# О РЕГИСТРАЦИИ ШУМОВ ДЫХАНИЯ ВОДОЛАЗА-АКВАЛАНГИСТА В МЕЛКОВОДНОЙ АКВАТОРИИ РАЗМЕЩЕННЫМИ У ДНА ГИДРОФОНАМИ

### Дорожко В.М., Горовой С.В., Коренбаум В.И.\*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН E-mail: \*v-kor@poi.dvo.ru

### Аннотация

Предотвращение несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные мелководные акватории остается актуальной задачей. Для диапазона частот ниже 100 Гц, характерного для шумов, связанных с дыханием водолаза-аквалангиста, существенная часть регистрируемых размещенными у дна гидрофонами может быть соотнесена с сейсмоакустической составляющей волны, бегущей по осадочному чехлу дна и/или тонкому придонному водному слою акватории. Дистанции, на которых удается идентифицировать низкочастотные дыхательные шумы водолаза-аквалангиста, достигают 180–220 м.

*Ключевые слова:* легководолаз, дыхательные шумы, идентификация, частота дыхания, сейсмоакустическая волна.

## ON REGISTERING RESPIRATORY-ASSOCIATED NOISES OF SCUBA-DIVER IN SHALLOW WATER WITH BOTTOM-MOUNTED HYDROPHONES

## Dorozhko V.M., Gorovoy S.V., Korenbaum V.I.\*

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences E-mail: \*v-kor@poi.dvo.ru

## Abstract

Prevention of scuba-diver trespassing shallow-water littoral areas is considered as actual. In frequency range below 100 Hz, characteristic for respiratoryassociated noise of scuba-divers, a significant part of the signal registered with bottom-mounted hydrophones, may be connected to the seismoacoustic component of the wave, travelling through the sedimentary bed and/or through a thin water layer above it. An identification of low-frequency respiratory-associated noises of scuba-diver in shallow-water areas is achieved at distances up to 180–220 м.

*Key words:* scuba-diver, respiratory-associated noises, identification, respiratory rate, seismoacoustic wave.

### Введение

Предотвращение несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные акватории актуально как для охраны объектов марикультуры от браконьеров, так и в антитеррористических целях [7]. Особенностью легководолазов является низкий уровень излучения физических полей и малая заметность для активных гидролокационных средств. В то же время принципиально неустранимым демаскирующим фактором является функционирование организма легководолаза и, прежде всего, его дыхание. Ранее было показано, что связанные с дыханием низкочастотные шумы могут быть использованы для решения задачи пассивного обнаружения и локализации водолаза-аквалангиста в прибрежной акватории [5].

# Постановка проблемы

При работе источника низкочастотных шумов в мелководных акваториях часть его излучения передается гидроакустической плоской волной, бегущей в водной толще, образующей приповерхностный волновод, а часть может передаваться за счет различных механизмов в осадочный чехол дна и возбуждать в нем донные сейсмоакустические волны (в виде нормальных волн, бегущих в осадочном слое, и/или вытекающих в воду, например, волн Стоунли) [1]. При этом низкочастотная сейсмоакустическая составляющая волны может, вообще говоря, распространяться существенно дальше гидроакустической.

Целью работы является анализ возможностей регистрации шумов дыхания водолаза-аквалангиста в мелководной акватории гидрофонами, размещенными у дна.

Регистрация сигналов выполнялась компактной антенной решеткой (рис. 1), состоящей из 12 гидрофонов, каждый из которых выполнен в виде стандартной сборки цилиндрических пьезопреобразователей диаметром 18 мм, герметизированных единой резиновой



Рис. 1. Внешний вид антенной решетки:

 гидрофон, 2 – герметичный контейнер с предварительным усилителем, 3 – коаксиальный соединительный кабель, 4 – подводный кабель с продольной герметизацией, 5 – соединительная муфта, 6 – транспортный ящик

оболочкой [2]. Для уменьшения влияния гидродинамических помех, вызванных движением морской воды относительно гидрофонов, на них надеваются звукопрозрачные матерчатые чехлы из синтетической махровой ткани толщиной 5 мм.

Гидрофоны подключены к подводному электрическому кабелю с продольной герметизацией СМПЭВГ-1000 12х0,75 общей длиной 100 м. К гидрофонам подключены герметичные контейнеры, в которых установлены предварительные усилители с коэффициентом усиления 12. Гидрофоны антенны укладывались на дно акватории в линию с дистанцией около 4 м друг от друга. На берегу кабельные выводы гидрофонов через магистральный усилитель с коэффициентом усиления 200 подключались к входам 16-канального электронного самописца PowerLab (ADInstruments) с 16-разрядным АЦП. Записи сигналов (суммарных шумов моря) выполнены с частотой дискретизации 10 кГц.

Выделение дыхательных шумов водолаза-аквалангиста из записей суммарных шумов моря с отдельных гидрофонов решетки реализовано с помощью алгоритма спектральной обработки. Запись шумов разбивалась на ряд последовательных интервалов по 30 с. На рис. 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие процедуру выполнения алгоритма обработки исходного сигнала (рис. 2а). С помощью прямого преобразования Фурье вычисляется спектр Ys суммарных шумов (рис. 2b), из которого выделяется спектр заданной ширины  $\Delta F$  (рис. 2b – выделение красным цветом). Указанная частотная селекция производится в цикле, на каждом шаге которого выделяемый спектр ( $\Delta F$ ) сдвигается по оси частот на заданную величину смещения, вследствие чего за время цикла осуществляется непрерывное перекрытие изучаемого частотного диапазона.

Спектр  $\Delta F$  подвергается обратному преобразованию Фурье, в результате чего вычисляется временная реализация S<sub> $\Delta F$ </sub> (рис. 2с) дыхательных шумов на тех участках спектра Y<sub>s</sub>, в которых преобладают указанные шумы. Выделенные дыхательные шумы детектируются



Рис. 2. Диаграммы спектральной обработки суммарных шумов в диапазоне частот 0–500 Гц:

 а) суммарные шумы моря (SN); b) спектр (YS) суммарных шумов; спектр, выделяемый фильтром (ΔF) шириной 20 Гц (красный цвет); с) временная реализация выделенных дыхательных шумов (SΔF); d) спектр отношения сигнал/шум (E) детектированной временной реализации выделенных дыхательных шумов; Em и Fm – амплитуда и частота максимальной спектральной составляющей спектра E линейным детектором. С помощью прямого преобразования Фурье по огибающей вычисляется спектр отношения сигнал/шум E (рис. 2d) детектированных дыхательных шумов. В качестве сигнала принимается величина  $E_m$ , а величина шумов определяется как среднеквадратическое отклонение массива спектральных составляющих (рис. 2d) без учета  $E_m$ . Частота дыхания принимается равной значению  $F_m$  спектральной составляющей с максимальной амплитудой  $E_m$  в пределах диапазона частот 0,1,..., 1,0 Гц, характерного для дыхательных шумов [4]. Контролируется соответствие результатов обработки записей, полученных с различных гидрофонов антенной решетки.

## Основные результаты

С целью записи шумов дыхания водолазы-аквалангисты на ластах совершали проходы на удаление до 180–220 м от гидрофонов антенной решетки, установленной у дна на глубине 10 м, в двух различных мелководных акваториях залива Петра Великого Японского моря. Водолаз-аквалангист передвигался на глубине 6–7 м и был снабжен GPS-приемником, установленным в буксируемом на фале герметичном поплавке.

Полученный в результате обработки материал представляет собой оценки спектра и отношения сигнал/шум дыхательных шумов в диапазоне частот 5–100 Гц, вычисленные через одноминутные интервалы времени движения водолаза-аквалангиста и пересчитанные затем в среднюю на интервале дистанцию до него. Результаты представлены для двух различных мелководных акваторий на рис. 3, 4.

Заметим, что дыхательные шумы водолаза-аквалангиста наблюдаются в диапазоне частот 5–100 Гц с пробелами, которые могут быть связаны как с особенностями генерации шумов водолазом-аквалангистом, так и с характеристиками распространения регистрируемых сигналов (рис. 3а, рис. 4а) вдоль трассы.

Для обеих акваторий (рис. 3b и рис. 4b) характерно достаточно быстрое снижение величины Е в начальной стадии ухода водолазоваквалангистов от антенны (при дистанциях до 50–60 м), что вполне координирует с представлениями о распространении низкочастотного 78



Рис. 3. Зависимость частотного спектра и отношения сигнал/шум от дистанции до движущегося водолаза-аквалангиста в акватории 1:
а) низкочастотная часть спектра дыхательных шумов; b) отношение сигнал/ шум спектра детектированных дыхательных шумов; измеренные данные (штриховые линии), МНК-оценка измеренных данных полиномом 5-й степени (сплошная кривая)

звука в мелком море [3], согласно которым оцениваемая частота среза для 1-й нормальной волны приповерхностного волновода при глубине моря 10 м, скорости звука в воде 1500 м/с и скорости звука в осадочном слое дна 1600 м/с составляет около 108 Гц. Согласно [6] на частотах ниже частоты среза «усиление волн при интерференции невозможно». Поэтому вместо характерной для волноводного распространения зависимости звукового поля от расстояния до источника в виде чередующихся и постепенно затухающих максимумов и минимумов, свойственной картине нормальных волн, должна наблюдаться плавная картина спадания, характер которой определяется свойствами дна [3].

Однако, как следует из рис. 3b и 4b, экспериментально измеренное отношение сигнал/шум (E) остается практически постоянным на уровне 7–8 дБ до дистанции 150 м в акватории 1, а в акватории 2 имеет





 а) низкочастотная часть спектра дыхательных шумов; b) отношение сигнал/шум спектра детектированных дыхательных шумов; измеренные данные (штриховые линии), МНК-оценка измеренных данных полиномом 5-й степени (сплошная кривая)

еще и дополнительный устойчивый подъем на дистанциях от 70 до 150 м. Следовательно, выявленный в исследованных акваториях характер спадания амплитуды шумов источника с дистанцией явно не укладывается в рамки классических представлений о распространении низкочастотного звука в приповерхностном волноводе мелкого моря, рассмотренных выше.

Напомним, что в нашем случае прием сигналов выполнялся донными гидрофонами. Следовательно, в обоих случаях (рис. 3, 4) дальнее распространение низкочастотных сигналов, связанных с дыхательными шумами водолазов-аквалангистов, может быть предположительно соотнесено с сейсмоакустической составляющей излучаемого сигнала, бегущей по осадочному чехлу дна акватории и/или тонкому придонному слою воды и вследствие этого воспринимаемой лежащими на дне гидрофонами антенной решетки. Уточнение особенностей возбуждения, распространения и восприятия этой сейсмоакустической составляющей волны требует дальнейших исследований.

#### Заключение

Для диапазона частот ниже 100 Гц, характерного для шумов, связанных с дыханием водолаза-аквалангиста, существенная часть сигналов, передаваемых на размещенные у дна (глубина 10 м) гидрофоны, может быть соотнесена с сейсмоакустической составляющей волны, бегущей по осадочному чехлу дна и/или тонкому придонному водному слою исследованных акваторий. При этом дистанции, на которых удается идентифицировать низкочастотные дыхательные шумы водолаза-аквалангиста, достигают 180–220 м, что делает полученные результаты перспективными для использования при решении задач предотвращения несанкционированного проникновения легководолазов в прибрежные акватории.

Благодарность. Исследование поддержано Программой фундаментальных исследований Российской академии наук (№ гос. регистрации проекта АААА-А20-120031890011-8).

#### Литература

- Bevans D.A., Buckingham M.J. Estimating the sound speed of a shallow-water marine sediment from the head wave excited by a low-flying helicopter // J. Acoust. Soc. Am. 2017. 142 (4). P. 2273–2287.
- Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Санкт-Петербург: Судостроение 1983. С. 91.
- F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt. Computational Ocean Acoustics. Second Edition. New York. Springer. 2011. 794 p.
- Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., Костив А.Е., Бородин А.Е., Почекутова И.А., Василистов А.М., Крупеньков А.В., Ширяев А.Д., Власов Д.И. Возможность пассивного акустического мониторинга легководолаза // ДАН. 2016. Т. 466. № 5. С. 602–606.
- Korenbaum V., Gorovoy S., Kostiv A., Shiryaev A., Borodin A. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver using low-frequency respiratory-associated noise emitted into water // J. Acoust. Soc. Am. 2019. 146. P. 4507–4513
- Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. Geol. Soc. of America. 1948. 139 p.

 Sutin A., Bunin B., Sedunov A., Sedunov N., Fillinger L., Tsionskiy M., Bruno M. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance // 2010 Int. Waterside Sec. Conf., WSS2010. art. no. 5730286.

#### References

- Bevans D.A., Buckingham M.J. Estimating the sound speed of a shallow-water marine sediment from the head wave excited by a low-flying helicopter // J. Acoust. Soc. Am. 2017. 142 (4). P. 2273–2287.
- 2. Bogorodskiy V.V., Zubarev L.A., Korepin Ye.A., Yakushev V.I. Podvodnyie akusticheskie preobrazovateli. Sudostroyeniye, St. Peterburg. 1983. P. 91.
- 3. F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, H. Schmidt // Computational Ocean Acoustics. Second Edition. New York. Springer. 2011. 794 p.
- Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Tagiltcev A.A., Kostiv A.E., Borodin A.E., Pochekutova I.A., Vasilistov A.M., Krupenkov A.C., Shiryaev A.D., and Vlasov D.I. The Possibility of Passive Acoustic Monitoring of a Scuba Diver. Doklady Earth Sciences. 2016. Vol. 466. Part 2. P. 187–190. DOI: 10.1134/S1028334X16020136.
- Korenbaum V., Gorovoy S., Kostiv A., Shiryaev A., Borodin A. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver using low-frequency respiratory-associated noise emitted into water // J. Acoust. Soc. Am. 2019. 146. P. 4507–4513.
- Pekeris C.L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. of America. 1948. 139 p.
- Sutin A., Bunin B., Sedunov A., Sedunov N., Fillinger L., Tsionskiy M., Bruno M. Stevens passive acoustic system for underwater surveillance // 2010 Int. Waterside Sec. Conf., WSS2010. art. no. 5730286.