

Особенности формирования скалярно–векторных характеристик звукового поля в мелком пресном водоеме в летний период и зимой при наличии ледового покрова

Б. И. Гончаренко^{1,*}, Е. В. Медведева^{1,2,†}, А. С. Шуруп^{1,2,3‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
Россия, 123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1

(Статья поступила 26.11.2019; Подписана в печать 09.01.2020)

Обсуждаются результаты двух экспериментов по измерению векторно–фазовой структуры акустического поля на гидроакустическом полигоне МГУ в акватории Клязьминского водохранилища в зимний и летний периоды. Для регистрации звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости использовались установленные на дно акватории автономные станции, содержащие векторные приемники и приемники звукового давления. Источником шумового сигнала летом являлось судно, проходящее вблизи точек расположения станций. На основе экспериментальных данных рассчитаны зависимости спада относительных уровней различных составляющих звукового поля от расстояния до источника. Демонстрируется возможность регистрации сигнала воздушного движущегося шумового источника (пассажирский самолет), донными станциями в условиях рассматриваемого эксперимента. Для зимних условий при наличии ледового покрова выявлена пространственная анизотропия естественных шумов акватории.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z. УДК: 534.6.

Ключевые слова: векторно–фазовые методы измерений, пространственная анизотропия и затухание шумового поля в мелком водоеме.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается увеличение количества исследований, посвященных изучению особенностей пространственного затухания векторных характеристик акустического поля — колебательной скорости частиц среды, ускорения или смещения частиц среды в звуковом поле. Так, в работах [1, 2] показано, что в мелком море коэффициент затухания вертикально ориентированных проекций вектора колебательно–го ускорения (ВКУ) на средних и высоких частотах в два раза и более превышает коэффициент затухания скалярных сигналов и горизонтально ориентированных проекций ВКУ. Авторы [1] отмечают, что законы затухания составляющих ВКУ и звукового давления (ЗД) хорошо согласуются между собой, но на отдельных участках дистанции для всех частот наблюдаются отклонения экспериментальных зависимостей от расчетных, вызванные, по-видимому, вариациями характеристик поверхностных слоев грунта вдоль трассы буксировки излучателя. В [2] проанализированы и выявлены особенности затухания для различных групп источников звука — монополь, диполь, мультиполь. Указанные различия необходимо учитывать при анализе характеристик сигналов от направленных источников в волноводе, в частности при теоретических и экс-

периментальных оценках эффективности обнаружения или измерения шумности реальных пространственно–развитых объектов. В более ранних работах [3, 4] были проведены исследования особенностей затухания звуковых сигналов в мелком море при различных горизонтах расположения источника и приемника звука, продемонстрировавшие, что степенные законы затухания могут варьироваться в весьма широких диапазонах. Также следует отметить возможность оценки пространственной анизотропии шумового поля на основе векторно–фазовых методов обработки акустических полей в низкочастотной области без применения протяженных приемных систем [5]. Анализ и учет пространственной анизотропии шумов является важным фактором, определяющим практическую реализуемость пассивных методов акустической томографии [6], позволяющих снизить стоимость и упростить техническую сложность гидроакустического эксперимента. В настоящей работе приводятся результаты исследования пространственного затухания скалярно — векторных характеристик звукового поля, зарегистрированного в акватории Клязьминского водохранилища при прохождении шумового источника, а также приводится оценка пространственной анизотропии естественного шумового поля при наличии ледового покрова.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные работы проводились на гидроакустическом полигоне МГУ, расположенном вблизи п. Поведники в акватории Клязьминского водохрани-

*E-mail: goncharenko@phys.msu.ru

†E-mail: medvedeva.ev15@physics.msu.ru

‡E-mail: shurup@physics.msu.ru

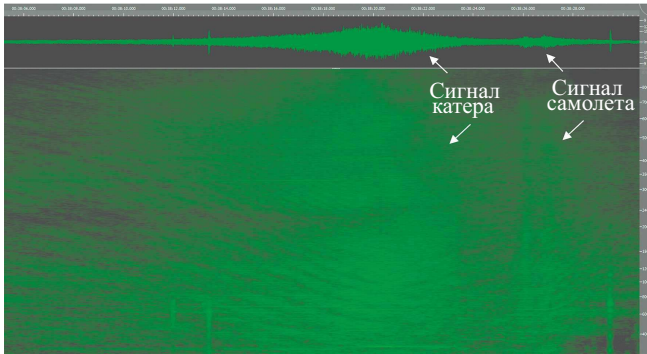


Рис. 1: Пример временной реализации сигнала (верхняя часть рисунка) и его спектрограммы (нижняя часть) для двух типов движущихся шумовых источников, зафиксированных летом (по вертикальной шкале отложена частота в герцах, по горизонтальной — время в секундах)

лица, в летний период в условиях активного судоходства, а также в зимний период, при наличии ледового покрова. Полигон характеризуется сложными условиями распространения, вызванными присутствием в дне акватории газонасыщенного слоя ила, что приводит к значительному затуханию. В ходе проведения эксперимента регистрация сигналов велась с помощью двух комбинированных приемных модулей КПМ № 1 и № 2, осуществлявших одновременное измерение звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости шумового поля. Использовалась донная постановка КПМ. По кабелям аналоговый сигнал поступал на поверхность воды, где запись сигнала через АЦП велась с помощью программного обеспечения персонального компьютера. В летний период регистрирующая аппаратура располагалась на лодках, которые предварительно закоривались в области постановки КПМ, а в зимний период — на поверхности льда внутри палаток, где поддерживался приемлемый температурный режим. Оба эксперимента проводились в одном и том же месте акватории, на участке с ровным дном, где глубина водного слоя составляла примерно 8 м. В летний период расстояние r от КПМ № 2 до проходящих мимо судов в разные моменты фиксировалось с помощью лазерного дальномера. Параллельно велась запись на видеорегистратор, установленный на берегу.

2. ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАТУХАНИЯ И АНИЗОТРОПИИ ШУМОВОГО ПОЛЯ

Для анализа характера затухания составляющих звукового поля в зависимости от горизонтального расстояния r между КПМ и источником звука был выделен отрезок записи летних измерений, на котором четко прослеживается шумовой сигнал от одиночного судна (рис. 1). Следует отметить, что на рис. 1 так-

же отчетливо виден сигнал самолета, пролетающего над акваторией. Кроме этого, на спектрограмме видна интерференционная структура акустического поля для обоих типов шумовых источников; ориентация интерференционных полос характеризует параметры источников. Рассчитывался относительный уровень величины звукового поля $L(r)$:

$$L(r) = 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{f^2(r, t)}{f_0^2} dt \right],$$

здесь в качестве функции f выбираются значения давления $p(r, t)$, измеренные в различные моменты времени t для заданного расстояния, или аналогичные зависимости одной из трех взаимно ортогональных компонент v_x, v_y, v_z колебательной скорости; t_1 и t_2 — времена начала и окончания записи сигналов на заданном расстоянии r ;

$$f_0^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f^2(r_0, t) dt,$$

где r_0 — минимальное расстояние, с которого начинались измерения. В качестве примера, на рис. 2 представлены экспериментальные данные по пространственному затуханию давления p и вертикальной составляющей звукового поля v_z . Как видно (рис. 2), на сравнительно небольших расстояниях p и v_z затухают приблизительно одинаково — в начале наблюдается цилиндрический закон спада $\sim r^{-1}$ (по мощности), далее следует область, соответствующая сферическому закону $\sim r^{-2}$. Однако при дальнейшем увеличении расстояния до источника вертикальная составляющая v_z колебательной скорости начинает затухать заметно быстрее, чем p . При этом, как для p , так и для v_z наблюдается существенное затухание $\sim r^{-3}$. Наблюдаемые особенности затухания могут быть объяснены присутствием газонасыщенного слоя в дне исследуемой акватории, который приводит к серьезным потерям при распространении. При этом вертикальная компонента v_z , наиболее чувствительная к характеристиками дна, проявляет большее затухание при увеличении расстояния до источника. Полученные результаты требуют своего учета при планировании и проведении гидроакустических работ на рассматриваемом полигоне.

В условиях зимнего эксперимента, при наличии ледового покрова, анализировалась пространственная анизотропия шумов акватории в соответствии с алгоритмом, представленным в работе [7, 8]. Для этого были построены нормированные гистограммы интенсивности $I(\varphi)/\max |I(\varphi)|$ (I — средняя интенсивность шума в направлении, характеризуемом азимутальным углом φ) в частотном диапазоне, где наблюдался максимум спектральной плотности мощности [8]. Оказалось, что естественное шумовое поле акватории (времена, когда присутствовали локализованные источники исключались из рассмотрения) обладает ярко выраженной анизотропией (рис. 3).

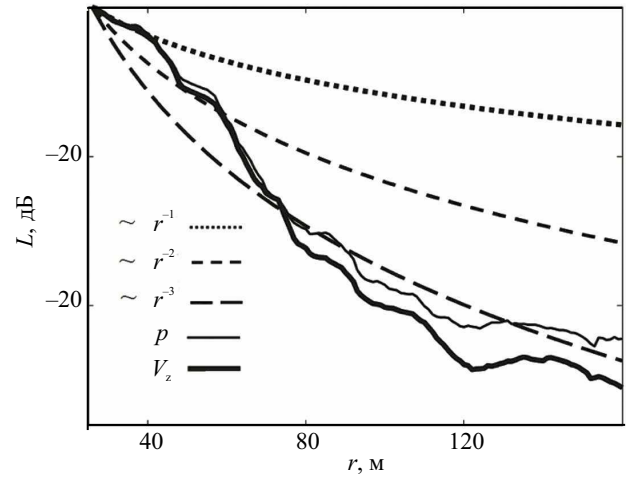


Рис. 2: Пример «видеофиксации» условий летнего эксперимента (слева). Пространственное затухание, характеризуемое функцией $L(r)$, рассчитанной отдельно для p и v_z на различных расстояниях до надводного шумового источника по мере его приближения, в частотном диапазоне 580 ± 50 Гц (справа)

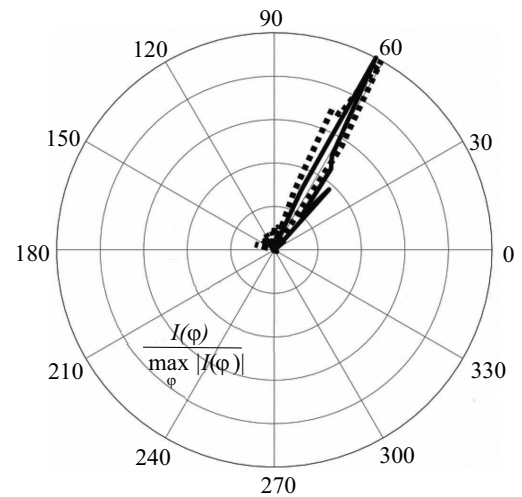


Рис. 3: Пример условий зимнего эксперимента (слева). Оценка углового распределения интенсивности шумового поля, зарегистрированного КИМ № 1 (сплошная линия) и КИМ № 2 (штрихованная линия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные в ходе проведенного исследования особенности формирования скалярно-векторных характеристик звукового поля в совокупности с алгоритмами обработки, численно реализованными и апробированными в настоящей работе, являются основой для планирования и проведения дальнейших натурных экспериментов на полигоне в акватории Клязьминского водохранилища. Существенное затухание различных составляющих акустического поля, вызванное присутствием газонасыщенного слоя в дне, требуют своего учета при оценки предельных расстояний между приемными модулями как в активном, так и пассивном режиме наблюдений. Отдельно стоит отметить вы-

явленную пространственную анизотропию естественного шумового поля акватории, причины которой до конца не исследованы, но учет которой представляет особый интерес при практической апробации методов пассивной томографии мелкого моря, использующей векторно-фазовые методы измерений. Перспективной является так называемая «направленная» корреляционная обработка шумов [8] с учётом формирования кардиоидной характеристики направленности на каждом КИМ с целью приема шумовых полей с заданного направления или наоборот — с целью подавления интенсивной помехи, приходящей с определенного направления.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.А. Рожкову, А.В. Григорьеву, И.Р. Сабирову,

О.С. Красулину и П.Ю. Муханову за помощь в организации и проведении полевых измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гран-

тов РФФИ № 18-05-00737, № 18-05-70034, а также гранта Президента РФ для научных школ № НШ 5545.2018.5.

-
- [1] Белов А. И., Кузнецов Г. Н. // Акуст. журн. 2017. **63**. № 6. С. 614.
[2] Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. // Акуст. журн. 2017. **63**. № 6. С. 623.
[3] Грачев Г. А. // Акуст. журн. 1983. **29**. № 2. С. 275.
[4] Гиндлер И. В., Петников В. Г. // Акуст. журн. 1987. **33**. № 2. С. 355.
[5] Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007.
[6] Буров В. А., Сергеев С. Н., Шуруп А. С. // Акуст. журн. 2008. **54**, № 1. С. 51.
[7] Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А. // Вестн. Моск. ун-та. 1994. **35**. № 6. С. 93.
[8] Медведева Е. В., Гончаренко Б. И., Шуруп А. С. // Труды школы-семинара «Волны-2019». С. 63.

Features of the formation of scalar-vector characteristics of the noise field in a shallow freshwater pond at summer season and at winter in the presence of ice cover

B. I. Goncharenko^{1,a}, E. V. Medvedeva^{1,2,b}, A. S. Shurup^{1,2,3}

¹Department of acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²P. P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

³The Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia

E-mail: ^agoncharenko@phys.msu.ru, ^bmedvedeva.ev15@physics.msu.ru, ^cshurup@physics.msu.ru

The results of two experiments on measuring the vector-phase structure of the acoustic field at the hydroacoustic testing ground of Moscow State University in the water area of Klyazma reservoir in the winter and summer seasons are discussed. To register sound pressure and three mutually orthogonal components of vibrational velocity, autonomous stations containing vector receivers and sound pressure receivers were installed at the bottom of the water area. For the summer conditions, the source of the noise signal was a ship passing near the stations. Based on the experimental data, the dependences of the decay of the relative levels of the various components of the sound field on the distance to the source are calculated. The possibility of detecting the signal of an air moving noise source (passenger plane) by bottom stations under the conditions of the experiment under consideration is demonstrated. For winter conditions, in the presence of ice cover, spatial anisotropy of the natural noises of the water area was revealed.

PACS: 43.60.+d, 43.58.+z.

Keywords: vector-phase measurement methods, spatial anisotropy and decay of the noise field in a shallow water, passive acoustic tomography

Received 26 November 2019.

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (499) 939-29-69, e-mail: goncharenko@phys.msu.ru.
2. Медведева Елена Владимировна — студентка физического факультета МГУ, кафедры акустики; тел.: (499) 939-30-81, e-mail: medvedeva.ev15@physics.msu.ru.
3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (499) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru