

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Особенности распространения звукового сигнала в мелком пресном водоеме при разной глубине погружения источника звукаБ. И. Гончаренко,^{1, а} А. И. Веденев,^{2, б} А. С. Шуруп^{1, 2, 3, в}¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*² *Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН. Россия, 117218, Москва, Нахимовский пр. 36.*³ *Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН. Россия, 123995, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1.*

Поступила в редакцию 24.05.2019, после доработки 04.07.2019, принята к публикации 11.07.2019.

Анализируются результаты эксперимента по измерению скалярно-векторных характеристик акустического поля в мелком водоеме с газонасыщенном грунтом. Одновременная регистрация звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости осуществлялась с использованием приемника звукового давления и векторного приемника. В качестве источника, расположенного на глубине водного слоя, использовался буксируемый излучатель тонального сигнала; в качестве источника, расположенного вблизи границы вода—воздух, использовался шумовой сигнал от проходящего судна. Показано, что при пространственном затухании составляющих звукового поля наблюдаются существенные вариации уровней звукового давления и составляющих колебательной скорости, вне зависимости от глубины погружения источника звука. При расположении источника звука на глубине водного слоя характер зависимости пространственного затухания составляющих акустического поля различный, а при расположении источника шумового сигнала под поверхностью границы вода—воздух характер затухания амплитуд звукового давления и вертикальной составляющей колебательной скорости одинаков на всей трассе измерения.

Ключевые слова: векторно-фазовые методы измерений, пространственное затухание звука в мелком водоеме, векторный приемник.

УДК: 534.6. PACS: 43.60.+d, 43.58.+z.

ВВЕДЕНИЕ. ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНОГО ГРУНТА ПРЕСНОГО ВОДОЕМА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА

Одним из важных факторов для оценки эффективности подводного наблюдения, а также акустического мониторинга морской акватории по акустическим сигналам является пространственное затухание звука. Величины затухания звуковых сигналов, как показано в работе [1], в сильной степени могут изменяться в зависимости от глубин погружения источника звука и приемного устройства, акустических свойств донных отложений, типа источника звука (монополь, диполь). Может наблюдаться существенный разброс пространственного затухания звука, причиной которого является изменчивость акустических свойств донных отложений [2, 3] вдоль трассы распространения сигнала.

Отметим особенности акустических характеристик подводного грунта пресного водоема. В пресноводных водоемах с донным грунтом, в котором содержатся газонасыщенные осадочные породы, всегда есть некоторое количество нерастворимых газов. Основным газом, содержащимся в осадках пресных водоемов, например озер, водохранилищ, является метан. Как показали расчеты и экспериментальные данные, при увеличении газа до 1% от общего объема грунта скорость звука уменьшается до 100 м/с, т.е. сни-

жается в 15 раз по сравнению со скоростью звука в воде [4]. Экспериментальные данные, полученные на Клязьминском водохранилище [5], подтверждают, что величина скорости звука в дне может быть существенно меньше скорости звука в воде и приблизительно составлять 100 м/с [5]. В этом случае при преломлении звука на границе вода—дно возможен значительный отток энергии в дно, что приводит к увеличению затухания в водном слое.

Еще один важный фактор, определяющий пространственное затухание звукового поля, — структура грунта. В качестве примера такого влияния грунта на рис. 1 приведены оригинальные экспериментальные данные по измерению затухания амплитуды звукового давления на гидроакустическом полигоне, расположенном в акватории Клязьминского водохранилища. Работы были проведены на двух участках пресноводного водохранилища, отстоящих друг от друга на расстоянии не менее 200 м. Глубина водного слоя в обоих случаях была примерно одинаковой и составляла ≈ 8.5 м, при этом структура дна на этих участках отличалась. По измерению частотной зависимости разности фаз между звуковым давлением и вертикальной компонентой колебательной скорости первой нормальной волны ранее было показано [6], что модель грунта первого участка можно представить в виде однородного жидкого полупространства с пониженной скоростью звука по отношению к скорости звука в воде. На втором участке выявлена слоистость грунта и была построена его акустическая модель, в которой имеется газонасыщенный слой [6].

^а E-mail: goncharenko@phys.msu.ru

^б E-mail: vedenev@ocean.ru

^в E-mail: shurup@physics.msu.ru

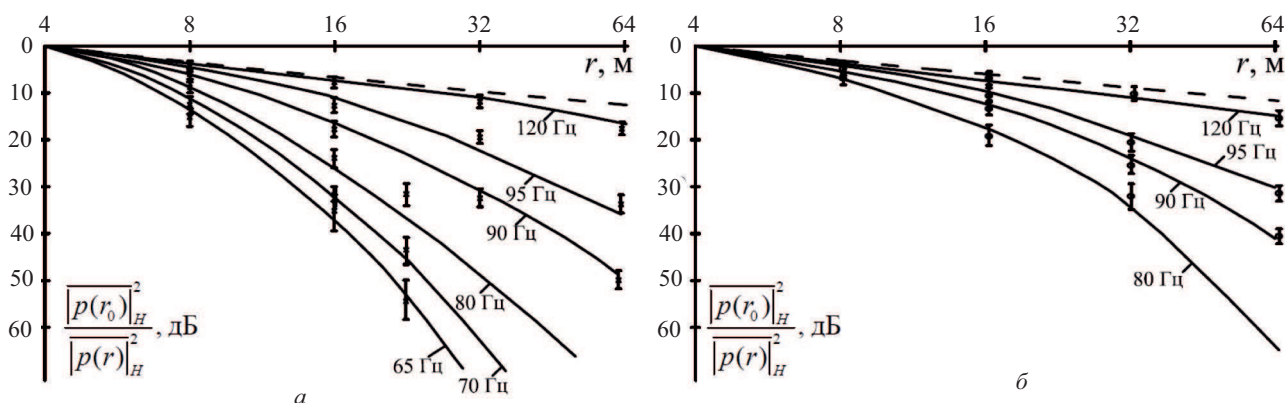


Рис. 1. Затухание амплитуды звукового давления в зависимости от горизонтального расстояния: однородный жидкий грунт (а) и двухслойная модель грунта (б). Экспериментальные результаты обозначены в виде крестиков (а) и кругов (б); размер вертикальных штрихов характеризует относительную величину ошибки

Экспериментальные результаты на рис. 1, а соответствуют участку с однородным жидким грунтом, на рис. 1, б — участку со слоистым дном, в котором имеется газонасыщенный слой. По оси абсцисс отложено горизонтальное расстояние r в метрах в логарифмическом масштабе, за нулевое расстояние принято $r_0 = 4$ м. По оси ординат — отношение в децибелах модуля квадрата амплитуды звукового давления усредненного по глубине водного слоя на расстоянии $r_0 = 4$ м к соответствующему измеренному значению. Цилиндрический закон убывания звукового давления представлен прямой пунктирной линией.

Сплошными кривыми на этих рисунках изображены рассчитанные значения затухания амплитуды звукового давления в функции горизонтального расстояния для соответствующих частот. Следует отметить, что для участка с однородным жидким грунтом пространственное затухание амплитуды звукового давления увеличивается с понижением частоты и существенно больше, чем цилиндрический закон убывания.

Параметры для однородного жидкого грунта и двухслойной модели грунта были заимствованы из работы [6]. Для модели однородного жидкого грунта параметры были следующими: $c_1 = 50$ м/с, $\rho_1 = 1.6$ г/см³ и поглощение в грунте $\delta_1 = 0.05$. Для двухслойной модели грунта — плотность промежуточного газонасыщенного слоя и нижнего полупространства соответственно равны $\rho_1 = 1.6$ г/см³, $\rho_2 = 2.1$ г/см³, скорости звука в них с учетом поглощения — $c_1^I = 100$ м/с, $c_1^{II} = 0.05c_1^I$, $c_2^I = 1800$ м/с и $c_2^{II} = 0.05c_2^I$, где $A_n = c_n^I + ic_n^{II}$, $n = 1, 2$, i — мнимая единица. Толщина промежуточного газонасыщенного слоя грунта $h = 0.7$ м, глубина водного слоя $H = 8$ м.

Из сравнения представленных на рис. 1 результатов для двух участков следует, что, начиная с частоты 95 Гц и ниже, для соответствующих частот имеет место существенно более быстрое затухание звукового давления на втором участке по сравнению с затуханием звукового давления на первом участке, обусловленное слоистостью грунта.

В последнее время при изучении пространственного затухания звука возрос интерес к исследованию векторных характеристик акустического поля — колебательной скорости частиц среды, ускорения или смещения частиц среды в звуковом поле.

Например, в работах [8, 9] показаны особенности затухания сигналов в мелком море. В частности, показано, что в мелком море коэффициент затухания вертикально ориентированных проекций вектора колебательного ускорения (ВКУ) на средних и высоких частотах в два раза и более превышает коэффициент затухания скалярных сигналов и горизонтально ориентированных проекций ВКУ. Кроме того, отмечено, что при увеличении расстояния на низких частотах при малом числе мод, в пределе — при распространении одной моды, величины коэффициентов затухания сближаются. Как следствие, сближаются коэффициенты затухания на самых низких частотах. Авторы [9] отмечают, что законы затухания составляющих ВКУ и звукового давления (ЗД) хорошо между собой согласуются, но на отдельных участках дистанции для всех частот наблюдаются отклонения экспериментальных зависимостей от расчетных. Так, например, отклонения для вертикальных проекций ВКУ заметно превышают отклонения для поля ЗД (и горизонтальных проекций ВКУ). Авторы предположили, что их причиной является вариация характеристик поверхностных слоев грунта вдоль трассы буксировки излучателя.

В работе [10] показано, что затухание амплитуд сигналов в волноводе Пекериса (звукового давления, векторов колебательной скорости и интенсивности) заметно различается 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 экспериментальных оценках эффективности обнаружения или измерения шумности реальных пространственно-развитых объектов, поля которых обладают направленностью, но могут быть аппроксимированы суперпозицией мультиполей. Особенно полезным, как отмечают авторы, может быть использование полученных аппроксимирующих зависимостей для описания низкочастотных полей, излучаемых гребными винтами.

В некоторых работах исследуются особенности затухания звуковых сигналов в мелком море при различных горизонтах расположения источника и приемника звука. Например, в работах [11, 12] показано, что при выполнении определенных условий средний уровень звукового поля в центре водного

слоя затухает пропорционально $r^{-3/2}$, т.е. по тому же закону, что и усредненное по глубине поле в слое. Если один из преобразователей находится вблизи морской поверхности, а другой — в середине слоя, то поле затухает $\sim r^{-5/2}$. Для преобразователей, одновременно работающих вблизи поверхности мелкого моря, поле затухает пропорционально $\sim r^{-1/2}$.

Цель настоящей работы — исследование пространственного затухания скалярно-векторных характеристик звукового поля в мелком пресном водоеме с газонасыщенным грунтом при различных глубинах погружения источника звука.

1. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Были проведены натурные измерения скалярно-векторной структуры акустического поля в русле реки Урал в летнее время 2017 года. Осуществлялось одновременное измерение как амплитуды звукового давления, так и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости [13]. При проведении эксперимента использовался донный вариант постановки комбинированного приемного модуля (КПМ), состоящего из приемника звукового давления и векторного приемника (ВП) (три взаимно ортогональных канала колебательной скорости) [14]. Ввиду сильного течения р. Урал (оно составило примерно 1 м/с) рамка КПМ, которая одновременно служила обтекателем, была дополнительно обшита в два слоя защитным материалом, что позволило существенно снизить шумы обтекания, возникающие на звукоприемниках от набегающего водного потока.

В качестве источника тонального сигнала 920 Гц использовалась пьезоэлектрическая сфера диаметром 80 мм. Продолжительность излучения составляла от 1 до 2 минут. Источник перемещался на небольшой моторной лодке на удалении до 175 м от приемной системы. Положение лодки контролировалось с помощью фала, закрепленного на обеспечивающем судне, с помощью GPS, а также лазерным измерителем расстояний. Параметры волновода в русле реки Урал были следующими: средняя глубина водного слоя вдоль трассы измерений составляла примерно 5 м, скорость звука в водном слое постоянна и равна 1483 м/с, эффективная скорость звука в верхнем слое осадков примерно — 250 м/с, плотность верхнего слоя осадков — 1300 кг/м³ [15]. Учитывая, что скорость звука в верхнем слое осадков существенно меньше скорости звука в водном слое, будем считать верхний слой осадков газонасыщенным [4].

Излучатель находился на глубине 1.3 м и перемещался от КПМ в направлении по течению реки. Были получены записи звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости для различных расстояний (от 13 м до 175 м) от излучателя до КПМ в водном слое с газонасыщенным грунтом.

В качестве примера на рис. 2 приведены одновременно зарегистрированные спектры по каналу давления «Р» (рис. 2, а) и по «Х»-каналу, соответствующему горизонтальной компоненте колебательной скорости (рис. 2, б), при расположении излучателя

на расстоянии 30 м от КПМ. По горизонтальной оси — частота в герцах, по вертикальной оси — децибелы относительно одного вольта. Дискретная составляющая на частоте $f = 920$ Гц в приведенных спектрах соответствует частоте излучаемого тонального сигнала. В качестве примера для «Z» канала, соответствующего вертикальной компоненте колебательной скорости v_z , на рис. 2, в приведена спектрограмма, полученная на основе оконного фурье-преобразования данных измерений v_z . Использование спектрограммы оказывается удобным для анализа частотно-временной изменчивости сигналов. На рис. 2, в видно, что в течение всего времени записи сигнала, когда источник находился на расстоянии 30 м от КПМ (примерно 1 мин излучения), удалось записать стабильный монохроматический сигнал по «Z»-каналу (красная вертикальная линия соответствует сигналу на частоте 920 Гц, излучаемому в течение примерно 1 мин). Аналогичные результаты наблюдаются и по остальным каналам КПМ. В итоге, как следует из приведенных на рис. 2, а, б, в данных, превышение амплитуды излученного сигнала над собственными шумами по всем каналам составляет примерно 30–35 дБ, что позволяет проводить исследование пространственного затухания скалярно-векторных характеристик звукового поля.

Для исследования особенностей затухания уровня звукового сигнала источника, расположенного под поверхностью границы вода–воздух, был использован шумовой сигнал от проходящего поблизости судна, движущегося против течения реки. Расстояние до судна в разные моменты фиксировалось с помощью лазерного измерителя расстояний. Это позволило в дальнейшем выделить на записях шумов те участки, которые соответствовали заданным расстояниям между КПМ и судном.

На рис. 3, а, б приведены спектрограммы давления и вертикальной составляющей колебательной скорости (результаты для «Х»- и «Y»-каналов визуально сравнимы с представленными на рис. 3) зарегистрированного шумового сигнала. На рис. 3, а, б видно, что по мере приближения судна относительный уровень сигналов увеличивается, достигая максимума при траверзе, после чего убывает. Также отчетливо прослеживается интерференционная структура шумового поля, представленная набором полос с различным углом наклона (следует отметить, что наклон полос изменяется по мере приближения и удаления судна). Подобное изменение интерференционной картины шумового поля в мелком море от движущегося источника является основой для различных алгоритмов оценки параметров источника [16]. Информация, полученная с помощью КПМ, может использоваться и для оценки параметров волновода в тех случаях, когда характеристики излучателя оценены или считаются априори известными. В связи с этим следует отметить, что в последнее время развиваются методы восстановления характеристик мелкого моря и пресных водоемов, не требующие привлечения дорогостоящих излучателей; вместо этого используются взаимные корреляции шумовых полей, зарегистрированных КПМ [17].

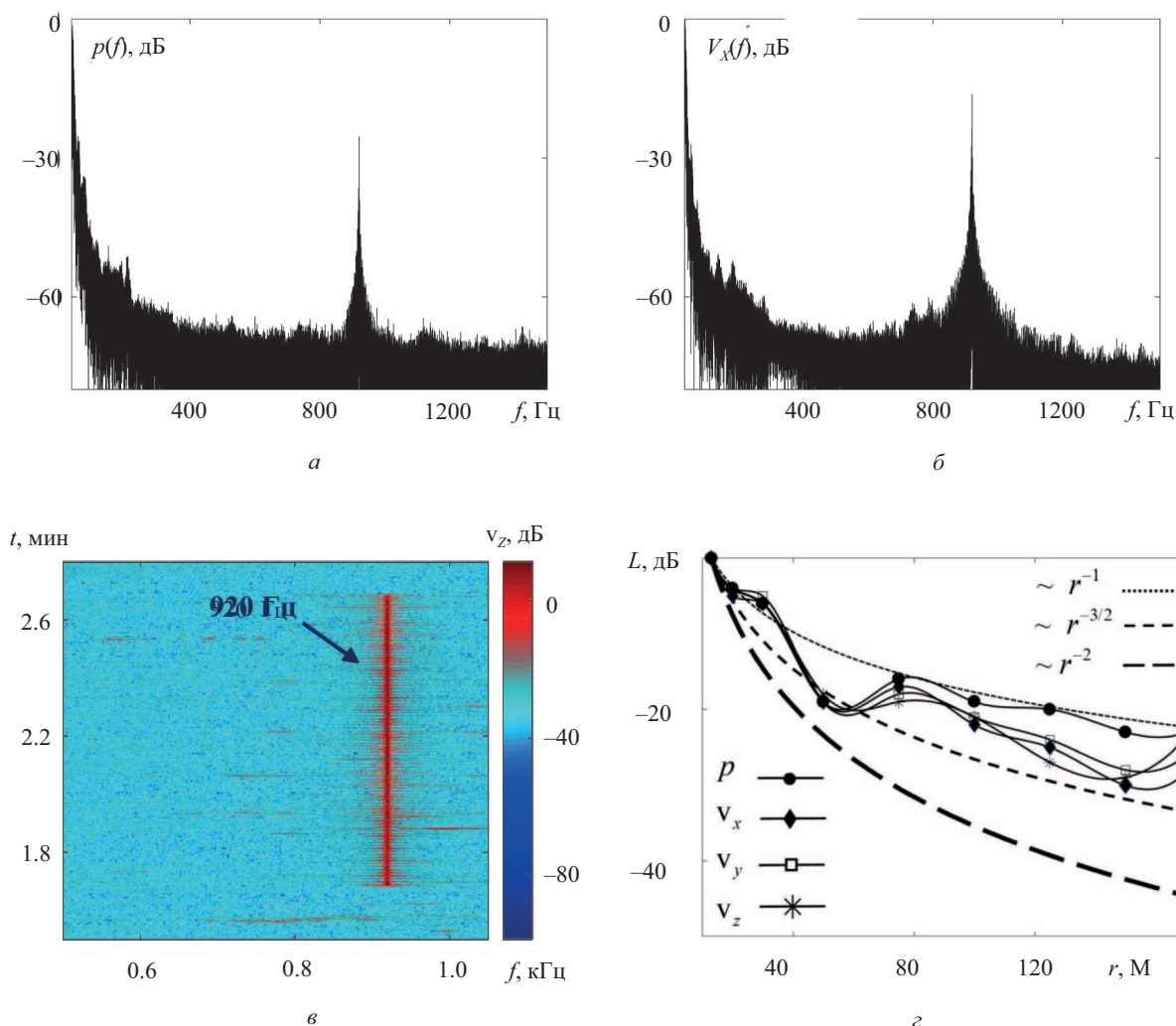


Рис. 2. Результаты измерений с монохроматическим источником, $f = 920$ Гц, расположенным на фиксированном расстоянии 30 м от КПМ на глубине 1.3 м: уровни спектров по каналу давления (а) и по «Х»-каналу (б), а также спектрограмма вертикальной компоненты колебательной скорости v_z (в) в децибелах относительно одного вольта. Пространственное затухание, характеризуемое функцией $L(r)$ (см. разд. 2), рассчитанной отдельно для давления p и трех ортогональных составляющих колебательной скорости v_x , v_y , v_z при различных расстояниях до монохроматического источника r (г)

Визуальное сравнение на спектрограммах рис. 3, а, б уровней сигналов в различных частотных диапазонах позволяет выявить характерную дискретную составляющую $f = 540$ Гц (отмечена на рис. 3, а и отчетливо наблюдается на рис. 3, б) для проходящего судна, а также вторую гармонику 1080 Гц. Измеренные в разные моменты времени расстояния до судна относительно, размещенной на дне КПМ, позволяют приступить к исследованию характера затухания звукового поля и для случая шумового источника.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления характера затухания составляющих звукового поля в зависимости от возрастания горизонтального расстояния r между КПМ и источником звука рассчитывался относительный уровень величины звукового поля $L(r)$: $L(r) = 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{f^2(r, t)}{f_0^2} dt \right]$, здесь в качестве функции f выбираются значения давления $p(r, t)$,

измеренные в различные моменты времени t для заданного расстояния r , или аналогичные зависимости одной из трех взаимноортогональных 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.

На рис. 2, г представлены экспериментальные данные по пространственному затуханию составляющих звукового поля в русле р. Урал при использовании контролируемого монохроматического источника с частотой излучения 920 Гц, при этом источник акустического сигнала располагался на глубине 1.3 м, а звукоприемники находились вблизи дна. Кроме того, приведены аналитические зависимости, соответствующие сферическому закону затухания звукового поля $\sim r^{-1}$, квадратичному закону $\sim r^{-2}$, а также пропорционально $r^{-3/2}$.

Отметим особенности пространственного затухания составляющих звукового поля. На представленных данных (рис. 2, г) по затуханию составляющих

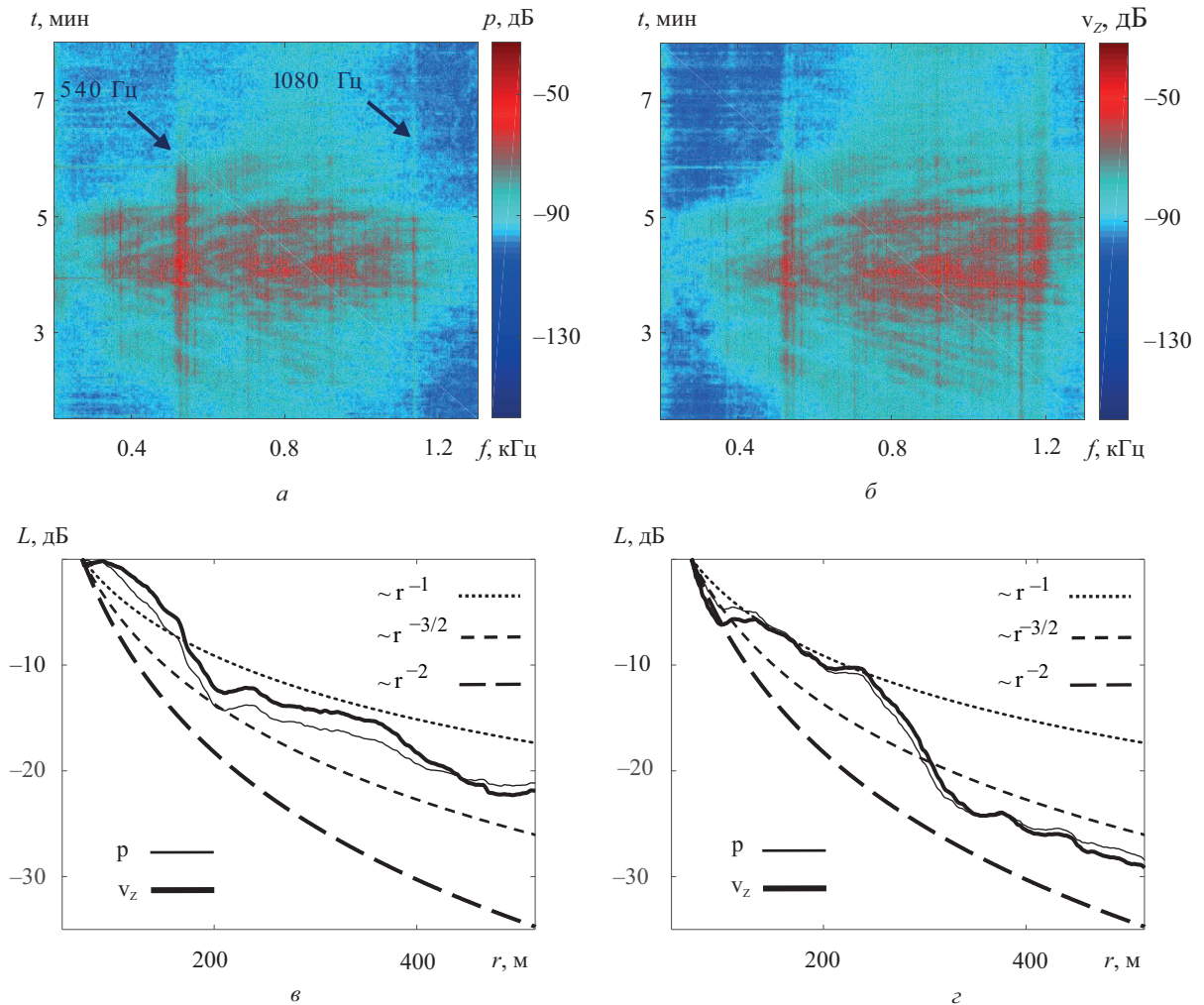


Рис. 3. Результаты измерений с шумовым источником (баржа), проходящим мимо КППМ: спектрограммы давления p (а, обозначена основная дискрета 540 Гц и вторая гармоника 1080 Гц) и вертикальной компоненты колебательной скорости v_z (б) в децибелах относительно одного вольта. Пространственное затухание, характеризуемое функцией $L(r)$, рассчитанной отдельно для p и v_z на различных расстояниях до шумового источника по мере его удаления для частотных диапазонов 1080 ± 50 Гц (в) и 540 ± 50 Гц (г)

звукового поля наблюдаются существенные вариации уровней давлений и колебательной скорости, обусловленные интерференционными эффектами, которые заметно проявляются в мелком водоеме. Далее характер зависимости пространственного затухания этих составляющих акустического поля различный. Так, на малых расстояниях от источника звука (примерно до 60 м) пространственное затухание уровней всех компонент звукового поля имеет приблизительно одинаковый характер и соответствует квадратичному закону $\sim r^{-2}$. По мере же увеличения расстояния пространственное затухание амплитуд звукового давления и трех взаимно ортогональных составляющих колебательной скорости начинает отличаться — затухание уровня звукового давления соответствует сферическому закону, а затухание всех составляющих колебательной скорости происходит значительно быстрее и на расстоянии 175 м разница достигает примерно 10 дБ.

Далее рассмотрим другой случай, когда источник шумового сигнала (движущийся корабль) расположен под поверхностью границы вода—воздух, а звукоприемники, как и в первом случае, располагались вблизи дна. Были выбраны два участка шумового сигнала: вблизи второй гармоники основной дискрет-

ной частоты — 1080 Гц, что приблизительно соответствовало частоте тонального излучаемого сигнала, и вблизи частоты 540 Гц, которая соответствовала основной дискретной составляющей частоты излучения шумового источника.

На рис. 3, в изображено затухание амплитуд звукового давления шумового сигнала, а также вертикальной составляющей колебательной скорости, профилированные вблизи второй гармоники основной дискретной частоты 1080 ± 50 Гц, по мере удаления судна от КППМ. В этом случае также наблюдаются вариации уровней сигналов, обусловленные интерференцией звукового поля. Однако они не столь заметны, как в случае излучения тонального сигнала, что обусловлено выбором достаточно широкой полосы частот. Характер затухания амплитуд звукового давления и вертикальной составляющей колебательной скорости примерно одинаков на всей трассе измерения. При этом затухание уровня сигнала происходит не так существенно по сравнению с затуханием уровня сигнала при расположении тонального источника излучения на глубине 1.3 м.

На рис. 3, г приведены аналогичные рис. 3, в зависимости, но полученные в полосе 540 ± 50 Гц, т. е. вблизи основной частоты излучения шумово-

го источника. Отметим, что также наблюдаются вариации уровней сигналов, обусловленные интерференцией звукового поля, и характер затухания амплитуд звукового давления и вертикальной составляющей колебательной скорости примерно одинаков на всей трассе измерения. Характер пространственного затухания уровней сигнала близок к монохроматическому источнику: на сравнительно небольших расстояниях наблюдается существенное затухание уровней сигнала, после чего наблюдается выход на зависимость $\sim r^{-1}$, соответствующую сферическому закону (расстояния примерно 125–240 м), после чего скорость затухания увеличивается, стремясь к квадратичной зависимости.

Особенность оценки пространственного затухания горизонтальных составляющих колебательной скорости v_x , v_y в случае движущегося судна состоит в том, что требуется дополнительно учитывать диаграмму направленности каналов «X» и «Y» векторного приемника, поскольку положение источника относительно направлений этих каналов изменяется с течением времени [18]. Это приводит к необходимости оценки пеленга на источник [19], что было сделано для условий рассматриваемого эксперимента в работе [20]. Показано, что полученные значения пеленга испытывают существенные вариации, вызванные сложными условиями распространения: сигнал распространяется вдоль русла реки с практически отвесными берегами, испытывая переотражения как от границ вода—воздух, поверхность водного слоя—дно, так и от берегов реки. В итоге учет диаграмм направленности каналов КПМ приводит к дополнительным ошибкам и влияет на достоверность оценки пространственного затухания v_x , v_y .

Отметим, что для контролируемого монохроматического источника (рис. 2, з) пеленг на источник не изменялся, поэтому учет диаграмм направленности горизонтальных каналов векторного приемника при расчете затухания уровней, соответствующих составляющих звукового поля, не требовался.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим основные результаты исследований.

При пространственном затухании составляющих звукового поля наблюдаются существенные вариации уровней звукового давления и трех взаимно ортогональных компонент колебательной скорости, обусловленные интерференционными эффектами, вне зависимости от глубины погружения источника звука. Столь заметное проявление интерференции связано с особенностями условий распространения акустического сигнала в рассматриваемом эксперименте: звук распространяется в относительно узком протяженном волноводе, ограниченном поверхностью водного слоя и дна, а также практически отвесными берегами, что приводит к многократным переотражениям как от границ вода—воздух, поверхность водного слоя—дно, так и от берегов реки, с последующим наложением сигналов, пришедших в точку наблюдения по разным траекториям. При повышении частоты интерференционная картина в волноводе формируется при наложении сигналов отдельных мод, формирующих полное акустическое поле на удалении от источника, при этом заметную роль могут

играть дисперсия и поглощение в условиях рассматриваемого эксперимента.

При расположении источника звука на глубине водного слоя характер зависимости пространственного затухания составляющих акустического поля различный. На малых расстояниях от источника звука пространственное затухание уровней всех компонент звукового поля соответствует квадратичному закону $\sim r^{-2}$. По мере же увеличения расстояния пространственное затухание уровня звукового давления соответствует сферическому закону, а затухание всех составляющих колебательной скорости происходит значительно быстрее и на расстоянии 175 м разница достигает примерно 10 дБ.

При расположении источника шумового сигнала под поверхностью границы вода—воздух характер затухания амплитуд звукового давления и вертикальной составляющей колебательной скорости одинаков на всей трассе измерения.

Пространственное затухание уровней сигнала вблизи основной частоты излучения шумового источника (540 Гц) идентично затуханию соответствующих уровней сигнала при использовании тонального источника звука (920 Гц), расположенного на глубине водного слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70034), а также гранта Президента РФ для научных школ № НШ 5545.2018.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожин Ф. В., Тонаканов О. С. Общая гидроакустика. Изд. МГУ, 1988. С. 33.
2. Агеева Н. С., Крупин В. Д. // Акуст. журн. 1980. **26**, № 2. С. 161.
3. Агеева Н. С., Крупин В. Д. // Акуст. журн. 1981. **27**, № 5. С. 669.
4. Гончаренко Б. И., Гусев В. А. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2017. № 5. 1750110.
5. Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н. // Акуст. журн. 1977. **20**, № 4. С. 531.
6. Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н., Иванов В. Е. // Акуст. журн. 1979. **25**, № 4. С. 507.
7. Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А. // Акуст. журн. 2006. **52**, № 2. С. 283.
8. Степанов А. Н. // Акуст. журн. 1996. **42**, № 3. С. 446.
9. Белов А. И., Кузнецов Г. Н. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 6. С. 614.
10. Кузнецов Г. Н., Степанов А. Н. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 6. С. 623.
11. Грачев Г. А. // Акуст. журн. 1983. **29**, № 2. С. 275.
12. Гиндлер И. В., Петников В. Г. // Акуст. журн. 1987. **33**, № 2. С. 355.
13. Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. **35**, № 6. С. 93. (Gordienko V. A., Goncharenko B. I. // Moscow Univ. Phys. Bull. 1994. **1994**, N 6. P. 74.)
14. Гончаренко Б. И., Гордиенко В. А., Рожков В. А. Векторный приемник МГУ. АС СССР № 322.884 от 19.12.1988 г.; патент РФ 322 884, 1997.
15. Веденев А. И., Луньков А. А., Шатравин А. В., Кочетов О. Ю. // Сб. трудов. Акустика океана. Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXXI сессией Российского акустического общества. М: ГЕОС, Москва. 2018. С. 177–180.

16. Казначеев И. В., Кузнецов Г. Н., Кузькин В. М., Пересёлков С. А. // Акуст. журн. 2018. **63**, № 1. С. 33.
17. Веденев А. И., Гончаров В. В., Муханов П. Ю. и др. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2017. № 5. 1750107.
18. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
19. Гордиенко В. А., Илюшин Я. А. // Акуст. журн. 1996. **42**, № 3. С. 365.
20. Гончаренко Б. И., Веденев А. И., Муханов П. Ю., Шуруп А. С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. **83**, № 1. С. 96.

The Peculiarities of Sound Propagation in Shallow Fresh Water for Different Depths of Sound Source

B. I. Goncharenko^{1,a}, A. I. Vedenev^{2,b}, A. S. Shurup^{1,2,3,c}

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

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Moscow 117997, Russia.*

³*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow 123995, Russia.*

E-mail: ^agoncharenko@phys.msu.ru, ^bvedenev@ocean.ru, ^cshurup@physics.msu.ru.

The experimental results of measurement of the scalar and vector characteristics of an acoustic field in shallow water with a carbon bottom are analyzed. Simultaneous recording of the sound pressure and three orthogonal components of particle velocity was carried out using a sound pressure receiver and a vector receiver. A towed transducer was the source of the tone signal; the noise signal from a passing ship was a source located near the water—air boundary. In the spatial decay of the sound field components, significant variations in the levels of sound pressure and particle velocity components were observed, regardless of the depth of the sound source. When the sound source was located in the depth of the water layer, the dependence of the spatial decrease in the acoustic field components is diverse, while when the noise signal source was located below the water—air interface, the decay character of the sound pressure amplitudes and of the vertical component of the particle velocity were the same throughout the measurement path.

Keywords: vector-phase measurement, methods spatial decay of sound in shallow water, vector receiver.

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

Received 24 May 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 5. Pp. 502–508.

Сведения об авторах

1. Гончаренко Борис Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-69, e-mail: goncharenko@phys.msu.ru.
2. Веденев Александр Иванович — канд. физ.-мат. наук, руководитель лаборатории, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 124-59-96 доб. 0426, e-mail: vedenev@ocean.ru.
3. Шуруп Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: shurup@physics.msu.ru.