. В результате обработки (рис 3, б) характерные параболические сигнатуры в месте расположения локальных объектов в толще дна превращаются в точечные объекты, улучшается разрешение, что позволяет реально оценить размеры локальных объектов.

■ Определение горизонтального размера исследуемого объекта с применением алгоритма синтеза апертуры

Скорость движения носителя акустического профилографа $V = 1.5$ м/с, общая длина обследуемого участка составила 215 м (рис. 4), исходные размеры антенны $d_a = 0.4$ м, размер апертуры синтеза $d = 2.72$ м (по 9 точкам, 8 отрезкам). Видимые горизонтальные размеры отраженных от искомого объекта сигналов в слое ила составили $L_r \sim 20.45$ м, после обработки $L_r \sim 2.16$ м. Ширина диаграммы направленности реальной антенны профилографа $\vartheta_a = 55^\circ$, поскольку угловая разрешающая способность определяется относительным размером апертуры λ/d , после обработки по алгоритму синтеза по 9 точкам ширина диаграммы направленности синтезированной антенны должна составлять $\vartheta = 8.088^\circ$. Одно измерение должно охватывать $L_d = 2 \cdot H \cdot \tan(\vartheta/2) = 1.75$ м при высоте антенны над объектом $H = 12.4$ м. Видимые

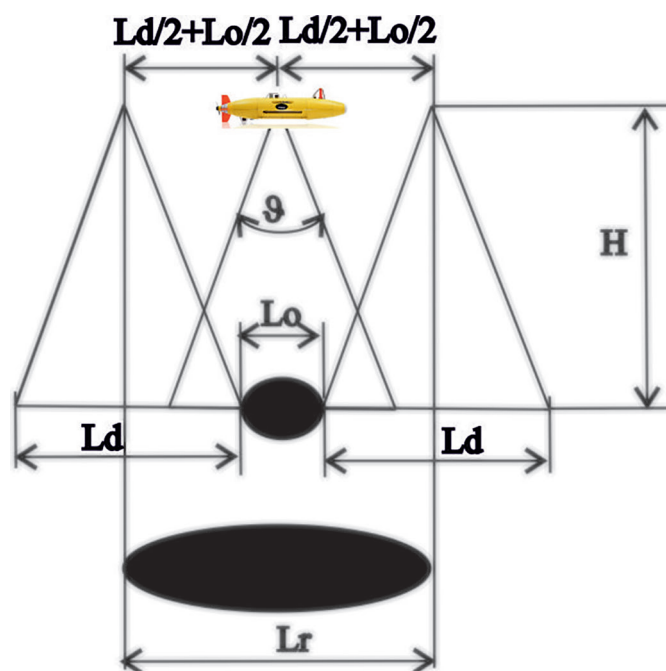


Рис. 4. К определению размеров искомого малоразмерного объекта по ширине диаграммы направленности синтезированной антенны

на профилограмме размеры исследуемого объекта L_r будут определяться как $L_r = L_d + L_o$, где L_o реальные горизонтальные размеры исследуемого объекта, поскольку из профилограммы рис. 4 видно, что $L_r = 2.16$ м и тогда $L_o = L_r - L_d = 2.16 - 1.75$ м = 0.41 м (диаметр реального объекта = 0.4 м). Точность измерения размеров объекта определяется частотой дискретизации по расстоянию, которая зависит от скорости движения АНПА, и частотой посылок импульсов. Кроме того, точность зависит от стабильности таких параметров, как прямолинейность движения носителя АП, постоянство скорости движения.

Заключение

Использование методов согласованной фильтрации позволяет производить профилографическую съемку с высокой помехоустойчивостью и хорошим разрешением по глубине, что очень важно при поиске заиленных объектов, несмотря на работу в относительно низкочастотном диапазоне. Широкая диаграмма направленности АП позволяет уверенно определять местоположение заиленного объекта, который отображается на профилограммах в виде параболической сигнатуры. Обработка принятых данных методами синтеза апертуры позволяет уточнить размеры исследуемого объекта при сравнительно малом времени затрачиваемом на обработку принятых данных и вынесение заключения о вероятности обнаружения заиленных малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных. Все перечисленное выше делает применение акустического профилографа с ЛЧМ-зондирующим сигналом с использованием алгоритмов обработки принятых сигналов методами синтеза апертуры эффективным средством при поиске заиленных малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных (мин и неразорвавшихся снарядов).



ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров А.И., Каевицер В.И., Разманова В.М., Раскатова В.Н. Применение методов синтеза апертур в низкочастотных эхолотах-профилографах // Тр. IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. С. 143–147.
2. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Анализ результатов обработки профилографических данных методом синтеза апертур // Научное обозрение. Технические науки. 2012. № 6. С. 158–162.
3. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтеза и фокусировки // Подводные исследования и робототехника. Владивосток, 2014, № 1(17). С. 33–38.
4. Патент России. Способ профилирования донных отложений / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. № 2517983. 10.06.2014, Бюл. № 16.
5. Патент России. Способ профилирования донных отложений / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. № 2518023. 10.06.2014, Бюл. № 16.
6. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Токарев М.Ю. [и др.] Опыт сейсмоакустического профилирования с многократным перекрытием: возможности и ограничения // Разведка и охрана недр. 2006. № 12. С. 21–25.
7. Докипедия. Свод правил СП 11-114-2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений» (одобрен письмом Госстроя РФ от 11 мая 2004 г. № ЛБ-21). [Электронный ресурс]. — <https://dokipedia.ru/document/5187940>. Загл. с экрана.
8. Vermeer G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition SEG, 2012. 369 p.
9. Шматков А.А. Разработка методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях. Дис. канд. тех. наук: 25.00.10 / Шматков Алексей Алексеевич. М., 2016. 149 с.
10. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Косарев Г.В. Эффект самофокусировки слабо направленного излучения при профилировании морского дна // Тр. X Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб, 2010. С. 350–353.

Об авторах

КАСАТКИН Борис Анатольевич, д.ф.-м.н., Г.Н.С., профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: Теоретическая и прикладная гидроакустика, распространение звуковых волн в слоистых волноводах

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

ORCID ID: 0000-0001-7392-3672

КОСАРЕВ Георгий Валерьевич, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

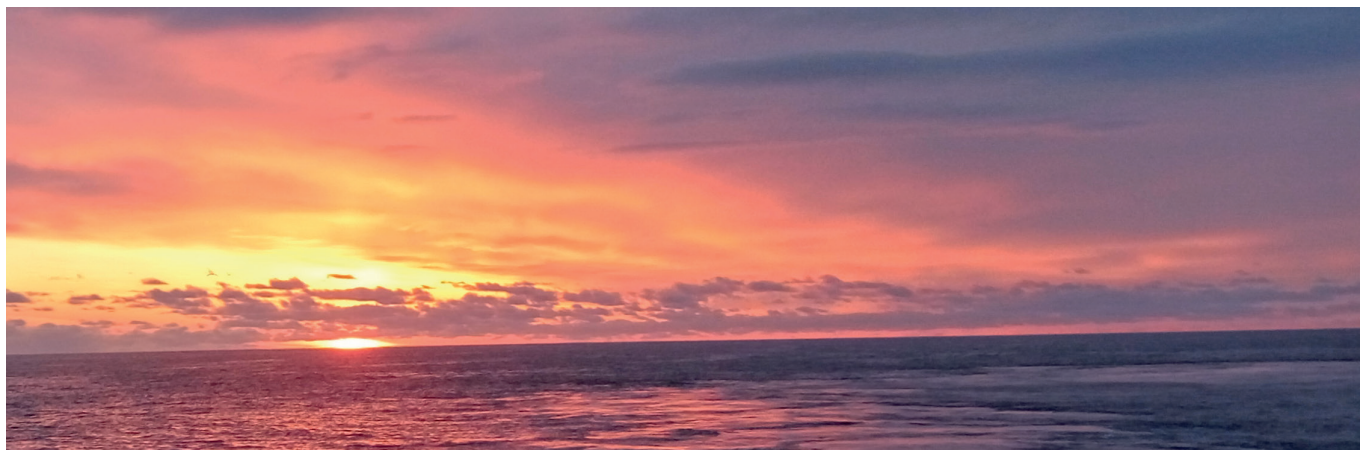
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: гидроакустические навигационные системы, акустические профилографы

ORCID ID: 0000-0002-2157-5482

Для цитирования:

Касаткин Б.А., Косарев Г.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ДНЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 41–46. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_04.



EXPERIENCE OF APPLICATION OF ACOUSTIC PROFILOGRAPH WITH SYNTHESIZED APERTURE FOR SEARCHING FOR SMALL OBJECTS IN THE SEA BOTTOM

B.A. Kasatkin, G.V. Kosarev

The experience of using a small-sized acoustic profiler with chirp modulation of the sounding signal located onboard the AUV and designed to search for small-sized silted objects in the seabed is analyzed. The profiler resolution was increased by using aperture synthesis algorithms. The method of profilographic survey of the seabed is described concerning the search and detection of small-sized objects. The size of the detected small-sized targets was estimated using the aperture synthesis algorithm. Performance calculation of the profilographic survey regarding the duration of the survey of a given area, the costs of the primary processing of the obtained data, and secondary processing by synthesizing the aperture has been performed.

Keywords: acoustic profiler, seabed profiling, aperture synthesis method, autonomous unmanned underwater vehicle, aperture synthesis algorithm.

References

1. Zakharov, A.I.; Kaevitser, V.I.; Razmanova, V.M.; Raskatova, V.N. Application of aperture synthesis methods in low-frequency echo sounders-profilographs. Proceedings of the IX All-Russian Conference «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». SPb.: Science. 2008. P. 143–147.
2. Kasatkin, B.A.; Kosarev, G.V. Analysis of the results of profilographic data processing by the aperture synthesis method. Scientific Review. Technical science. 2012. No. 6. P. 158–162.
3. Kasatkin, B.A.; Kosarev, G.V. The results of the use of an acoustic profiler for monitoring sea areas using synthesis and focusing algorithms. Underwater Research and Robotics. Vladivostok, 2014, No. 1 (17). P. 33–38.
4. Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Method for profiling bottom sediments. Patent of Russia N 2517983.10.06.2014. Bul. No. 16.
5. Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Method for profiling bottom sediments. Patent of Russia No. 2518023. 10.06.2014. Bul. No. 16.
6. Experience of seismoacoustic profiling with multiple overlap: possibilities and limitations / V.G. Gainanov, N.A. Kuzub, M.Yu. Tokarev [and others]. Exploration and protection of mineral resources. 2006. No. 12. P. 21–25.
7. Docipedia. The set of rules SP 11-114-2004 “Engineering surveys on the continental shelf for the construction of offshore oil and gas facilities” (approved by the letter of the State Construction Committee of the Russian Federation of May 11, 2004 No. LB-21). [Electronic resource]. Access mode: <https://dokipedia.ru/document/5187940>. Head. from the screen.
8. Vermeer, G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition / G.J.O. Vermeer. SEG, 2012. 369 p.
9. Shmatkov A.A. Development of a technique for three-dimensional seismoacoustic observations in shallow water areas. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 25.00.10. Shmatkov Aleksey Alekseevich. M., 2016. 149 p.
10. Zlobina, N.V.; Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Self-focusing effect of weakly directed radiation during profiling of the seabed. Proceedings of the X All-Russian Conference. «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». SPb. 2010. P. 350–353

About the authors

KASATKIN Boris Anatolievich, Doctor of Physics and Mathematics
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: Theoretical and applied hydroacoustics, sound wave propagation in layered waveguides
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0001-7392-3672

KOSAREV Georgij Valer'evich, senior researcher
Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: Hydroacoustic navigation systems, acoustic profilographs
ORCID ID: 0000-0002-2157-5482

Recommended citation:

Kasatkin B.A., Kosarev G.V. EXPERIENCE OF APPLICATION OF ACOUSTIC PROFILOGRAPH WITH SYNTHESIZED APERTURE FOR SEARCHING FOR SMALL OBJECTS IN THE SEA BOTTOM. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 2(36). P. 41–46. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_04.