

УДК 534+502+504

© А. К. Бритенков<sup>1,2</sup>, О. В. Машукова<sup>3</sup>, Б. Н. Боголюбов<sup>1</sup>, Е. Н. Сибирицова<sup>3</sup>, Е. Н. Скуратовская<sup>3</sup>, А. В. Мельник<sup>3</sup>, М. И. Силаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН. 603950, ул. Ульянова, д. 46, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 603950, пр. Гагарина, д. 23, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Московское представительство Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН. 119991, Ленинский пр., д. 38, г. Москва, Россия

\*E-mail: brittenkov@ipfran.ru

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НА МОРСКИЕ СВЕЯЩИЕСЯ ПЛАНКТОННЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Статья поступила в редакцию 09.09.2020, после доработки 29.10.2020

Акустическое загрязнение является опасной антропогенной нагрузкой на экосистемы Мирового океана. В настоящее время гидроакустические излучатели широко используются для решения разнообразных научных и прикладных задач, уже не ограничиваясь традиционными задачами дальней звукоподводной связи, телеуправления, освещения подводной обстановки, акустической термометрии океанского климата, мониторинга подводных объектов, геолого-, сейсмо- и рыбопромысловой разведки. Во многих из перечисленных приложений, в частности в задачах обеспечения дальней звукоподводной связи, а также при проведении геолого- и сейсморазведки, необходимы мощные источники низкочастотных гидроакустических полей. Создаваемое такими гидроакустическими излучателями звуковое давление достигает нескольких тысяч, а в некоторых случаях — десятков тысяч Па (приведённых к 1 м). Воздействие звуковых полей такой интенсивности на гидробионтов практически не изучено. Основной проблемой подобных исследований является сложность регистрации результатов воздействия мощных акустических полей на морские экосистемы. Настоящая работа посвящена разработке методики проведения исследований влияния мощных низкочастотных звуковых полей на светящиеся планктонные морские организмы. Методика основана на определении параметров биолюминесценции, являющейся одним из важнейших индикаторов функционального состояния гидробионтов.

**Ключевые слова:** гидроакустика, гидроакустический преобразователь, гидробионты, планктон, биолюминесценция.

© А. К. Бритенков<sup>1,2</sup>, О. В. Машукова<sup>3</sup>, Б. Н. Боголюбов<sup>1</sup>, Е. Н. Сибирцова<sup>3</sup>, Е. Н. Скуратовская<sup>3</sup>, А. В. Мельник<sup>3</sup>, М. И. Силаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of RAS. 603950, Ulyanova Str., 46, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. 603950, Gagarina Pr., 23, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup>Moscow Branch of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS. 119991, Leninsky Pr., 38, Moscow, Russia

\*E-mail: brittenkov@ipfran.ru

## METHODOLOGY FOR STUDYING THE EFFECT OF LOW-FREQUENCY HIGH-INTENSITY ACOUSTIC FIELDS ON MARINE LUMINOUS PLANKTONIC ORGANISMS

Received 09.09.2020, in final form 29.10.2020

«Acoustic pollution» is a dangerous anthropogenic load on the ecosystems of the World Ocean. At present, hydroacoustic emitters are widely used to solve a variety of scientific and applied problems, no longer limited to the traditional tasks of long-distance sound underwater communications, remote control, illumination of the underwater environment, acoustic thermometry of the ocean climate, monitoring of underwater objects, geological, seismic and fishery exploration. In many of the above mentioned applications, in particular in the tasks of providing long-distance sound underwater communication as well as in conducting

Ссылка для цитирования: Бритенков А.К., Машукова О.В., Боголюбов Б.Н., Сибирицова Е.Н., Скуратовская Е.Н., Мельник А.В., Силаков М.И. Методика исследования влияния низкочастотных акустических полей высокой интенсивности на морские светящиеся планктонные организмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 65–77. doi: 10.7868/S2073667321020064

For citation: Britenkov A.K., Mashukova O.V., Bogolyubov B.N., Sibirtsova E.N., Skuratovskaya E.N., Melnik A.V., Silakov M.I. Methodology for Studying the Effect of Low-Frequency High-Intensity Acoustic Fields on Marine Luminous Planktonic Organisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021, 14, 2, 65–77. doi: 10.7868/S2073667321020064

geological and seismic exploration, powerful sources of low-frequency hydroacoustic fields are needed. The sound pressure created by such hydroacoustic emitters reaches several thousand, and in some cases — tens of thousands of Pa (reduced to 1 m). The effect of sound fields of such intensity on aquatic organisms has hardly been studied. The main problem of such studies is the difficulty in recording the impact of powerful acoustic fields on marine ecosystems. This work is devoted to the development of a methodology for researching the influence of powerful low-frequency sound fields on luminous planktonic marine organisms. The methodology is based on determining the parameters of bioluminescence, which is one of the most important indicators of the functional state of aquatic organisms.

**Key words:** hydro-acoustics, hydroacoustic transducer, hydrobionts, plankton, bioluminescence.

## 1. Введение

Спектр приложений низкочастотных гидроакустических излучателей (НЧИ) достаточно обширен: от дальней звукоподводной связи и телеуправления до сейсмоакустической разведки [1]. Основной особенностью низкочастотного диапазона является слабое затухание звука при распространении на большие расстояния, что подтверждают результаты экспериментов по передаче гидроакустических сигналов на расстояния в несколько сотен километров и более [2]. Мощные НЧИ с рабочей полосой частот шириной до 30 % от основной резонансной частоты в отличие от высокочастотных спектральных диапазонов [3] позволяют использовать диапазон частот до 1 кГц [1] в качестве перспективного диапазона для сверхдальней связи и освещения подводной обстановки в целях мониторинга и решения других задач [4–6].

Увеличение дальности действия гидроакустических средств требует создания звукового давления в непосредственной близости НЧИ на уровне 10 кПа и выше. Стремительно растущее разнообразие приложений мощной низкочастотной гидроакустики одновременно с нарастанием темпов освоения Мирового океана во второй половине XX века вызвало динамичный рост количества излучающих систем [6] и увеличение максимально возможного уровня излучаемых звуковых сигналов. Последнее обстоятельство неизбежно приводит к «шумовому загрязнению» крупных и мелких акваторий морей и Мирового океана в целом.

Опасность шумового загрязнения Мирового океана в XXI в. становится критической для естественного функционирования морских экосистем. Звуки двигательных установок и шумы винтов судов уже не являются доминирующими в энергетическом наполнении звуковых полей морских акваторий. Излучаемая современными гидроакустическими преобразователями акустическая мощность настолько высока, что при недостаточной глубине расположения НЧИ излучение сопровождается кавитацией, поскольку развиваемое звуковое давление превышает критическое значение давления в жидкости. Число кавитации

$$\chi = \frac{P_0 - P_s}{P_a}, \quad (1)$$

где  $P_s$  — давление насыщенного пара в воде при текущей температуре,  $P_a$  — амплитуда звукового давления,  $P_0$  — гидростатическое давление, т.е. амплитудой понижения давления в жидкости, определяет момент возникновения кавитации как критическое число  $\chi_k$ , которому соответствует критическое значение звукового давления  $P_a = P_k$ . Таким образом, звук с высокой плотностью энергии при распространении в воде изменяет её локальное агрегатное состояние.

С другой стороны, возможные уровни акустической мощности излучаемых современными гидроакустическими средствами звуковых сигналов не только превышают болевой порог для крупных морских животных, но и способны приводить к необратимым физиологическим изменениям морских макро- и микроорганизмов [7]. Вертикальные и горизонтальные перемещения как реакции избегания свойственны не только пелагическим и придонным рыбам [8], но и морским млекопитающим: киты и дельфины, спасаясь от шума, выплывают на мелководье, где могут быть выброшены волнами на берег [9, 10], либо погружаются на опасные для них глубины [9, 11]. У большинства погибших китов наблюдается кровоизлияние в мозг, обусловленное перегрузкой слухового аппарата, что нехарактерно для погружений при обычных условиях [10–14].

В некоторых источниках приводятся примеры последствий шумового воздействия и на другие группы гидробионтов. Например, шумовое воздействие в полосе от 40 Гц до 20 кГц на личинки моллюсков *Pecten novaezelandiae* приводит к нарушению роста и возникновению различных пороков развития на всех стадиях онтогенеза у 46 % исследуемых личинок [15], а клетки органа слуха многих видов рыб могут в значительной степени повреждаться от действия гармонических акустических сигналов с уровнем звукового давления около 1 кПа. В отличие от некоторых видов птиц, у которых после звуковой травмы чувствительные клетки звукового аппарата регенерируют, у рыб *Pagrus auratus* (Berycidae) потеря слуховых клеток из-за подобных

травм не восполняется после звукового воздействия в течение 58 сут [7]. Ещё более выраженное негативное воздействие эхолоцирование оказывает на планктонные организмы, в частности зоопланктон, являющийся кормовой базой для рыб. Поэтому изучение влияния мощных гидроакустических полей на гидробионты приобретает всё большую актуальность. Известны работы, где приведены результаты исследований, в частности, воздействия акустического излучения на скопления ракообразных, рыб и морских млекопитающих, а также и возможность смягчения различных вредных эффектов эхолотов или сейсмических источников [16]. Тем не менее, практически отсутствуют работы, посвящённые исследованиям воздействия низкочастотных акустических полей высокой интенсивности на морские макро- и микроорганизмы и анализ физиологических изменений гидробионтов, вызываемых высокими уровнями излучения.

## 2. Низкочастотные гидроакустические излучатели

В мощной низкочастотной подводной гидроакустике под низкочастотными, как правило, подразумевают излучатели, удовлетворяющие двум критериям, первым из которых является волновой размер НЧИ [17]:

$$2\pi D < \lambda, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина звуковой волны,  $D$  — характерный размер излучателя. Вторым критерием, определяющим принадлежность преобразователя к низкочастотным, в прикладных задачах гидроакустики принято считать излучение в диапазоне частот, находящимся ниже 1.5–2.0 кГц [18].

В диапазоне частот ниже 100 Гц по сравнению с НЧИ, использующими другие активные элементы, наиболее эффективны электромагнитные преобразователи [17]. НЧИ с магнитами на основе редкоземельных металлов и магнитомягких материалов позволяют излучать звук с акустической мощностью на уровне более 200 Вт и более в диапазоне частот от единиц до сотен Гц [19].

Баланс между размерами преобразователя и его КПД, полосой излучаемых частот и акустической мощностью достигается использованием пьезоэлектрических активных элементов для НЧИ, как правило, в сочетании с механическими трансформаторами. Другие технические решения в конструкции НЧИ либо слишком громоздки и дороги [2], либо имеют ограничения диапазон рабочих глубин, а также на форму и вид передаваемых сигналов.

Примером разработанного ИПФ РАН мощного пьезоэлектрического НЧИ является Бикон<sup>TM</sup> — монополь встречно-поршневого типа с конусообразным излучающим корпусом [20]. Бикон<sup>TM</sup> (рис. 1) размером около 1 м имеет КПД до 80 %, развивая акустическое давление 10 кПа × м при ресурсе до  $10^{12}$  циклов. НЧИ подобного типа может использоваться без компенсатора гидростатического давления на глубинах до 400 м. Резонансная частота для преобразователя данного типа определяется размерами корпуса НЧИ и находится в пределах 300–1500 Гц.

НЧИ размером 60 см и менее считаются компактными и малогабаритными для мощной низкочастотной гидроакустики [17]. Наибольшую эффективность и технологичность изготовления имеют преобразователи продольно-изгибного типа (рис. 2) с пьезоэлектрическими активными элементами, использующими механический трансформатор [21]. Такие НЧИ имеют высокую удельную мощность [22] и применяются там, где требуется высокий уровень звукового давления (3–4 кПа × м) при относительно малых размерах излучателя (до 0.3–0.6 м).

Для диапазона частот 1–2 кГц преобразователи продольно-изгибного типа могут иметь цельнометаллический корпус, подобно разработанному в ИПФ РАН НЧИ с волнообразным гофрированием излучающей оболочки [23].

Излучатель с титановым корпусом (рис. 3) и пьезокерамическим активным элементом размером 76.6 × 36.5 мм (длина × диаметр) обладает высокой удельной мощностью при максимальных габаритах менее 90 мм и массе менее 1 кг. Отсутствие поглощающего покрытия и сравнимая с конструктивной массой НЧИ присоединённая масса воды повышает КПД преобразователя по сравнению с излучателями аналогичных размеров [24], а ресурс составляет не менее  $10^9$  циклов.



Рис. 1. Бикон<sup>TM</sup> — монополь встречно-поршневого типа с излучающим корпусом.

Fig. 1. Bikon<sup>TM</sup> — a piston-type monopole with a radiating body.



**Рис. 2.** Малогабаритный НЧИ продольно-изгибного типа.

**Fig. 2.** Small-sized longitudinal-bending low frequency radiator (LFR).

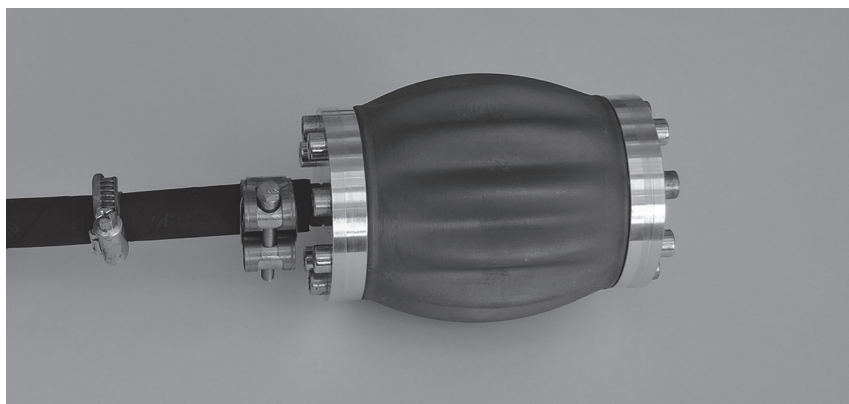
На частоте резонанса 1.7 кГц такой излучатель при ширине полосы частот 28 % и КПД около 30 % обеспечивает уровень излучения  $500 \text{ Па} \times \text{м}$  и более.

Связанные колебательные системы и совмещение механических резонансов колебательных систем в конструкции НЧИ является одним из способов повышения эффективности малогабаритных гидроакустических преобразователей. Примером подобного конструктивного решения является преобразователь инерционно-изгибного типа с пьезокерамическим активным элементом. Работа излучателя этого типа основана на передаче изгибных колебаний пластин с клееными пьезокерамическими кольцами на излучающие мембраны. Активный элемент этого излучателя имеет поперечную поляризацию, изменяя диаметр при подаче электрического напряжения. В таком НЧИ гидростатическое давление не влияет на активный элемент, что исключает дрейф основной резонансной частоты с глубиной погружения. Разработанный в ИПФ РАН преобразователь (рис. 4) обладает удельной мощностью более  $8 \text{ кВт/м}^3$ , минимальным дрейфом частоты основного резонанса по глубине (менее 2 %) при ширине полосы 11 % и КПД до 50 %.

В подобном акустическом оформлении активного элемента преобразователя влияние присоединённой массы воды на колебательную систему НЧИ незначительно. Как следствие, излучатель инерционно-изгибного типа имеет довольно высокое значение основной резонансной частоты при габаритах, сравнимых с размерами компактных НЧИ продольно-изгибного типа. Так, преобразователь инерционно-изгибного типа размером  $170 \times 80 \text{ мм}$  (длина  $\times$  диаметр) и массой 3.3 кг имеет основной резонанс на частоте резонанса 3.5 кГц, где он способен развивать звуковое давление около  $2000 \text{ Па} \times \text{м}$ .

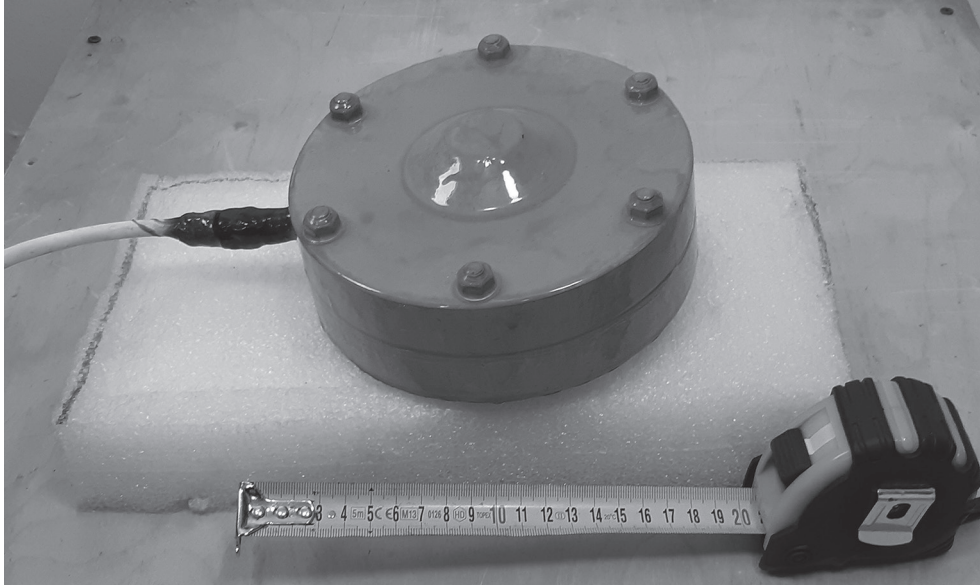
### 3. Интегральные показатели состояния гидробионтов

Биолюминесценция является физиологическим показателем состояния светящихся планктонных организмов [25, 26]. Результаты экспериментов показали, что все основные факторы, характеризующие жизнедеятельность гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe ovata* (питание, состояние при репродукции, температура, освещённость, сезонная изменчивость и соли тяжёлых металлов), оказывают существенное воздействие на активность их биолюминесценции, следовательно, на процессы жизнедеятельности [27]. Состояние светящихся планктонных организмов можно оценить по интегральному биолюминесцентному сигналу в слое воды толщиной 1 м [28, 29]. Изменения в уровне сигнала до излучения акустических сигналов и после показывают степень звукового воздействия на светящиеся планктонные организмы.



**Рис. 3.** Компактный НЧИ продольно-изгибного типа с корпусом сложной формы.

**Fig. 3.** Compact LFR of longitudinal-bending type with a complex shape body.



**Рис. 4.** НЧИ инерционно-изгибного типа с пьезокерамическим активным элементом.

**Fig. 4.** LFR of inertial-bending type with piezoceramic active element.

Исследование влияния мощных низкочастотных гидроакустических полей на морские светящиеся планктонные виды целесообразно проводить в шельфовой и глубоководной зоне с использованием судов обеспечения. Для регистрации биолюминесцентного сигнала можно использовать мультипараметрический гидробиофизический комплекс «Сальпа-М» (далее «Сальпа-М») (рис. 5).

Комплекс «Сальпа-М» состоит из погружного модуля, катушки с кабелем, источника питания и программного интерфейса [25]. Функциональная схема комплекса «Сальпа-М» включает 4 измерительных (табл. 1) и 2 служебных канала (рис. 6):

- канал передачи информации и дистанционного управления работой ПУ;
- канал контроля и сигнализации.

Опрос и регистрации измерений датчиков «Сальпа-М» происходит с частотой 4 Гц. Для регистрации уровня акустической мощности непосредственно в зоне собираемых гидробионтов, дополнительно к штатному набору приборов «Сальпы-М» устанавливается гидрофон с автономным устройством записи уровня акустического излучения непосредственно в точке регистрации биолюминесценции.

#### 4. Проведение исследования в акватории Чёрного моря

Основной особенностью Чёрного моря является наличие сероводородного слоя, верхняя граница которого может находиться на глубинах 50–150 м [25] и ниже которой не опускаются живые организмы. С учётом данной особенности исследования можно ограничить приповерхностным слоем воды глубиной до 100 м.

Максимум энергии свечения большинства светящихся гидробионтов Чёрного моря приходится на тёмное время суток [30] и часто превышает энергию свечения в светлое время суток на несколько порядков [31]. Суточные циклы вертикальных миграций планктонных организмов могут искажать данные результаты регистрации воздействия низкочастотного звука на параметры



**Рис. 5.** Погружной модуль мультипараметрического гидробиофизического комплекса «Сальпа-М».

**Fig. 5.** External view of the submersible module of the multiparametric hydrobiophysical complex “Salpa-M”.

Таблица 1

**Измерительные каналы комплекса «Сальпа-М»**  
**Measuring channels of the “Salpa-M” complex**

| Измерительные каналы      | Диапазон измерений                                                    | Цена единицы наименьшего разряда, не более | Погрешность измерения, % |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| Биоломинесценция          | $10^{-13} \div 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{см}^2 \times \text{л}^{-1})$ | 0.01                                       | $\pm 10$                 |
| Температура               | $-2 \div +35^\circ \text{C}$                                          | 0.02                                       | $\pm 0.1$                |
| Гидростатическое давление | $0 \div 20 \text{ МПа}$                                               | 0.05                                       | $\pm 0.03$               |
| Солёность                 | $0.2 \div 40.0$ единиц практической солёности                         | 0.002                                      | $\pm 0.005$              |



Рис. 6. Структурно-функциональная схема погружного модуля «Сальпа-М».

Fig. 6. Structural and functional diagram of the “Salpa-M” submersible module.

биоломинесценции планктонных организмов. В связи с этим, оптимальным временем для проведения эксперимента является промежуток времени с начала астрономических вечерних сумерек до конца астрономических утренних сумерек.

С целью изучения влияния на жизнедеятельность гидробионтов излучения в разных частотных диапазонах в качестве источника излучения целесообразно использование нескольких гидроакустических излучателей в диапазонах от 500–600 Гц до 1.5–2.0 кГц. Поскольку для постановки эксперимента достаточно ограничиться глубинами до 150 м, компенсаторы гидростатического давления для НЧИ не требуются.

Зондирование фотического слоя проводится с борта судна обеспечения, лежащего в дрейфе. Проведение исследовательских работ по сбору данных биоломинесценции ограничивается волнением моря до 3-х баллов и средней силе ветра до 10–12 м/с, а также грозами и ливневыми дождями.

Для получения предварительных оценок в ходе проведения эксперимента «Сальпа-М» и блок НЧИ (погружаемая часть излучающего комплекса) опускаются в воду на грузонесущем тросе с наветренного борта судна с палубы юта. Во избежание закручивания кабеля и грузонесущего троса, НЧИ опускается с закреплённым датчиком глубины и контрольным гидрофоном с использованием оттяжки, отдаваемой с бака на расстоянии 30–50 м от расположенного на юте основного спуско-подъёмного устройства.

Функциональная схема системы возбуждения и контроля излучаемой акустической мощности, включающая в себя программно-аппаратный комплекс (надводная часть) и контрольный гидрофон (погружаемая часть), приведена на рис. 7.

Возможная схема постановки НЧИ для проведения зондирования фотического слоя воды во время излучения гидроакустических сигналов приведена на рис. 8.

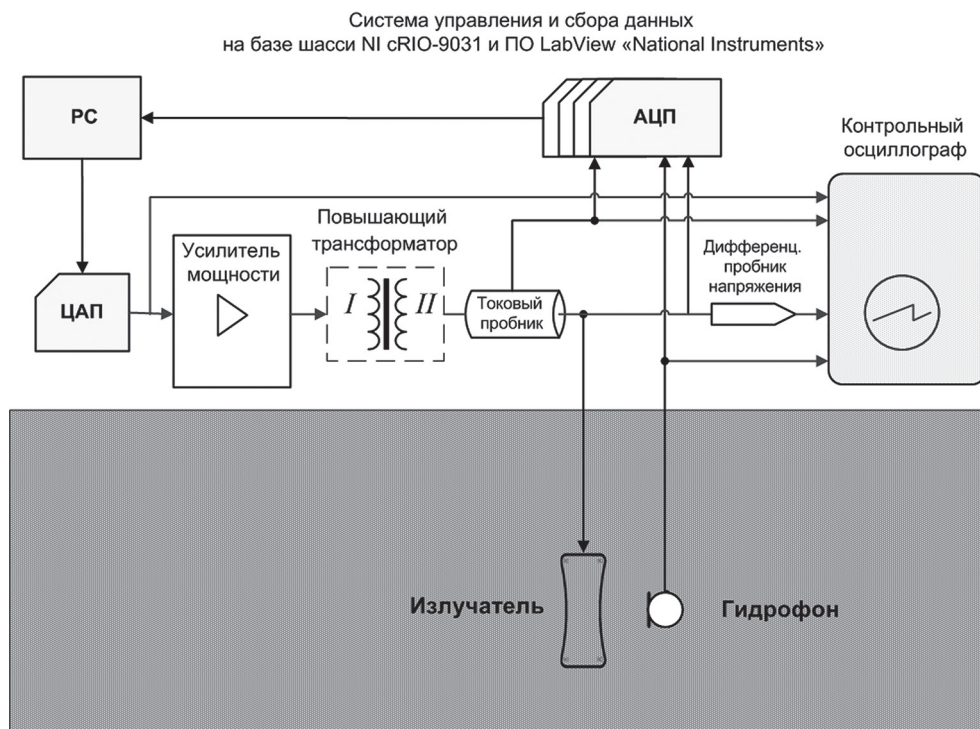


Рис. 7. Схема управления излучением, контроля и измерения уровня излучаемой акустической мощности.

Fig. 7. Scheme of emission control, control and measurement of the radiated acoustic power level.

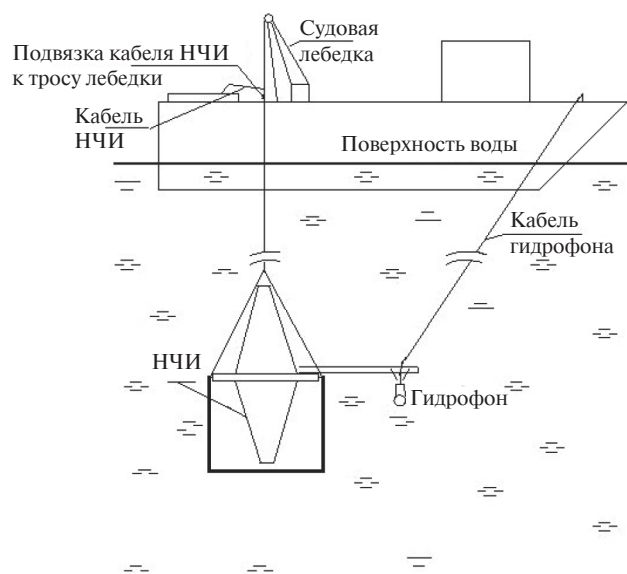


Рис. 8. Схема постановки НЧИ с борта судна обеспечения для проведения зондирования фотического слоя воды.

Fig. 8. Scheme of LFR placement from the side of the support vessel for sounding the photic layer of water.

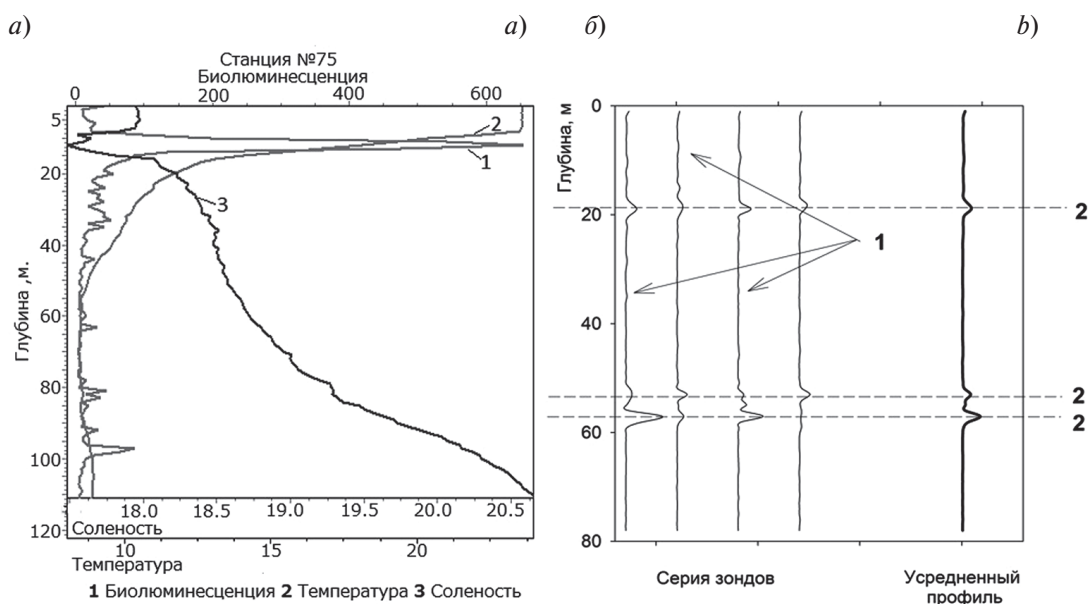
Следует заметить, что для постановки эксперимента возможно использование грузонесущего кабель-троса и включение автономной записи сигналов с гидрофона без передачи во время излучения в надводную часть системы управления излучением, контроля и измерения уровня излучаемой акустической мощности.

## 5. Методика зондирования фотического слоя воды и сбор данных

Во время зондирования фотического слоя воды данные с датчиков «Сальпа-М» в режиме реального времени поступают на персональный компьютер, установленный на борту судна, и регистрируются программой PMUTPUR. Под зондированием фотического слоя моря комплексом «Сальпа-М» подразумевается вертикальное зондирование *in situ* от поверхности до горизонта 100 м (либо до горизонта 10–15 м от дна при глубине места менее 100 м) и подъёма до поверхности [29]. Синхронная запись измеряемых параметров морской среды ведётся только при спуске (погружении) прибора. Результатом зондирования являются вертикальные профили интенсивности биолюминесценции, а также данные о температуре и солёности морской среды (рис. 9, а).

Вертикальный профиль биолюминесценции позволяет оценить толщину слоя скопления светящихся планктонных видов и глубины его залегания. Ввиду особенностей Чёрного моря, подобных слоев может быть несколько [32]. В зоне скопления светящихся видов значение интенсивности поля биолюминесценции обычно на несколько порядков выше, чем в других исследуемых слоях воды (рис. 9, б). Такие слои часто называются пиками биолюминесценции. Расположение пиков биолюминесценции по глубине имеет сезонный характер [33]. Толщина скопления светящихся планктонных видов варьирует в диапазоне от 2 м до нескольких десятков метров. Толщина слоя менее 2 м является, как правило, биолюминесцентным сигналом единичного организма.

Отдельные светящиеся планктонные организмы могут находиться в толще воды и вне зоны скопления, поэтому для исключения их влияния используется метод многократного зондирования, без перерыва между зондами. Например, это может быть серия из 10 зондирований в течение 20–25 мин с дальнейшим усреднением полученных данных (рис. 9, б).



**Рис. 9.** Вертикальные профили измеряемых параметров «Сальпа-М»: а — вертикальные профили температуры, солёности и биолюминесценции, б — вертикальные профили биолюминесценции одной серии зондирований «Сальпа-М» и усредненный профиль биолюминесценции. 1 — сигналы одиночных организмов, 2 — слои скопления светящихся видов (пики биолюминесценции).

**Fig. 9.** Vertical profiles of the “Salpa-M” measured parameters: а — vertical profiles of temperature, salinity and bioluminescence, б — vertical profiles of bioluminescence of one series of soundings “Salpa-M” and the average bioluminescence profile. 1 — signals of single organisms, 2 — layers of the luminous species clusters (bioluminescence peaks).

Сбор данных по биолюминесценции производится в следующем порядке:

1. Проведение серии зондирований (10–15 зондов) фотического слоя «Сальпа-М» при отсутствии излучения гидроакустических сигналов.
2. Проведение серии зондирований (10–15 зондов) фотического слоя «Сальпа-М» при излучении гидроакустических тональных или ЛЧМ сигналов со скважностью не более 2 в полосе частот шириной 10–15 % от резонансной частоты НЧИ.
3. Проведение серии зондирований (2–4 серии) фотического слоя «Сальпа-М» каждые 30 мин после окончания излучения гидроакустических сигналов НЧИ.

## 6. Проблемы проведения эксперимента и обработки результатов

В описанной выше схеме постановки эксперимента в морских условиях с борта судна обеспечения ввиду возможной вариации расстояния между НЧИ и набором датчиков «Сальпа-М» различие максимального и минимального значений звукового давления, действующего на исследуемую область локализации гидробионтов, превышает 20 раз. Таким образом, при уровне звукового давления 4–5 кПа в точке нахождения «Сальпа-М», расстоянии между источником звука (НЧИ) и областью регистрируемой биолюминесценции около 100 м (глубина НЧИ — 50 м, глубина «Сальпа-М» — 100 м, база между СПУ НЧИ и «Сальпа-М» — 35 м), звуковое давление в точке регистрации составит всего 40–50 Па. Расстояние между НЧИ и «Сальпа-М» при их спуске из разных частей судна обеспечения может изменяться от 10 до 150 м, что требует их совместного размещения в единой конструкции, где расстояние между датчиками регистрации биолюминесценции и НЧИ не будет превышать 1–3 м.

Другой важной особенностью эксперимента является высокое электрическое напряжения на НЧИ с пьезоэлектрическими активными элементами [34] (до 2 кВ) при излучении высокой акустической мощности. Для обеспечения эксперимента при сохранении необходимых мер электробезопасности, излучение гидроакустических сигналов осуществляется только после остановки спуска или подъёма НЧИ, что затрудняет получение полноценной картины влияния низкочастотных акустических полей на гидробионты. Разработка автономного излучающего комплекса, включающего в себя НЧИ и систему возбуждения, согласования, управления и электропитания, сопряжена со значительными техническими сложностями. Кроме этого, ввиду неопределённости требуемого диапазона частот для проведения исследований, разработка подобного автономного излучающего комплекса оказывается достаточно затратной и нецелесообразной.

Ввиду возникновения кавитации на малых глубинах проблематично излучение высокой акустической мощности, что ограничивает возможности проведения эксперимента эшелонами глубин 10–15 м до 100–150 м. Следует отметить, что данное обстоятельство не позволяет в лабораторных условиях поставить эксперимент по исследованию влияния мощных акустических полей на показатели биолюминесценции гидробионтов. Вероятнее всего, требуемую для постановки эксперимента высокую интенсивность звука при проведении экспериментов в лабораторных условиях (в искусственных водоёмах на малых глубинах) невозможно заменить высокой концентрацией светящихся организмов. Воздействие звука малой интенсивности не вызывает биолюминесценции гидробионтов даже в случае их повышенной концентрации в слое воды [25, 26].

Погрешность определения пороговых значений уровня звукового давления, при котором наблюдается биолюминесценция, в первую очередь связана с инструментальными погрешностями измерений расстояния  $D$  между НЧИ и регистратором биолюминесценции «Сальпа-М», расстоянием от НЧИ до измерительного гидрофона  $L$  и его погрешностью  $\Delta P_r$ . На основании чего можно считать, что

$$\Delta P \approx P \sqrt{\left(\frac{\Delta P_a}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $P$  — звуковое давление на гидрофоне,  $\Delta L$  — погрешность определения расстояния между НЧИ и измерительным гидрофоном,  $\Delta D$  — погрешность определения расстояния между НЧИ и «Сальпа-М». При инструментальной погрешности измерений расстояний  $\Delta L = 1$  см,  $\Delta D = 0.1$  м, и использовании гидрофонов типа Г61Н с погрешностью  $\pm 1$  дБ, относительная погрешность полученных значений звукового давления составит около 25 %, поскольку для определения эффективного значения звукового давления

$$P_1 = \frac{U_g L}{\gamma}, \quad (4)$$

где  $P_1$  — приведенное к одному метру среднеквадратичное звуковое давление,  $U_g$  — напряжение на гидрофоне,  $\gamma$  — чувствительность гидрофона (В), относительная погрешность которой не превышает  $\pm 12$  %.

## 7. Заключение

Современные гидроакустические излучающие системы и комплексы способны развивать звуковое давление, при котором плотность энергии звука порождает кавитацию — локальные переходы среды из одного агрегатного состояния в другое. Большой уровень звукового давления может вызвать кавитацию даже при значительной глубине погружения малогабаритных НЧИ (15–50 м). Звук с подобным уровнем акустической мощности не только вызывает изменения поведенческих реакций представителей морской фауны, но и, вероятно, может приводить к биотравмам и другим необратимым физиологическим изменениям морских макро- и микроорганизмов. Изучение влияния мощных низкочастотных звуковых полей на морские гидробионты, в частности планктонные организмы, путём исследования параметров биолюминесценции, является перспективным способом определения набора ключевых индикаторов функционального состояния морских экосистем.

Описанная в работе методика проведения эксперимента позволяет с достаточно высокой для подобных экспериментов точностью определить пороговые уровни акустического излучения, при котором возникает реакция морских светящихся гидробионтов. Однако для получения более достоверных оценок требуется проводить многократное излучение гидроакустических сигналов как в разных метеорологических условиях, так в разное время года для накопления статистической информации и усреднения по ансамблю полученных данных, поскольку оценка допустимых уровней шумового загрязнения является актуальной задачей из-за отсутствия на текущий момент общепринятых международных и региональных норм в области акустической экологии Мирового океана.

## 8. Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность заведующему отделом акустики океана Д.А. Касьянову, заместителю директора ИПФ РАН по науке П.И. Коротину, директору ФИЦ ИнБЮМ Р.В. Горбунову, помощнику капитана по НТС НИС «Профессор Водяницкий» В.В. Давыдову, руководителю отдела биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ А.Б. Боровкову за поддержку и помощь в подготовке и организации исследований.

## 9. Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (проект 0035–2019–0019 и 0030–2021–0018) и госзадания ФИЦ ИнБЮМ № AAAA-A18–118020790229–7. Отработка метода проводилась в рамках темы «Комплексные исследования современного состояния экосистемы Атлантического сектора Антарктики», № гос.регистрации AAAA-A19–119100290162–0.

## Литература

1. Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.
2. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication // J. Acoust. Soc. Am. 2013. V. 133, N1. P. EL61–EL67.
3. Шустов А.С. Высокоскоростной гидроакустический OFDM модем // Сборник научных работ XIII Международной научной конференции Евразийского научного объединения. М.: ЕНО, 2016. С. 45.
4. Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC) // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V. 105, N982. doi: 10.1121/1.425359
5. Сапронов А.А., Зибров В.А., Воробьёв С.В. Применение пьезоэлектрических преобразователей в системе дистанционного мониторинга потребляемых водных ресурсов в сфере жилищно-коммунального хозяйства // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т. 6, № 1. С. 35–40.
6. Rolt K.D. History of flexensional electroacoustic transducers // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 87, N3. P. 1340–1349.
7. McCauley R.D., Fewtrell J., Popper A.N. High intensity anthropogenic sound damages fish ears // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113, N1. P. 638–642.
8. Jorgenson J.K., Gyselman E.C. Hydroacoustic measurements of the behavioral response of arctic riverine fishes to seismic airguns // J. Acoust. Soc. Am. 2009. 126(3): 1598–606. doi: 10.1121/1.3177276
9. Степанюк И.А. Тайна китов-«самоубийц»: поиск физических механизмов // Наука и техника: прошлое и настоящее. 2009. № 1. URL: [https://fiz.1sept.ru/view\\_article.php?ID=200900112](https://fiz.1sept.ru/view_article.php?ID=200900112) (дата обращения 01.02.2020).
10. Иванов М.П. Изучение коммуникации дельфина: методика, двигательные и акустические показатели // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2009. Т. 45, № 6. С. 575–582.

11. Ridgway S.H., Carder D.A. Whale physiology at depth: hearing, sonar, and homeostasis // Int. assoc. for aquatic animal med. proc. online. 1995. Part IV. URL: <https://www.vin.com/apputil/content/defaultadv1.aspx?pId=11257&catId=32509&id=3977137> (дата обращения: 01.02.2020).
12. Иванов М.П., Дроган Е.В. Эксперимент по исследованию коммуникации китообразных // Учёные записки физ. факультета МГУ. 2014. № 5. С. 145351–1–145351–7.
13. Piantadosi C.A., Thalmann E.D. Pathology: Whales, Sonar and Decompression Sickness // Nature. 2004. V. 428, N6984. P. 575–576.
14. Herman L.M., Tavalga W.N. The communication systems of cetaceans / Cetacean behavior: Mechanisms and functions. New York: Wiley Interscience, 1980. P. 149–209.
15. Aguilar de Soto N., Delorme N., Atkins J., Howard S., Williams J. Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae // J. Comparative psychology. 2007. V. 24, N2. P. 240–249.
16. Сибирицова Е.Н., Токарев Ю.Н., Чуприна И.С. Некоторые возможные последствия интенсификации судоходства для экосистемы Чёрного моря // Вестник Прикаспия. 2016. № 2 (13). С. 42–49.
17. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. Newport — New London: Naval Underwater Systems Center, 1986. 102 p.
18. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А., Перфилов В.А. Перспективы использования 3D-печати для изготовления компактных гидроакустических преобразователей продольно-изгибного типа со сложной геометрией излучающей оболочки // Учёные записки физ. факультета МГУ. 2017. № 5. С. 1750104–1–1750104–5.
19. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Фарфель В.А., Смирнов С.А., Перфилов В.А. Мощные низкочастотные гидроакустические преобразователи: проблемы конструирования, изготовления и перспективы развития // Тр. IX Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». С.-Петербург, 2018. С. 170–172.
20. Боголюбов Б.Н., Бритенков А.К., Кирсанов А.В., Перфилов В.А., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Согласование низкочастотного импеданса системы возбуждения гидроакустического излучателя высокой мощности с электромеханическим преобразователем на основе пьезокерамического активного элемента // Тр. Второй российско-белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О.В. Лосева. Нижний Новгород, 2015. С. 361–365.
21. Андреев М.Я., Боголюбов Б.Н., Ключин В.В., Рубанов И.Л. Низкочастотный малогабаритный продольно-изгибный электроакустический преобразователь // Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51–55.
22. Боголюбов Б.Н., Кирсанов А.В., Леонов И.И., Смирнов С.А., Фарфель В.А. Расчёт и экспериментальные исследования компактного продольно-изгибного гидроакустического преобразователя с центральной частотой излучения 520 Гц // Гидроакустика. 2015. № 23(3). С. 20–26.
23. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Смирнов С.А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU2681268. Опубликовано 05.03.2019. Бюл. № 7.
24. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Дерябин М.С., Фарфель В.А. Измерение электромеханических характеристик компактного низкочастотного гидроакустического излучателя сложной формы // Тр. МАИ. 2019. № 105. С. 1–24.
25. Токарев Ю.Н., Евстигнеев П.В., Машукова О.В. Планктонные биолуминесцентные Мирового океана: видовое разнообразие, характеристики светоизлучения в норме и при антропогенном воздействии. Севастополь: Орианда, 2016. 340 с.
26. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н., Черепанов О.А., Чугунов Ю.В. Биолуминесценция в океане. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 283 с.
27. Tokarev Yu.N., Mashukova O.V. Bioluminescence of the Black Sea Ctenophores—Aliens as an Index of their physiological state // Luminescence: J. Biolog. and Chem. Luminescence. 2016. V. 14. С. 351.
28. Мельников В.В., Мельник А.В., Мельник Л.А. Особенности биолуминесценции у нижней границы кислородной зоны в центре Чёрного моря // Тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Севастополь, 12–13 сентября 2019 г. Севастополь: ИПТС, 2019. С. 121. (29)
29. Serikova I.M., Tokarev Y.N., Vasilenko V.I., Briantseva Y.V., Stanichniy S.V., Suslin V.V. Response of phytoplankton of the Sevastopol coastal zone to climate peculiarities of the years 2009–2012 // Hydrobiological J. 2016. T. 52, № 1. С. 40–51.
30. Mashukova O.V., Tokarev Yu.N. Bioluminescence daily rhythm of ctenophore *Beroe ovata* Mayer, 1912 // Proceedings of the Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges 30 Oct — 03 Nov 2013, Marmaris, Turkey // Marine Biology and Microbiology. V. II. P. 729–736.
31. Машукова О.В. Суточная ритмика светоизлучения *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz (Ctenophora: Lobata) // Тр. Науч.-практ. конф. «Экологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление прибрежной зоной». Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 89–94.
32. Полонский А.Б., Мельникова Е.Б., Серебренников А.Н., Токарев Ю.Н. Региональные особенности интенсивности свечения гидробионтов и концентрации хлорофилла *a* в водах Черного моря // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 275–281. doi: 10.15372/AOO20180405

33. Мельник А.В., Белогурова Ю.Б. Сезонная изменчивость поля биOLUMиНесценции у берегов Кавказа в 2018 г. // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 2 (36). С. 100–106. doi: 10.33075/2220–5861–2019–2–100–106
34. Бритенков А.К., Боголюбов Б.Н., Фарфель В.А., Смирнов С.Ю., Круглов Н.Ю., Кушнерёв Д.Н. Расчёт, конструирование и изготовление электрических эквивалентов мощных низкочастотных гидроакустических преобразователей // Радиотехника. 2019. № 5 (6). С. 129–136.

## References

1. Bogorodskij V.V., Zubarev L.A., Korepin E.A., Yakushev V.I. Underwater electroacoustic transducers. *Leningrad, Sudostroeniye*, 1983. 248 p. (in Russian).
2. Mosca F., Matte G., Shimura T. Low-frequency source for very long-range underwater communication. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013, 133, 1, EL61–EL67.
3. Shustov A.S. High-speed sonar OFDM modem. *Sbornik nauchnykh rabot XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii Evrazijskogo nauchnogo ob"edineniya. Moskva, ENO*, 2016. 45 p. (in Russian).
4. Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC). *J. Acoust. Soc. Am.* 1999, 105, 982. doi: 10.1121/1.425359
5. Sapronov A.A., Zibrov V.A., Vorob'yov S.V. Application of piezoelectric transducers in the remote monitoring system of consumed water resources in the field of housing and utilities infrastructure. *Elektrotekhnicheskie i Informatsionnye Komplekсы i Sistemy*. 2010, 1(6), 35–40 (in Russian).
6. Rolt K.D. History of flexensional electroacoustic transducers. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990, 87, 3, 1340–1349.
7. McCauley R.D., Fewtrell J., Popper A.N. High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *J. Acoust. Soc. Am.* 2003, 113, 1, 638–642.
8. Jorgenson J.K., Gyselman E.C. Hydroacoustic measurements of the behavioral response of arctic riverine fishes to seismic airguns. *J. Acoust. Soc. Am.* 2009, 126(3):1598–606. doi: 10.1121/1.3177276
9. Stepanyuk I.A. The mystery of suicide whales: the search for physical mechanisms. 2009, 1, URL: [https://fiz.lsept.ru/view\\_article.php?ID=200900112](https://fiz.lsept.ru/view_article.php?ID=200900112) (Date of access: 01.02.2020).
10. Ivanov M.P. Dolphin communication study: methodology, motor and acoustic indicators. *Zhurnal Evolyutsionnoj Biokhimii i Fiziologii*. 2009, 45 (6), 575–582 (in Russian).
11. Ridgway S.H., Carder D.A. Whale physiology at depth: hearing, sonar and homeostasis. 995, IV, URL: <https://www.vin.com/apputil/content/defaultadv1.aspx?pId=11257&catId=32509&id=3977137> (Date of access: 01.02.2020).
12. Ivanov M.P., Drogan E.V. Experiment to study the cetaceans communication. *Memoirs of the Faculty of Physics*. 2014, 5, 145351–1–145351–7 (in Russian).
13. Piantadosi C.A., Thalmann E.D. Pathology: Whales, Sonar and Decompression Sickness. *Nature*. 2004, 428, 6984, 575–576.
14. Herman L.M., Tavolga W.N. The communication systems of cetaceans / Cetacean behavior: Mechanisms and functions. *New York, Wiley Interscience*, 1980, 149–209.
15. Aguilar de Soto N., Delorme N., Atkins J., Howard S., Williams J. Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *J. Comparative Psychology*. 2007, 24, 2, 240–249.
16. Sibirtsova E.N., Tokarev Yu.N., Chuprina I.S. Some possible consequences of the shipping intensification for the Black Sea ecosystem. *Vestnik Prikaspiya*. 2016, 2(13), 42–49 (in Russian).
17. Woollet R. Sonar Transducer Fundamentals. *Newport — New London, Naval Underwater Systems Center*, 1986. 102 p.
18. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Smirnov S.A., Perfilov V.A. 3D-printing possibilities for the manufacturing technology development of hydroacoustic longitudinal bending type emitters with the complex radiator's body geometry. *Memoirs of the Faculty of Physics*. 2017, 5, 1750104–1–1750104–5 (in Russian).
19. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Farfel' V.A., Smirnov S.A., Perfilov V.A. Powerful low-frequency hydroacoustic transducers: problems of design, manufacture and development prospects. *Trudy IX Vserossiyskoj konf. «Prikladnye Tekhnologii Gidroakustiki i Gidrofiziki»*. St. Petersburg, 2018, 170–172 (in Russian).
20. Bogolyubov B.N., Britenkov A.K., Kirsanov A.V., Perfilov V.A., Smirnov S.A., Farfel' V.A. Matching the low-frequency impedance of the excitation system of a high-power hydroacoustic emitter with an electromechanical transducer based on a piezoceramic active element. *Trudy Vtoroj rossijsko-belorusskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elementnaya baza otechestvennoj radioelektroniki: importozameshchenie i primeneniye» im. O.V. Loseva. Nizhnij Novgorod*, 2015, 361–365 (in Russian).
21. Andreev M. Ya., Bogolyubov B.N., Klyushin V.V., Rubanov I.L. Low-frequency small-sized longitudinal-bending electroacoustic transducer. *Datchiki i Sistemy*. 2010, 12, 51–55 (in Russian).
22. Bogolyubov B.N., Kirsanov A.V., Leonov I.I., Smirnov S.A., Farfel' V.A. Calculation and experimental studies of a compact longitudinal-flexural hydroacoustic transducer with a central radiation frequency of 520 Hz. *Gidroakustika*. 2015, 23(3), 20–26 (in Russian).

23. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Smirnov S.A. Longitudinal-bending hydroacoustic transducer. *Patent RU2681268*. Published 05.03.201. Bulletin 7 (in Russian).
24. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Deryabin M.S., Farfel' V.A. Measurement of the electromechanical characteristics of a compact low-frequency hydroacoustic transducer of complex shape. *Trudy MAI*. 2019, 105, 1–24 (in Russian).
25. Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Mashukova O.V. Planktonic bioluminescent of the World Ocean: species diversity, characteristics of light emission in normal conditions and under anthropogenic impact. *Sevastopol, Orianda*, 2016, 340 p. (in Russian).
26. Gitelzone I.I., Levin L.A., Utyushev R.N., Cherepanov O.A., Chugunov O.A. Bioluminescence in the ocean. *St. Peterburg, Gidrometeoizdat*, 1992. 283 p. (in Russian).
27. Tokarev Yu.N., Mashukova O.V. Bioluminescence of the Black Sea Ctenophores-Aliens as an Index of their Physiological State. *Luminescence, J. Biolog. and Chem. Luminescence*. 2016, 14, 351 (in Russian).
28. Mel'nikov V.V., Mel'nik A.V., Mel'nik L.A. Features of bioluminescence at the lower boundary of the oxygen zone in the center of the Black Sea. *Tezisy Doklada Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Sevastopol'*, 12–13 Sentyabrya 2019 g. Sevastopol', IPTS, 2019, 121 (in Russian).
29. Serikova I.M., Tokarev Yu.N., Vasilenko V.I., Briantseva Yu.V., Stanichniy S.V., Suslin V.V. Response of phytoplankton of the Sevastopol coastal zone to climate peculiarities of the years 2009–2012. *Hydrobiological J.* 2016, 52, 1, 40–51 (in Russian).
30. Mashukova O.V., Tokarev Yu.N. Bioluminescence daily rhythm of ctenophore *Beroe ovata* Mayer, 1912. Proceedings of the Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges 30 Oct — 03 Nov 2013, Marmaris, Turkey. *Marine Biology and Microbiology*. II, 729–736.
31. Mashukova O.V. The daily rhythm of light emission of *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz (Ctenophora: Lobata). *Trudy Nauch.-Prakt. Konf. «Ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo Regiona i Kompleksnoe Upravlenie Pribrezhnoy Zonoj»*. Sevastopol', EHKOSI-Gidrofizika. 2014, 89–94 (in Russian).
32. Polonsky A.B., Mel'nikova E.B., Serebrennikov A.N., Tokarev Yu.N. Regional peculiarities of hydrobiont bioluminescence intensity and chlorophyll *a* concentration in Black Sea waters. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018, 31(4), 365–371.
33. Mel'nik A.V., Belogurova Yu.B. Seasonal variability of the bioluminescence field off the coast of the Caucasus in 2018. *Sistemy Kontrolya Okruzhayushhej Sredy*. 2019, 2 (36), 100–106 (in Russian).
34. Britenkov A.K., Bogolyubov B.N., Farfel' V.A., Smirnov S. Yu., Kruglov N. Yu. Calculation, design and manufacture of electrical equivalents of powerful low-frequency hydroacoustic transducers. *Radiotekhnika*. 2019, 5 (6), 129–136 (in Russian).