

Смолянинов Илья Вячеславович – e-mail: ilia159@mail.ru; н.с.

Элбакидзе Андрей Владимирович – e-mail: elbakidze@mail.ru; тел.: 84965652447; с.н.с.

Денисов Егор Юрьевич – e-mail: egor-denisov@mail.ru; ведущий инженер.

Kaevitser Vladilen Iosifovich – Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; e-mail: kvi43@mail.ru; 1, acad. B.A. Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow region, 141190, Russia; phone: +74965652616; chief researcher; dr. of eng. sc.

Krivtsov Alexandr Pavlovich – e-mail: mybox17@yandex.ru; phone: +74965652451; senior scientist; cand. of phis.-math. sc.

Razmanov Vladimir Mikhaylovich – e-mail: razvlmi@ire.rssi.ru; senior scientist; cand. of phis.-math. sc.

Smolyaninov Il'ya Vyacheslavovich – e-mail: ilia159@mail.ru; researcher.

Elbakidze Andrey Vladimirovich – e-mail: elbakidze@mail.ru; phone: +74965652447; senior scientist.

Denisov Egor Yur'evich – e-mail: egor-denisov@mail.ru; leading engineer.

УДК 534.2

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-9198

Г.В. Солдатов

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

Гидроакустические средства широко используются для проведения экологического мониторинга различных водоемов и донного грунта. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании гидроакустических приборов на сегодняшний день является применение сложных широкополосных сигналов в гидролокации. Методы формирования и обработки сложных сигналов предполагают наличие априорной информации о амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиках антенны. Для измерений АЧХ гидроакустических антенн разработаны стандартизированные методики. Разработке оригинальной методике измерения относительной ФЧХ гидроакустических антенн и экспериментальному исследованию их ФЧХ посвящена настоящая работа. Суть предлагаемой методики заключается в излучении исследуемым образцом антенны двухчастотного сигнала, его регистрации с помощью гидрофона и сравнения с подаваемым на антенну сигналом. Для этого на антенну подается два радиоимпульса опорной частоты, относительно которой будет определяться фазовый сдвиг, и исследуемой частоты. Радиоимпульсы следуют друг за другом без разрыва фазы. Измерения относительной разности фаз проводятся последовательно для каждой интересующей исследователя частоты относительно опорной. В результате экспериментальных исследований были получены зависимости сдвига фаз между радиоимпульсами, подаваемыми на антенну и излучаемыми ею, при условии, что на опорной частоте сдвиг фаз равнялся 0. То есть, полученная кривая ФЧХ по форме соответствует истинной, но отличается от нее на некоторое постоянно значение. В большинстве случаев для формирования и обработки сложных сигналов необходимо знать частотную зависимость приращения сдвига фаз. Из этого можно сделать вывод, что результаты измерений относительной ФЧХ предлагаемым методом содержат всю необходимую информацию для формирования и обработки сложных сигналов. Проведенное экспериментальное исследование показало эффективность предложенной методики определения относительной ФЧХ антенны. Применение предлагаемой методики позволит формировать фазоманипулированные сигналы.

Гидроакустика; гидроакустическая антенна; акустические измерения; фазо-частотная характеристика.

G.V. Soldatov

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING THE PHASE FREQUENCY RESPONSE OF HYDROACOUSTIC BROADBAND ANTENNA

Hydroacoustic means are widely used for carrying out environmental monitoring in different reservoirs and ground soil. Nowadays the most perspective direction in enhancement of hydroacoustic instruments is an application of aggregate broadband signals in a hydrolocation. Methods of formation and processing of aggregate signals assume existence of prior information on amplitude-frequency (AChH) and phase-frequency (FChH) characteristics of the antenna. The standardized techniques are developed for measurements of hydroacoustic antennas AChH. The present paper is devoted to the development of an original technique of measurement of the relative FChH of hydroacoustic antennas and the pilot study of their FChH. The essence of the offered technique consists in radiation of the double-frequency signal by the studied sample of the antenna, its registration by means of the hydrophone and comparing with the signal given on the antenna. For this purpose two radio-frequency pulses of reference frequency relative to which the phase shift will be defined, and the studied frequency are supplied to the antenna. Radio-frequency pulses follow one after another without rupture of a phase. Measurements of the relative phase difference are taken sequentially for each frequency which is interesting to the researcher and relative to the reference one. As a result of the pilot studies, dependences of phase shift between the radio-frequency pulses supplied to the antenna and radiated by it were received, on condition that the reference frequency phase shift was equal to 0. That is, the received FChH curve corresponds to the true one in the form, but differs from it on some constant value. In most cases for formation and processing of aggregate signals it is necessary to know the frequency dependence of an increment of phase shift. Thus, it is possible to draw a conclusion that results of measurements of the relative FChH by the offered method contain all necessary information for formation and processing of aggregate signals. The conducted pilot study showed efficiency of the offered technique of determination of the relative FChH of the antenna. Application of the offered technique will allow to create the phase manipulated signals.

Hydroacoustics; hydroacoustic antenna; acoustic measurements; phase-frequency characteristic.

Введение. За последние 30 лет произошел значительный скачок в развитии гидроакустических средств, с помощью которых проводят экологический мониторинг водных акваторий [1–3]. Это стало возможным благодаря совершенствованию элементной базы и увеличению мощности электронных вычислительных систем. Однако, в настоящее время темпы роста несколько замедлились. Это произошло после того, как все возможности аппаратуры для обработки, визуализации и принятия решений были исчерпаны. Следующий виток в развитии, по мнению авторов, возможен за счет появления новых гидроакустических средств и методов обработки гидроакустических сигналов.

Существенное повышение эффективности гидроакустических средств дистанционного мониторинга водоемов возможно путем применения сложных широкополосных сигналов в гидролокации [4–11]. Основным видом модуляции, применяемой в гидроакустических средствах, является частотная модуляция. Поэтому для формирования и обработки сложных частотно-модулированных сигналов необходимо знать фазо-частотную характеристику (ФЧХ) антенны, определению которой и посвящена настоящая работа.

Под фазо-частотной характеристикой антенны понимается разность фаз между напряжением (током), подаваемым на антенну, и скоростью колебаний излучающей поверхности антенны. ФЧХ зависит от типа пьезоэлемента и конструкции антенны [12–13]. ФЧХ антенны, при необходимости, может быть скорректирована с помощью дополнительных согласующих RCL цепей [12].

Типовые амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики колебательных систем [14–16] приведены на рис. 1. Для обеспечения максимального КПД диапазон рабочих частот приемоизлучающих гидроакустических антенны выбирают вблизи основного резонанса. Из рис. 1 видно, что максимальное приращение фазы наблюдается вблизи резонанса с переходом через 0 градусов. Изменение фазы может достигать 180 градусов. Поэтому для излучения и приема сложных сигналов вблизи основного резонанса антенны необходимо учитывать помимо АЧХ еще и ФЧХ.

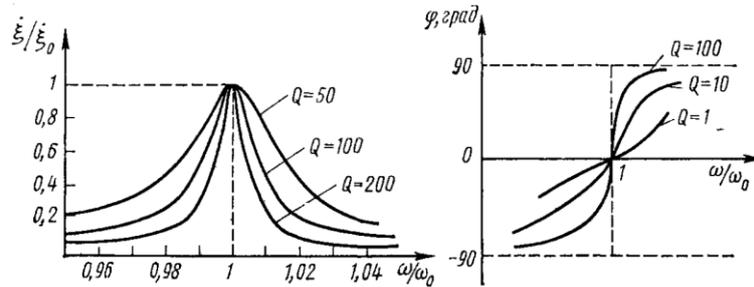


Рис. 1. АЧХ и ФЧХ колебательных систем

Измерения ФЧХ антенны связаны с некоторыми трудностями [18–20]. Во-первых, необходимо исключить пространственный набег фаз. Во-вторых, нужно учитывать частотную зависимость пространственно-фазовое поле антенны. В-третьих, необходимо знать ФЧХ приемного гидрофона. В-четвертых, измерения нужно проводить в условиях открытого пространства в гидроакустическом бассейне.

Задачей данного исследования является поиск соответствия характеристик частотно-модулированного (фазо-модулированного) акустического сигнала, измеренного на геометрической оси в дальнем поле антенны, электрическому сигналу, поданному на выводы исследуемой антенны. Для измерения фазо-частотной характеристики антенны необходимо исключить пространственный набег фаз. На сегодняшний день решение этой задачи мной не найдено. Однако, частотную зависимость приращения сдвига фаз на разных частотах относительно сдвига фаз на опорной частоте определить можно. Назовем частотную зависимость приращения сдвига фаз между электрическим напряжением на выводах антенны и акустическим давлением в дальнем поле антенны относительной фазо-частотной характеристикой антенны.

Методика определения ФЧХ гидроакустических антенн. Определение относительной ФЧХ антенны предлагается проводить следующим образом. Подать на выводы антенны специальный сигнал, представляющий собой два радиоимпульса излучаемых один за другим без задержки и без разрыва фазы, и записать сигнал первым каналом АЦП. Принять сигнал гидрофоном и записать вторым каналом АЦП. Гидрофон следует располагать таким образом, чтобы разность хода лучей от элементов излучающей поверхности антенны была много меньше длины волны, то есть на геометрической оси в дальнем поле антенны.

Пример специального сигнала, подаваемого на выводы антенны, приведен на рис. 2. Первый радиоимпульс (опорный) имеет частоту заполнения равную 20 кГц, а второй радиоимпульс (исследуемый) – 30 кГц.

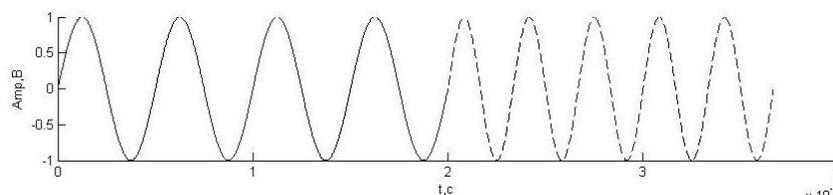


Рис. 2. Форма сигнала на выводах антенны

Если сдвиг фаз между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением не меняется в зависимости от частоты, то форма сигнала, измеренная на гидрофоне, должна совпадать с формой сигнала, измеренной на выводах антенны (рис. 2).

В случае наличия частотной зависимости сдвига фаз между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением, в принятом гидрофоном сигнале возникнет разрыв по фазе на стыке радиоимпульсов как показано на рис. 3. Для наглядности разность фаз задана 180 градусов.

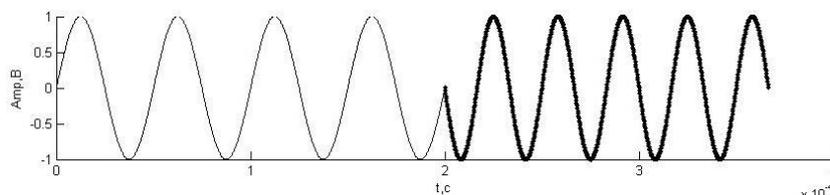


Рис. 3. Форма сигнала, принятого гидрофоном

Для определения частотной зависимости приращения сдвига фаз между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением в дальнем поле антенны нужно совместить сигнал, поданный на антенну, и сигнал, принятый гидрофоном таким образом, чтобы фазовый сдвиг между опорными радиоимпульсами был равен 0. Таким образом, исключается пространственный набег фаз. В случае отсутствия частотной зависимости приращения фазового сдвига между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением, сдвиг фаз между вторыми радиоимпульсами также будет равен 0. На рис. 4 показаны совмещенные сигналы при наличии приращения с частотой сдвига фаз между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением в дальнем поле антенны.

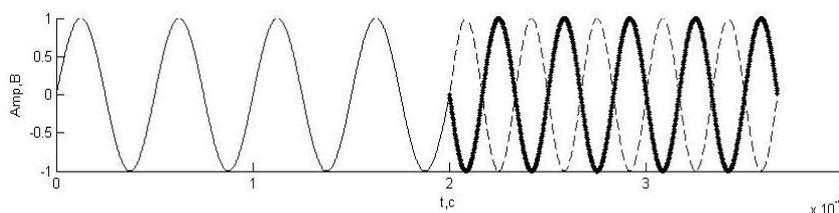


Рис. 4. Совмещение сигнала, поданного на антенну, с сигналом, принятым гидрофоном

Частотная зависимость приращения сдвига фаз между напряжением на выводах антенны и акустическим давлением в дальнем поле антенны относительно опорной частоты определяется путем измерения фазового сдвига между вторыми (исследуемыми) радиоимпульсами.

Экспериментальные исследования ФЧХ гидроакустических антенн. Экспериментальные исследования проводились в гидроакустическом бассейне Уникальной научной установки «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс». В качестве образцов использовались две антенны с близкими резонансными частотами 16 кГц и 21 кГц. Исследования проводились в диапазоне частот от 16 до 30 кГц.

Экспериментальное измерение ФЧХ предлагаемой методикой предполагает наличие гидрофона с известной ФЧХ. В нашем случае, использовался высокочастотный гидрофон 8103 фирмы Брюль и Кьер, ФЧХ которого, на частотах проведения эксперимента, была практически линейной, так как диапазон частот исследования значительно ниже резонансной частоты гидрофона.

Относительная ФЧХ определялась для антенн №1 и №2 на установке, упрощенная структурная схема которой приведена на рис. 5.

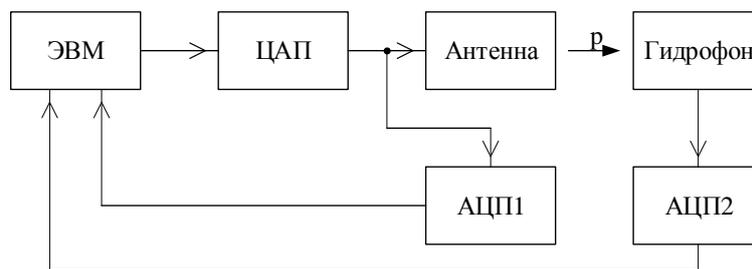


Рис. 5. Структурная схема установки для измерения относительной ФЧХ антенны

Работа на экспериментальной установке проводилась следующим образом. В ЭВМ формировался специальный сигнал, состоящий из двух радиоимпульсов. Опорная частота была выбрана равной 20 кГц. Сформированные в ЭВМ радиоимпульсы длительностью 7 периодов несущими частотами 16, 25 и 30 кГц записывались в ЦАП генератора Agilent 33220a. С выхода ЦАП специальный сигнал подавался на антенну. Напряжение на выводах антенны измерялось АЦП1. Напряжение на выходе гидрофона измерялось АЦП2. В качестве АЦП применялась система сбора данных LCard E20-10. Далее в ЭВМ осуществлялось совмещение сигналов и вычисление сдвига фаз согласно приведенной выше методике.

На рис. 6 и 7 приведены результаты экспериментального определения приращения сдвига фаз между опорным радиоимпульсом несущей частотой 20 кГц (первая половина сигнала) и радиоимпульсом с несущей частотой 16 кГц (вторая половина сигнала). На рис. 6 показаны сигналы, измеренные на выводах антенны (кривая 1) и на выводах гидрофона (кривая 2).

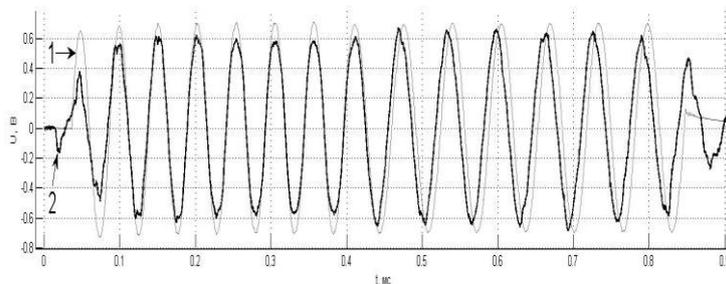


Рис. 6. Сигналы, измеренные на выводах антенны (кривая 1) и с помощью гидрофона (кривая 2)

На рис. 7 приведены амплитудные спектры сигналов, измеренных на выводах антенны (график слева) и с помощью гидрофона (график справа).

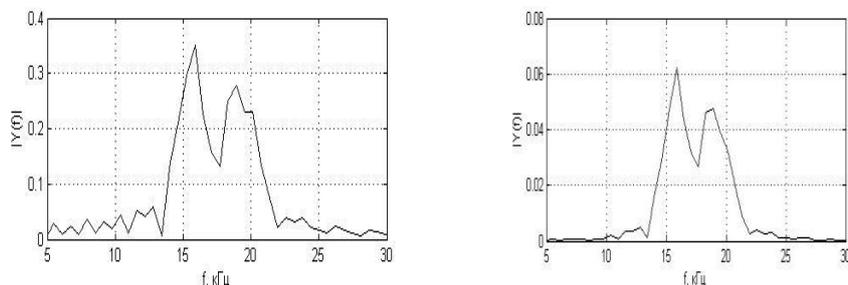


Рис. 7. Амплитудные спектры сигналов, измеренных на выводах антенны (график слева) и с помощью гидрофона (график справа)

Приращение сдвига фаз между опорным радиоимпульсом несущей частотой 20 кГц и радиоимпульсом с несущей частотой 16 кГц после совмещения сигналов составило -39° .

Результаты измерений частотной зависимости приращения сдвига фаз приведены в таблице 1. Во втором столбце табл. 1 приведены фазовые сдвиги между акустическим давлением, измеренным на исследуемой частоте (16, 25, 30 кГц) относительно измеренного на опорной частоте 20 кГц антенны №1. В третьем столбце приведены фазовые сдвиги между акустическим давлением, измеренным на исследуемой частоте (16, 25, 30 кГц) относительно измеренного на опорной частоте 20 кГц антенны №2.

Таблица 1

Фазовые сдвиги между акустическим давлением, измеренным на исследуемой частоте (16, 25, 30 кГц) относительно измеренного на опорной частоте 20 кГц

Частота, кГц	Антенна 1, сдвиг фаз отн. 20 кГц, град.	Антенна 2, сдвиг фаз отн. 20 кГц, град.
16	-39	-31
20	0	0
25	4	88
30	-40	102

Относительные ФЧХ антенн 1 и 2 приведены на рис. 8. Для наглядности к кривым добавлено смещение в область значений, соответствующих теоретическим на рис. 1.

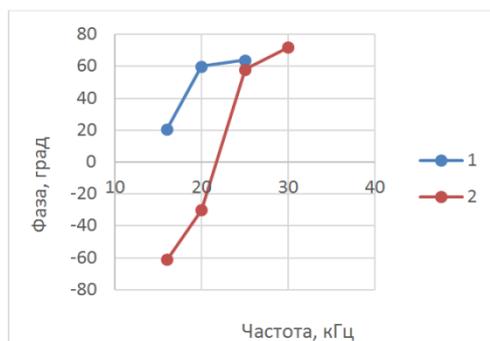


Рис. 8. Относительные ФЧХ антенн 1 и 2

Характер экспериментально полученных кривых частотной зависимости приращения фазового сдвига совпадает с теоретическими кривыми на рис. 1 с учетом того, что частоты основного резонанса антенн составляли 16 и 21 кГц.

Заключение. Разработанная методика позволяет определить относительную ФЧХ в условиях гидроакустического бассейна. Проведенное экспериментальное исследование показало эффективность предложенной методики определения относительной ФЧХ антенны. Применение предлагаемой методики для определения ФЧХ и стандартных методик для определения АЧХ позволит существенно повысить качество формирования сложных сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Солдатов Г.В., Тарасов С.П., Пивнев П.П.* Методы определения акустических свойств и структуры морского дна с использованием параметрической антенны // Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012. – С. 416-419.
2. *Солдатов Г.В.* Определение параметров донных осадков дистанционными методами в целях экологического мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 9 (122). – С. 88-93.
3. *Солдатов Г.В., Тарасов С.П., Каевицер В.И., Захаров А.И., Смольянинов И.В.* Определение скорости звука в донных отложениях при экологическом мониторинге // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/p4p2y2015/3480> (дата обращения: 1.10.2016).
4. *Пивнев П.П., Воронин В.А.* Применение многокомпонентных сигналов для повышения дальности действия ГАС с параметрическими антеннами в волноводах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 29-34.
5. *Gowski J. Te, Lubniewski Z.* Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acoustica // Acta Acoustica.* – 2002. – № 88. – P. 623-626.
6. *Atallah L., Probert Smith P.J.* Using Wavelet Analysis to Classify and Segment Sonar Signals Scattered from Underwater Sea Beds // *Acta Acoustica.* – 2002. – No. 88 – P. 627-631.
7. *Medwin H., Clay C.S.* *Fundamentals of Acoustical Oceanography.* - Wiley-Interscience, 1977. – 580 p.
8. *Istapanian R.S.H., Stojanovic M. (eds.)* *Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems.* – Springer, 2002. – 283 p.
9. *Tohyama M., Koike T.* *Fundamentals of Acoustic Signal Processing.* - Academic Press, 1998. – 334 p.
10. *Merklinger H.M. (ed.)* *Progress in Underwater Acoustics.* - Plenum Press, Plenum Publishing, 1987. - 839 p.
11. *Moura J.M.F., Lourtie I.M.G.* *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration.* – Springer, 1993. - 671 p.
12. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. – СПб.: Политехника, 2014. – 294 с.
13. *Sherman Charles H., Butler John L.* *Transducers and Arrays for Underwater Sound.* – Springer, 2007. - 610 p.
14. *Лепендин Л.Ф.* Акустика: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.
15. *Исакович М.А.* Общая акустика: учеб. пособие. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
16. *Etter P.C.* *Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques and Applications.* - E & FN Spon, 1996. - 303 p.
17. *Колесников А.Е.* Акустические измерения. – Л.: Судостроение, 1983. – 256 с.
18. *Боббер Р.Дж.* Гидроакустические измерения. - М.: Мир, 1974. – 361 с.
19. *Urick R.J.* *Principles of Underwater Sound, 3rd Edition.* - New York: McGraw-Hill, 1983. – 423 p.
20. *Таранов Э.С., Тюрин А.М., Сташкевич А.П.* Гидроакустические измерения в океанологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 325 с.

REFERENCES

1. *Soldatov G.V., Tarasov S.P., Pivnev P.P.* Metody opredeleniya akusticheskikh svoystv i struktury morskogo dna s ispol'zovaniem parametricheskoy anteny [Methods of determining acoustic properties and structure of the seabed using parametric antenna], *Vserossiyskaya konferentsiya «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [All-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics"]. St. Petersburg: Nauka, 2012, pp. 416-419.
2. *Soldatov G.V.* Opredelenie parametrov donnykh osadkov distantsionnymi metodami v tselyakh ekologicheskogo monitoringa [Defining the parameters of bottom sediments remote sensing for environmental monitoring], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 9 (122), pp. 88-93.
3. *Soldatov G.V., Tarasov S.P., Kaevitser V.I., Zakharov A.I., Smolyaninov I.V.* Opredeleniya skorosti zvuka v donnykh otlozheniyakh pri ekologicheskom monitoringe [The definitions of the speed of sound in the sediments under environmental monitoring], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2015, No. 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3480> (accessed 1 October 2016).
4. *Pivnev P.P., Voronin V.A.* Primenenie mnogokomponentnykh signalov dlya povysheniya dal'nosti deystviya GAS s parametricheskimi antennami v volnovodakh [The use of multi-component signals to increase the range of action of GAS parametric antennas waveguides], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 29-34.
5. *Gowski J. Te, Lubniewski Z.* Seabed Characterization Using Spectral Moments of the Echo Signal. *Acoustica, Acta Acoustica*, 2002, No. 88, pp. 623-626.
6. *Atallah L., Probert Smith P.J.* Using Wavelet Analysis to Classify and Segment Sonar Signals Scattered from Underwater Sea Beds, *Acta Acoustica*, 2002, No. 88, pp. 627-631.
7. *Medwin H., Clay C.S.* Fundamentals of Acoustical Oceanography. Wiley-Interscience, 1977, 580 p.
8. *Istapanian R.S.H., Stojanovic M. (eds.)* Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication Systems. Springer, 2002, 283 p.
9. *Tohyama M., Koike T.* Fundamentals of Acoustic Signal Processing. Academic Press, 1998, 334 p.
10. *Merklinger H.M. (ed.)* Progress in Underwater Acoustics. Plenum Press, Plenum Publishing, 1987, 839 p.
11. *Moura J.M.F., Lourtie I.M.G.* Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration. Springer, 1993, 671 p.
12. *Konovalov S.I., Kuz'menko A.G.* Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektroakusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovately [Features of pulse modes electroacoustic piezoelectric transducers]. St. Petersburg: Politekhnik, 2014, 294 p.
13. *Sherman Charles H., Butler John L.* Transducers and Arrays for Underwater Sound. Springer, 2007, 610 p.
14. *Lependin L.F.* Akustika: ucheb. posobie dlya vuzov [Acoustics: proc. manual for schools]. Moscow: Vyssh. shkola, 1978, 448 p.
15. *Isakovich M.A.* Obshchaya akustika: ucheb. posobie [General acoustics: proc. Allowance]. Moscow: Nauka, 1973, 495 p.
16. *Etter P.C.* Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques and Applications. E & FN Spon, 1996, 303 p.
17. *Kolesnikov A.E.* Akusticheskie izmereniya [Acoustic measurements]. Leningrad: Sudostroenie, 1983, 256 p.
18. *Bobber R.Dzh.* Gidroakusticheskie izmereniya [Underwater electroacoustic measurements]. Moscow: Mir, 1974, 361 p.
19. *Urlick R.J.* Principles of Underwater Sound, 3rd Edition. New York: McGraw-Hill, 1983, 423 p.
20. *Taranov E.S., Tyurin A.M., Stashkevich A.P.* Gidroakusticheskie izmereniya v okeanologii [Hydroacoustic measurements okeanology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 325 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Тарасов.

Солдатов Геннадий Валерьевич - Южный федеральный университет; e-mail: gsoldatov@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Александровская, 62, кв. 20; ассистент.

Soldatov Gennady Valerievich - Southern Federal University; e-mail: gsoldatov@sfedu.ru; 62, Alexandrovskaya street, ap. 20, Taganrog, 347922, Russia; assistant.