

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 534.143

**АВТОНОМНАЯ НИЗКОЧАСТОТНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ СТАНЦИЯ С  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

© 2020 г. А. А. Пивоваров<sup>а,\*</sup>, И. О. Ярошук<sup>а</sup>, А. Н. Швырев<sup>а</sup>, А. Н. Самченко<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

\*e-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 26.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Гидроакустическая излучающая станция с электромагнитным преобразователем развивает акустическое давление до 2400 Па (188 дБ), приведенное к расстоянию 1 м от оси излучателя, в диапазоне частот 420–520 Гц (по уровню –3 дБ) и обладает рабочей глубиной погружения до 500 м. Примененные технические решения позволяют использовать станцию для широкого круга океанологических исследований, а также при построении систем навигации подводных аппаратов и передачи данных по гидроакустическому каналу.

DOI: 10.31857/S0032816220050341

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из перспективных методов для решения задач акустической томографии в океане является зондирование водной среды с помощью широкополосных когерентных (частотно-модулированных, фазоманипулированных) гидроакустических сигналов на стационарных исследовательских трассах. Для излучения сигналов различных типов наиболее удобным и практичным является применение автономных донных гидроакустических излучающих станций [1]. Постановка излучателя на якорь или на дно дает возможность стабилизировать измерительные трассы распространения сигнала, а автономность излучателя позволяет проводить работы в произвольной акватории, не привязываясь к береговой инфраструктуре.

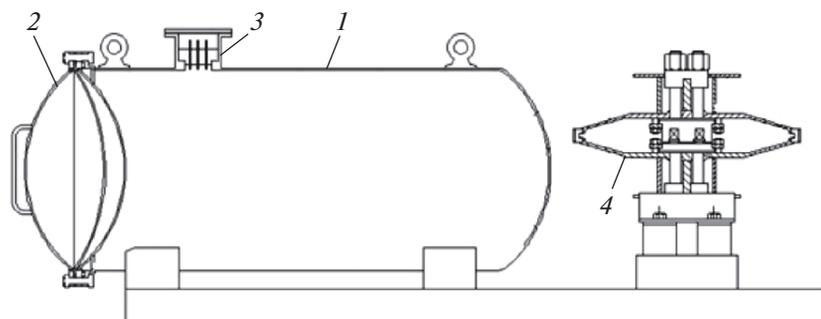
Для проведения натуральных экспериментов по решению исследовательских задач в области океанологии и акустической томографии сотрудниками лаборатории “Статистического моделирования” Тихоокеанского океанологического института была сконструирована и изготовлена автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция.

В данной статье рассматриваются конструктивные решения и применение автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической станции с электромагнитным преобразователем, создающей акустическое давление до 2400 Па в диапазоне частот 420–520 Гц [2], а также представлены некото-

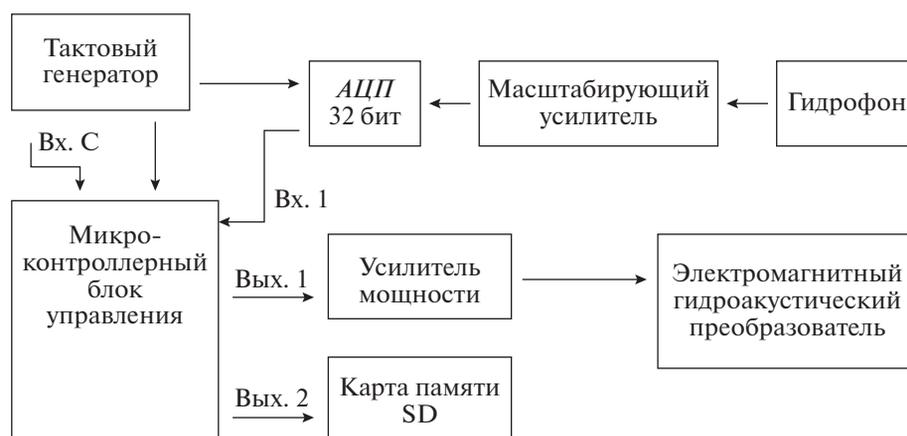
рые результаты океанологических исследований с использованием этой станции, проведенных на шельфе Японского моря в октябре 2019 года.

Основными требованиями к станции являлись: минимизация массогабаритных характеристик (общий вес не более 100 кг), автономность не менее 3-х суток, рабочий частотный диапазон 420–520 Гц, акустическое давление в рабочем диапазоне, приведенное к 1 м, не менее 2000 Па, возможность синхронизации с другими устройствами и наличие приемного гидрофона для записи акустических сигналов. Дополнительной опцией является возможность использовать автономную излучающую станцию в качестве ретранслятора гидроакустических сигналов и маяка для позиционирования подводных аппаратов.

В качестве электроакустического преобразователя, исходя из требований к срокам автономности, массогабаритным характеристикам и излучаемой акустической мощности станции, был выбран оптимальным преобразователь электромагнитного типа. Электромагнитные преобразователи в данном частотном диапазоне обладают рядом преимуществ: они просты в изготовлении и обслуживании, обладают наиболее высокими удельной мощностью и электроакустическим к.п.д. по сравнению с пьезоэлектрическими и электродинамическими преобразователями [3, 4]. Кроме того, для задач подводного позиционирования и ретрансляции гидроакустических сигналов, а также обработки и интерпретации полученных в океанологических



**Рис. 1.** Конструктивный вид автономной станции. 1 – герметичный корпус; 2 – компенсатор гидростатического давления; 3 – приемный гидрофон; 4 – электромагнитный гидроакустический преобразователь.



**Рис. 2.** Функциональная схема автономной станции.

исследованиях натурных данных, существует необходимость в наличии канала синхронизации с различными устройствами и регистрации гидроакустических сигналов.

### ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

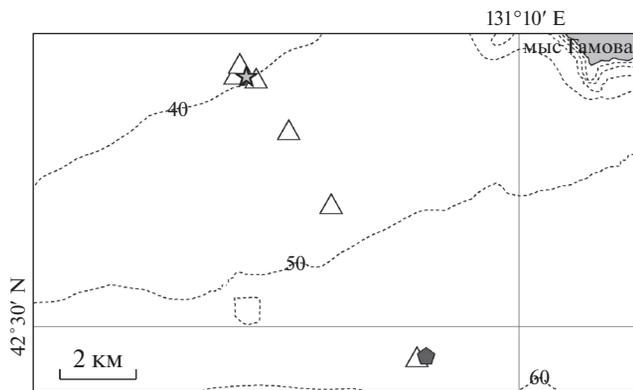
Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция (рис. 1) состоит из следующих элементов: стального герметичного контейнера 1 и электромагнитного гидроакустического преобразователя 4, закрепленных на металлической раме через виброизолирующие демпферные крепежные элементы. На контейнере расположен компенсатор гидростатического давления в акустически жестком корпусе 2 и приемный гидрофон 3.

Во внутренней полости герметичного контейнера находятся аккумуляторная батарея, термостатированный высокостабильный кварцевый генератор тактовой частоты (см. рис. 2, где приведена функциональная схема станции), микроконтроллерный блок управления, соединенный последовательным синхронным интерфейсом с блоком энергонезависимой твердотельной SD-

памяти, подключенный к блоку управления канал регистрации гидроакустического поля в составе гидрофона, масштабирующего усилителя и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а также подключенный к выходу микроконтроллерного блока управления усилитель мощности, соединенный с электромагнитным гидроакустическим преобразователем.

Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая станция работает следующим образом. Во время подготовки излучающей станции к работе накачивается воздухом компенсатор гидростатического давления для электромагнитного преобразователя и устанавливается аккумуляторная батарея питания. При включении питания усилитель мощности переходит в режим ожидания сигнала с микроконтроллерного блока управления.

Микроконтроллерный блок управления, изготовленный на базе микроконтроллера PIC32MM0064GPL036, коммутирует "Вх. 1" приемного тракта опорного гидрофона и переходит в режим ожидания внешнего синхросигнала запуска работы системы, подаваемого на "Вх. С".



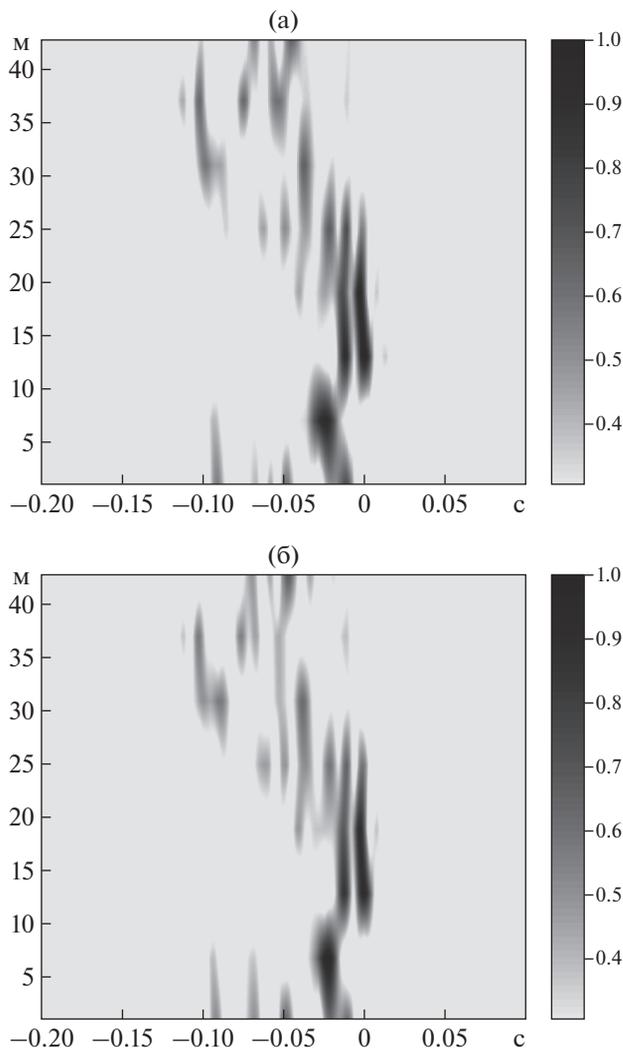
**Рис. 3.** Схема натурального эксперимента. Звездочкой отмечено место постановки автономной излучающей станции, пятиугольником – точка установки вертикальной приемной 8-элементной антенны, треугольниками обозначены места установки автономных термогирлянд.

Это может быть сигнал с устройства точного времени (Глонасс, GPS) или внешний синхронизирующий импульс. В дальнейшем синхронизация поддерживается с помощью высокостабильного тактового генератора.

Тактовая частота для микроконтроллерного блока управления и АЦП приемного гидрофона подается с высокостабильного термостатированного тактового генератора МХО37/8Р. При поступлении на “Вх. С” микроконтроллерного блока управления внешнего сигнала запускается программа формирования и передачи на усилитель мощности излучаемого сигнала, а также преобразования и записи гидроакустического сигнала, поступающего на “Вх. 1”.

Сигнал с гидрофона ЭПБА (3, рис. 1) проходит через масштабирующий усилитель с фильтром низкой частоты и поступает на 32-битный АЦП (рис. 2), а далее по SPI-протоколу на цифровой вход (Вх. 1) микроконтроллерного блока управления. Данные накапливаются в буфере памяти блока управления и затем блоками выдаются на цифровой выход (Вых. 2) для записи на энергонезависимую SD-карту памяти емкостью 128 Гбайт, что позволяет обеспечить непрерывность записи на срок до трех месяцев.

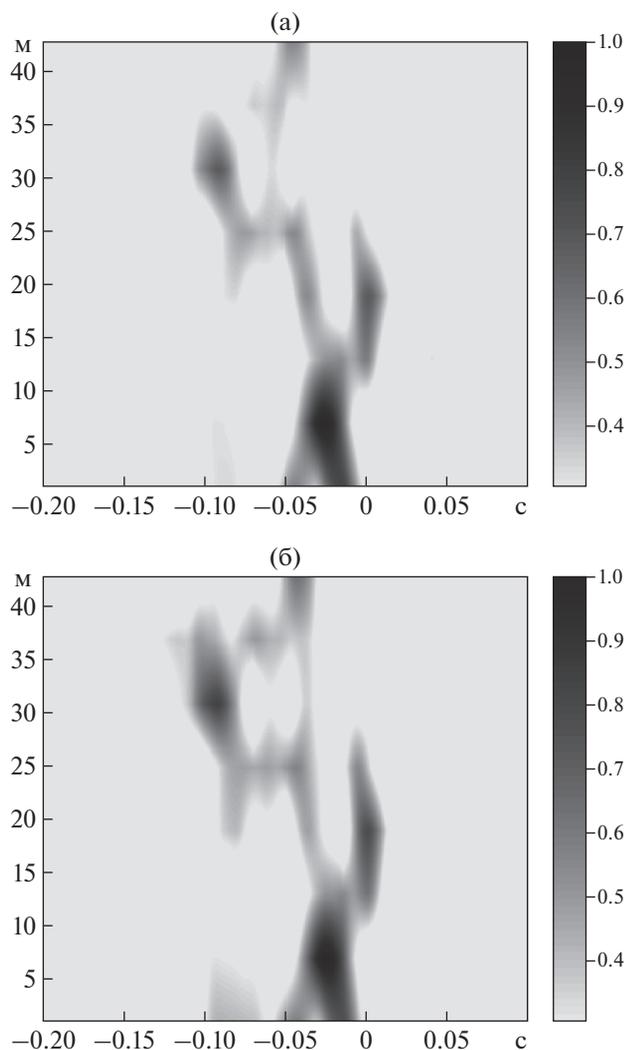
Сигнал, формируемый по заданной программе, с микроконтроллерного блока управления подается через аналоговый выход (Вых. 1) на усилитель мощности и далее на электромагнитный гидроакустический преобразователь, и происходит излучение гидроакустического сигнала в водную среду. Формирование типов и продолжительности сигналов определяется программой и выбирается из условий и задач применения излучающей станции.



**Рис. 4.** Распределение максимумов корреляционной функции для линейного свип-сигнала 400–560 Гц продолжительностью 2 с (а), 10 с (б).

Использование фазоманипулированного, частотно-модулированного зондирующего сигнала и наличие синхронизации с другими устройствами позволяет расширить область применения автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической излучающей станции в направлении построения системы передачи данных по гидроакустическому каналу и позиционирования для подводных аппаратов в произвольной акватории, а также расширения возможностей в области акустической томографии водной среды.

В режиме подводного маяка для позиционирования подводных аппаратов несколько таких станций устанавливаются на дно в районе использования подводных аппаратов и периодически излучают фазоманипулированные сигналы на различных несущих частотах в границах рабочего диапазона. На подводных аппаратах устанавли-



**Рис. 5.** Распределение максимумов корреляционной функции для фазоманипулированного сигнала длиной 63 символа (а) и 255 символа (б) на несущей 480 Гц.

ливаются приемный гидрофон и специальный блок обработки данных. В памяти блока находятся точные координаты постановки автономных излучателей и опорные сигналы соответствующих им частот, а также точное синхронизированное время их излучения.

Затем в блоке обработки проводится операция свертки полученного с приемного гидрофона сигнала с опорными сигналами, в результате которой получаются времена прохождения сигнала от маяков до подводного аппарата и, зная среднюю скорость звука в данной акватории, методом триангуляции определяется текущее положение аппарата.

Благодаря использованию микроконтроллерного блока управления и наличию канала приемного гидрофона, с помощью соответствующей модификации управляющей программы также существует возможность передачи телеметрической информа-

ции и ретрансляции сигналов других станций с целью построения распределенной информационной системы для выбранной акватории. И хотя гидроакустический канал в пределах частотного диапазона станций обладает сравнительно низкой пропускной способностью, но для широкого класса задач по передаче команд и данных телеметрии этого вполне достаточно.

### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В октябре 2019 года в Японском море в акватории залива Посьета был проведен натурный эксперимент с применением автономной низкочастотной широкополосной гидроакустической излучающей станции, вертикальной приемной гидроакустической антенны и автономных термогирлянд [5]. Эксперимент проводился с целью верификации модели расчета интерференционной структуры низкочастотного гидроакустического поля в условиях мелкого моря, оптимизации методики применения и параметров сложных широкополосных гидроакустических сигналов, а также изучения взаимодействия низкочастотного гидроакустического поля с полем внутренних волн.

Схема эксперимента представлена на рис. 3. В узловой точке находилась автономная излучающая станция на глубине 38 м. В ходе эксперимента от автономной излучающей станции в течение полутора суток шло излучение последовательно из нескольких широкополосных сигналов с периодом 300 с. В состав сигналов входили линейные свип-сигналы в полосе 400–560 Гц продолжительностью 10 и 2 с, а также два фазоманипулированных сигнала в виде псевдослучайных последовательностей длиной 63 и 255 символов по 10 периодов на символ на несущей частоте 480 Гц.

Прием осуществлялся на 8-элементную вертикальную приемную антенну, расположенную на расстоянии 8 км от излучающей станции в направлении свала глубин в точке с глубиной места 56 м, составленную из синхронизированных регистраторов гидроакустического поля [6]. Регистраторы расположены в следующем порядке — первый на высоте 1 м от дна, следующие семь с периодом 6 м друг от друга.

Также на время эксперимента было установлено 6 многоэлементных автономных термогирлянд. Три термогирлянды стояли треугольником стороной 500 м вблизи точки постановки донной станции — для определения направления распространения фронта внутренних волн. Одна термогирлянда находилась в непосредственной близости от приемной вертикальной антенны и две термогирлянды располагались по трассе распространения гидроакустического сигнала.

На рис. 4 и 5 проиллюстрированы результаты натурального эксперимента в виде корреляционных функций для разных типов сигналов, полученных в результате свертки принятого сигнала с его маской. Интерпретировать максимумы корреляционной функции можно как волновые пакеты (моды), распространяющиеся с некоторой групповой скоростью. На графиках по оси  $Y$  приведено расстояние от дна в метрах, по оси  $X$  указано время в секундах относительно прихода сигнала с максимальной амплитудой корреляционной функции, а интенсивностью цвета отмечено значение нормированной корреляционной функции. На рисунках можно наглядно оценить скорость распространения мод и распределение их интенсивности по глубине.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании излучающей станции были полностью удовлетворены требования к срокам автономности, массогабаритным характеристикам и излучаемой мощности. Предлагаемые технические решения, в том числе за счет установки электромагнитного гидроакустического преобразователя, позволяют станции излучать с высоким качеством и к.п.д. в пределах рабочего диапазона гармонические, частотно-модулированные и фазоманипулированные сигналы. Кроме того, включение в состав оборудования излучающей станции высокоточного тактового генератора, канала синхронизации с другими устройствами и канала записи с гидрофона, расширяет перечень используемых методик для задач акустической томографии, дает возможность использования станции в качестве подводных маяков для позиционирования

подводных аппаратов, а также передачи ретрансляции данных по гидроакустическому каналу.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Автономная станция создана в рамках реализации государственных заданий: АААА-А17-117030110031-6 “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в условиях глубокого и мелкого моря”, АААА-А20-120021990003-3 “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана” и программы “Дальний Восток” 18-И-004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутенко А.Н. // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 5. С. 662.
2. Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. Патент на полезную модель 176198 РФ // Оpubл. 12.01.2018. Бюл. № 2.
3. Стробыкин Д.С., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцева А.А. // ПТЭ. 2018. № 2. С. 124. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020277>
4. Долгих Г.И., Чупин В.А., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Яковенко С.В., Ярошук И.О. // ПТЭ. 2017. № 4. С. 137. <https://doi.org/10.7868/S0032816217030181>
5. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. // ПТЭ. 2017. № 1. С. 128. <https://doi.org/10.7868/S0032816216060227>
6. Леонтьев А.П., Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н. Патент на полезную модель 171967 РФ // Оpubл. 20.03.2017. Бюл. № 18.