

# ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ЕГО ШУМОВОМУ ПОЛЮ

Е.С. Казначеева, В.М. Кузькин, Ю.В. Матвиенко,  
С.А. Пересёлков, Ю.А. Хворостов

В рамках интерферометрической обработки предложена методика определения дальности обнаружения малогабаритного подводного аппарата. Она основана на численных оценках звукового поля в мелком море и экспериментальных данных о спектральных характеристиках шумоизлучения объекта и фонового шума акватории. Сформулированы условия формирования неискаженной интерференционной картины и выполнен анализ ее искажений для условий численного эксперимента.

**Ключевые слова:** подводная акустика, звуковое поле, океанический волновод, источник шума, обнаружение, интерференционная структура, голограмма, подводный малогабаритный аппарат.

## Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются эффективным средством для решения широкого круга задач подводных исследований, в частности, съемки физических полей океана, поисковых операций, отслеживания перемещения морских животных и т.д. При выполнении этих работ необходим контроль местоположения подводного аппарата по его шумоизлучению. Решение задачи на основе обработки, построенной на устойчивых структурных особенностях интерференционной картины звукового поля, формируемой широкополосным источником звука, предложено в работах [1, 2]. Обработка реализует квазиогерентное накопление спектральной плотности вдоль полос интерференционной картины (интерферограммы) в переменных частота–время. Под интерферограммой понимается квадрат модуля принимаемого сигнала в переменных частота–время. К накопленной спектральной плотности интерферограммы применяется двумерное преобразование Фурье, т.е. формируется голограмма.

Цель данной работы – на основе интерферометрической обработки оценить дальность обнаружения АНПА на примере одиночного скалярного приемника.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ШУМОВЫХ ПОЛЕЙ АНПА И ФОНА МОРЯ

Оценка дальности обнаружения реализована на основе результатов эксперимента по измерениям спектров шумового поля малогабаритного АНПА и фона моря, выполненного в мелководной акватории Тихоокеанского шельфа [3].

Ограничимся шириной полосы  $\Delta f = 300\text{--}350$  Гц. На рис. 1 приведен спектр звукового давления фона моря. На средней частоте спектра  $f_0 = 325$  Гц спектральная плотность шумового фона моря  $\overline{p}_n(f_0) = 60.00$  дБ.

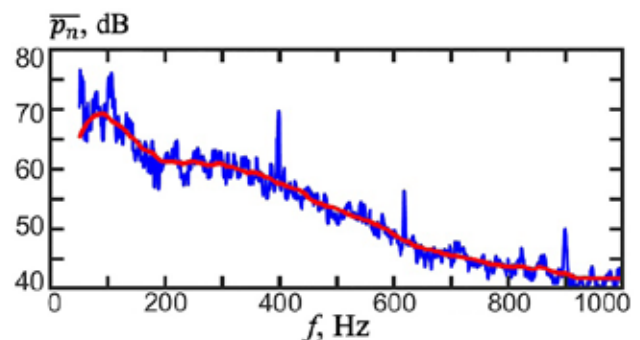


Рис. 1. Спектральная плотность шумового фона моря. Синяя кривая – экспериментальный спектр, красная кривая – сглаженный спектр [3]

Согласно [3], спектральная плотность шумоизлучения АНПА на скорости  $w = 2$  м/с в ближней зоне (расстояние от корпуса  $r_* = 15$  см) равна  $\overline{p_s}(f_0, r_*) = 97.00$  дБ. В предположении сохранения шумового портрета и с учетом особенностей распространения спектральная плотность шумоизлучения АНПА в дальней зоне  $r_0 = 200$  м оценивается как  $\overline{p_s}(f_0, r_0) = 72.50$  дБ. Шумовой фон моря является помехой по отношению к шумоизлучению АНПА.

## 2. ПОЛЕ ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА

Усредненное звуковое давление шумового точечного источника в полосе частот  $\Delta f$  на горизонтальном расстоянии  $r$  представим в виде суммы мод суперпозиции  $K$  гармонических составляющих на частотах  $f_k$  со случайной мощностью  $W_k$ :

$$\overline{P_{\Delta f}}(r) = \sqrt{\rho c} \left| \sum_m \sum_k \sqrt{\overline{W}_k} S_{mk}(r) \right|, \quad (1)$$

где

$$S_{mk}(r) = \frac{\psi_m(z_s, f_k) \psi_m(z_q, f_k)}{\sqrt{h_m(f_k)} r} \exp[ih_m(f_k)r + \gamma_m(f_k)r]. \quad (2)$$

Здесь  $z_s$  и  $z_q$  – глубина источника и приемника;  $\rho$  и  $c$  – плотность и скорость звука в воде;  $\psi_m$ ,  $h_m$  и  $\gamma_m$  – собственная функция, действительная и мнимая части горизонтального волнового числа  $m$ -й моды. Выражение (1) применимо к протяженному источнику, если его горизонтальный размер  $L$  мал по сравнению с расстоянием  $r$ . Для рассматриваемого АНПА соотношение (1) применимо на расстояниях нескольких десятков метров.

Примем, что средние значения мощностей гармонических составляющих не зависят от номера гармоники,  $\overline{W}_k = \overline{W}$ . Тогда в полосе  $\Delta f$  закон спада (1) для расстояний  $r \geq r_0$  приводится к виду

$$\overline{P_{\Delta f}}(r) = \overline{P_{\Delta f}}(r_0) \sqrt{\frac{r_0}{r}} \frac{R(r)}{R(r_0)}, \quad (3)$$

где

$$R(r) = \sum_m \sum_k S_{mk}(r). \quad (4)$$

Здесь  $\overline{P_{\Delta f}}(r_0)$  – усредненное значение амплитуды  $\overline{P_{\Delta f}}(r_0) = p_s(r_0, f_0) \sqrt{\Delta f}$ . Усредненный квадрат звукового давления (средняя мощность в полосе  $\Delta f$ ) равен

$$\overline{P_{\Delta f}^2}(r) = \left| \overline{P_{\Delta f}}(r) \right|^2. \quad (5)$$

## 3. ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

Интерферограмму в переменных частота–время запишем в виде суммы мод:

$$I(\omega, t) = \sum_m \sum_n A_m(\omega, t) A_n^*(\omega, t) \exp[ih_m(\omega)(r + wt)], \quad (6)$$

$m \neq n,$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $h_m(\omega) = h_{mn}(\omega) - h_n(\omega)$ ;  $r$  – удаление источника от приемника в момент времени  $t = 0$ . Верхний индекс «\*» обозначает комплексно-сопряженную величину. Цилиндрическое расхождение, модальное затухание и глубины расположения источника  $z_s$  и приемника  $z_q$  учитываются амплитудной зависимостью мод  $A_m$ . Условие  $m \neq n$  означает, что из интерферограммы вычтено среднее значение.

К интерферограмме (6) применим двумерное преобразование Фурье:

$$F(\tau, \tilde{\nu}) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_1}^{\omega_2} I(\omega, t) \exp[i(\tilde{\nu}t - \omega\tau)] dt d\omega. \quad (7)$$

Здесь  $\omega_{1,2} = \omega_0 \mp (\Delta\omega/2)$ ,  $\omega_0$  и  $\Delta\omega$  – средняя частота и ширина спектра;  $\Delta t$  – время траекторного накопления (время формирования интерферограммы);  $\tau$  и  $\tilde{\nu} = 2\pi\nu$  – время и круговая частота голограммы. Спектральная плотность (7) локализована в узкой полосе в форме фокальных пятен. Они расположены: в первом и третьем квадрантах, если источник приближается к приемнику,  $w < 0$ ; во втором и четвертом квадрантах, если источник удаляется от приемника,  $w > 0$ . Область локализации содержит  $(M - 1)$  основных максимумов с координатами  $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$ , расположенными на прямой  $\tilde{\nu} = \tilde{\epsilon}\tau$ . Здесь  $\mu = 1, M - 1$  – номер фокального пятна. Пик фокального пятна в точке  $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$ , ближайшего к началу координат, обусловлен интерференцией соседних мод. Координаты  $(\tau_2, \tilde{\nu}_2)$  соседнего пика вызваны интерференцией мод номеров  $(m, m + 2)$  и т.д. Пик фокального пятна, определяемый интерференцией первой и последней моды, расположен в точке  $(\tau_{M-1}, \tilde{\nu}_{M-1})$ .

Радиальная скорость и начальное расстояние, если  $r \gg w\Delta t$ , оцениваются как

$$\dot{w} = -\kappa_{w\mu} \tilde{\nu}_\mu, \quad \dot{r} = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \quad (8)$$

$$\kappa_{w\mu} = \left| h_{m(m+\mu)}(\omega_0) \right|^{-1}, \quad \kappa_{r\mu} = \left| dh_{m(m+\mu)}(\omega_0) / d\omega \right|^{-1}. \quad (9)$$

Восстановленные параметры источника, в отличие от истинных значений, обозначены точкой свер-

ху. Черта сверху обозначает усреднение по номерам интерферирующих мод.

Интерференционная картина характеризуется частотными  $\Lambda_\omega^{(mn)}$  и временными  $\Lambda_t^{(mn)}$  масштабами изменчивости, обусловленными интерференцией  $m$ -й и  $n$ -й модами:

$$\Lambda_\omega^{(mn)} = 2\pi/r |dh_{mn}(\omega_0)/d\omega|, \quad \Lambda_t^{(mn)} = 2\pi/|wh_{mn}(\omega_0)| \quad (10)$$

Формируемая интерферограмма не искажается, если полоса  $\Delta\omega$  и время наблюдения  $\Delta t$  не меньше частотного и временного периодов изменчивости для любой пары  $(m, n)$  мод:

$$\Delta\omega > \Lambda_\omega^{(mn)}, \quad \Delta t > \Lambda_t^{(mn)}. \quad (11)$$

Неравенства (11) накладывают ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и пространственно-частотных масштабов изменчивости передаточной функции волновода при формировании интерферограммы. Нарушение неравенств приводит к изменению конфигурации и размытию фокальных пятен, сопровождающемуся увеличением погрешности восстановления параметров источника (8). Нарушение первого условия вызывает наложение фокальных пятен, что приводит к искажениям области локализации спектральной плотности. Иная закономерность проявляется при несоблюдении второго условия, когда времени наблюдения недостаточно для пересечения источником пространственных масштабов изменчивости интерференционной картины. В этом случае положение пика фокального пятна, образованного такими интерферирующими модами, смещается на ось времени, так как по отношению к ним интерферограмма формируется неподвижным источником.

В качестве критерия предельной дальности  $r_{max}$  обнаружения шумового источника примем условие, согласно которому максимум функции углового распределения спектральной плотности голограммы

$$G[\tilde{\chi}, q(r)] = \int_0^{\Delta\tau} |F[\tau, \tilde{v}(\tau), q(r)]| \sqrt{1 + \tilde{\chi}^2} d\tau \quad (12)$$

в направлении  $\tilde{\chi} = \tilde{\varepsilon}$  расположения пиков фокальных пятен сигнала в два раза превышает помеховые пики в направлениях  $\tilde{\chi} \neq \tilde{\varepsilon}$ ,

$$G[\tilde{\varepsilon}, q(r_{max})] = 2G[\tilde{\chi}, q(r_{max})]. \quad (13)$$

Здесь

$$q(r) = \overline{P_{\Delta f}^2(r)} / \overline{N_{\Delta f}^2} \quad (14)$$

– входное отношение с/п;  $\Delta t$  – линейный размер области локализации по оси времени;  $\overline{P_{\Delta f}^2(r)}$  (4) и  $\overline{N_{\Delta f}^2} = (\overline{P_n(f_0)})^2 \Delta f$  – средние мощности сигнала и помехи в полосе  $\Delta f$ .

Интерферометрическая обработка реализуется следующим образом. За время наблюдения  $\Delta t$  в полосе излучения  $\Delta\omega$  накапливаются  $J$  независимых реализаций длительностью  $T$  и с временным интервалом  $\delta T$  между ними:  $J = \Delta t / (T + \delta T)$ . Реализации независимы, если  $\delta T > 2\pi/\Delta\omega$ . Формируется интерферограмма, и к ней применяется двумерное преобразование Фурье в переменных время–частота.

#### 4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Горизонтально-однородный волновод, глубина  $H = 60$  м, скорость звука  $c = 1480$  м/с. Параметры дна: отношение плотности грунта и воды  $\rho = 1.8$ , комплексный показатель преломления  $n = 0.88(1+i0.013)$ . АНПА удаляется от одиночного скалярного приемника со скоростью  $w = 2$  м/с. Глубина АНПА  $z_s = 30$  м, глубина приемника  $z_q = 50$  м. Расстояние  $r_0 = 200$  м. Полоса  $\Delta f = 300\text{--}350$  Гц,  $f_0 = 325$  Гц. В полосе  $300\text{--}350$  Гц, средняя мощность: шума фона моря  $\overline{N_{\Delta f}^2} = -43.01$  дБ; шумоизлучения АНПА –  $\overline{P_{\Delta f}^2(r_0)} = -30.51$  дБ. Время наблюдения  $\Delta t = 30$  с, длительность шумовой реализации  $t_s = 1.5$  с, временной интервал между ними  $\delta t_s = 0.5$  с, число временных интервалов  $J = 15$  (рис. 2).

В полосе  $\Delta f = 50$  Гц шаг дискретизации по частоте  $\delta f = 0.2$  Гц, число гармонических составляющих  $K = 251$ . Число мод  $M = 12$ . Значения волновых чисел  $h_m(\omega_0)$  и производных  $dh_m(\omega_0)/d\omega$  приведены в таблице. Начиная с расстояния 10 км уровень

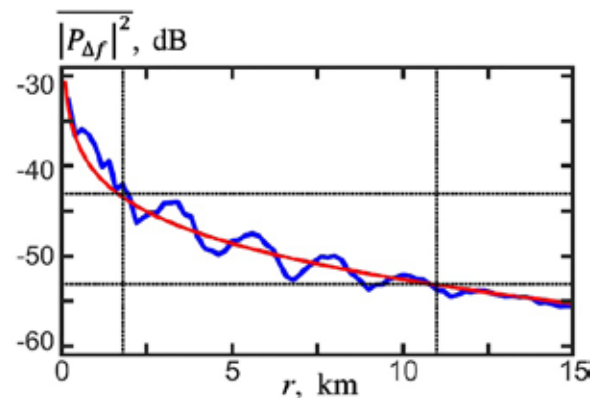


Рис. 2. Зависимость средней мощности  $\overline{P_{\Delta f}^2(r)}$  шумоизлучения АНПА от расстояния  $r$  в полосе  $\Delta f = 300\text{--}350$  Гц. Скорость  $w = 2$  м/с. Красная линия – энергетическое сложение; синяя – интерференционное сложение

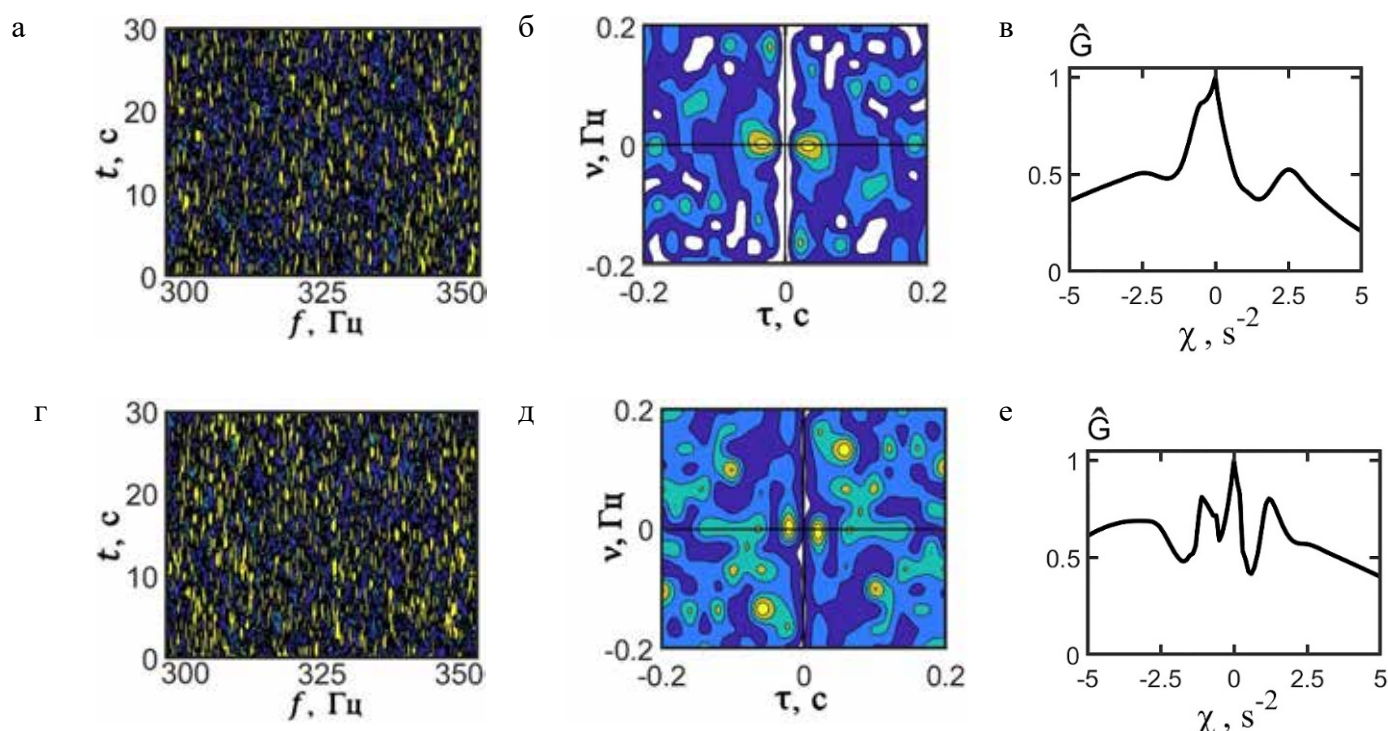


Рис. 3. Нормированные интерферограммы (а, г), голограммы (б, д) и функции углового распределения спектральной плотности (в, е). Расстояния: а, б, в – 11.0 км, г, д, е – 11.5 км

Таблица. Значения волновых чисел  $h_m(\omega_0)$  и производных  $dh_m(\omega_0)/d\omega$

Номера мод, $m$	1	2	3	4	5	6
$h_m, \text{м}^{-1}$	1.3788	1.3761	1.3715	1.3650	1.3566	1.3463
$(dh_m/d\omega)/10^{-4}, \text{с/м}$	6.7609	6.7733	6.7943	6.8244	6.8641	6.9142
Номера мод, $m$	7	8	9	10	11	12
$h_m, \text{м}^{-1}$	1.3339	1.3194	1.3028	1.2840	1.2628	1.2392
$(dh_m/d\omega)/10^{-4}, \text{с/м}$	6.9753	7.0485	7.1346	7.2345	7.3489	7.4762

осцилляций заметно снижается, что объясняется уменьшением числа мод, формирующих звуковое поле. Горизонтальными пунктирами отмечены значения средних мощностей -43.01 и -53.01 дБ, соответствующие отношениям с/п ( $q = 0, -10$  дБ). Этим значениям с/п отвечают расстояния (вертикальный пунктир):  $r = 1.7, 11.0$  км.

Результаты интерферометрической обработки для области предельных расстояний обнаружения АНПА приведены на рис. 3. На рис. 3, а, г наблюдается хаотическая интерферограмма. На голограмме для расстояния  $r = 11.0$  км (рис. 3, б) имеет место структурированная картина фокальных пятен, которая становится случайной при расстоянии  $r = 11.5$  км (рис. 3, д). Из рис. 3, в, е, согласно критерию (13), следует оценка максимальной дальности обнаружения  $r_{max} = 11.0$  км, что соответствует отношению с/п  $q = -10$  дБ. Нормированная величина  $G$  обозначена сверху знаком «крышка».

Для интерферирующих соседних мод второе неравенство (11) не выполняется, что обуславливает расположение

пика первого фокального пятна на оси времени (рис. 3, б, д). По данным моделирования на расстоянии  $r = 11.0$  км поле результативно формируется модами номеров  $m = 1-4$ . Для первых двух мод  $m = (1, 2)$  на расстоянии  $r = 11.0$  км первое условие (10) не выполняется. Поэтому при оценке расстояния следует учитывать моды номеров  $m = 2-4$ . Координата пика фокального пятна  $\tau_1 = 2.9 \cdot 10^{-2}$  с. Согласно (8)  $\dot{r} = 11.3$  км.

## Заключение

На основе интерферометрической обработки представлен алгоритм оценки предельной дальности обнаружения шумового источника. Сформулированы условия формирования неискаженной интерферограммы, которые накладывают ограничения на ширину полосы и время наблюдения в зависимости от расстояния, радиальной скорости и пространственно-частотных масштабов изменчивости передаточной функции волновода. Реализовано численное моделирование алгоритма определения предельной дальности АНПА в полосе 300–350 Гц, движущегося со скоростью 2 м/с. Учтены искажения интерферограммы и вносимые ею изменения в расположение спектральной плотности голограммы.

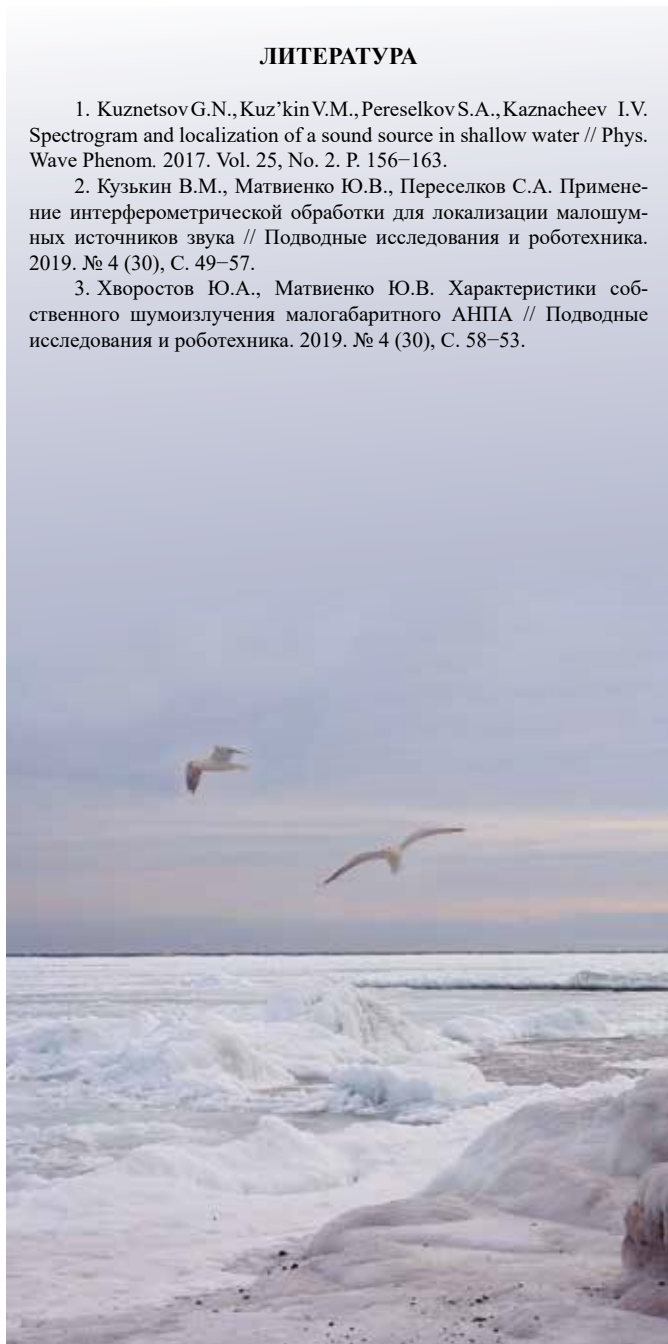


**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 19-29-06075 и 19-38-90326). Исследование Е.С. Казначеевой поддержано грантом Президента Российской Федерации МК-6144.2021.4.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V. Spectrogram and localization of a sound source in shallow water // Phys. Wave Phenom. 2017. Vol. 25, No. 2. P. 156–163.
2. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Переселков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации маломощных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30), С. 49–57.
3. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30), С. 58–53.

**Для цитирования:**

Казначеева Е.С., Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Переселков С.А., Хворостов Ю.А. ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ЕГО ШУМОВОМУ ПОЛЮ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 4(38). С. 80–85. DOI: 10.37102/1992-4429\_2021\_38\_04\_08.

**Об авторах**

**КАЗНАЧЕЕВА Елена Сергеевна**, аспирант  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»  
**Адрес:** 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1  
**Область научных интересов:** акустика океана, моделирование распространения звуковых волн, нерегулярные и нестационарные волноводы, интерференция, голографическая обработка сигналов  
**E-mail:** el.kaznacheeva@gmail.com  
**ORCID ID:** 0000-0002-8772-4508

**КУЗЬКИН Венедикт Михайлович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им А.М. Прохорова РАН  
**Адрес:** 119991 Москва, ул. Вавилова 38  
**Область научных интересов:** прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волноводы, интерференция звуковых волн, акустическая голография  
**E-mail:** kumiov@yandex.ru  
**ORCID ID:** 0000-0002-4136-3081

**МАТВИЕНКО Юрий Викторович**, д.ф.-т.н., главный научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а  
**Область научных интересов:** акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука.  
**E-mail:** ymat@marine.febras.ru  
**ORCID ID:** 0000-0002-4133-9073

**ПЕРЕСЕЛКОВ Сергей Алексеевич**, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»  
**Адрес:** 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1  
**Область научных интересов:** прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волноводы, интерференция звуковых волн, акустическая голография.  
**E-mail:** pereselkov@yandex.ru  
**ORCID ID:** 0000-0003-4083-8046

**ХВОРОСТОВ Юрий Анатольевич**, ведущий конструктор  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук  
**Адрес:** 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а  
**Область научных интересов:** акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука.  
**E-mail:** oss.dvfu@mail.ru  
**ORCID ID:** 0000-0002-4805-3051