

УДК 534.22

© Ю. Н. Моргунов¹, В. В. Безответных¹, А. Е. Бородин², А. В. Буренин¹, Е. А. Войтенко¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

²Дальневосточное отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Владивосток
Evgeni@poi.dvo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Статья поступила в редакцию 25.09.2015 г., после доработки 02.03.2016 г.

Приведены результаты экспериментальных и численных исследований закономерностей формирования акустических полей, сформированных низкочастотными импульсными сигналами, распространяющимися из шельфа в глубокое море. Обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в апреле 2014 г., в сравнении с результатами, полученными в августе 2006 г., на одной и той же акустической трассе, с расстояниями между корреспондирующими точками более 100 км. 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 $\sim 1.5 \text{ с}^{-1}$. Экспериментальные и численные исследования показали, что эффект акустического «оползня» в условиях слабого отрицательного градиента скорости звука также проявляется, но структура акустического поля захваченного подводного звукового канала 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 подводных навигационных систем по типу ГЛОНАСС и GPS для сезона с весенней гидрологией.

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

Yu. N. Morgunov¹, V. V. Bezotvetnikh¹, A. E. Borodin², A. V. Burenin¹, E. A. Voytenko¹

¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

²Far Eastern office of applied problems section of Presidium of RAS, Vladivostok, Russia

THE RESEARCH OF FUNCTIONING OF THE REGIONAL SYSTEM OF UNDERWATER NAVIGATION SUPPORT IN DIFFERENT HYDROLOGICAL CONDITIONS

Received 25.09.2015 г., in final from 02.03.2016.

The paper presents the results of experimental and numerical studies of the regularities of formation of acoustic fields generated by low-frequency pulse signals propagating from the shelf into the deep sea. The results of an experiment conducted in the Japan Sea in April 2014 are discussed in comparison with the results obtained in August 2006, on the same acoustic track, with distances between corresponding points of more than 100 km. In April hydrological conditions on the coastal zone of the acoustic trace and in the upper layer of the deep part of the sea were characterized by a relatively weak ($\sim 0.35 \text{ s}^{-1}$) negative vertical gradient of sound speed, while in August 2006 it was $\sim 1.5 \text{ s}^{-1}$. Experimental and numerical studies showed that the effect of acoustic «mudslide» in the conditions of weak negative gradient of sound speed is also apparent, but the structure of the acoustic field which is trapped by the underwater sound channel has a more complicated structure with a stretched time impulse response. However, it's ordered, stable and well identifiable structure in all randomly selected points for measurement on the acoustic trace may provide the establishment of effective underwater navigation systems of GLONASS and GPS type for a season of spring hydrology.

Key words: hydroacoustics, sound propagation, pseudorandom signals, underwater navigation.

Ссылка для цитирования: Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Бородин А. Е., Буренин А. В., Войтенко Е. А.

Исследование особенностей функционирования региональной системы подводного навигационного обеспечения в различных гидрологических условиях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 3. С. 80—86.

For citation: Morgunov Yu. N., Bezotvetnikh V. V., Borodin A. E., Burenin A. V., Voytenko E. A. The research of functioning of the regional system of underwater navigation support in different hydrological conditions. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 3, 80—86.

В статье обсуждаются результаты экспериментальных исследований в интересах разработки технических решений и рекомендаций по созданию эффективных сетецентрических систем подводного наблюдения в оперативно важных районах зоны ответственности Тихоокеанского флота. Ключевой задачей при создании подобных систем является обеспечение сети подводного наблюдения, состоящей из подводной лодки, подводных обсерваторий и платформ, буйковых станций и необитаемых аппаратов различного назначения, объединенных между собой и с центром анализа и принятия решений на расстояниях в десятки и сотни километров.

Взаимодействие гидроакустических и гидрофизических полей в слоистой водной среде при сложном рельефе дна может приводить к возникновению непредсказуемых теоретически особенностей и эффектам при формировании пространственно-временной структуры акустических полей. 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 Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН) на основе полученных фундаментальных результатов по особенностям распространения 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, 5]. Это позволило реализовать простой алгоритм расчета расстояния путем умножения скорости звука на оси ПЗК на время распространения максимального прихода акустической энергии в импульсной характеристике канала. Одним из условий возникновения этого эффекта является наличие отрицательного градиента скорости звука в шельфовой зоне. Учитывая практическую важность полученных результатов, была поставлена цель экспериментально исследовать возможность решения задач навигации при существенно отличающихся гидрологических условиях в весенний период.

Ниже обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в апреле 2014 г. в сравнении 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. 1, а, б). В глубоководной части трассы в апреле отмечается наличие ПЗК с не столь ярко выраженной верхней границей, как в августе (рис. 1, а). Волнение моря при проведении измерений составляло около 1 балла в первой точке до 5 баллов в третьей точке (144 км от излучателя). На мелководном участке трассы наблюдается небольшой уклон дна в сторону увеличения глубин, затем резкий континентальный склон и глубокое море. По последним данным исследований характеристик грунтов в данном районе, плотность песчаного грунта составляет 1710 г/см^3 .

Экспериментальные исследования проводились в течение пяти суток и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником расположенном на шельфе, в трех точках на удалении 27, 82 и 144 км. Использование сложных сигналов позволило произвести выделение на фоне окружающего шума приходов акустической энергии, распространяющихся по различным лучевым траекториям, т. е. получить импульсный отклик среды распространения. Методика проведения эксперимента была следующая. В 150 м от береговой черты на глубине 34 м был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель у мыса Шульца и соединен кабелем с береговым постом управления. Это был тот же излучатель, что и в 2006 г., но он был переустановлен при замене кабеля в 2013 г. 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

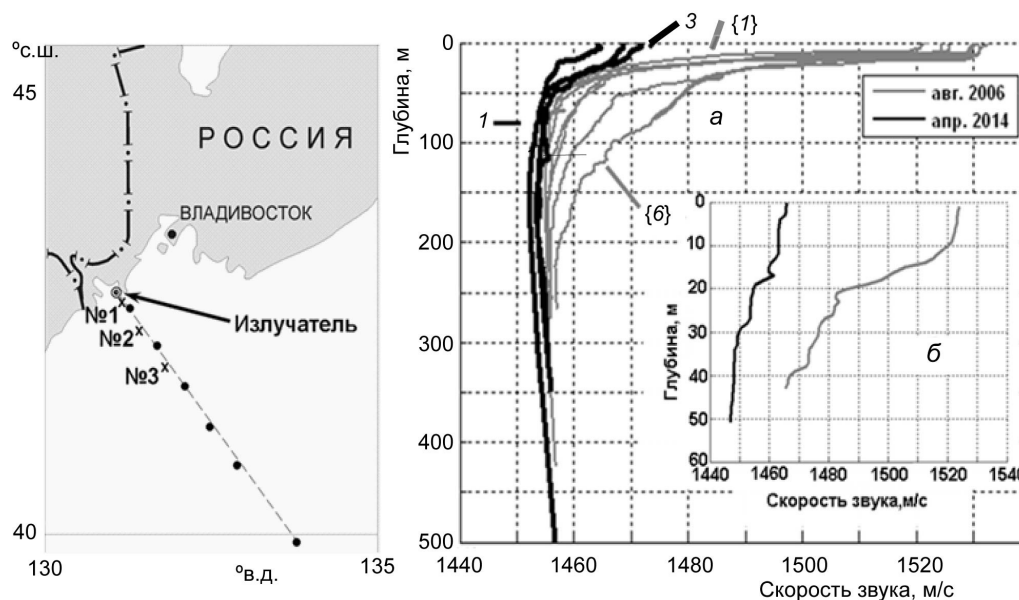


Рис. 1. Схема и гидрологические характеристики эксперимента.
Слева — схема эксперимента (× — точки измерений 2014 г.; кружки — 2006 г.); справа — вертикальные разрезы скорости звука: *а* — в точках 1—3 (2014 г.), {1—6} (2006 г.); *б* — у излучателя (черным цветом отмечены профили скорости звука, полученные в 2014 г., серым — в 2006 г.).

приемного тракта ПО использовался радиогидроакустический буй, внутри которого размещаются радиопередатчик, модуль GPS, система единого времени (СЕВ) для синхронизации излучающей и приемной систем, усилитель акустических сигналов, источник питания. При помощи кабеля осуществляется 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 осуществлялась передача поступающей с гидрофона акустической информации и данных с GPS о местоположении дрейфующего буя. Ошибка измерения координат надводной части буя при обсервации по спутникам составила 5 м. Вклад в ошибку измерений может вносить тот факт, что гидрофон может относиться до 30 м от положения буя по горизонтали. Далее производилось вычисление функций взаимной корреляции принятых сигналов с репликами излученных для получения импульсных откликов канала распространения. Точность измерения времени распространения импульсов при синхронизации излучающей и приемной систем с использованием GPS составляет 1 мкс.

На рис. 2 приведены 20-минутные фрагменты импульсных характеристик, полученные в трех точках трассы в 2014 г. Можно отметить стабильную, с хорошим превышением над помехой структуру

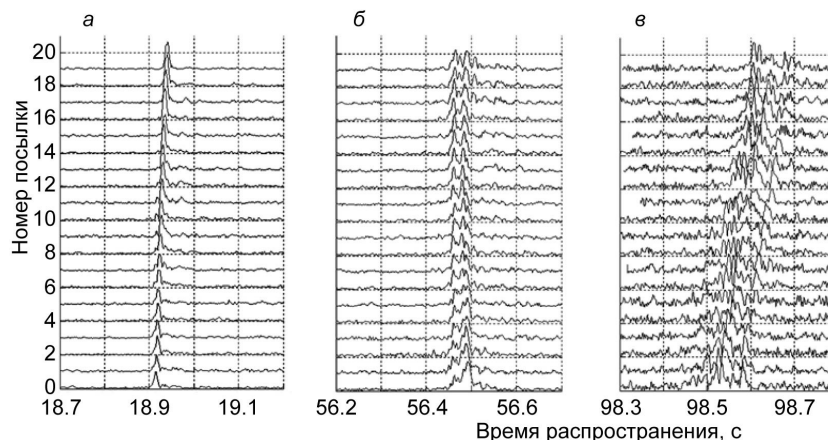


Рис. 2. Импульсные характеристики волновода.
а — удаление 27 км, точка № 1; *б* — удаление 82 км, точка № 2; *в* — удаление 144 км, точка № 3.

импульсных приходов. По временам приходов видно, что в первых двух точках буй с приемной системой дрейфовал приблизительно перпендикулярно трассе источник-приемник, а в третьей удалялся от источника. В первой точке, расположенной над свалом глубин, импульсная характеристика состоит из одного прихода акустической энергии, т. к., по-видимому, удалось поместить приемный гидрофон точно на оси ПЗК. Во второй точке наблюдается от двух до четырех приходов акустической энергии, распространяющейся 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 мы наблюдаем те же два-четыре прихода, распространяющихся вблизи оси ПЗК и за ними более мощный, распространяющийся по оси ПЗК (рис. 2, 3). За этой группой отмечаются более слабые приходы, распространяющиеся 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, распространяющегося вблизи оси ПЗК. Для объяснения отличий импульсных характеристик на больших расстояниях рассмотрим результаты численного моделирования процесса распространения акустической энергии по лучевым траекториям для условий 2006 и 2014 гг. (рис. 4, 5). Для этого была использована лучевая программа RAY [6], которая успешно применялась при анализе схожих результатов российско-корейско-американского эксперимента в Японском море [7]. Следует отметить, что в расчетах мы рассматривали только лучи вышедшие под углами менее 10° как наиболее информативные при заданных условиях и целях экспериментов. Ниже приведены результаты расчетов для наиболее удаленных от излучателя точек приема.

На рис. 4, а видно, что для летних условий 2006 г. в шельфовой зоне сформирован узкий придонный звуковой канал лучевыми траекториями с углами скольжения близкими к нулевым. При выходе в глубокое море эти лучи попадают на ось ПЗК и далее распространяются вдоль нее, независимо от ее колебаний по глубине (рис. 4, а). Это качественное описание физики процесса распространения акустической энергии подтверждается численными расчетами, результаты которых приведены на рис. 4, б, в. Действительно, расчеты импульсных характеристик (рис. 4, в) и углов скольжения траекторий импульсов (рис. 4, б) на приемной системе, расположенной на расстоянии 113 км от излучателя, показывают,

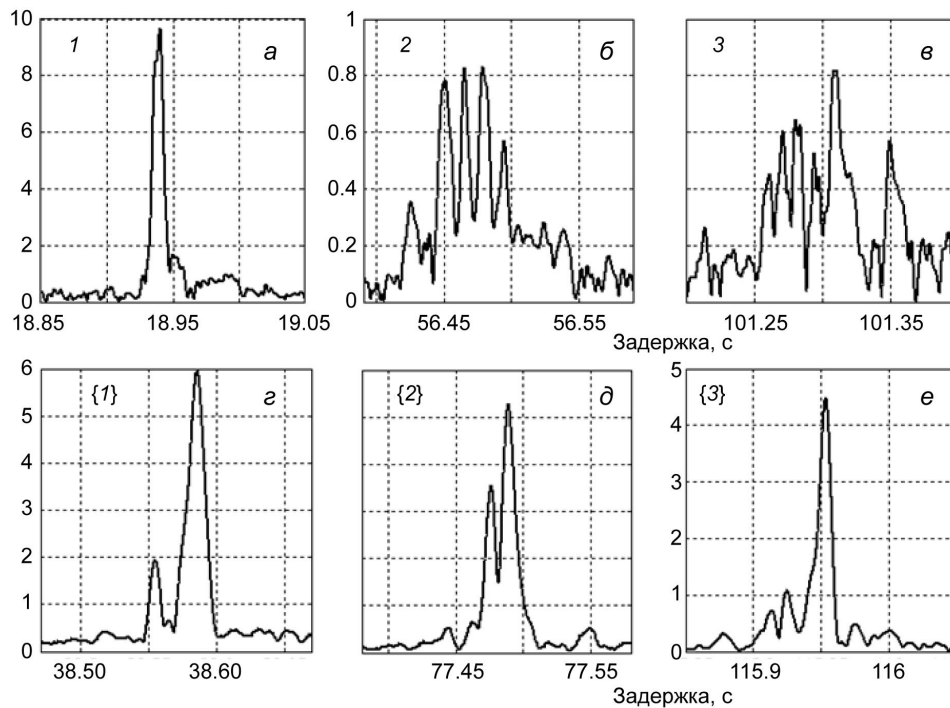


Рис. 3. Импульсные характеристики волновода.

Вверху — точки измерений в 2014 г. (1 — 27 км, 2 — 82 км, 3 — 144 км);
внизу — точки измерений в 2006 г. ({1} — 56 км, {2} — 113 км, {3} — 169 км).

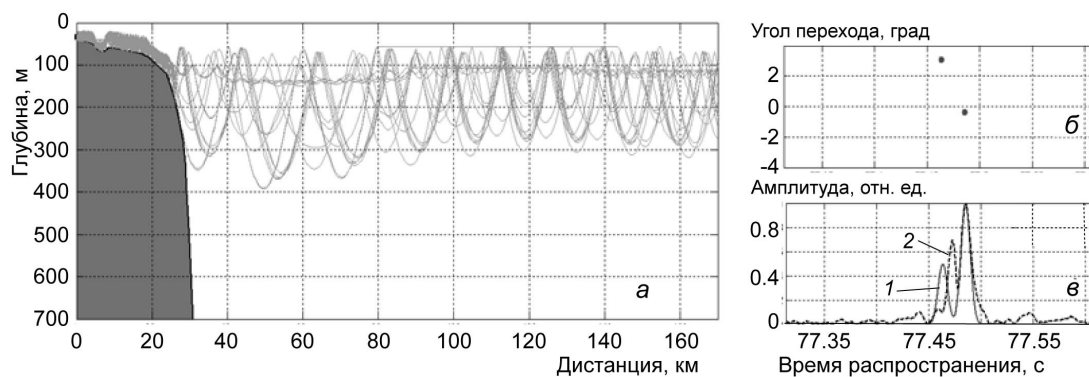


Рис. 4. Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента 2006 г.
а — лучевая картина распространения; *б* — углы прихода; *в* — импульсные характеристики волновода.
 1 — моделирование; 2 — эксперимент.

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. 4, *в*).

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 энергия 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. 5, *а*), распространяющейся со скоростью звука, близкой к скорости на оси ПЗК. Расчеты импульсных характеристик (рис. 5, *в*) и углов скольжения траекторий принятых импульсов (рис. 5, *б*) на приемной системе, расположенной на расстоянии 144 км от излучателя, показывают, что основная энергия сосредоточена в группе импульсов, прошедших вблизи оси ПЗК под углами скольжения в пределах 1° . Более ранние и меньшие по амплитуде приходы акустической энергии, прошедшие по траекториям с большими скоростями звука, соответствуют углам скольжения $2\text{--}3^\circ$. Следует отметить хорошее соответствие рассчитанной и полученной экспериментально временной структуры импульсной характеристики (рис. 5, *в*). Таким образом, представленные результаты 2014 г. позволяют сделать важный вывод. В 50-метровом слое воды, окружающей ось ПЗК, формируется сплошной канал акустической освещенности, в котором максимальные по амплитуде значения импульсной характеристики занимают временной интервал от 15 мс (точка № 1) до 40 мс (точки № 2 и 3). Это позволит 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. 1, *а, б*). Данные расчетов расстояний,

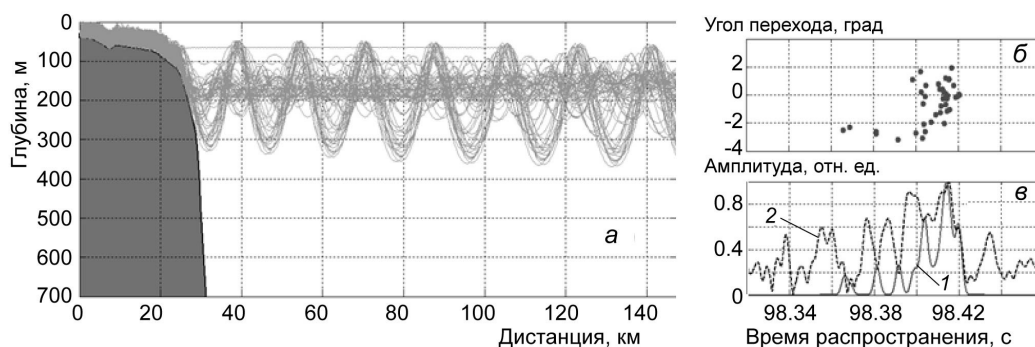


Рис. 5. Сравнение результатов численного моделирования с данными эксперимента 2014 г.
 Обозначения те же, что на рис. 4.

полученных 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 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 приходов 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 м. Но результаты, приведенные в таблице, полученные при осреднении расчетов расстояний по всем сигнальным посылкам в сериях, демонстрируют лучшие точности.

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 побережий подобными системами.

Следует также 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 и имеют важное научное значение для развития теории и практики в подводной акустике.

Работа выполнена при содействии Тихоокеанского флота ВМФ РФ и Дальневосточного отделения Секции прикладных проблем при Президиуме РАН в организации и проведении экспериментальных работ.

Расчет расстояний между корреспондирующими точками

№	Дата и время записи	Время распространения на начало и конец записи, 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	38.59 38.51	1455.05	1456.60	56.14 56.03	56.20 56.10	56.24 56.15	(91) 31 (117) 57
{2}	25 августа 04:25 05:25	77.42 77.80	1455.65	1456.12	112.70 113.26	112.74 113.29	112.76 113.39	(59) 24 (136) 101
{3}	25 августа 10:30 12:09	115.91 116.54	1454.10	1454.96	168.55 169.46	168.64 169.56	168.76 169.62	(214) 115 (163) 63
2014								
1	14 апреля 17:11 17:30	18.91 18.94	1454.33	1448.97	27.51 27.55	27.41 27.45	27.415 27.455	(93) 8 (92) 9
2	18 апреля 19:02 20:00	56.94 57.04	1454.01	1452.315	82.795 82.93	82.70 82.83	82.70 82.85	(95) 2 (83) 13
3	17 апреля 22:18 22:57	99.14 99.34	1453.19	1452.33	144.07 144.28	143.98 144.36	143.94 144.385	(128) 43 (22) 107

Литература

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 // ДАН. 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. Amer. 2002. V. 111, № 2. P. 757—762.
5. Акуличев В. А., Моргунов Ю. Н., Бородин А. Е. Региональная система подводного навигационного обеспечения и дистанционного управления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 2. С. 36—40.
6. 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.
7. Spindel R. C., Na J., Dahl P. H., Oh S., Eggen C., Kim Y. G., Akulichev V. A., Morgunov Y. N. Acoustic Tomography for Monitoring the Sea of Japan: A Pilot Experiment // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2003. V. 28, № 2. P. 297—302.