

УДК 534.222

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОЕ МОРЕ

© 2016 г. Ю. Н. Моргунов, В. В. Безответных, А. В. Буренин, Е. А. Войтенко

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43*

E-mail: alex_bu@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.05.2015 г.

Исследовано влияние гидрологических условий на проявление эффекта акустического “оползня”, который заключается в фокусировке акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе ее на ось подводного звукового канала в глубоком море. Проведено сравнение результатов экспериментов, проведенных в Японском море в апреле 2014 г. и в августе 2006 г. на одной и той же акустической трассе, где расстояние между корреспондирующими точками составляло более 100 км. В апреле гидрологические условия на шельфовом участке трассы и в верхнем слое глубоководной части моря характеризовались наличием относительно слабого (-0.35 с^{-1}) отрицательного вертикального градиента скорости звука, в то время как в августе 2006 он составлял $\sim 1.5 \text{ с}^{-1}$. Экспериментальные и численные исследования показали, что эффект акустического “оползня” в условиях слабого отрицательного градиента скорости звука также проявляется, но структура акустического поля, захваченного подводным звуковым каналом, имеет более сложный характер с растянутой во времени импульсной характеристикой. Тем не менее, ее упорядоченная, стабильная и хорошо идентифицируемая структура во всех случайно выбранных для измерений точках на трассе позволяет рассчитывать на создание эффективных (с точностями в сотые доли процента) подводных навигационных систем по типу ГЛОНАСС и GPS для сезона с весенней гидрологией.

Ключевые слова: гидроакустика, распространение звука, псевдослучайные сигналы, подводная навигация.

DOI: 10.7868/S0320791916030114

Процессы взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей в слоистой водной среде на акваториях с переменным рельефом дна обуславливают формирование сложной пространственно-временной структуры акустических полей, которые не всегда можно предсказать теоретически. Эта проблема актуальна при решении задач прикладной гидроакустики, т.к. требует в важных для практики случаях проведения специальных экспериментов, направленных на выявление особенностей формирования акустических полей, которые могут повлиять на эффективность функционирования гидроакустических комплексов и систем на подводных объектах (ПО). Особенно это важно при проведении разработок систем позиционирования и управления, функционирующих в сотнях километров от источников навигационных и информационных сигналов, размещаемых вблизи береговой черты. Технология создания таких систем разрабатывается на протяжении последних лет в ТОИ ДВО РАН на основе полученных фундаментальных результатов при исследовании особенностей рас-

пространения низкочастотных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море [1–3]. В работе [1] авторами убедительно показана возможность эффективного решения задач навигации в Японском море в осенне-летний период на расстояниях до 200 миль от источника навигационных сигналов, расположенного вблизи (400 м) береговой черты. Эти результаты базируются на эффекте акустического “оползня”, который заключается в фокусировке акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе ее на ось подводного звукового канала (ПЗК) в глубоком море [1, 4]. Это позволило реализовать простой алгоритм расчета расстояния путем умножения скорости звука на оси ПЗК на время распространения максимального прихода импульсных сигналов в канале. Одним из условий возникновения этого эффекта является наличие отрицательного градиента скорости звука в шельфовой зоне. Учитывая практическую важность полученных результатов, была поставлена цель экспериментально изучить возможность решения задач навигации при различающихся гидрологических условиях в весенний период.

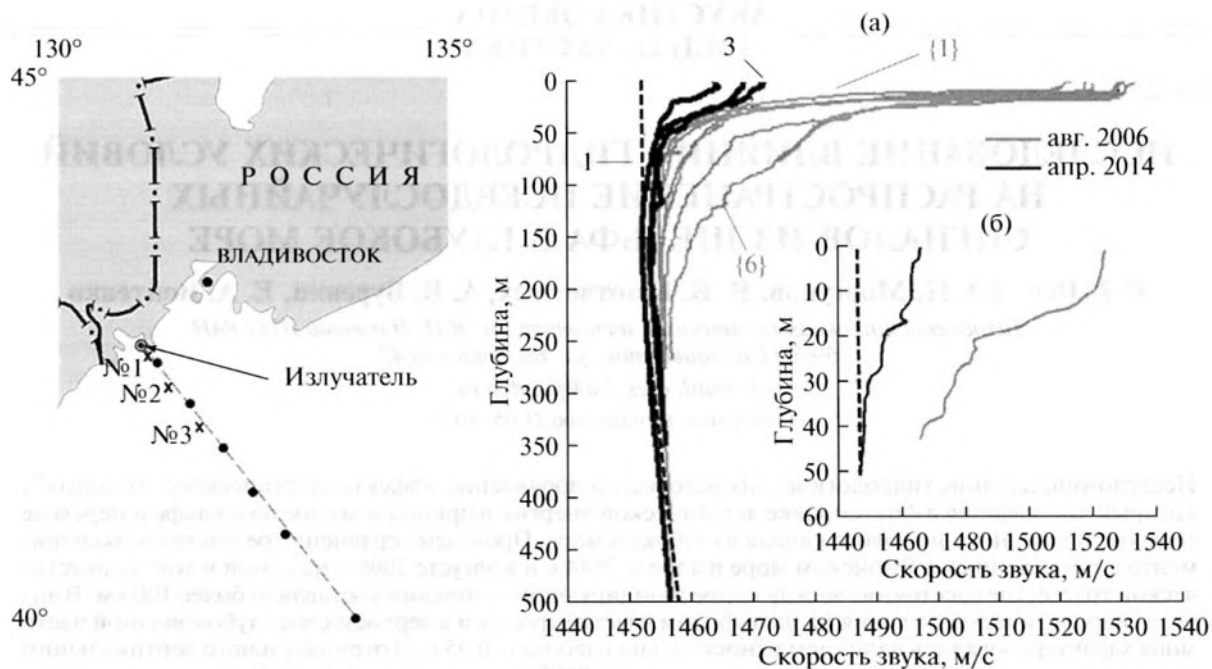


Рис. 1. Слева – схема эксперимента: × – точки измерений 2014 г.; • – точки измерений 2006 г. Справа – вертикальные разрезы скорости звука: (а) в точках 1–3 (2014 г.), {1–6} (2006 г.); (б) у излучателя (черным цветом отмечены профили скорости звука, полученные в 2014 г., серым – в 2006 г., штриховыми линиями – для зимнего профиля).

Ниже обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в апреле 2014 г., и проведено их сравнение с результатами, полученными в августе 2006 г. [1], на одной и той же акустической трассе (рис. 1). В апреле гидрологические условия на шельфовом участке трассы и в верхнем слое глубоководной части моря характеризовались наличием относительно слабого ($\sim 0.35 \text{ с}^{-1}$) отрицательного вертикального градиента скорости звука, в то время как в августе 2006 г. он составлял $\sim 1.5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 1а, 1б). В глубоководной части трассы в апреле отмечается наличие ПЗК с не столь ярко выраженной верхней границей как в августе (рис. 1а). Волнение моря при проведении измерений составляло около 1 балла в первой точке и примерно 5 баллов в третьей точке (144 км от излучателя). На мелководном участке трассы наблюдается небольшой уклон дна в сторону увеличения глубин с плотностью песчаного грунта $1800\text{--}2000 \text{ г/см}^3$, затем резкий континентальный склон и глубокое море.

Экспериментальные исследования проводились в течение пяти суток и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником, расположенным на шельфе, в трех точках на удалении 27, 82 и 144 км. Использование сложных сигналов позволило произвести выделение на фоне окружающего шума приходов импульсных сигналов, распространяющихся по различным лучевым траекториям, т.е. получить импульсный отклик среды распростра-

нения. Методика проведения эксперимента была следующая. У мыса Шульца, в 150 м от береговой черты, на глубине 34 м был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель и соединен кабелем с береговым постом управления. Это был тот же излучатель, что и в 2006 г., но при замене кабеля в 2013 г. он был переустановлен ближе к берегу. Один раз в минуту излучались сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 500 Гц. Длительность сеансов излучения варьировалась от 20 до 120 мин. В качестве имитатора приемного тракта ПО использовался радиогидроакустический буй, внутри которого размещались радиопередатчик, модуль GPS, система единого времени (СЕВ) для синхронизации излучающей и приемной систем, усилитель акустических сигналов, источник питания. При помощи кабеля осуществлялось соединение надводной части буя с гидрофоном, заглубленным ориентировочно до оси ПЗК, глубина которого определялась непосредственно перед постановкой с помощью гидрологического зонда. В центр анализа данных, расположенный на судне, по радиоканалу передавалась поступающая с гидрофона акустическая информация и данных GPS о местоположении дрейфующего буя. Далее производилось вычисление функций взаимной корреляции принятых сигналов с репликами излученных для получения импульсных откликов канала распространения.

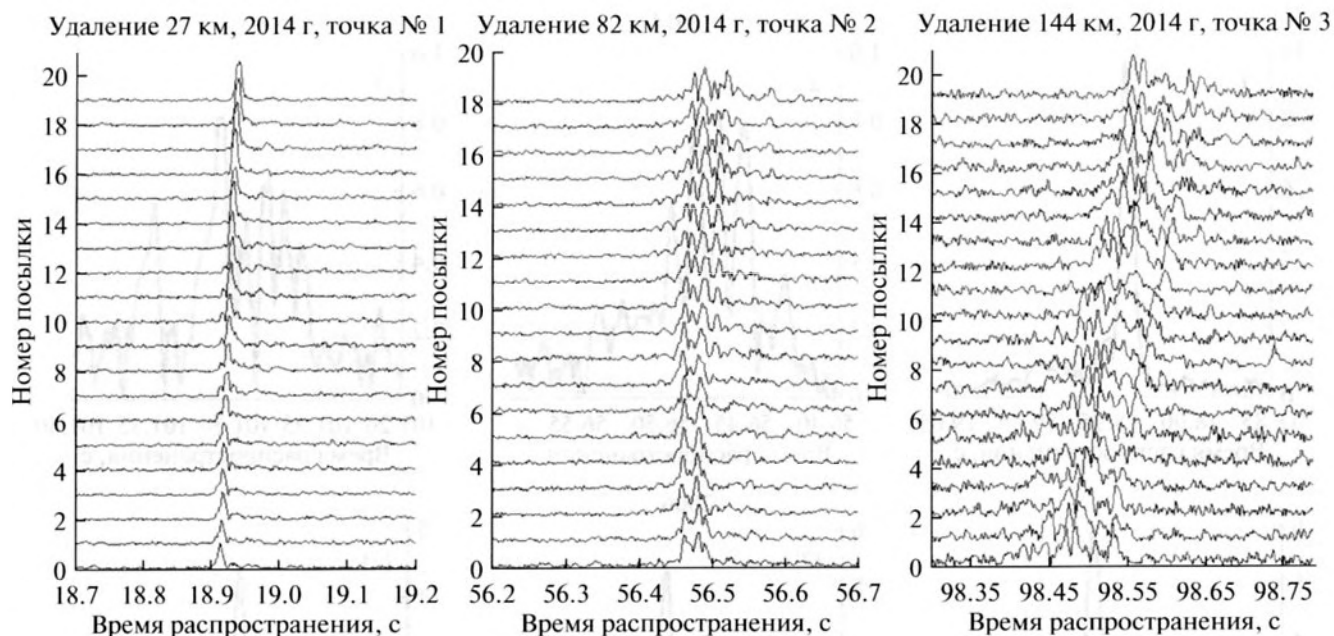


Рис. 2. Импульсные характеристики волновода.

На рис. 2 приведены 20-минутные фрагменты импульсных характеристик, полученные в трех точках трассы. Можно отметить стабильную, с хорошим превышением над помехой структуру импульсных сигналов. По изменению времен приходов можно судить, что в точках № 1 и № 2 буй с приемной системой дрейфовал перпендикулярно трассе источника—приемник, а в третьей удалялся от источника. В первой точке, расположенной над свалом глубин, импульсная характеристика обусловлена приходом одного сигнала, т.к., по-видимому, удалось поместить приемный гидрофон точно на оси ПЗК. Во второй точке наблюдается от двух до четырех приходов сигналов, распространяющихся по лучевым траекториям вблизи оси ПЗК, но максимальные значения стабильно отмечаются на двух приходах с разницей во времени около 30 мс. Более сложная структура из семи приходов, растянутых по времени до 100 мс, фиксируется в третьей точке. Здесь имеются те же два—четыре прихода сигналов, распространяющихся вблизи оси ПЗК, и за ними более мощный, распространяющийся по оси ПЗК (рис. 2, 3). За этой группой отмечаются более слабые приходы сигналов, распространяющихся по удаленным от оси ПЗК траекториям.

На рис. 3 приведены типичные импульсные характеристики, полученные в трех точках, и, для сравнения, импульсные характеристики, полученные в 2006 г. на приблизительно таких же расстояниях. Анализ этих характеристик показывает, что только на расстоянии 27 км они похожи на характеристики 2006 г. и состоят из одного прихода сигнала, распространяющегося вблизи оси ПЗК.

Для объяснения отличий импульсных характеристик на больших расстояниях рассмотрим результаты численного моделирования процесса распространения сигналов по лучевым траекториям для условий 2006 и 2014 гг. (рис. 4 и рис. 5). Для этого была использована лучевая программа RAY [5], которая успешно применялась при анализе схожих результатов российско-корейско-американского эксперимента в Японском море [6]. Следует отметить, что в расчетах рассматривались только лучи, вышедшие под углами менее 10 градусов, как наиболее информативные при заданных условиях экспериментов. Ниже приведены результаты расчетов для наиболее удаленных от излучателя точек приема.

Расчеты, проведенные для летних условий 2006 г., показывают, что в шельфовой зоне лучевые траектории формируют узкий ПЗК. При выходе в глубокое море эти лучи попадают на ось ПЗК и далее распространяются вдоль нее, независимо от ее колебаний по глубине (рис. 4а). Эти качественные предпосылки подтверждаются численными расчетами, приведенными на рис. 4б и 4в. Действительно, расчеты импульсной характеристики (рис. 4в) и углов скольжения траекторий импульсов (рис. 4б) для условий приема на систему, расположенную на расстоянии 113 км от излучателя, показывают, что максимальная энергия принятого сигнала сосредоточена в импульсе, прошедшем под углом скольжения, близким к нулю по оси ПЗК. Правильность сделанных выводов подтверждается хорошим соответствием импульсных характеристик, полученных экспериментально и численно (рис. 4в).

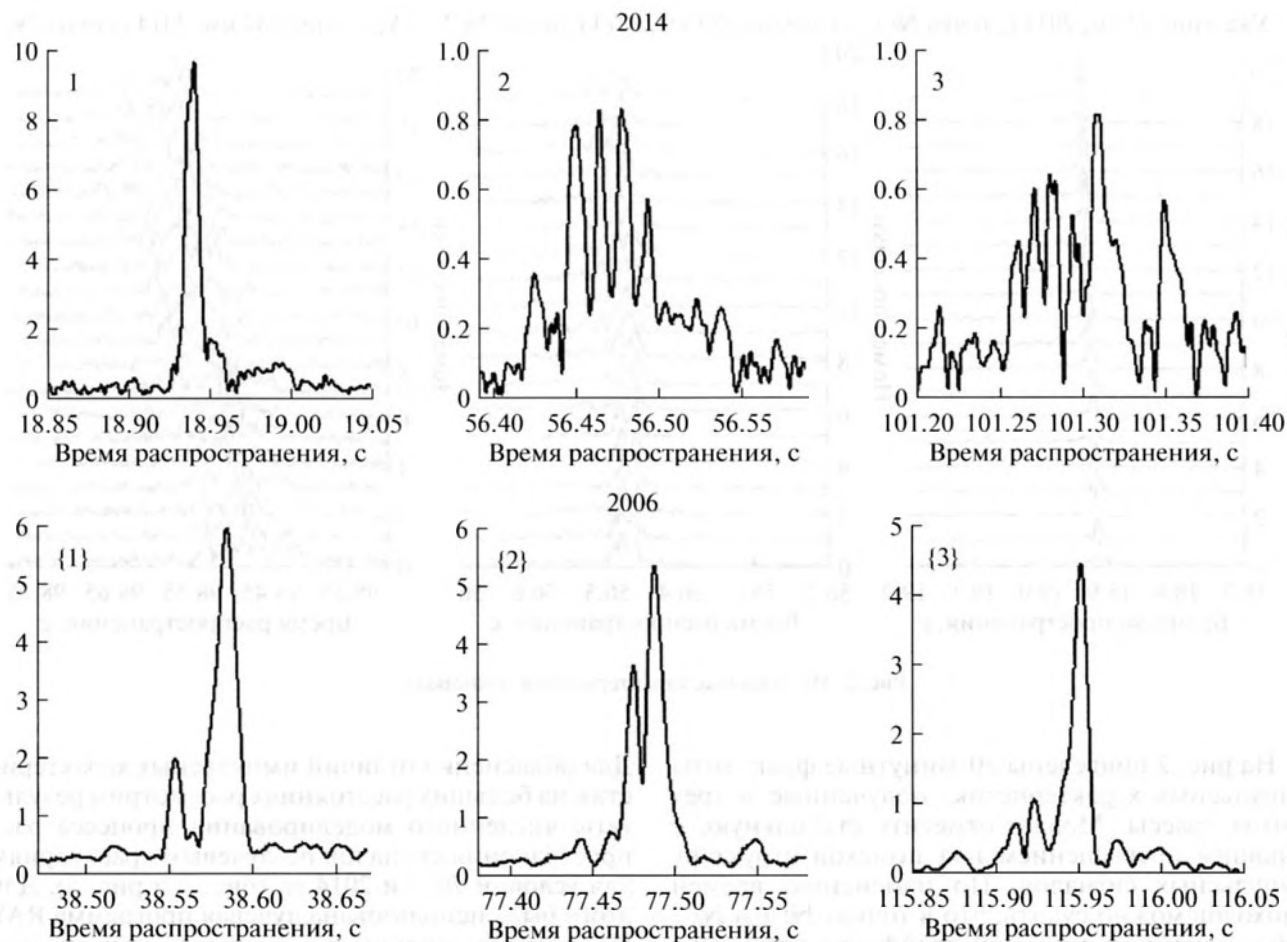


Рис. 3. Импульсные характеристики волновода: сверху – точки измерений в 2014 г. (1 – 27 км, 2 – 82 км, 3 – 144 км); снизу – точки измерений в 2006 г. ({1} – 56 км, {2} – 113 км, {3} – 169 км).

Более сложная лучевая картина наблюдается для весенних условий 2014 г. (рис. 5). В этом случае, из-за меньшего градиента скорости звука по глубине, на шельфе основная группа импульсов распространяется в более широком водном слое и под большими углами. При выходе в глубокое море эта группа лучей формирует вокруг оси ПЗК 50-метровый слой с высокой концентрацией лучевых траекторий акустической энергии (рис. 5а), распространяющихся со скоростью звука, близкой к скорости на оси ПЗК. Расчеты импульсной характеристики (рис. 5в) и углов скольжения траекторий принятых импульсов (рис. 5б) приемной системой, расположенной на расстоянии 144 км от излучателя, показывают, что основная энергия сосредоточена в группе импульсов, прошедших вблизи оси ПЗК под углами скольжения в пределах одного градуса. Более ранние и меньшие по амплитуде сигналы, прошедшие по траекториям с большими скоростями звука, соответствуют углам скольжения от 2 до 3 градусов. Следует отметить хорошее соответствие рассчитанной и полученной экспериментально временной структуры импульс-

ной характеристики (рис. 5в). Таким образом, представленные результаты 2014 г. позволяют сделать важный вывод. В 50-метровом слое воды, окружающем ось ПЗК, формируется сплошной канал акустической освещенности, в котором максимальные по амплитуде значения импульсной характеристики занимают временной интервал от 15 (точка № 1) до 40 мс (точки № 2 и № 3). Это позволяет реализовать точности дальнометрии в сотые доли процента.

Измеренные импульсные характеристики волноводов использовались для расчета дистанций между корреспондирующими точками по измеренным временам распространения максимального импульса и скоростям звука на оси ПЗК. Пример результатов расчетов расстояний по одной, случайно выбранной из серии сигнальной посылке, приведен в таблице. Там же приведены скорректированные по методике, описанной в [1], расчеты расстояний по средним скоростям звука на трассе, учитывающие тот факт, что вода на шельфовом участке более холодная, чем на оси ПЗК (рис. 1а, 1б). Данные расчетов расстояний,

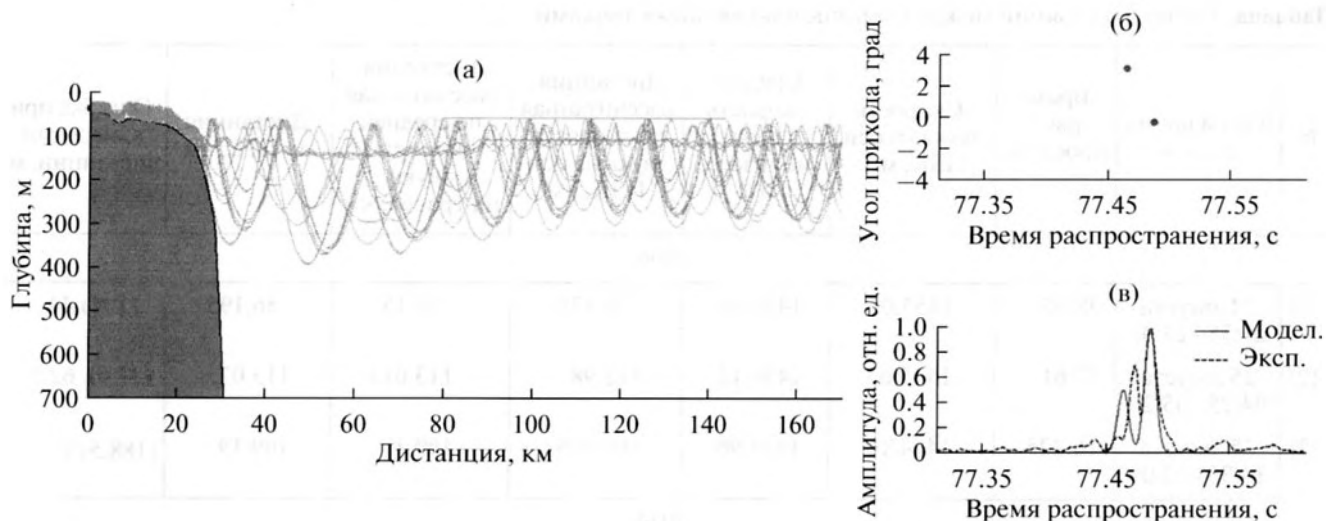


Рис. 4. Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента 2006 г.: (а) лучевая картина распространения; (б) углы прихода; (в) импульсные характеристики волновода.

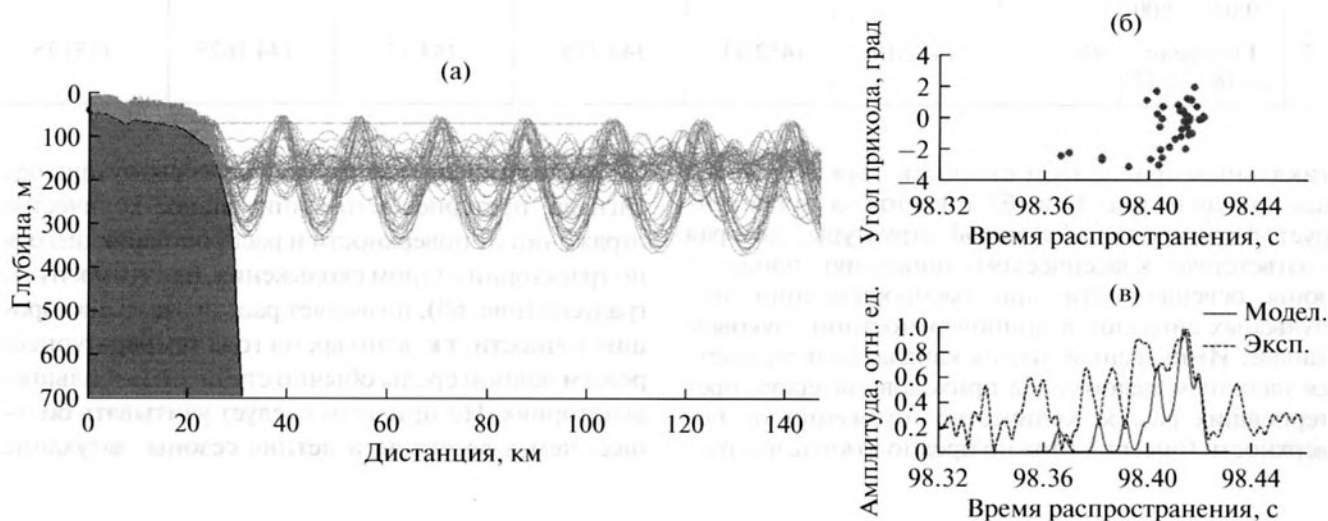


Рис. 5. Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента 2014 г.: (а) лучевая картина распространения; (б) углы прихода; (в) импульсные характеристики волновода.

полученные для всех посылок серии, сравнивались с результатами обсервации по GPS, и определялась средняя ошибка позиционирования имитатора ПО при дрейфе в данной точке трассы. В последнем столбце таблицы приведены средние значения разностей измерения расстояний акустическим методом и по данным GPS при использовании в расчетах скоростей звука на оси ПЗК (в скобках) и средних по трассе скоростей. Столь малые ошибки (сотые доли процента, как и в 2006 г.) при более сложных условиях распространения обусловлены тем, что максимальные по амплитуде импульсы распространялись по практически прямолинейным лучевым траекториям вблизи оси ПЗК. Разброс во времени прихода

импульсов, которые могут быть приняты за максимальные при расчете расстояний в точках № 2 и № 3, могут составлять до 30–40 мс. Это может приводить к ошибкам определения расстояний в 60–70 метров. Но приведенные в таблице результаты, полученные при усреднении расчетов расстояний по всем сигнальным посылкам в сериях, демонстрируют лучшие точности.

Результаты численного моделирования процессов по формированию импульсного отклика каналов для условий эксперимента 2006 г. и 2014 г. показали хорошее согласие с экспериментальными результатами. Поэтому были проведены расчеты для зимних гидрологических условий (рис. 6), которые характеризуются нулевым вер-

Таблица. Расчет расстояний между корреспондирующими точками

№	Дата и время записи	Время распространения, с	Скорость звука на оси ПЗК, м/с	Средняя скорость звука на трассе, м/с	Дистанция, рассчитанная по скорости звука на оси ПЗК, км	Дистанция, рассчитанная по средней скорости звука на трассе, км	Дистанция по GPS, км	Ошибка при измерении дистанции, м
2006								
{1}	24 августа 21:35–23:07	38.55	1455.05	1456.60	56.135	56.15	56.195	(104) 44
{2}	25 августа 04:25–05:25	77.61	1455.65	1456.12	112.98	113.015	113.075	(97.5) 62.5
{3}	25 августа 10:30–12:09	116.225	1454.10	1454.96	169.005	169.1	169.19	(188.5) 89
2014								
1	14 апреля 17:11–17:30	18.925	1454.33	1448.97	27.53	27.43	27.435	(92.5) 8.5
2	18 апреля 19:02–20:00	56.99	1454.01	1452.315	82.86	82.765	82.775	(89) 7.5
3	17 апреля 22:18–22:57	99.24	1453.19	1452.33	144.175	144.17	144.1625	(75) 7.5

тикальным градиентом скорости звука (штриховая кривая на рис. 1а и 1б). Рисунок 6а иллюстрирует формирование лучевой структуры, которая соответствует классическому описанию сплошной зоны освещенности при распространении импульсных сигналов в приповерхностном звуковом канале. Импульсный отклик канала характеризуется наличием целого ряда приходов сигналов, претерпевших разное количество отражений от поверхности (рис. 6в). Можно предположить, что рас-

чет расстояния по максимальному первому приходу сигнала, претерпевшего минимальное количество отражений от поверхности и распространяющегося по траектории с углом скольжения, близким к нулю градусов (рис. 6б), позволяет рассчитывать на хорошие точности, т.к. в это время года температурный режим водной среды обычно стабилен на больших акваториях. Но при этом следует учитывать большее, чем в весенние и летние сезоны, затухание

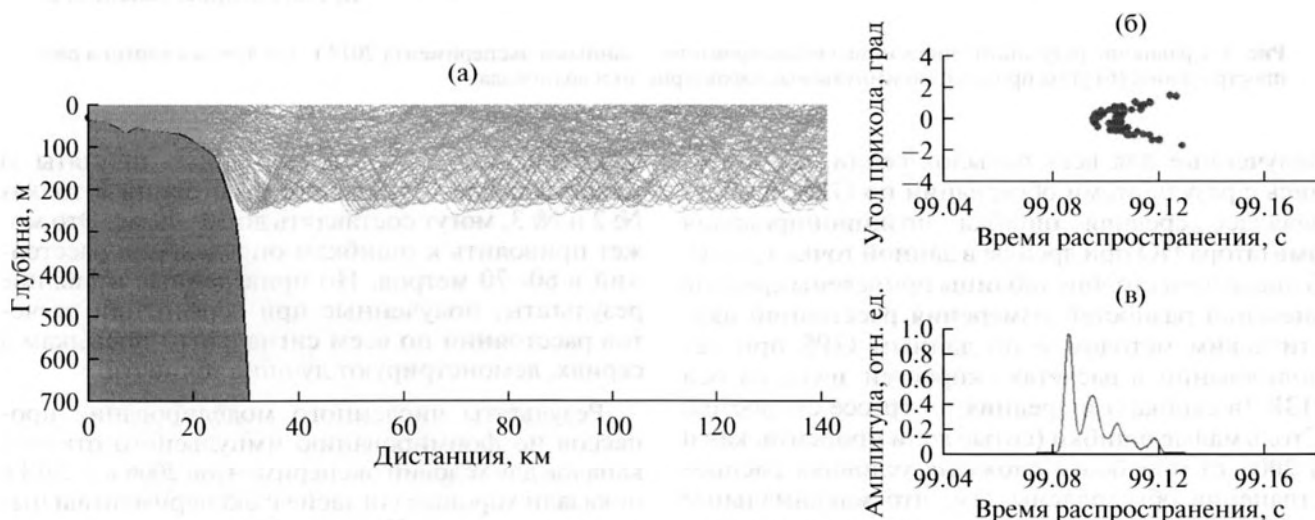


Рис. 6. Результаты численного моделирования для условий зимней гидрологии: (а) лучевая картина распространения; (б) углы прихода; (в) импульсные характеристики волновода.

звука, которое будет зависеть от состояния поверхности моря и частоты зондирующего сигнала.

Таким образом, в условиях натурного эксперимента подтверждена эффективность разработанной в ТОИ ДВО РАН концепции создания подводных навигационных систем по типу ГЛОНАСС и GPS для сезона с весенней гидрологией, которая характеризуется слабым отрицательным вертикальным градиентом скорости звука. При этом источник навигационных сигналов был размещен в 150 м от берега, т.е. еще ближе, чем в 2006 г. Постановка была осуществлена в течение двух часов с катера силами нескольких специалистов. Это обстоятельство имеет важное прикладное значение, т.к. кроме экономии кабеля повышается мобильность и безопасность оборудования береговой подобными системами.

В процессе выполнения работ была успешно протестирована и адаптирована для решения навигационных задач вычислительная программа RAY. Это позволило применить ее для оценки эффективности концепции по построению систем навигации дальнего радиуса действия для сезона с зимней гидрологией. Расчеты показали, что с большой долей уверенности можно рассчитывать на такие же точности решения задач навигации, как и в весенний и летне-осенний сезоны. Но перед практической реализацией потребуются дополнительные экспериментальные исследования по оптимизации частотного диапазона и определению необходимой мощности излучения, т.к. в этом случае необходимо учитывать дополнительное затухание при отражениях от дна и поверхности моря.

Следует отметить, что экспериментальные результаты данного исследования, полученные в контролируемых условиях, представляют несомненный интерес для развития теоретических и

численных методов исследования закономерностей формирования и взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей на акваториях с переменным рельефом дна. Они имеют важное научное значение для развития теории и практики в подводной акустике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А.* Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 3. С. 374–380.
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. *Акуличев В.А., Бородин А.Е., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С.* Применение сложных акустических сигналов в дальней навигации подводных объектов // *Докл. РАН.* 2007. Т. 417. № 5. С. 693–696.
4. *Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A.* Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // *J. Acoust. Soc. Am.* 2002. V. 111. № 2. P. 757–762.
5. *Bowlin J.B., Spiesberger J.L., Duda T.F., Freitag L.E.* Ocean acoustical ray-tracing software RAY / Woods Hole Oceanographic Technical Report, WHOI-93-10, 1993.
6. *Spindel R.C., Na J., Dahl P.H., Oh S., Eggen C., Kim Y.G., Akulichhev V.A., Morgunov Yu.N.* Acoustic tomography for monitoring the Sea of Japan: a pilot experiment // *IEEE J. Oceanic Engineering.* 2003. V. 28. № 2. P. 297–302.