

О РЕГИСТРАЦИИ ШУМОВ,
СОЗДАВАЕМЫХ ЛАСТАМИ НА МЕЛКОВОДЬЕ

С.В. Горовой^{1,2}, В.И. Коренбаум^{1*}

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет,*

Инженерная школа, Владивосток

E-mail: *v-kor@poi.dvo.ru

Аннотация

Особенности шумов ласт легководолазов, свидетельствующие о мультипольном характере излучения их источников, предсказаны теоретически. Экспериментально продемонстрирована перспективность обнаружения низкочастотных составляющих шума ласт водолаза-аквалангиста с помощью приемника градиента давления. Полученные результаты свидетельствуют о том, что низкочастотные шумы ласт легководолазов могут быть успешно использованы для пассивного обнаружения и мониторинга как в интересах обеспечения безопасности рекреационного дайвинга, так и в антитеррористических целях.

Ключевые слова: легководолаз, шумы, ласты, обнаружение, приемник градиента давления.

ON REGISTERING NOISES PRODUCED
BY FINS IN SHALLOW WATER

S.V. Gorovoy^{1,2}, V.I. Korenbaum^{1*}

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok,*

²*Far Eastern Federal University, Engineering School, Vladivostok,*

E-mail: *v-kor@poi.dvo.ru

Abstract

The features of noises of fins of scuba divers, indicating the multipole nature of emission, were predicted theoretically. Advantages of detecting the low-

frequency components of the noises of fins of open-circuit scuba diver with the pressure gradient receiver were experimentally demonstrated. The results indicate that the low-frequency noises of fins can be successfully used for passive detection and monitoring, both in the interests of ensuring the safety of recreational diving and for antiterrorism aims.

Keywords: scuba diver, noises, fins, detection, pressure gradient receiver.

ORCID Korenbaum V.I. 0000-0001-7270-2341

Введение

Предотвращение несанкционированного проникновения легководолазов в охраняемые участки прибрежных акваторий актуально как в антитеррористических целях, так и для решения задач охраны прибрежных объектов марикультуры от браконьеров. Особенностью легководолазов как объектов обнаружения является низкий уровень излучения физических полей и малая заметность для активных гидролокационных средств. В то же время принципиально неустраняемыми демаскирующими факторами легководолаза являются функционирование организма, прежде всего, дыхание, а также движение ласт. Эти физиологические процессы порождают мелкомасштабные низкочастотные гидрофизические возмущения в толще воды и придонном осадочном слое, которые, в свою очередь, имеют гидро- и сейсмоакустические проявления, создающие потенциальный физический базис для решения задачи пассивного обнаружения легководолаза на мелководье.

Постановка проблемы

Целью работы является анализ особенностей шумов, создаваемых ластами.

Основные источники шумов легководолаза, обусловленные движением его ласт, имеют характерный размер не более 0,5 м. На частотах ниже 200 Гц (длины волны 7,5 м и более) эти источники излучения могут рассматриваться как точечные. Такие источники могут совершать колебания различных типов, основными из которых являются монополюсные, дипольные, квадрупольные [1].

Для акустического монополя в неограниченном пространстве известны зависимости от расстояния r создаваемого им звукового дав-

ления $p = p_0 * \exp(-ikr)/kr$ и радиальной компоненты колебательной скорости $v_r = p_0(1-i/kr) * \exp(-ikr)/(ckr)$, где p_0 – нормирующий множитель, k – волновое число, i – мнимая единица, c – скорость звука в среде, ρ – ее плотность. Звуковое давление монополя спадает по закону $1/kr$, но для радиальной компоненты его колебательной скорости имеется еще и составляющая, сдвинутая по фазе на $\pi/2$ и спадающая по закону $1/(kr)^2$. Последняя (неволновая) компонента доминирует в ближнем поле источника (при $kr < 1$) и приближенно описывает гидродинамическое воздействие источника на приемный элемент. Приемники давления, гидрофоны (ПД) с малыми волновыми размерами слабо чувствительны к подобному воздействию [2]. В связи с этим измерение характеристик поля монополя гидрофонами оказывается возможным проводить в непосредственной близости к нему. Напротив, приемники градиента давления (ПГД) эту компоненту поля воспринимают более эффективно, чем волновую составляющую. Отклик современных ПГД пропорционален колебательному ускорению $v_r' = i\omega p_0(1-i/kr) * \exp(-ikr)/(ckr)$. Поэтому при $kr < 1$ эффективнее принимать сигнал с помощью ПГД, тогда как при $kr > 1$ – вследствие затухания неволновой компоненты – возможности ПГД и ПД по сигналу выравниваются. Переходная зона, где оба типа акустических приемников будут одинаково эффективны, соответствует $kr = 1$. Если задаться частотами спектра шумов 10–20 Гц, то на дистанциях менее $r = 24 - 12$ м, соответственно, для их регистрации окажутся более пригодными ПГД.

Работу одной ласты можно представить осцилляционными колебаниями ее кромки со сходом потока, что можно описать в виде совокупного дипольного источника, ориентированного под некоторым углом к направлению движения легководолаза. Как известно, поле дипольного источника характеризуется звуковым давлением $p = B \exp(-ikr)/r [1-i/kr] \cos\varphi$, радиальной $v_r = B \exp(-ikr)/(cr) [1-2i/kr-2/(kr)^2] \cos\varphi$ и тангенциальной $v_\tau = B \exp(-ikr)/(cr^2) [i/kr+1/(kr)^2] \sin\varphi$ компонентами колебательной скорости, где B – константа излучения диполя. Наличие тангенциальной компоненты колебательной скорости является важной особенностью ближнего поля диполя по сравнению с монополем. В дальнем поле эффективность его излучения мала по сравнению с монополем, но в ближнем поле за счет наличия составляющих, пропорциональных $1/(kr)^2$ дипольный источник создает возмущения среды более эффективно, чем монополюсный.

Этот эффект физически объясняется появлением переменных гидродинамических течений вблизи осциллирующего источника. Как и в случае монополя, переходная зона для эффективности приема ПГД соответствует $kr = 1$. Однако использование ПГД для регистрации излучения компонент колебательной скорости (ускорения) дипольного источника в ближней зоне представляется более выгодным, чем для случая монополюсного источника.

Если рассматривать излучение пары ласт при их переменном движении (плавание стилем кроль), то к одиночному дипольному излучателю следует присовокупить второй, включенный в противофазе на дистанции менее 0,5 м. Физическая картина попеременного вертикального колебания ласт напоминают поперечный квадрупольный источник, который, как и диполь характеризуется звуковым давлением, радиальной и тангенциальной компонентами колебательной скорости. Эффективность излучения квадрупольного источника ниже, чем у дипольного, однако в ближнем поле колебательной скорости здесь присутствуют составляющие [3], пропорциональные не только $1/(kr)^2$, но также $1/(kr)^3$. Таким образом, регистрация компонент колебательной скорости (ускорения) в ближнем поле такого источника с помощью ПГД может оказаться еще более перспективной.

Описанная проблема требует экспериментального исследования и оценки.

Основные результаты

С целью одновременной записи шумов дыхания и шумов ласт водолаз-аквалангист совершил проход вдоль установленной на дне (глубина 10 м) антенной решетки из 12 гидрофонов и ПГД [4] на высоте около 2 м над ними. Фрагмент записи приведен на Рис. 1, где представлены отклики расположенных рядом гидрофона № 2 антенной решетки и 3-компонентного ПГД. Геометрия расположения и взаимной ориентации компонент ПГД и трассы водолаза-аквалангиста представлена на Рис. 2.

На спектрограмме гидрофона № 2 (Рис. 1а) в диапазоне частот 30–400 Гц хорошо видны характерные вертикальные полосы дыхательных шумов (Рис. 1 – 1) с частотой следования около 0,2 Гц, которые, как и ожидалось, достигают максимума интенсивности (и мак-

симального расширения полосы частот в низкочастотный диапазон (диапазон) при проходе водолаза непосредственно над гидрофоном (Рис. 1 – 1). Дальность различения этих шумов составляет (с учетом скорости водолаза-аквалангиста порядка 0,5 м/с) около 20 м, как на подходе к гидрофону, так и на удалении от него.

На спектрограмме (Рис. 1б) продольно ориентированной вдоль линии антенны и установленной под углом 45° от дна компоненте ПГД (Рис. 2 – 5) хорошо просматриваются синхронные с гидрофо-

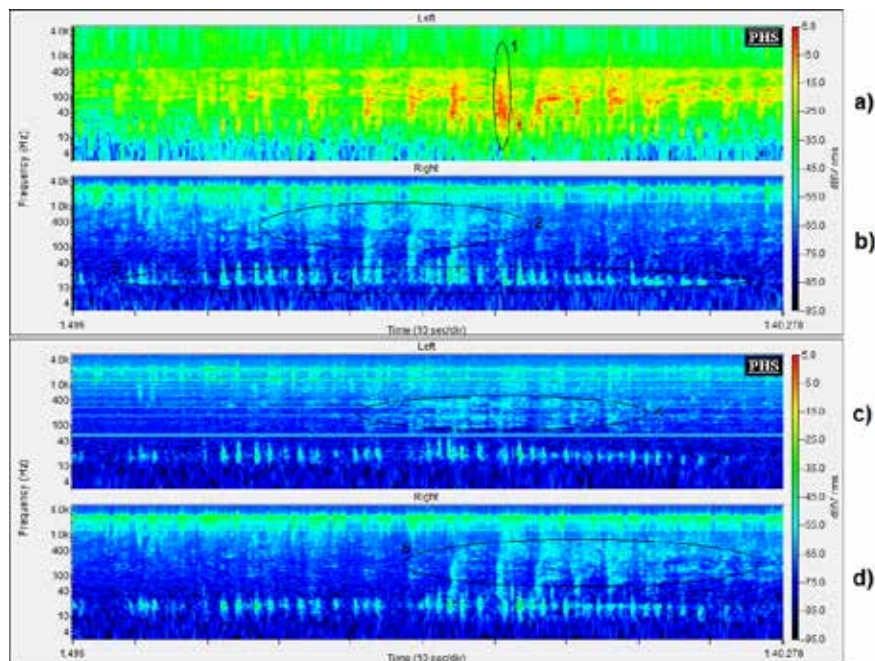


Рис. 1. Спектрограммы откликов гидрофона № 2 и смежного трехкомпонентного ПГД на перемещение аквалангиста на ластах вдоль линии решетки на высоте 2 м над датчиками:

а) гидрофон № 2 антенной решетки; б) компонента ПГД продольной ориентации, установленная под углом 45° от дна (Рис. 2 – 5); в) компонента ПГД горизонтальная, поперечной к линии антенной решетки ориентации; д) компонента ПГД продольной ориентации, установленная под углом 135° от дна (Рис. 2 – 6); 1 – фрагмент дыхательных шумов на гидрофоне; 2 – фрагмент дыхательных шумов на компоненте ПГД продольной ориентации; 3 – фрагмент шумов ласт; 4 – фрагмент дыхательных шумов; 5 – фрагмент дыхательных шумов.

ном № 2 полосы дыхательных шумов преимущественно на подходе к ПГД (Рис. 1 – 2, Рис. 2 – L1). При проходе над самим ПГД, определяемом по максимуму сигналов в отклике гидрофона № 2 (Рис. 1 – 1) и дальнейшем уходе от него (Рис. 2 – L2) эти сигналы существенно ослабевают, что можно объяснить дипольной направленностью этой компоненты ПГД (Рис. 2 – 5).

В то же время в отклике этой компоненты ПГД хорошо просматриваются и более часто повторяющиеся вертикальные полосы в диапазоне частот 10 – 40 Гц (Рис. 1 – 3), имеющие частоту повторения около 0,5 Гц. Интересно, что сходные образования просматриваются и на спектрограмме гидрофона № 2 (Рис. 1а), но менее четко. Поскольку ширина полосы этих спектральных полосок явно увеличивается при приближении к ПГД (Рис. 1b), они могут быть отнесены к шумам, связанным с движением водолаза на ластах. При непосредственном проходе над ПГД и уходе от него ширина полосы этих спектральных полосок постепенно уменьшается, что может быть связано, как с оговоренной вертикальной ориентацией этой компоненты ПГД, так и взаимной ориентацией компоненты ПГД (Рис. 2 – 6) и ориентации дипольной составляющей источника шумов ласт (Рис. 2 – L2). При этом дальность различения этих шумов на подходах к ПГД составля-

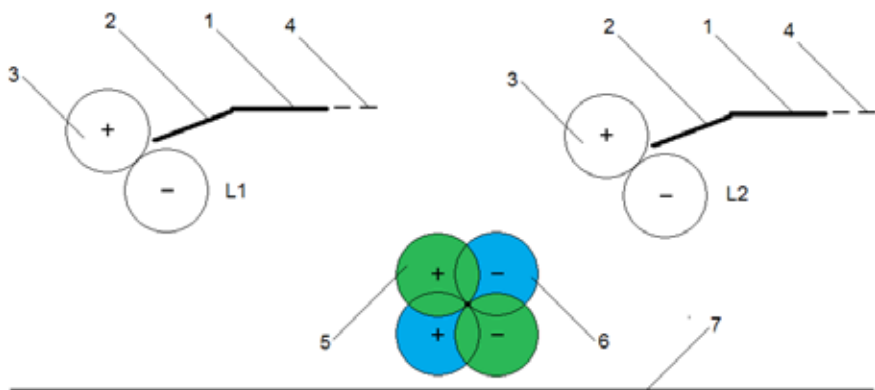


Рис. 2. Схема взаимной ориентации источника излучения шумов ласт легководолаза и ПГД:

L1 – положение водолаза при подходе к ПГД, L2 – при удалении от ПГД,
 1 – положение ноги, 2 – положение ласты, 3 – дипольная составляющая излучения ласты, 4 – направление движения водолаза, 5, 6 – дипольные характеристики направленности компонент ПГД продольной по отношению к трассе водолаза ориентации, 7 – дно акватории.

ет не менее 25 м, а на отходе – 17 м, что близко к вышеприведенной теоретической оценке для $kr = 1$.

На спектрограмме (Рис. 1с) горизонтальной поперечно ориентированной вдоль линии антенны компоненте ПГД ориентированной минимумом дипольной характеристики направленности на трассу прохода водолаза сигналы, соответствующие дыхательным шумам наблюдаются только при проходе непосредственно над ПГД, и то, в существенно ослабленном виде (Рис. 1 – 4). Размываются также (особенно ниже 500 Гц) характерные спектральные полосы дыхательных шумов. Интересно заметить, что асимметрия дальностей различения дыхательных шумов на подходе к ПГД и отходе от него в этом случае исчезает. Наблюдаемые эффекты могут быть связаны с преимущественной регистрацией в данном случае не радиальной и тангенциальной составляющей колебательного ускорения поля источника шумов, что подтверждает его мультипольность (наличие дипольных и квадрупольных составляющих, описанных выше). Это умозаключение подтверждается практически столь же устойчивой регистрацией, как на продольно ориентированной компоненте ПГД (Рис. 1 – 3), шумов, связываемых с движением ласт. Поскольку шумы ласт лежат в более низкочастотной области (ниже 20 – 30 Гц), чем основные дыхательные шумы, данный эффект проявляется здесь еще сильнее и позволяет различать эти шумы на практически тех же дальностях, которые близки к вышеприведенным теоретическим оценкам при $kr = 1$.

На спектрограмме (Рис. 1d) продольно ориентированной вдоль линии антенны и установленной под углом 135° от дна компоненте ПГД (Рис. 2 – 6) по дыхательным шумам просматривается зеркальная (Рис. 1 – 5) по отношению к ортогональной ей продольной компоненте ПГД (Рис. 1 – 1) картина. Здесь шумы усиливаются при удалении водолаза от ПГД. Данный эффект, безусловно, может быть связан с зеркальной ориентацией дипольной характеристики направленности рассматриваемой компоненты ПГД (Рис. 2 – 6). Зато шумы, связываемые с ластами, видны практически на тех же дистанциях и с близкими по полосам частот характеристиками. Это наблюдение может быть истолковано в пользу преимущественно ближнеполевого характера излучения регистрируемых шумов ласт дипольным/квадрупольным источником, совокупность радиальной и тангенциальной составляющих которого приводят к потери компонентами ПГД дипольной направленности, характерной для дальнего поля.

Заключение

Таким образом, при обнаружении легководолаза в толще водного слоя придонными гидроакустическими датчиками для регистрации низкочастотных шумов ласт, действительно, более перспективно применение ПГД. При этом на малых дистанциях влиянием поверхности воды и дна можно пренебречь вследствие показанного выше быстрого затухания гидроакустического сигнала, порождаемого мультипольными источниками шумов ласт, которое делает переотраженные от поверхности и дна сигналы существенно более слабыми, чем прямые. На больших дистанциях обнаружения для диапазона частот, характерного для шумов ласт, становятся существенными эффекты, связанные с «запиранием» гидроакустического волновода, что ограничивает достижимую дальность обнаружения по порядку той же глубиной места. Однако часть гидрофизических возмущений в толще воды, создаваемых движением ласт, может передаваться в осадочный слой дна и возбуждать в нем донные волны, которые могут распространяться достаточно далеко и обнаруживаться как углубленными в осадочный слой вибродатчиками (сейсмоакустическая компонента), так и расположенными в воде у дна гидрофонами и ПГД (гидроакустическая компонента). Особый интерес в этом плане представляют исключительно мелководные акватории глубиной 2 — 3 м. Количественные исследования возможностей выделения сейсмоакустической и гидроакустической компонент шумов ласт будут продолжены.

Благодарность Работа выполнена при финансовой поддержке Программы РАН «Новые вызовы климатической системы Земли», проект № 18-1-004.

Литература

1. Skurdzyk E. The Foundations of Acoustics, Springer-Verlag, Wien New York, 1971.
2. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A. (2012), Flow noise of an underwater vector sensor embedded in a flexible towed array, Journal of Acoustic Society of America. 131. 5. p. 3755-3762.
3. Korenbaum V.I., Tagiltcev A.A., Gorovoy S.V., Shiryayev A.D., Kostiv A.E. On Localization of Wheezing Respiratory Sounds in Human Lungs by means of Intensimetric Processing of Signals Detected on the Chest Surface Acoustical Physics. 2016. Vol. 62. No. 5. pp. 600–607.
4. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoy S.V., Kostiv A.E., Shiryayev A.D. (2017), Low-frequency inertial-type pressure-gradient receivers for oceanological investiga-

tions. *Instruments and Experimental Techniques*. 60. 4. P. 600–604. DOI: 10.1134/S0020441217040066.

References

1. Skurdzyk E. *The Foundations of Acoustics*, Springer-Verlag, Wien New York, 1971.
2. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A. (2012), Flow noise of an underwater vector sensor embedded in a flexible towed array, *Journal of Acoustic Society of America*. 131. 5. p. 3755-3762.
3. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoy S.V., Shiryayev A.D., Kostiv A.E. On Localization of Wheezing Respiratory Sounds in Human Lungs by means of Intensity Processing of Signals Detected on the Chest Surface *Acoustical Physics*. 2016. Vol. 62. No. 5. pp. 600–607.
4. Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Gorovoy S.V., Kostiv A.E., Shiryayev A.D. (2017), Low-frequency inertial-type pressure-gradient receivers for oceanological investigations. *Instruments and Experimental Techniques*. 60. 4. P. 600–604. DOI: 10.1134/S0020441217040066.