

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В МЕЛКОМ МОРЕ ВДОЛЬ КРОМКИ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА

**А.А. Голов, Ю.Н. Моргунов,
М.А. Сорокин, П.С. Петров**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹

Анализируются результаты натурного эксперимента по распространению импульсных акустических сигналов на шельфе Японского моря в осенне-летний период 2018 года. Цель эксперимента состояла в определении времен прихода и эффективных скоростей распространения сигналов вдоль акустической трассы, ориентированной вдоль кромки шельфа. В ходе теоретического анализа и моделирования распространения акустических колебаний для условий эксперимента разработана методика прогноза эффективных скоростей распространения импульсных сигналов на большие расстояния в мелком море. Методика основана на усреднении групповых скоростей первой модальной компоненты сигнала по всей трассе.

Необходимость решения задач навигационного обеспечения подводных объектов в мелководных акваториях морей и океанов требует особых подходов и дополнительных теоретических исследований особенностей распространения импульсных сигналов применительно к задачам акустической дальнометрии. В работе рассматривается наиболее общий теоретический подход к решению подобных задач.

Распространение звука в мелком море на дальние дистанции (более 100 км) неизбежно сопровождается проявлением многих физических эффектов и процессов [1–4], которые необходимо учитывать при моделировании акустических полей, оценке их уровней интенсивности и временной структуры сигналов в точках приема. К числу этих эффектов в первую очередь относятся горизонтальная и вертикальная рефракция звуковых волн [5, 6], обусловленная влиянием гидрологических условий в районе проведения исследований [7, 8], а также рельефом дна на акустической трассе и в ее окрестности [9–11]. Другой важный эффект связан с трансформацией сигнала под влиянием волноводной (межмодовой и внутримодовой) дисперсии [5, 6] и перераспределения энергии сигнала между отдельными его модальными компонентами (взаимодействия мод). Комбинация всех перечисленных эффектов в совокупности с неопределенностью

в значениях многих параметров волновода (в первую очередь параметров слоев дна) делает практически невозможным точный расчет временных рядов импульсных сигналов в точках приема. Во многих практических задачах, однако, возникает необходимость оценки импульсных характеристик таких сигналов или некоторых их интегральных характеристик [1–4, 12–16] (время прихода, соответствующее максимальной интенсивности, длительность принимаемого сигнала и т.п.). Оказывается, что некоторые из этих характеристик весьма устойчивы и почти не зависят от мелкомасштабных вариаций параметров волновода вдоль акустической трассы. В настоящей работе обсуждаются результаты натурного эксперимента, в ходе которого исследовалось распространение звука на трассе протяженностью около 136 км, ориентированной вдоль кромки континентального шельфа Японского моря. В ходе эксперимента были получены импульсные характеристики данного протяженного геоакустического волновода. В ходе последующего теоретического анализа удалось получить весьма точные оценки основных параметров импульсной характеристики, для чего потребовалось привлечь

¹ 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 231-16-13;
E-mail: morgunov@poi.dvo.ru, golov_alexander@inbox.ru

несколько различных математических моделей. Результаты проведенных исследований имеют важное практическое значение, в частности, при разработке систем акустической дальнометрии [12, 14].

1. Описание эксперимента

Экспериментальные исследования проводились в августе 2018 года при выраженном сезонном термоклин в водном слое на глубинах от 50 до 100 м. Акустическая трасса была ориентирована приблизительно вдоль кромки шельфа Японского моря, причем глубина в точке излучения (около 35 м) была несколько меньше, чем в среднем по трассе (около 80 м). Мобильный широкополосный пьезокерамический излучатель свешивался при помощи крановой установки с борта большого гидрографического катера (БГК), стоявшего на якоре поблизости от м. Лихачева, и опускался на глубину 30 м (при этом он оказывался в 5 м от морского дна). Один раз в три минуты излучался широкополосный фазоманипулированный сигнал с несущей частотой 400 Гц на основе М-последовательности длиной 1023 символа. Более 90% энергии излучаемого сигнала приходилось на полосу частот от 300 до 500 Гц.

В конечной точке трассы, в двадцати километрах от мыса Шульца, с яхты «Светлана» производилась постановка свободно дрейфующего радиогидроакустического буя (РГБ), обеспечивавшего прием излученных сигналов. С целью фиксации положения относительно источника в момент приема сигнальной посылки РГБ был оснащен GPS-приемником. Данные GPS и акустическая информация в реальном времени передавались по радиоканалу в пункт обработки и записи, расположенный на борту яхты «Светлана». Временной интервал между моментами излучения и приема сигналов фиксировался с помощью системы единого времени.

На рис. 1 представлена общая схема проведения эксперимента и отмечены местоположения точек излучения и приема сигналов. На рис. 2 показан рельеф дна на экспериментальной трассе (по данным батиметрической съемки с помощью эхолота), а также распределение скорости звука в водном слое, полученное по данным точечных измерений. Измерения были выполнены с помощью STD-зонда в пяти точках трассы, разделяющих ее на четыре сегмента почти одинаковой длины (вертикальные пунктирные линии на рис. 2). Гидрофон РГБ был погружен на глубину 80 м и принимал сигналы, распространяющиеся вблизи дна. В ходе обработки вычислялась взаимно-корреляционная функция (ВКФ) сигналов,



Рис. 1. Общая схема эксперимента

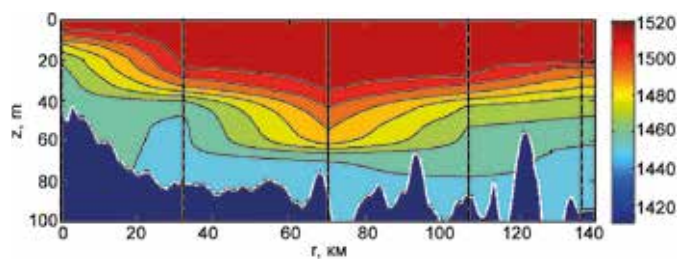


Рис. 2. Рельеф дна вдоль акустической трассы (сплошная линия), а также контурный график распределения скорости звука в водном слое, полученный путем интерполяции данных натуральных измерений, выполненных STD-зондом в точках трассы (вертикальные пунктиры)

зарегистрированных приемником, и излученной модулированной М-последовательности. Получаемая в результате функция времени представляет собой экспериментальную оценку импульсной характеристики волновода (ИХВ) (при дальнейшем анализе и построении графиков используется модуль этой функции).

Из рис. 3 видно, что в течение всего эксперимента в наблюдаемых ИХВ имеется стабильный максимальный первый приход (рис. 4, а) и лишь в редких

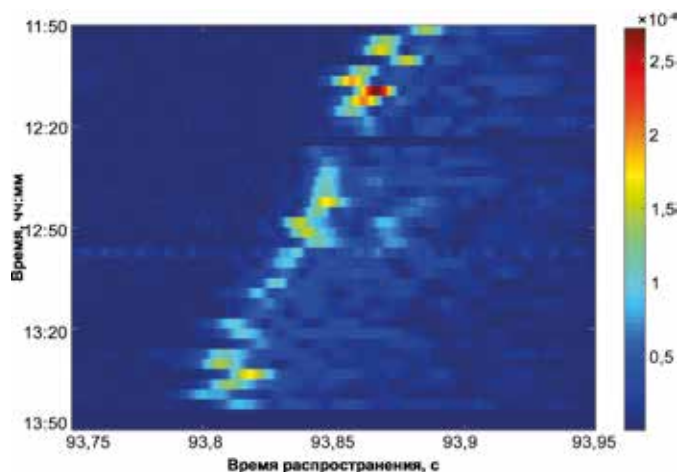


Рис. 3. Диаграмма функциональной блок-схемы подготовки данных

случаях акустическая энергия принимаемого сигнала распределяется по группе из трех приходов, максимумы которых разделены временными интервалами в 10–20 мс (рис. 4, б). По этой причине для расчета расстояния между источником и приемником определялись экспериментальные оценки времени распространения i -й сигнальной посылки – τ_i^{exp} , вычисляемой как разность времени излучения и времени регистрации максимального пика рассчитанной ИХВ, которые затем умножались на скорость звука на акустической трассе.

Предварительный прогноз эффективной скорости звука на трассе (v_{prog}) был получен усреднением минимальных значений скорости звука в пяти точках промера СТД-зондом, ввиду того что предполагалось образование придонного звукового канала,

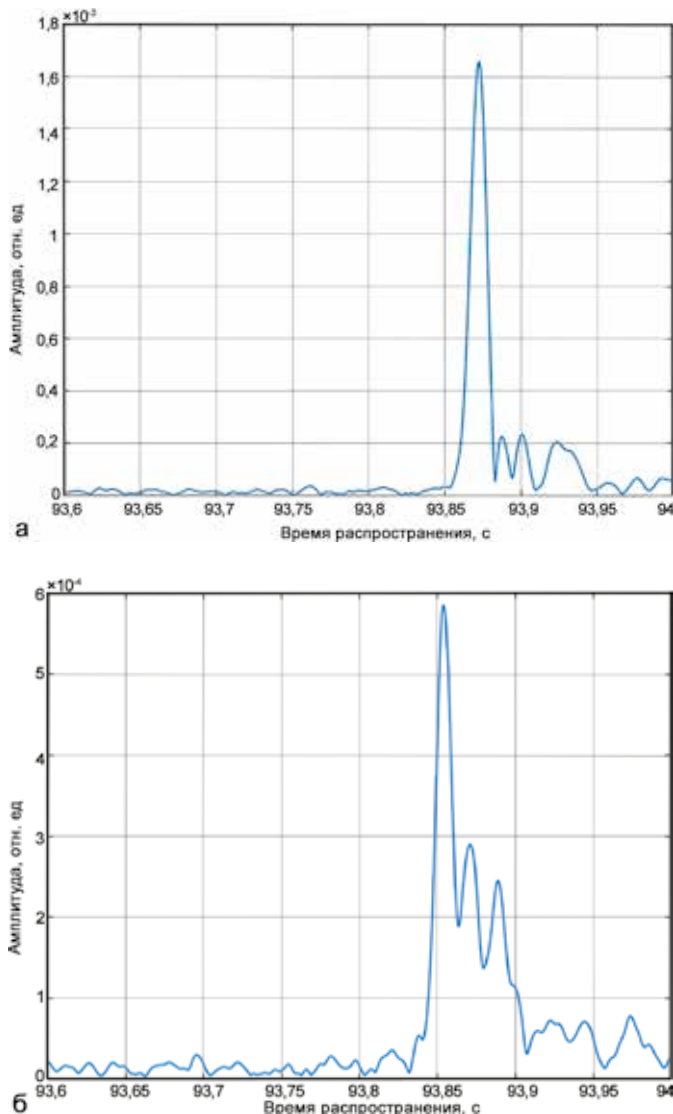


Рис. 4. Примеры импульсных откликов: а – для случаев с одним максимальным приходом; б – для случаев разделения акустической энергии на три прихода, соотносимых по уровню

свойственного данной акватории во временной период проведения эксперимента. Его значение составило 1456,7 м/с. На рис. 5 представлена гистограмма невязок расстояний от источника до приемника, рассчитанных по данным GPS и по предварительному прогнозу $v_{prog} \cdot \tau_i^{exp}$.

Среднее значение невязки составило 100,2 м при среднем квадратичном отклонении (СКО) 25,4. Все значения невязки, рассчитанные как $v_{prog} \cdot \tau_i^{exp}$, имеют отрицательный знак, т.е. полученные расстояния больше определенных по GPS. Это говорит о более высоком значении спрогнозированной скорости звука.

Используя данные GPS о положении приемника и излучателя и рассчитанные времена распространения сигналов, можно определить эффективную скорость звука:

$$V_{eff}^i = R_{GPS}^i / \tau_i^{exp},$$

где R_{GPS}^i – расстояния по данным GPS между источником и приемником в момент регистрации i -й посылки. Результаты данных расчетов представлены на рис. 6, из которого видно, что значение V_{eff} в течение двух часов эксперимента варьируется в очень узком диапазоне значений 1455,16–1455,66 м/с (среднее значение составляет 1455,41 м/с). Осюда следует, что несмотря на дрейф РГБ и флуктуации параметров волновода, неизбежно проявляющиеся за такой промежуток времени, оцениваемая в эксперименте эффективная скорость распространения сигналов вдоль рассматриваемой трассы является исключительно устойчивой величиной, что также подтверждается низким значением СКО.

Таким образом, спрогнозированное значение эффективной скорости звука, определенное по данным пяти СТД-промеров вдоль трассы, существенно отличается от значения, полученного на основе

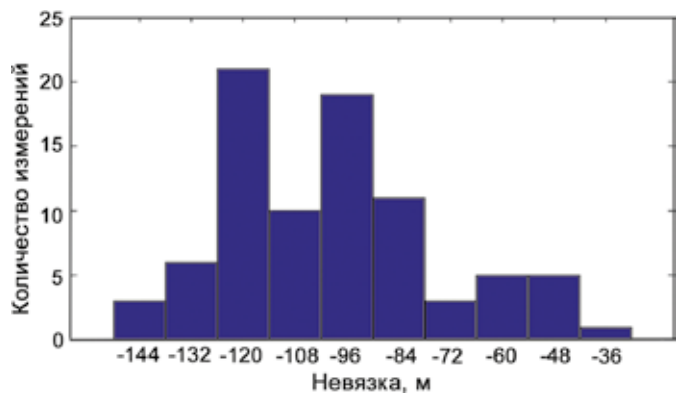


Рис. 5. Гистограмма невязок рассчитанных расстояний от источника до приемника по данным GPS и рассчитанным как $v_{prog} \cdot \tau_i^{exp}$

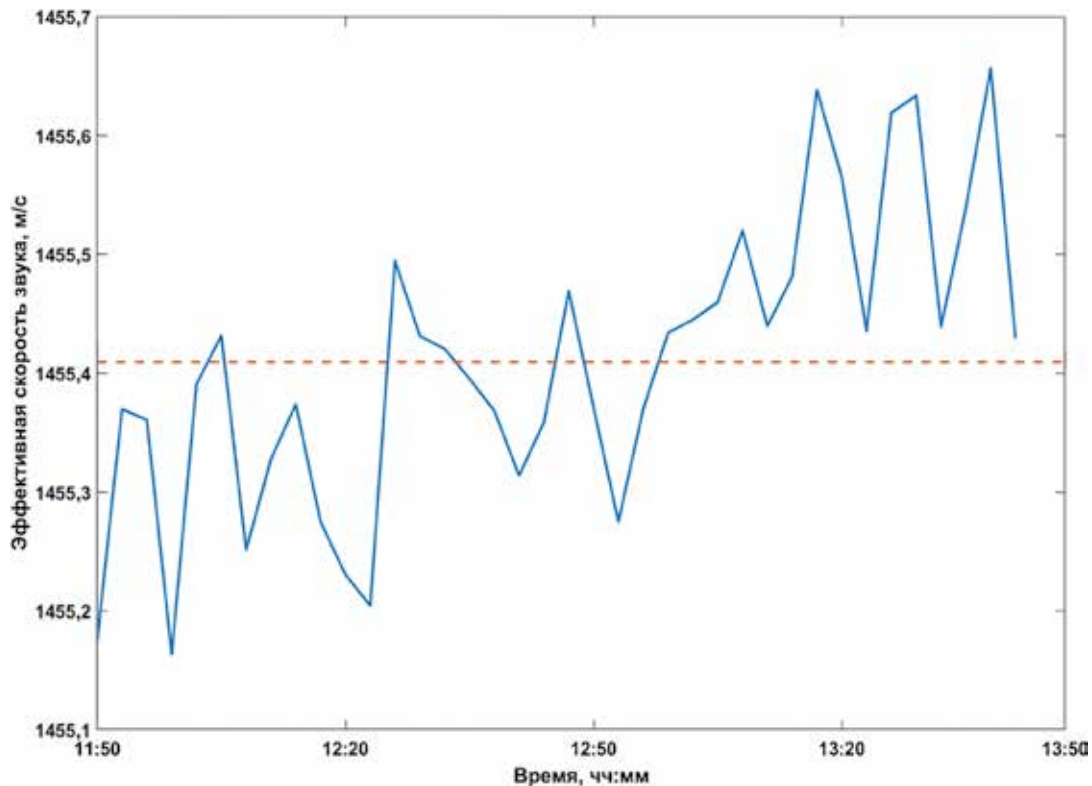


Рис. 6. Рассчитанные значения эффективной скорости для каждого измерения (сплошная линия) и среднее значение эффективной скорости на двухчасовом фрагменте (пунктирная линия)

проведенного эксперимента. Это свидетельствует о сложном характере распространения акустических колебаний (многократных переотражениях от дна и поверхности, горизонтальной рефракции и т.д.), для детального анализа которого была проведена оценка модовой структуры поля в образовавшемся волноводе.

2. Алгоритм расчета эффективных скоростей распространения звука на протяженных трассах в мелком море

Описания конкретных решений для расчета эффективных скоростей распространения звука на протяженных трассах в мелком море в значительной степени основывается на модовой теории распространения звука в океане. Центральным понятием, лежащим в основе данной методики, является групповая скорость нормальных волн (далее – мод). Для ее вычисления были разработаны высокоэффективные комплексы программ, сочетающие использование численных и аналитических методов, которые применялись при оценке эффективных скоростей распространения сигналов вдоль мелководной акустической трассы протяженностью 136 км.

Если известны модовые функции $\phi_j(r, z)$ и волновые числа $k_j = k_j(r)$, то групповую скорость $v_j^g(r)$ в данном сечении волновода можно рассчитать, используя соотношение:

$$\frac{1}{v_j^g(r)} = \frac{\omega}{k_j} \int_0^H \frac{(\phi_j(z))^2}{\rho(z)c^2(z)} dz. \quad (1)$$

Дистанция от источника до приемника вдоль геодезической линии R_{gps} и время распространения j -й модальной компоненты сигнала вдоль трассы t_j (в рамках двумерной теории распространения звука) связаны следующим интегральным соотношением:

$$t_j = \int_0^{R_{\text{gps}}} \frac{dr}{v_j^g(r)}. \quad (2)$$

Формула (2) является точной, если пренебречь горизонтальной рефракцией звука в океане (см. ниже). Тем не менее она неудобна для практических вычислений, в т.ч., например, для решения задач акустической дальнометрии, т.к. величина R_{gps} , которую в этом случае требуется оценить, находится в верхнем пределе интеграла. Поэтому мы вводим величину:

$$v_{\text{eff}}(j, f) = \frac{R_{\text{gps}}}{t_j}, \quad (3)$$

которую будем называть (теоретической) эффективной скоростью распространения j -й модальной компоненты вдоль некоторой трассы (здесь R_{gps} есть расстояние от источника до приемника, исчисленное вдоль геодезической линии на поверхности Земли). Если трасса состоит из n сегментов, каждый из которых составляет часть ε_i от ее длины (так что $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n = 1$), причем на i -м сегменте эффективная скорость равна v_{eff}^i , то эффективная скорость на всей трассе может быть найдена по формуле:

$$v_{eff} = \left[\sum_{i=1}^n \varepsilon_i / v_{eff}^i \right]^{-1}. \tag{4}$$

Предположим, что в начальной точке $r = r_i^1$ и конечной точке $r = r_i^2$ некоторого сегмента трассы известны профили скорости звука в воде и найдены групповые скорости j -й моды $v_j^g(r_i^1)$ и $v_j^g(r_i^2)$ соответственно. Предполагая, что изменение групповой скорости данной моды внутри сегмента можно считать линейным, вычислим интеграл (2) в пределах от r_i^1 до r_i^2 . Тогда получим следующее значение эффективной скорости (для j -й моды) на данном интервале:

$$v_{eff}^j(j, f) = \frac{v_j^g(r_i^2) - v_j^g(r_i^1)}{\ln(v_j^g(r_i^2) / v_j^g(r_i^1))}. \tag{5}$$

Комбинируя формулы (4) и (5), легко вычислить эффективную скорость звука для протяженной трассы, на которой имеется несколько гидрологических станций (включая начальную и конечную точки), разбивающих всю трассу на сегменты. Таким образом, для вычисления эффективной скорости распространения сигнала следует выполнить следующие вычисления:

1. Интерполировать профили скорости звука на точки, где известны значения глубин;
2. Для каждой из m точек получить модовые функции и волновые числа $k_j = k_j(r)$ (в случае дальнего распространения в мелком море достаточно получить волновое число и собственную функцию первой моды);
3. Вычислить по формуле (1) групповые скорости всех мод во всех m точках трассы;
4. Применить формулы (4) и (5) для расчета эффективных скоростей распространения различных модальных компонент сигнала (в случае распространения в мелком море использовать скорость первой модальной компоненты в качестве оценки эффективной скорости).

3. Результаты применения алгоритма расчета эффективной скорости распространения импульсных сигналов в мелком море при анализе эксперимента

В табл. 1 представлены результаты расчета эффективных скоростей для частот $f = 300, 400, 500$ Гц и номеров мод $j = 1, 2, 3$ по формулам (4) и (5), а также эффективные скорости, рассчитанные по данным натурального эксперимента.

Таблица 1. Эффективные скорости распространения сигналов $v_{eff}^j(j, f)$ (м/с), вычисленные по формулам (4), (5) для $f = 300, 400, 500$ Гц и $j = 1, 2, 3$, а также наблюдаемые в эксперименте.

Частота	№ мод		
	1	2	3
400 Гц	1456,1	1454,1	1451,8
500 Гц	1456,1	1454,8	1452,6
Эксперимент	1455,4		

При расчете используется разбиение трассы на 4 сегмента точками гидрологических станций.

Теоретическая оценка расстояния от источника до приемника может быть получена по формуле $R^{th}(j, f) = v_{eff}^j(j, f) \tau^{exp}$.

Сравнивая эту оценку с расстоянием R_{gps} , рассчитанным по данным GPS, можно оценить ошибку позиционирования по формуле $\Delta R(j, f) = R^{th}(j, f) - R_{gps}$. Результаты расчета ошибок по эффективным скоростям различных модальных компонент сигнала на частотах $f = 300, 400, 500$ Гц представлены в таб. 2 (значения в метрах).

Таблица 2. Ошибки определения дальности до источника $\Delta R(j, f) = R^{th}(j, f) - R_{gps}$ с использованием теоретических оценок эффективных скоростей из таблицы 1 по сравнению с данными GPS.

Частота	№ мод		
	1	2	3
300 Гц	46,9	-225,3	-159,6
400 Гц	65,7	-122,0	338,0
500 Гц	65,7	-56,3	-262,9

На рис. 7 представлена гистограмма невязок рассчитанных расстояний от источника до приемника по данным GPS и рассчитанных как $v_{eff}^j(1, 400) \cdot \tau_i^{exp}$.

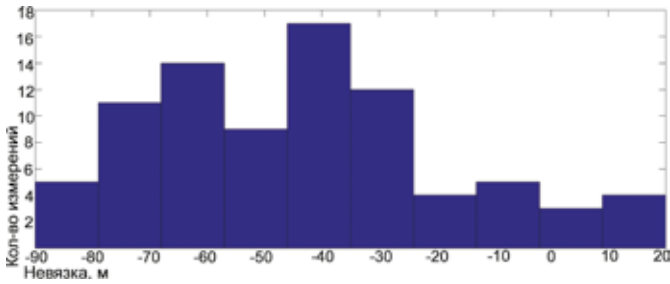


Рис. 7. Гистограмма невязок рассчитанных расстояний от источника до приемника по данным GPS и рассчитанным как $v_{eff}^{(1,400)} \cdot \tau_i^{exp}$

Применение в расчетах дистанции значения эффективной скорости первой моды на частоте 400 Гц позволило снизить среднее значение невязки с данными GPS более чем в 2 раза. Среднее значение невязки составили 44 м при СКО 25 м. И хотя выполненная оценка эффективной скорости по формулам (4) и (5) полностью учитывает всю имеющуюся информацию о гидрологических условиях на акустической трассе, в ней не учитываются неоднородности батиметрии между каждой парой гидрологических станций. Эти неоднородности можно учесть, если разбить трассу на существенно большее количество сегментов, имеющих равную длину (например, 0,5 км). В этом случае будут использованы уточненные зависимости $v_j^g(r)$ и формула (4) станет фактически эквивалентна интегральному соотношению (2), что позволит достигнуть еще большей точности в прогнозировании эффективной скорости звука на акустических трассах, проходящих в мелком море вдоль кромки континентального шельфа.

ВЫВОДЫ

Сравнение экспериментальных результатов с модельными расчетами показывает, что правильная теоретическая оценка эффективной скорости звука является ключевым этапом решения задач акустической дальнометрии. Отметим, что положительные значения всех уточненных ошибок позиционирования показывают, что, очевидно, имеется некоторый до сих пор неучтенный нами эффект, приводящий к тому, что теоретические скорости распространения модальных компонент импульсного сигнала должны распространяться несколько выше, чем наблюдаемые в эксперименте. Тем не менее для многих практических задач оценки времен (или дальностей), получаемые по эффективной скорости первой модальной компоненты являются достаточно точными (так, ошибка в определении дистанции в рассмотренном случае составила бы не более 75 м при длине трассы в 136 км).

ЛИТЕРАТУРА

1. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С. Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 5. С. 641–649.
2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирования импульсной характеристики в глубоком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 1. С. 51–52.
3. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2016. Т. 62, № 3. С. 341–347.
4. Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.G., Akulich V.A., Morgunov Y.N. Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: A pilot experiment // IEEE J. Oceanic Engineering. 2003. Vol. 28, No. 2. P. 297–302.
5. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. Computational ocean acoustics. New-York: Springer, 2011.
6. Katsnelson B.G., Petnikov V.G., Lynch J.F. Fundamentals of Shallow Water Acoustics. New-York: Springer, 2012.
7. Badiey M., Katsnelson B.G., Lin Y.-T., Lynch J.F. Acoustic multipath arrivals in the horizontal plane due to approaching nonlinear internal waves // J. Acoust. Soc. Am. 2010. Vol. 129, No. 4. P. 141–147.
8. Badiey M., Katsnelson B.G., Lynch J.F., Pereselkov S., Siegmann W.L. Measurement and modeling of threedimensional sound intensity variations due to shallowwater internal waves // J. Acoust. Soc. Am. 2005. Vol. 117, No. 2. P. 613–625.
9. Кацнельсон Б.Г., Малихин А.Ю. Пространственно-временная интерференция звукового поля в горизонтальной плоскости в области берегового склона // Акуст. журн. 2012. Т. 58, № 3. С. 330–337.
10. Петров П.С., Сергеев С.А., Толченников А.А. Об использовании асимптотических формул на основе модифицированного канонического оператора Маслова при моделировании распространения импульсных акустических сигналов в трехмерных волноводах мелкого моря // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 6. С. 799–807.
11. Tang J., Петров П.С., Piao S., Козицкий С.Б. К вопросу о методе изображений в задаче о распространении звука в клине в акустике океана: некоторые исправления и дополнения // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 2. С. 228–240.
12. Акуличев В.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Половина Ю.А. Применение псевдослучайных сигналов для подводной дальнометрии на шельфе // Докл. Акад. наук. 2010. Т. 432, № 4. С. 541–543.
13. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения сейсморазведочных импульсов в прибрежную зону // Акуст. журн. 2012. Т. 57, № 3. С. 356–369.
14. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 2. С. 191–196.
15. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Дубина В.А., Лучин В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (26). С. 49–54.
16. Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Безответных В.В., Петров П.С. Исследование возможности позиционирования автономных подводных аппаратов при выполнении ими глубоководных миссий // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 48–54.