

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНЫХ ШУМОВ ЛЕГКОВОДОЛАЗА–АКВАЛАНГИСТА

С.В. Горовой, А.А. Тагильцев, В.Г. Сиренко

Представлены результаты экспериментального исследования в полосе частот 10–4000 Гц спектральных плотностей, функций когерентности и одномерных плотностей распределения вероятностей мгновенных значений звукового давления и горизонтальной компоненты градиента звукового давления гидроакустических шумов находящегося неподвижно у дна легководолаза, экипированного аквалангом Aeris (США). Шумы зарегистрированы в прибрежной акватории на расстоянии 2 м от источника. Во время эксперимента наблюдались техногенные помехи, обусловленные движением судов, а также импульсные помехи, создаваемые морскими ракообразными. Показано, что основная часть энергии шумов, создаваемых дыханием легководолаза, сосредоточена в диапазоне 15–1000 Гц. Наибольшие значения функции когерентности сигналов, воспринимаемых приемником звукового давления и приемником градиента звукового давления во время выдохов, наблюдались в областях 25–100 Гц и 350–600 Гц, во время вдохов – в областях 80–250 Гц и 350–800 Гц. В качестве моделей плотностей распределений мгновенных значений зарегистрированных шумов предлагается использовать суммы гауссовских распределений. Приводятся рекомендации по возможным практическим применениям результатов исследований.

Ключевые слова: гидроакустические шумы мелкого моря, векторно–скалярные приемники, шумы легководолазов.

Введение

В подводных работах, выполняемых легководолазами в мелководных, с глубинами менее 30 м прибрежных морских акваториях, широко используются дыхательные аппараты открытого цикла (акваланги), а также, на глубинах до 20 м – более компактные дыхательные аппараты замкнутого цикла (ребризеры). Во время нахождения под водой чувствительность легководолазов к изменениям самочувствия притупляется. Известно, что недостаточный контроль самочувствия, функционального и психоэмоционального состояния влияет на качество выполняемых ими работ под водой, а также может стать причиной заболеваний водолаза, травм или даже гибели [1], поэтому дистанционный, в реальном времени, мониторинг физического состояния находящихся под водой легководолазов является очень важным при обучении, тренировках, а также в целях профилактики профессиональных заболеваний.

Гидроакустические (ГА) шумы, обусловленные дыханием, движением и деятельностью легководолазов под водой могут использоваться как для осуществления дистанционного контроля и объективной оценки состояния их здоровья [2, 3], так и для наблюдения за перемещениями и определения местоположения под водой [4, 5]. В работах [2–6] описаны результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов. В [2, 3, 7] приведены результаты исследования спектральных характеристик звукового давления шумов легководолаза с ребризером FROGS [8], в котором применены специальные технические решения для уменьшения его шумоизлучения. Шумы легководолазов с дыхательными аппаратами различных типов отличаются как интенсивностью, так и областями частот, в которых сосредоточена наибольшая часть излучаемой ими звуковой энергии [2, 3, 5, 6, 8]. Характеристики шумов, создаваемых даже одним и тем же дыхатель-

ным аппаратом при использовании в идентичных условиях разными легководолазами, могут существенно отличаться, что требует индивидуального подхода к их наблюдению и статистических оценок.

Представляемые авторами результаты эксперимента, выполнены с целью исследования спектральных и статистических характеристик подводных шумов, зарегистрированных векторно-скалярным приемником (ВСП) вблизи неподвижного легководолаза, экипированного аквалангом. ВСП включает ненаправленный приемник звукового давления (ПД) и векторный приемник (ВП) инерционного типа собственной разработки [9], который, как показано далее, в большей части диапазона частот 10–1000 Гц работал как приемник компонент градиента звукового давления. Поступавшие от ВСП сигналы после усиления и фильтрации в общей полосе частот 10–4000 Гц подвергались дискретизации с помощью многоканального 16-разрядного АЦП и записывались в память компьютера. Частота дискретизации составляла 10 кГц.

■ Описание эксперимента

Эксперимент по регистрации шумов легководолаза выполнялся летом в одной из акваторий залива Петра Великого Японского моря. Условия эксперимента: состояние моря 2 балла, придонное течение со скоростью порядка 0,02 м/с, глубина места в районе работ 6 м, дно – песок, редкие водоросли. Во время эксперимента, кроме ГА динамических шумов моря, наблюдались техногенные помехи, обусловленные движением судов, импульсные помехи, создаваемые донными биологическими объектами (раки, мелкие крабы и др.). Результирующие уровни техногенных помех и динамических шумов моря во время эксперимента примерно соответствовали кривым Венца при состоянии моря 4 балла. ВСП был установлен на расстоянии 0,3 м от дна и соединен кабелем с аппаратурой регистрации сигналов. ВСП был ориентирован так, чтобы направление максимальной чувствительности датчика одной из его горизонтальных компонент было параллельно береговой линии, второй компонент – перпендикулярно.

В выполнении эксперимента участвовал профессиональный легководолаз с более чем 20-летним опытом подводного плавания и водолазных работ под водой (сварочных, монтажных, аварийно-спасательных и др.) как с дыхательными аппаратами различных типов, так и на задержке дыхания. Легководолаз использовал следующее снаряжение: «мокрый» гидрокостюм, ласты, акваланг Aeris с регулятором

давления Aeris ION AT600 и компенсатор плавучести (жилет) Aeris. Непосредственно перед проведением эксперимента легководолаз выполнил подготовительные упражнения: погружения – проходы под водой – всплытия для проверки снаряжения и своего самочувствия. Во время выполнения эксперимента легководолаз погрузился в воду, приблизился к ВСП и, скомпенсировав плавучесть, находился стоя на дне на расстоянии 2 м от него так, чтобы находиться в направлении максимума чувствительности ВП, ориентированного параллельно береговой линии. Затем он последовательно на 2 минуты (для регистрации шумов акватории) выполнил задержку дыхания, далее в течение 10 минут (с 20:33 до 20:43 местного времени) старался дышать в удобном для себя режиме, потом вновь на 2 минуты выполнил задержку дыхания. После выхода на берег он сообщил о симптомах недомогания, появившихся под водой: затрудненное и неравномерное дыхание, мышечная слабость. Симптомы были отнесены к последствиям перенесенной незадолго до эксперимента вирусной инфекции. После подъема из воды дыхание легководолаза нормализовалось, но общее недомогание продолжалось. При последующем обращении в медицинское учреждение, обследовании и долечивании его состояние здоровья и пригодность к выполнению погружений восстановились.

■ Методика и результаты эксперимента

ГА шумы, зарегистрированные в канале ПД ($y_1(t)$) и ВП $y_2(t)$, максимум характеристики направленности чувствительности которого был ориентирован на легководолаза, подвергались спектральной и статистической обработке. На рис. 1 показаны осциллограмма и спектрограмма шума $y_2(t)$, поступавшего во время эксперимента с выхода вышеуказанного ВП, масштабы уровней условные. На рис. 2 и 3 показаны фрагменты осциллограммы и спектрограммы рис. 1. Осциллограммы имеют вид суммы непрерывного случайного процесса (шумовой дорожки) и нестационарной последовательности импульсных помех, создаваемых щелчками ракообразных. Амплитуды некоторых из импульсных помех на порядок и более превышают среднее квадратическое значение шумовой дорожки. Разрешающая способность по частоте на всех спектрограммах составляет 2,5 Гц. Независимо от наличия или отсутствия шумов дыхания легководолаза на спектрограммах наблюдаются артефакты: максимум вблизи 2100 Гц, соответствующий резонансной частоте чувствительного элемента ВП, минимум (темная полоса) и максимум на частотах

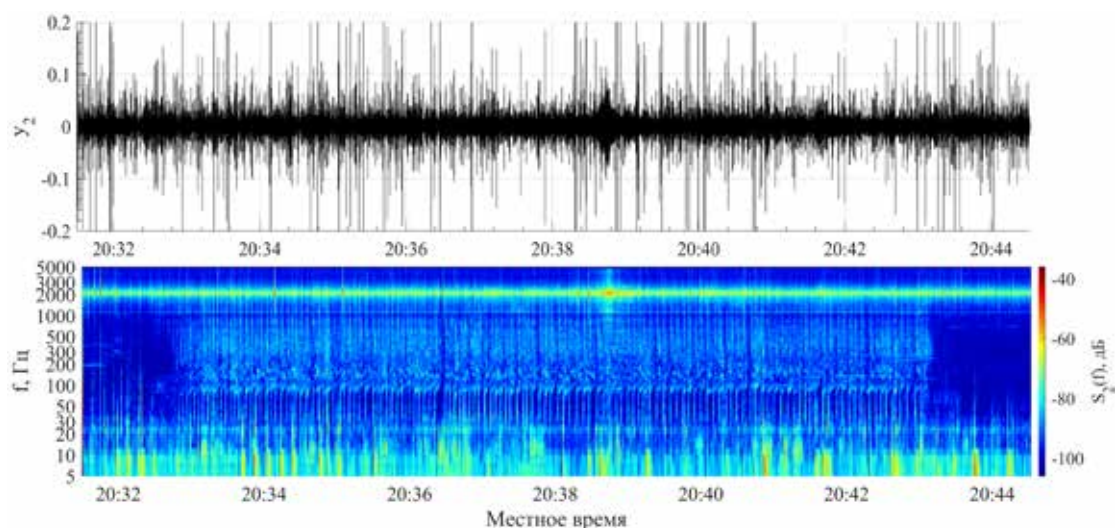


Рис. 1. Осциллограмма и спектрограмма шумов в канале ВП во время эксперимента

1060 Гц и 1130 Гц (антирезонанс и резонанс), и максимум вблизи 20 Гц, обусловленные резонансными свойствами конструктивных элементов системы крепления ВСП. Нерегулярные составляющие на частотах менее 20 Гц вызваны небольшими движениями легководолаза. Осциллограммы и спектрограммы шумов, поступающих с выхода ПД имеют подобный вид, но на них незаметны указанные артефакты.

На спектрограмме рис. 1, на интервале 20:33–20:43 явно видны составляющие, обусловленные дыхательными циклами легководолаза. Видно, что энергия шумов дыхания легководолаза с данным экземпляром акваланга, зарегистрированных на расстоянии 2 м от него, сосредоточена в области 15–1000 Гц.

На рис. 3 рамками красного и синего цвета выделены интервалы длительностью 1 с во время выдыхов

и вдохов легководолаза. Сигналы на данных интервалах использованы далее для оценивания усредненных спектральных характеристик и плотностей распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений шумов дыхания легководолаза.

На рис. 4 красными и синими линиями показаны частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов с ПД (график $P_{11}(f)$) и ВП (график $P_{22}(f)$) во время выдыхов и вдохов, оцененные в полосах шириной 10 Гц на интервалах 1 с, выделенных рамками соответствующих цветов на рис. 3, масштабы уровней условные. Линиями черного цвета показаны усредненные по трем интервалам длительностью 1 с спектральные уровни в полосах шириной 10 Гц шумов с ПД и ВП, когда легководолаз выполнял задержку дыхания после 20:43 местного времени. Поскольку легководолаз не двигался, они соот-

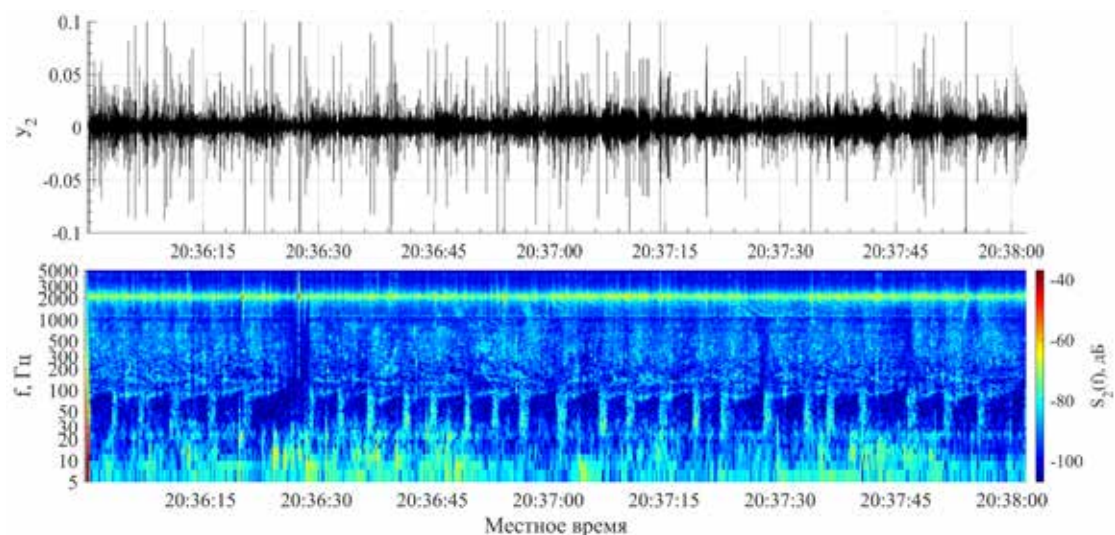


Рис. 2. Фрагменты длительностью 120 секунд из осциллограммы и спектрограммы рис. 1

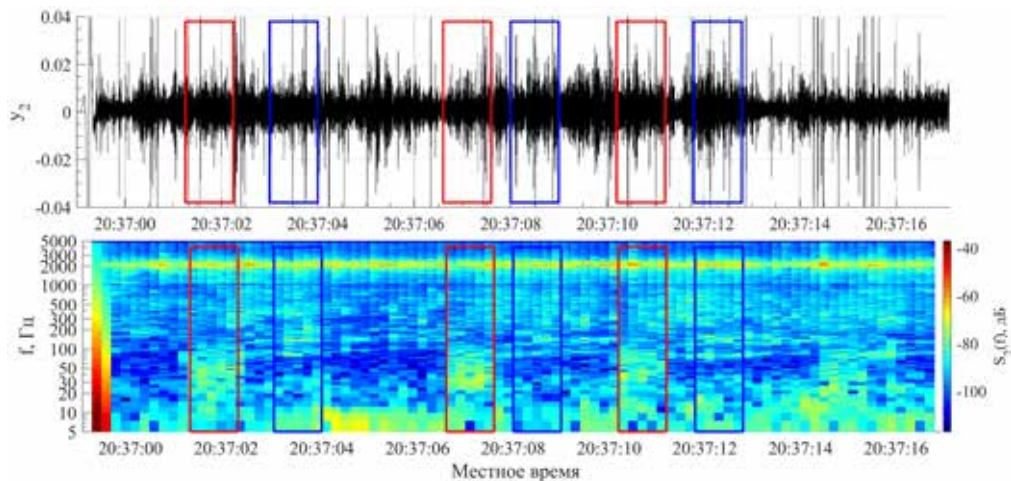


Рис. 3. Фрагменты длительностью 16 с из осциллограммы и спектрограммы рис. 2. Красными и синими рамками выделены односекундные интервалы во время выдохов и вдохов соответственно

ветствуют спектральным уровням шумов акватории. Приведенные на рис. 4 зависимости предназначены для использования в качестве оценок спектральных плотностей шумов легководолаза и акватории. Видно, что во время выдохов большая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе частот 15–600 Гц, в которой наблюдается один плавный экстремум в области 40–50 Гц. Во время вдохов большая часть энергии шума легководолаза была сосредоточена в полосе 60–600 Гц, здесь наблюдаются два плавных экстремума: в области 80–90 Гц и в области 140–150 Гц.

На частотах 250–600 Гц как для шумов с ПД, так и для шумов с ВП спектральные уровни во время выдохов и вдохов практически совпадают, хотя превышение спектральных уровней шумов с ВП над шу-

мами акватории на 2–3 дБ больше, чем для шумов с ПД. Указанное совпадение спектральных уровней свидетельствует о том, что шум легководолаза в данной области обусловлен в основном потоком всплывающих пузырей выдыхаемого воздуха. На частотах 600–1000 Гц спектральные уровни шумов с ПД во время выдохов и во время вдохов почти совпадают с уровнями шумов акватории, которые наблюдались во время эксперимента, тогда как для шумов с ВП они на 5–10 дБ превышают уровни шумов акватории. Это подтверждает преимущество применения ВП по сравнению с ПД в области частот 250–1000 Гц, где проявляется пространственная избирательность ВП.

На частотах ниже 20 Гц наблюдается обратная ситуация: в данном эксперименте применение ПД имеет преимущество перед ВП. Так, на частотах 10–

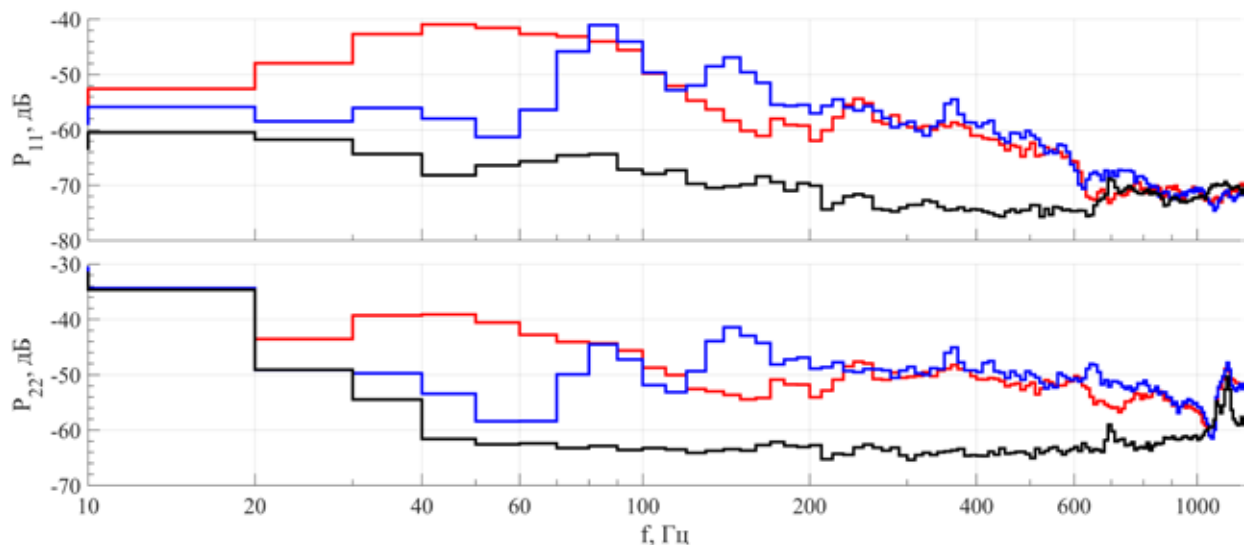


Рис. 4. Частотные зависимости модулей усредненных спектральных уровней шумов в каналах ПД (график P11) и ВП (график P22). Красными, синими и черными линиями показаны модули соответственно выдохов, вдохов и шумов акватории в полосах шириной 10 Гц

20 Гц спектральные уровни шумов с ВП и при выдохе и при вдохе становятся сравнимыми с уровнями шумов моря, тогда как спектральные уровни шумов с ПД превышают уровень шумов акватории на 8 и 6 дБ соответственно.

Весьма важным является вопрос о том, какой характеристике звукового поля (колебательная скорость, градиент давления, интенсивность и т.д.) в реальных условиях соответствуют электрические сигналы на выходе применяемого ВП в различных областях частот [9–11]. Известно, что если сигнал на выходе идеального ВП пропорционален градиенту звукового давления, то его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) чувствительности по звуковому давлению с повышением частоты имеет рост 20 дБ/декада, тогда как у идеального ненаправленного ПД она не зависит от частоты. Поэтому отношение модулей спектральных плотностей шумов с выходов имеющих общий фазовый центр ВП и ПД (или разность их логарифмов), при повышении частоты будет характеризоваться указанным наклоном 20 дБ/декада [9, 10].

На рис. 5 сплошными линиями красного, синего и черного цвета показаны разности $P_{22}-P_{11}$ графиков, приведенных на рис. 4, для интервалов выдохов, вдохов, выделенных на рис. 3, и шумов акватории соответственно. Видно, что на частотах 150–400 Гц все линии практически совпадают, на частотах 60–1500 Гц, отклонения от наклона 20 дБ/декада не превышают 5–10 дБ, наибольшие по абсолютной величине отклонения наблюдаются для шумового фона. При увеличении времени накопления отклонения от указанного наклона уменьшаются. Это позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне частот 60–1500 Гц данный ВП, с учетом использованной в эксперименте системы его крепления, следует рассматривать как приемник градиента звукового давления (ПГД) и использовать для описания его характеристик соотношения, приведенные в [10, 11].

Основные преимущества ВСП по сравнению с ПД при малых отношениях сигнал/помеха реализу-

ются путем использования известных в статистической радиотехнике алгоритмов обработки сигналов, в которых объединяется информация, поступающая с ПД и ВП так, чтобы подлежащие приему или обнаружению сигналы складывались когерентно, а помехи – некогерентно [10–13]. Для решения вопроса о целесообразности сложения (в т.ч. взвешенного частотно-зависимого) когерентных составляющих шумов легководолазов, воспринимаемых ПД и ВП, необходимо иметь информацию о модулях и аргументах взаимных спектров, а также о функциях когерентности [12, 13] как для полезных сигналов (в данном случае шумов дыхания), так и для помех – шумов акватории.

На рис. 6, сверху вниз, показаны частотные зависимости модулей ($P_{12}(f)$) и аргументов ($\arg_{12}(f)$) взаимных спектральных уровней, а также функции когерентности ($C_{12}(f)$) шумов на выходах ПД и ВП, усредненные по трем выделенным временным интервалам (на рис. 3), в полосах частот шириной 10 Гц. Красные, синие и черные линии соответствуют выдохам, вдохам и шумам акватории.

Видно, что положения на оси частот максимумов модулей взаимных спектров $P_{12}(f)$ соответствуют положениям максимумов модулей спектральных уровней $P_{11}(f)$ и $P_{22}(f)$, приведенных на рис. 4. На частотах 30–600 Гц их уровни на 20 дБ и более превышают уровни взаимного спектра шума акватории, а их аргументы ($\arg_{12}(f)$) отличаются друг от друга в пределах 10° . Наибольшие значения функции когерентности шумов, воспринимаемых ПД и приемником градиента звукового давления (ВП) во время выдохов, наблюдались в областях 25–100 Гц и 350–600 Гц, а во время вдохов – в областях 80–250 Гц и 350–800 Гц.

Представленные оценки позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиночного ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП (формирование, с учетом отличия от нуля аргумента взаимного спектра, кардионидных характеристик направленности в частотных

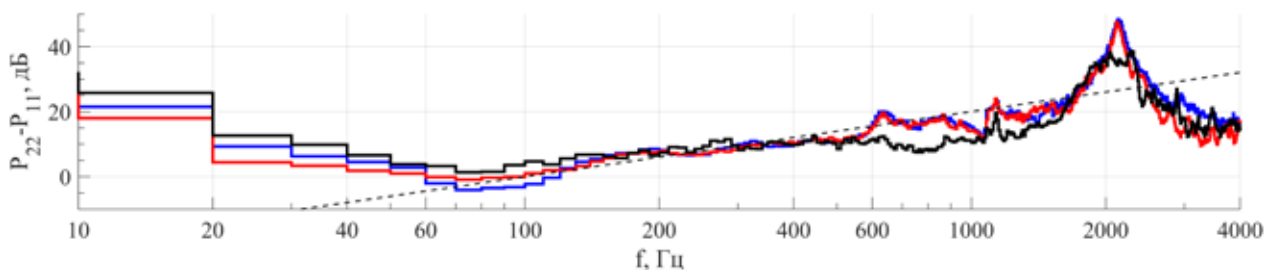


Рис. 5. Частотная характеристика разности $P_{22}-P_{11}$. Сплошные линии черного, красного и синего цвета – разности модулей усредненных спектральных уровней шумов моря, шумов выдохов и вдохов, на выходах ВП и ПД во время эксперимента. Пунктирная линия соответствует наклону 20 дБ/декада

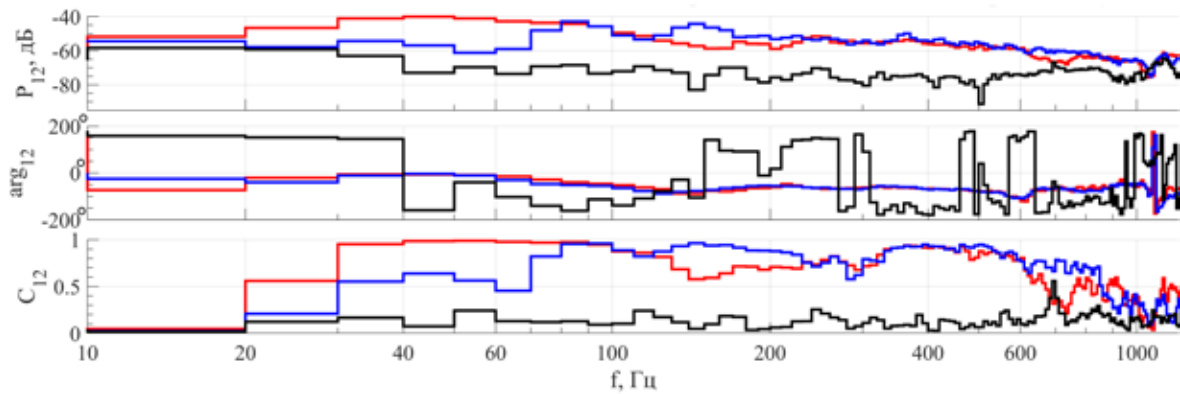


Рис. 6. Модули и аргументы взаимных спектральных уровней, функции когерентности (сверху вниз) шумов в каналах ПД и ВП. Красные, синие и черные линии соответствуют интервалам во время выдохов, вдохов и шумов моря

полосах, где наблюдается высокая когерентность, и др.) по сравнению с одиночным ПД.

Для определения физического состояния легководолаза во время нахождения под водой весьма важным является вопрос об оценивании в режиме реального времени характеристик его дыхания [2, 3, 13], и в первую очередь – частоты повторения и «интенсивности» дыхательных циклов (вдох–выдох). Как видно из спектрограмм, рис. 1–3, дыхательный ритм легководолаза наиболее заметен в полосе частот 40–90 Гц. На рис. 7, а, б показаны осциллограммы сигналов от ПД и ВП на выходах цифровых фильтров в этой полосе. Отдельные дыхательные циклы (выдох–вдох) определенно видны, заметны нерегулярность

их следования и изменения уровней, обусловленные физическим состоянием легководолаза.

Для оценивания динамики характеристик дыхательного ритма легководолаза воспользуемся спектральным анализом огибающей его шумов [2, 3]. Выделение огибающих широкополосных процессов, таких как шумы легководолазов, может быть осуществлено различными способами, в том числе с помощью преобразования Гильберта [12]. В данном случае для выделения огибающей более предпочтительным является использование энергетического приемника, выполняющего последовательно операции полосовой фильтрации, квадратичного детектирования и скользящего интегрирования [2, 5]. Сколь-

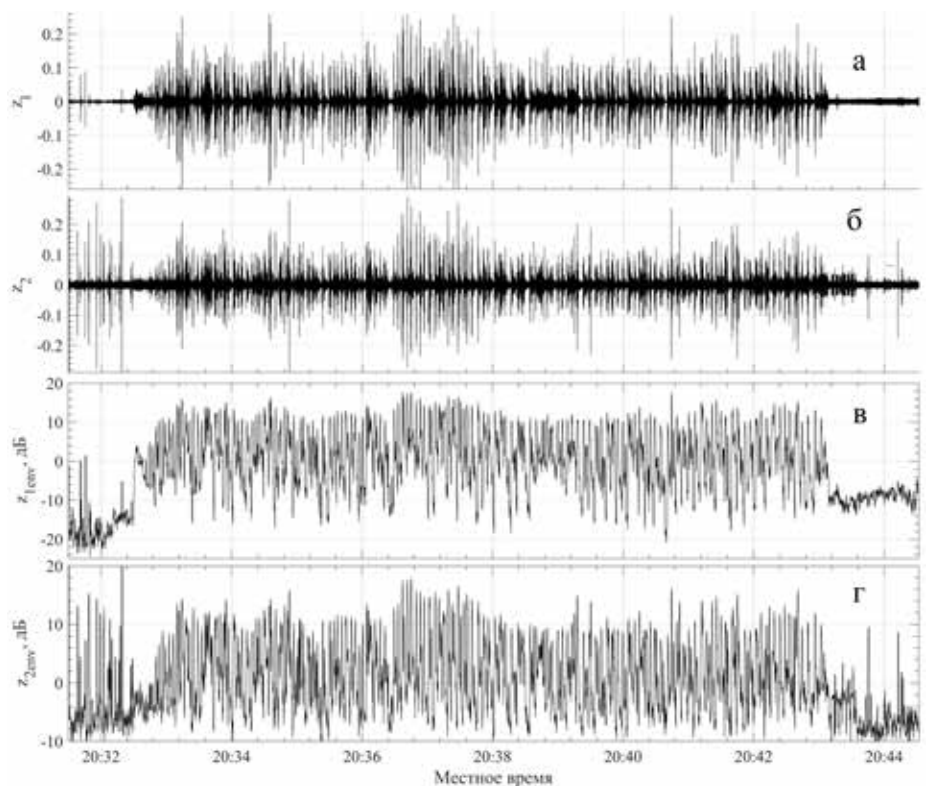


Рис. 7. Осциллограммы шумов (а, б) от ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц и их огибающих (в, г) при времени накопления 0.5 с

зующее интегрирование (суммирование при цифровой реализации) за время T с постоянными весами эквивалентно применению фильтра скользящего среднего, амплитудно-частотная характеристика которого описывается соотношением $H(f) = \sin(2\pi fT/2)/(2\pi fT/2)$. Если время интегрирования составляет 0,5 с, то первый нуль $H(f)$ будет наблюдаться при $f = 2$ Гц, что достаточно в данном случае, так как частота дыхания легководолаза обычно не выходит за пределы 0,1–1 Гц (6–60 дыхательных циклов в минуту).

На рис. 7, в, г показаны осциллограммы огибающих шумов от ПД и ВП, полученные с помощью энергетических приемников в полосе частот 40–90 Гц при времени накопления 0,5 с. Видно, что превышение шумов легководолазов над шумами акватории (отношение сигнал/помеха) как для ПД, так и для ВП составляет более 20 дБ.

На рис. 8 показаны спектрограммы вышеуказанных огибающих. Для их построения использовалось не быстрое преобразование Фурье (БПФ), а способ, который применялся до появления алгоритмов БПФ для вычисления спектра мощности (этот способ используется также в устройствах обнаружения тональных сигналов с неизвестными амплитудами и начальными фазами на фоне помех): для получения оценки спектра мощности на частоте f исследуемый фрагмент сигнала длительности T_{in} умножается на функции $\sin(2\pi ft)$ и $\cos(2\pi ft)$, результаты умножения интегрируются на интервале длительностью T_{in} , затем возводятся в квадрат, суммируются и извлекается квадратный корень из суммы квадратов. В данном случае частота f изменялась от 0,06 до 2 Гц с шагом 0,005 Гц, длительности интервалов T_{in} были выбраны равными 20 с, чтобы охватить не менее трех ды-

хательных циклов, сдвиг по времени анализируемых интервалов составлял 1 с. Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками. В данном случае частота дыхания легководолаза не оставалась постоянной, что характеризует опытных пловцов, а нерегулярно изменялась в основном от 0,2 до 0,3 Гц (интервалы между вдохами или выдохами составляли 3,3–5 с). Это свидетельствует о нарушении ритма дыхания, вызванного отклонениями в физическом состоянии легководолаза во время эксперимента, что подтвердилось после его выхода из воды.

Для построения алгоритмов, обеспечивающих увеличение дальности мониторинга легководолазов с помощью методов статистической радиотехники, необходимы модели плотностей распределения вероятностей (ПРВ) мгновенных значений принимаемых ПД и ВП шумов. Очень важным является оценивание возможности применения, в качестве таких моделей, гауссовского распределения вероятностей. На рис. 9 показаны усредненные по трем выделенным рамками на рис. 3 фрагментам шумов от ПД и ВП (во время выдохов и вдохов, а также шумов акватории) нормированные (когда математическое ожидание и дисперсия равны 0 и 1 соответственно) гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений этих шумов от ПД (вверху) и ПД (внизу) в полосе частот 40–90 Гц. Здесь (а) и (б) – гистограммы во время выдохов, (в) и (г) – гистограммы во время вдохов, (д) и (е) – гистограммы шумового фона. Красными пунктирными линиями показаны нормированные гауссовские кривые. Видно, что во всех случаях наблюдаются отличия от гауссовского распределения. Детальный анализ шумов легководолаза показал, что наблюдаемые отличия

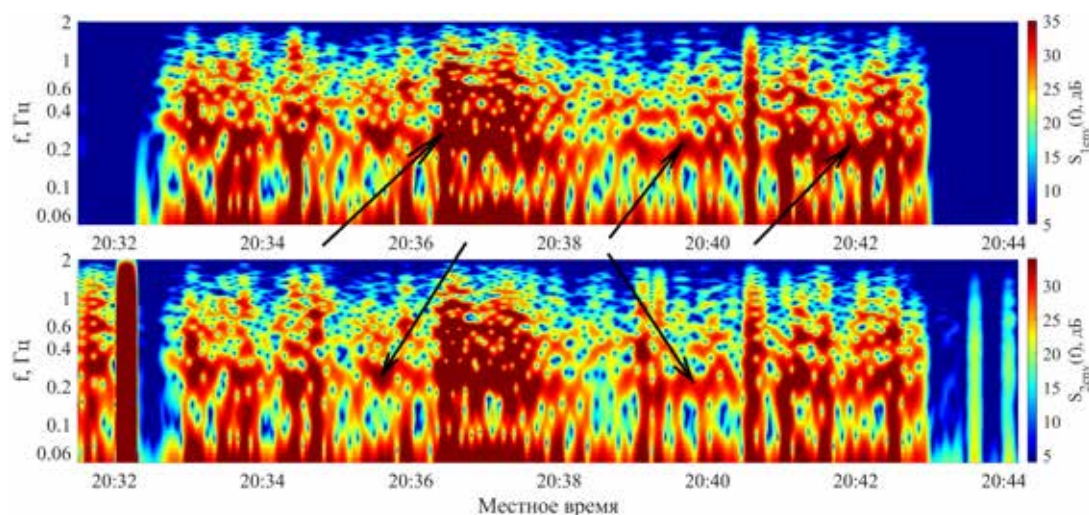


Рис. 8. Спектрограммы огибающих шумов ПД (вверху) и ВП (внизу). Соответствующие частоте дыхания спектральные составляющие показаны стрелками

ПРВ мгновенных значений от гауссовского закона во время выдохов и вдохов обусловлены сложной структурой шумов легководолаза. Отличия от гауссовского закона ПРВ мгновенных значений шумового фона акватории обусловлены импульсными помехами, создаваемыми морскими обитателями [16].

В качестве моделей плотностей распределения, пригодных (в том числе для формирования отношений правдоподобия) для выдохов, вдохов и шумов акватории удобно использовать суммы гауссовских распределений [15–17], имеющих вид:

$$w(y) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_1^2}} + B \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_2^2}},$$

где σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения, A и B – весовые коэффициенты. Процедура определения всех этих величин по экспериментальным данным описана в [15, 16].

На рис. 9, а, б сплошными линиями синего цвета показаны графики функции $w(y)$ для случаев, когда $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0,5$, $A = 0,8$, $B = 0,2$ и $\sigma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0,6$, $A = 0,225$, $B = 0,775$ соответственно. Данные функции пригодны для использования в качестве моделей ПРВ мгновенных значений сигналов с ПД и ВП в полосе частот 40–90 Гц во время выдохов легководолаза. Аналогично формируются модели и для других распределений, показанных на рис. 9. Вопрос о построении более точных моделей, обеспечивающих заданные значения уровней значимости, применительно к практическим задачам является спорным вследствие заметной на рис. 1–3 и 7 вариабельности шумов дыхания легководолаза.

Заключение

Регистрация ГА шумов легководолаза одиноким векторно-скалярным приемником позволяет получить в реальном времени дополнительный объем новой информации о спектральных и статистических характеристиках, что открывает возможность увеличения дальности наблюдения создаваемых аквалангистом шумов и мониторинга его физического состояния.

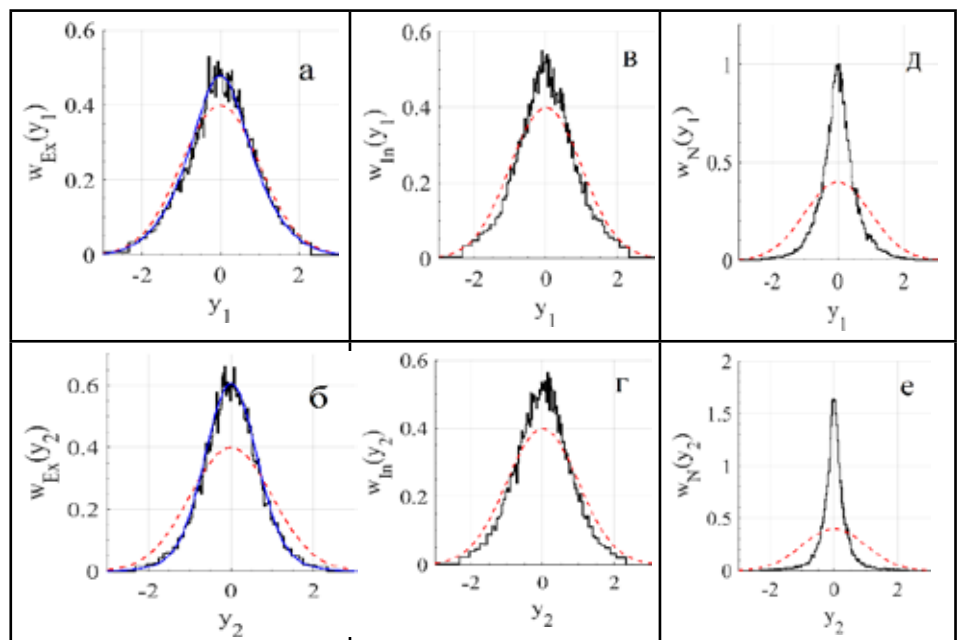
Во время пребывания под водой при выполнении описанного в работе эксперимента у профессионального легководолаза произошли изменения в физическом состоянии, что было обнаружено в процессе анализа шумов и ритма дыхания и стало основанием для дополнительного лечения последствий ранее перенесенного респираторного заболевания.

Основная часть энергии шумов легководолаза с дыхательным аппаратом Aeris, регистрируемых на расстоянии 2 м от него, сосредоточена в области частот 20–1000 Гц, при этом наблюдаются максимумы излучения: во время выдохов – в области 30–80 Гц, во время вдохов – в областях 60–80 Гц и 140–150 Гц.

Представленные оценки взаимных спектров и функций когерентности позволяют рассчитывать на увеличение дальностей наблюдения и мониторинга шумов легководолаза при использовании одиноким ВСП за счет объединения информации, поступающей от ПД и ВП, в сравнении с одиноким ПД.

Одномерные плотности распределения мгновенных значений шумов легководолаза не описываются гауссовским законом распределения как при выдо-

Рис. 9. Усредненные нормированные гистограммные оценки ПРВ мгновенных значений шумов от ПД (вверху) и ПГД (внизу): а) и б) – во время выдохов; в) и г) – во время вдохов; д) и е) – гистограммы шумового фона. Красные пунктирные линии – нормированные гауссовские кривые



хе, так и при вдохе. В качестве моделей одномерных плотностей распределений как во время выдохов, так и вдохов а также шумового фона акватории можно использовать взвешенные суммы двух гауссовских распределений с разными дисперсиями.

При условии известности закона спада интенсивности создаваемого легководолазом звукового поля при удалении от него, знание приведенных в данной работе величин (оценок спектральных плотностей шумов акватории, шумов легководолаза во время выдохов и вдохов, отношения сигнал/помеха и функций когерентности) позволяет определить мак-

симальные дистанции, на которых может осуществляться его наблюдение и мониторинг.

Методика эксперимента, примененные ВСП и ПД, а также измерительное оборудование и программные продукты могут быть использованы для регистрации и анализа шумов других типов дыхательных аппаратов, а также выявления индивидуальных особенностей дыхания под водой.

Работа выполнена в рамках НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред» (регистрационный номер: 124022100075-6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Buzzacott P. Mortality rate during professionally guided scuba diving experiences for uncertified divers, 1992–2019 // Diving and Hyperbaric Medicine. 2021. June. 30. 51(2). P. 147–151.
2. Коренбаум В.И., Горовой С.В., Тагильцев А.А., и др. Возможность пассивного акустического мониторинга легководолазов // Доклады академии наук. 2016. Т. 466, № 5. С. 1–5.
3. Коренбаум В.И., Бородин А.Е., Горовой С.В. и др. Экспериментальное исследование биологических шумов водолазов. Фундаментальная наука – Военно-Морскому Флоту. Том 2. Материалы круглого стола в рамках VII Международного военно-морского салона. 1 июля 2015 г. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 92–98.
4. Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Kostiv A.E. и др. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver // The Journal of the Acoustical Society of America. 2019, 146(6), pp. 4507–4513.
5. Gemba K., Nosal E. Source signature characterization for detection of open-circuit SCUBA regulators // Proceeding of Meeting on Acoustics. 2013. Vol. 19.
6. Erbe C., Parson V., Duncan A., и др. Underwater acoustic signature of recreational swimmers, divers, surfers and kayakers // Acoustics Australia. 2016. Vol. 44(2). P. 333–341.
7. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A. и др. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2015 24(1), 070020.
8. Rebreather FROGS 18. URL: <https://milproaqualung.com/products/frogs-18?variant=45006669938871>. Проверено 24.03.2026.
9. Горовой С.В. Сравнительный анализ характеристик сигналов, зарегистрированных с использованием векторного приемника и гидрофона давления на мелководье // Сборник трудов XXXVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2024. С. 77 – 83.
10. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
11. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б., и др. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании: теория и эксперимент. Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2019. 360 с.
12. Дзюба В.П. Скалярно-векторные методы теоретической акустики. Владивосток: Дальнаука, 2006. 195 с.
13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
14. Бреслав И.С. Паттерны дыхания: Физиология, экстремальные состояния, патология. Л.: Наука, 1984. 206 с.
15. Bouvet M., Schwartz S.C. Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization // The Journal of the Acoustical Society of America. 1988. Vol. 83, no. 3. P. 1023–1033.
16. Bond J.W., Stein D., Zeidler J. Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference // Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC, 1994.
17. Горовой С.В. Статистические модели гидроакустического шумового фона мелководных прибрежных акваторий // Сборник трудов XXXVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2026. С. 131–137.

Сведения об авторах

ГОРОВОЙ Сергей Владимирович, доцент департамента электроники, инфокоммуникаций и приборостроения
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, гидроакустические измерения, векторно-скалярные приемники

E-mail: GorovoySV@mail.ru. **Тел.:** +7914-721-21-86.

ORCID: 0000-0003-1370-953X

ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, заведующий лабораторией океанотехники

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустические антенны и преобразователи, гидроакустические измерения

E-mail: atagitsev@poi.dvo.ru

Тел.: +7 (423) 231-14-00. **ORCID:** 0000-0001-9207-4418

СИРЕНКО Владимир Григорьевич, магистрант департамента электроники, инфокоммуникаций и приборостроения

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Область научных интересов: водолазные работы, гидроакустические измерения, исследование морских млекопитающих

E-mail: vlad_sir2019@gmail.com. **Тел.:** +7914-655-88-64

USING A VECTOR–SCALAR SENSOR TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF UNDERWATER NOISE OF A SCUBA DIVER

S.V. Gorovoy, A.A. Tagiltsev, V.G. Sirenko

The results of an experimental study in the frequency band 10-4000 Hz of spectral densities, coherence functions, and one-dimensional probability distribution densities of instantaneous sound pressure values and the horizontal component of the sound pressure gradient of underwater noise from a scuba diver equipped with Aeris scuba gear (USA) motionless at the bottom are presented. The noises were recorded in the coastal water area at a distance of 2 m from the source. During the experiment, man-made interference caused by the movement of ships, as well as pulse interference caused by marine crustaceans, was observed. It is shown that the main part of the noise energy generated by the breathing of a scuba diver is concentrated in the range of 15-1000 Hz. The highest values of the coherence function of the signals perceived by the sound pressure receiver and the sound pressure gradient receiver during exhalation were observed in the regions of 25-100 Hz and 350-600 Hz, during inspiration – in the regions of 80-250 Hz and 350-800 Hz. It is proposed to use the sums of Gaussian distributions as models of the distribution densities of the instantaneous values of the recorded noises. Recommendations on possible practical applications of the research results are given.

Keywords: hydroacoustic noise of shallow sea, vector–scalar sensor, underwater noise from a scuba diver.

References

1. Buzzacott P. Mortality rate during professionally guided scuba diving experiences for certified divers, 1992-2019 // *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2021.– June. 30. 51(2). P. 147-151.
2. Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Tagiltsev A.A., et al. The possibility of passive acoustic monitoring of light divers // *Reports of the Academy of Sciences*. 2016. Vol. 466. No. 5. P. 1-5.
3. Korenbaum V.I., Borodin A.E., Gorovoy S.V., and others. Experimental study of biological noise of divers. Fundamental science is devoted to the Navy. Volume 2. Materials of the round table in the framework of the VII International Naval Salon. July 1, 2015, Moscow: TECHNOSPHERE, 2016. P. 92-98.
4. Korenbaum V.I., Gorovoy S.V., Kostiv A.E., et al. An attempt at hydroacoustic localization of an open-circuit scuba diver // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019, 146(6), P. 4507–4513.
5. Gemba K., Nosal E. Source signature characterization for detection of open-circuit SCUBA regulators // *Proceeding of Meeting on Acoustics*. 2013. V. 19.
6. Erbe C., Parson V., Duncan A., et al. Underwater acoustic signature of recreational swimmers, divers, surfers and kayakers // *Acoustics Australia*. 2016. Vol. 44(2). P. 333-341.
7. Gorovoy S., Korenbaum V., Borodin A. et al. Detecting respiratory noises of diver equipped with rebreather in water // *Proceedings of Meeting on Acoustics*. 2015 24(1), 070020.
8. Rebreather FROGS 18 [Electronic resource] <https://milproaqualung.com/products/frogs-18/?variant=45006669938871>. Verified on 03/24/2026.
9. Gorovoy S.V. Comparative analysis of the characteristics of signals recorded using a vector receiver and a pressure hydrophone in shallow water // *Proceedings of the XXXVI session of the Russian Acoustic Society*. Moscow: GEOS, 2024. P. 77-83.
10. Gordienko V.A. Vector–phase methods in acoustics. Moscow: Fizmatlit, 2007. 480 p.
11. Kasatkin B.A., Zlobina N.V., Kasatkin S.B., and others. Shallow sea acoustics in a scalar–vector description: theory and experiment. Vladivostok: IPMT FEBRAS, 2019. 360 p.
12. Dzyuba V.P. Scalar vector methods of theoretical acoustics. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2006. 195 p.
13. Bendat J., Pirsol A. Applied analysis of random data. Moscow: Mir, 1989. 540 p.
14. Breslav I.S. Patterns of respiration: Physiology, extreme conditions, pathology. L.: Nauka, 1984. 206 p.
15. Bouvet M., Schwartz S.C. Underwater noises: Statistical modeling, detection, and normalization // *The Journal of the Acoustic Society of America*. 1988. Vol. 83. No. 3. P. 1023-1033.
16. Bond J.W., Stein D., Zeidler J. Gaussian Mixture Models for Acoustic Interference // *Technical Report 1667 AD–A285 950 DTIC*, 1994.
17. Gorovoy S.V. Statistical models of the hydroacoustic noise background of shallow coastal waters // *Proceedings of the XXXVIII session of the Russian Acoustic Society*. Moscow: GEOS.– 2026. 131-137.

Information about the authors

GOROVOY Sergey Vladimirovich, associate Professor of the Department of Electronics, Infocommunications and Instrumentation

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University"

Address: FEFU Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922 Russia

V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, st. Baltic, 43

Research interests: digital signal processing, sonar measurements, vector-scalar sensors

Phone: +7914-721-21-86

E-mail: GorovoySV@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1370-953X

Tagiltsev Alexander Anatolyevich, Ph.D., associate professor, head of Laboratory for Ocean Research Equipment Development

V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences

Address: 690041, Vladivostok, st. Baltic, 43

Research interests: hydroacoustic antennas and transducers, acoustic measurements

Phone: +7 (423) 231-18-50

E-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9207-4418

SIRENKO Vladimir Grigorievich, Master's student in the Department of Electronics, Infocommunications and Instrumentation.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Far Eastern Federal University"

Address: FEFU Campus 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok 690922 Russia

Research interests: diving, sonar measurements, marine mammal research

Phone: +7914-655-88-64

E-mail: vlad_sir2019@gmail.com



Recommended citation:

Gorovoy S.V., Tagiltsev A.A., Sirenko V.G. USING A VECTOR-SCALAR SENSOR TO STUDY THE CHARACTERISTICS OF UNDERWATER NOISE OF A SCUBA DIVER. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 84–94. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_10. EDN: OAWTIK.

