

УДК 534.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УБЫВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МЕЛКОМ ПРЕСНОМ ВОДОЕМЕ ПРИ НАЛИЧИИ СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЫ

© 2019 г. Б. И. Гончаренко¹, А. И. Веденев², П. Ю. Муханов^{1, *}, А. С. Шуруп^{1, 2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: pavel.mukhanov@gmail.com

Приводятся результаты экспериментального исследования пространственного затухания звука в мелком водоеме, полученные с помощью приповерхностного источника и комбинированного приемного модуля, состоящего из приемника звукового давления и трехкомпонентного приемника колебательной скорости (векторного приемника).

DOI: 10.1134/S0367676519010101

ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустический мониторинг является неотъемлемой частью решения задачи наблюдения и контроля акватории. Сюда может входить, не ограничиваясь этим, и наблюдение за перемещениями бентических фронтов, и изменение течений, и локализация загрязнений. Особую роль в этом обширном списке играет наблюдение за судоходством и его влиянием на ихтиофауну. Спутниковое и радиолокационное наблюдение позволяет локализовать только объекты на поверхности, но, к сожалению, никак не может оценить воздействие на водную среду. В этом ключе, оптимальным является использование систем наблюдения, которые находятся непосредственно в среде воздействия.

Одним из основных факторов, определяющих успешность реализации гидроакустического мониторинга акваторий является пространственное затухание различных составляющих звуковой волны [1]. Если ранее при изучении пространственного затухания звука использовался преимущественно приемник звукового давления, то в последнее время возрастает интерес к исследованию именно векторных характеристик акустического поля [2, 3] — колебательной скорости частиц среды, ускорения или смещения частиц среды в звуковом поле. Например, для исследования гидроакустического воздействия на ихтиофауну возникает необходимость измерения параметров движения частиц среды в акустическом поле (колебательной скорости, ускорения или смещения), так как ры-

бы и беспозвоночные в основном чувствительны к колебаниям частиц среды, а не к звуковому давлению [4].

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА

Активное судоходство для акватории представляет собой движущиеся широкополосные источники шума, в которых могут быть с выделенные дискретные составляющие, при этом сам источник звука располагается вблизи свободной поверхности. Ранее было показано теоретически для случая, когда источник находится вблизи свободной поверхности [5], что существует возможность аномально большого затухания звука, при котором убывание звукового поля происходит не по цилиндрическому закону $\sim 1/\sqrt{r}$ и не по сферическому $\sim 1/\sqrt{r}$, а по квадратичному закону $\sim 1/r^2$, здесь r — горизонтальное расстояние между источником звука и приемником.

Этот теоретический результат ранее наблюдался в эксперименте при исследовании убывания звукового давления [5]. В то же время экспериментального исследования пространственного убывания компонент колебательной скорости частиц среды для рассматриваемого случая, насколько известно авторам, ранее не проводилось.

В настоящей работе приводятся результаты обработки натуральных измерений векторно-фазовой структуры акустического поля, проведенных в русле реки Урал в июне 2017 года. Осуществля-

лось одновременное измерение как амплитуды звукового давления, так и трех взаимноортогональных составляющих колебательной скорости частиц среды, что позволило оценить относительные уровни и сравнить характер пространственного затухания этих составляющих акустического поля.

При проведении эксперимента использовался донный вариант постановки комбинированного приемного модуля (КПМ), состоящего из приемника звукового давления и векторного приемника (ВП) (три взаимноортогональных канала колебательной скорости). Диаграммы направленности каналов векторного приемника в рабочем диапазоне частот были косинусного типа. Как показали измерения, вертикальное распределение скорости звука $c(r, z)$ в водной толще, а также глубину $h(r)$ в месте проведения эксперимента можно считать постоянными в пределах погрешности прибора: $c(r, z) \cong c_0 = 1482 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $h(r) \cong h_0 = 5 \text{ м}$. В ходе проведения эксперимента был записан шумовой сигнал от судна, проходящего мимо КПМ со скоростью $\approx 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Этот сигнал в дальнейшем и будет анализироваться. Расстояние до судна в разные моменты фиксировалось с помощью лазерного измерителя расстояний; максимальное расстояние составляло 660 м, минимальное расстояние до КПМ было 70 м (траверз). Скорость течения реки примерно $\approx 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Расстояние от КПМ до ближайшего берега $\approx 10 \text{ м}$, ширина русла реки в месте проведения измерений $\approx 130 \text{ м}$. Схема эксперимента изображена на рис. 1а.

ОЦЕНКА ПЕЛЕНГА НА ИСТОЧНИК

Для получения зависимостей убывания уровня компонент поля в зависимости от расстояния необходимо рассчитать направление (пеленг) на источник звука в горизонтальной плоскости. В данном случае пеленг на корабль $\varphi(t)$ будет рассматриваться относительно направления x . Для оценки $\varphi(t)$ применялся разностно-фазовый метод [1], состоящий в оценке разности фаз между спектральной амплитудой звукового давления $p(f, t)$ и комбинацией двух компонент колебательной скорости вида $v_x(f, t) + i v_y(f, t)$, i — мнимая единица, для заданного диапазона частот f . Тогда $\varphi(t)$ — угол между направлением канала x КПМ (см. рис. 1а) и направлением на источник из центра КПМ.

На рис. 1б изображена оценка пеленга судна, полученная по мере его движения, при обработке данных в полосе частот $f = 500\text{--}1200 \text{ Гц}$, где сосредоточена основная энергия зарегистрированного шумового сигнала. Значения углов $\varphi(t) < 70^\circ$

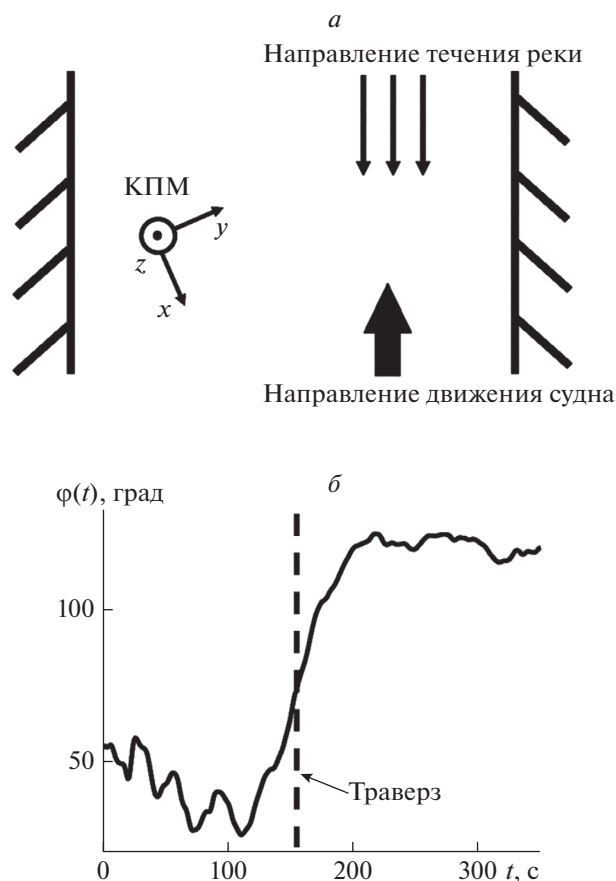


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению шумового сигнала судна, движущегося против течения реки, с помощью комбинированного приемного модуля (КПМ) (а); оценка пеленга $\varphi(t)$ на судно по мере его движения (б).

соответствуют приближению судна, а значения $\varphi(t) > 70^\circ$ — удалению; на траверзе оценка угла $\varphi(t)$ оказалась равной $\approx 70^\circ$, что соответствует условиям проведения эксперимента. На рис. 1б видно, что по мере приближения источника наблюдаются заметные вариации пеленга. Анализ экспериментальных данных показал, что этот эффект наблюдается при обработке данных в различных частотных диапазонах, однако причина подобных вариаций $\varphi(t)$ достоверно не известна и требует более детального анализа, выходящего за рамки настоящей работы. Можно предположить, что столь несимметричное поведение $\varphi(t)$ связано с разным характером распространения сигнала против течения реки (когда источник движется к КПМ) и по течению (в случае удаления источника). В дальнейшем анализируется уровни спада составляющих звукового поля, зарегистрированных при удалении судна от КПМ.

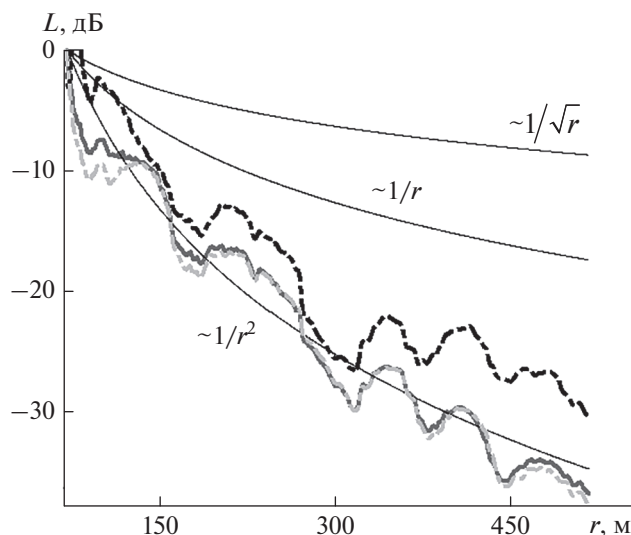


Рис. 2. Относительные уровни убывания: давления (темно-серая сплошная линия), а также вертикальной (светло-серая штриховая линия) и радиальной (черная штриховая линия) компонент колебательной скорости. Тонкими черными сплошными линиями изображены аналитические кривые для убывания по цилиндрическому, сферическому и квадратичному законам.

ОЦЕНКА УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ СИГНАЛА ОТ РАССТОЯНИЯ

Для выявления характера убывания рассматриваемых составляющих звукового поля в зависимости от возрастания горизонтального расстояния r между КПП и источником звука рассчитывался относительный уровень величины звукового поля $L(r)$:

$$L(r) = 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{g^2(r, t)}{g_0^2} dt \right]; \quad (1)$$

здесь в качестве функции $g(r, t)$ выбираются значения давления $p(r, t)$, измеренные в различные моменты времени t для заданного расстояния r , значения вертикальной компоненты колебательной скорости $v_z(r, t)$, а также радиальной компоненты (т.е. компоненты, направленной на источник) $v_r(r, t) = V_x(r, t) \cos \varphi_s(t) + V_y(r, t) \sin \varphi_s(t)$, где $V_x(r, t)$, $V_y(r, t)$ – значения компонент колебательной скорости на x - и y -выходах КПП с учетом их диаграмм направленности, $\varphi_s(t)$ – значения пеленга на источник в горизонтальной плоскости, рассчитанные по экспериментально измеренным расстояниям до судна, с учетом ориентации каналов КМП оцененной ранее (рис. 1); t_1 и t_2 – времена начала и окончания записи сигналов на задан-

ном расстоянии r ; $g_0^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g^2(r_0, t) dt$, где r_0 – минимальное расстояние до источника.

На рис. 2 представлена зависимость относительных уровней рассматриваемых составляющих звукового поля от расстояния до источника. Результаты представлены для экспериментальных данных, профильтрованных вблизи основной дискреты 530 Гц шумового сигнала корабля. На рис. 2 также изображены аналитические зависимости, соответствующие цилиндрическому закону убывания, сферическому закону и квадратичному убыванию. Как видно на рис. 2, убывание давления $p(r, t)$ соответствует квадратичному закону. Такое же поведение демонстрирует и вертикальная составляющая колебательной скорости $v_z(r, t)$. При этом характер поведения радиальной составляющей $v_r(r, t)$ несколько отличается. На сравнительно небольших расстояниях $v_r(r, t)$ убывает медленнее, чем звуковое давление; при увеличении расстояния относительные уровни убывания для $p(r, t)$, $v_z(r, t)$ и $v_r(r, t)$ ведут себя практически одинаково, при этом относительный уровень $v_r(r, t)$ остается выше, чем соответствующие уровни $p(r, t)$ и $v_z(r, t)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе обработки экспериментальных данных, указывают на то, что в рассматриваемых условиях мелкого водоема наблюдается квадратичный закон убывания составляющих звукового поля, связанный, по-видимому, с влиянием свободной границы и глубины погружения источника звука. В отличие от глубокого океана, где этот эффект известен и наблюдался ранее в экспериментах, в условиях мелководного распространения звука особое влияние оказывают характеристики дна, а также возможная горизонтальная рефракция на береговой линии, что требует более детального численного исследования для достоверного объяснения полученного результата. Также показано, что больший объем информации о среде по сравнению с использованием одиночного датчика давления, можно получить с помощью КПП. Полученные уровни пространственного убывания различных составляющих акустического поля могут быть использованы в качестве исходных данных для решения обратной задачи восстановления характеристик водоема [6, 7], в том числе коэффициента амплитудного поглощения вдоль трассы распространения сигнала. Перспективным является исследование возможностей таких оценок с учетом обнаруженных осо-

бенностей пространственного убывания составляющих звукового поля.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-02097 офи_м, № 16-02-00680.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гордиенко В.А.* Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. *Белов А.И., Кузнецов Г.Н.* // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 614.
3. *Кузнецов Г.Н., Степанова А.Н.* // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 623.
4. *Биоакустика.* Под ред. Ильичева В.Н. М.: Высшая школа, 1975. 256 с.
5. *Рожин Ф.В., Тонаканов О.С.* Общая гидроакустика. М.: изд. МГУ, 1988. 160 с.
6. *Веденев А.И., Гончаров В.В., Муханов П.Ю. и др.* // Уч. записки физ. ф-та МГУ. 2017. № 5. С. 1750107.
7. *Шуруп А.С., Румянцева О.Д.* // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 6. С. 700.