

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО В ГЛУБОКОМ МОРЕ ИСТОЧНИКОМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ, РАСПОЛОЖЕННЫМ НА ШЕЛЬФЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

© 2019 г. Ю. Н. Моргунов^а, А. А. Голов^{а, *}, А. В. Буренин^а, П. С. Петров^{а, **}

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: golov_alexander@inbox.ru

**e-mail: petrov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.01.2019 г.

После доработки 18.04.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Обсуждаются результаты экспериментов, проведенных в сентябре 2017 г. для обоснования применимости способа позиционирования подводных объектов при их функционировании на глубинах, существенно превышающих глубину оси подводного звукового канала. Приводятся результаты экспериментальных исследований и численного анализа эффекта фокусировки акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе ее в глубоководные (до 500 м) слои Японского моря для летне-осенних гидрологических условий. Эксперименты по приему широкополосных импульсных сигналов с центральной частотой 400 Гц проводились на различных удалениях (20, 68, 86, 90 и 198 км) от источника навигационных сигналов, установленного на глубине 35 м у побережья вблизи мыса Шульца. Для приема сигнальной информации была использована система с распределенными по глубине до 500 м гидрофонами, с возможностью длительной регистрации сигналов на фиксированных глубинах или в процессе погружения. Результаты экспериментов позволили исследовать импульсные характеристики акустических волноводов, рассчитать эффективные скорости распространения навигационных сигналов, принимаемых на различных глубинах, а также сделать выводы о возможности решения задач позиционирования автономных подводных аппаратов на глубинах до 500 м и при удалении от источника навигационных сигналов до 200 км. Выполнено математическое моделирование распространения акустических волн в волноводе, воспроизводящем условия эксперимента, с применением метода нормальных волн.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, подводная навигация, групповые скорости

DOI: 10.1134/S0320791919050162

Исследования взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей в слоистой водной среде при сложном рельефе дна актуальны при решении задач прикладной гидроакустики. В важных для практики случаях требуется проведение специальных экспериментов, направленных на выявление особенностей формирования акустических полей, которые могут повлиять на эффективность функционирования гидроакустических комплексов и систем на подводных объектах. Особенно это важно при проведении разработок систем позиционирования и управления автономных подводных аппаратов (АПА) [1], функционирующих в сотнях километров от источников навигационных и информационных сигналов, размещаемых вблизи береговой черты. Технология создания таких систем разрабатыва-

ется на протяжении последних лет в ТОИ ДВО РАН на основе фундаментальных результатов по особенностям распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов с шельфа в глубокое море [2–7]. В работе [4] авторами убедительно показана возможность эффективного решения задач акустической дальнометрии 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 фокусировки акустической энергии в придонном слое на шельфе и переходе ее на ось подводного звукового канала (ПЗК) в глубоком море [1–3]. Такой характер распространения звука из шельфа в глубокое море позволяет использовать простой алгоритм расчета расстояния, заключающийся в

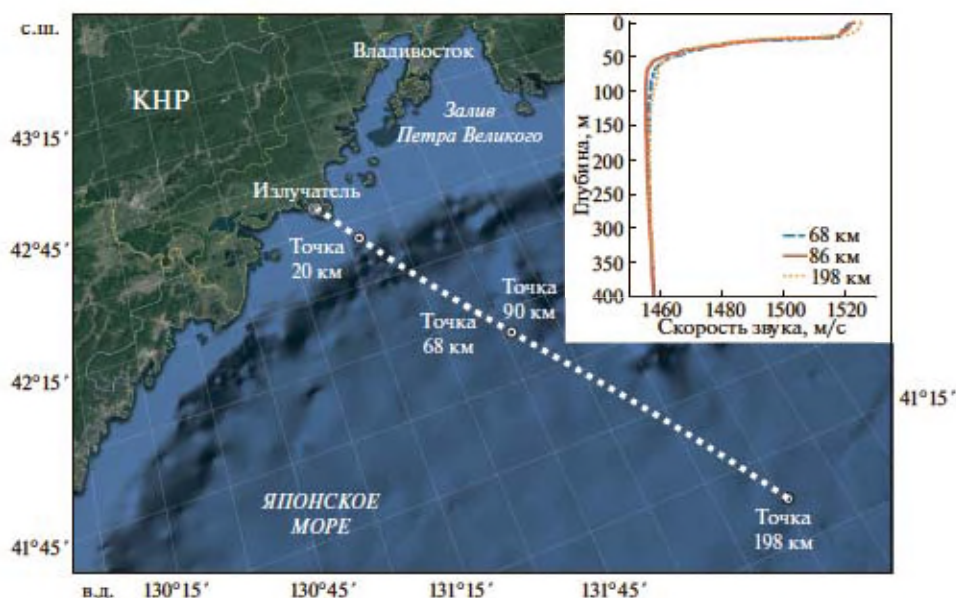


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

умножении скорости звука на оси ПЗК на время распространения максимального по интенсивности прихода акустической энергии в импульсной характеристике канала. Данная технология разработана и апробирована для обязательного нахождения АПА вблизи оси ПЗК, и в некоторых случаях это условие существенно ограничивает возможности эффективного выполнения миссий АПА.

Целью данного исследования было проведение экспериментов и теоретических расчетов, направленных на обоснование применимости описанного выше способа для решения задач позиционирования АПА при их функционировании на глубинах, существенно превышающих глубину оси ПЗК. Методически исследования строились таким образом, чтобы реализовать измерения импульсных характеристик волновода, включающего шельф и глубокое море, при приеме низкочастотных фазоманипулированных сигналов на глубинах до 500 м и удалении от источника навигационных сигналов (ИНС) до 200 км. Импульсные характеристики использовались для расчетов эффективных скоростей распространения звука при приеме сигналов на различных глубинах. Для анализа полученных результатов и подтверждения их применимости к задачам позиционирования АПА было выполнено математическое моделирование процессов распространения акустической энергии для условий экспериментов с применением теории нормальных волн и лучевого метода.

Техническая реализация плана исследований осуществлялась на той же акустической трассе

(рис. 1), на которой проводились предыдущие работы авторов с 2000-го г. [4–7].

Измерения проводились в пяти точках трассы на удалении ~20, 68, 86, 90 и 198 км (рис. 1) и заключались в приеме сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником, расположенным на шельфе, и вычислении импульсных характеристик волноводов путем свертки принятых сигналов с репликой излученного. Методика проведения экспериментов была следующая. В 150 м от береговой черты на глубине 34 м был установлен на грунт широкополосный пьезокерамический излучатель, развивающий акустическое давление 1500 Па/м и соединенный кабелем с береговым постом управления. Один раз в минуту излучались сложные фазоманипулированные сигналы (М-последовательности, 1023 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 400 Гц. Длительность сеансов излучения в каждой точке варьировалась от 3 до 5 ч.

Вблизи свала глубин на удалении 20 км (точка № 1) был установлен донный гидрофон с радиобуем для передачи сигнальной информации на береговой пост. Таким образом, была реализована разработанная авторами методика определения эффективной скорости на шельфовом участке трассы, которая базируется на точном измерении расстояния и времени распространения сигналов [8]. Сразу следует отметить, что значение эффективной скорости и на шельфе, и на оси ПЗК в глубоком море оказалось равным около 1456 м/с. Следовательно, корректировать эффективную скорость на всей трассе не понадобилось, и она принималась равной скорости звука на оси ПЗК.

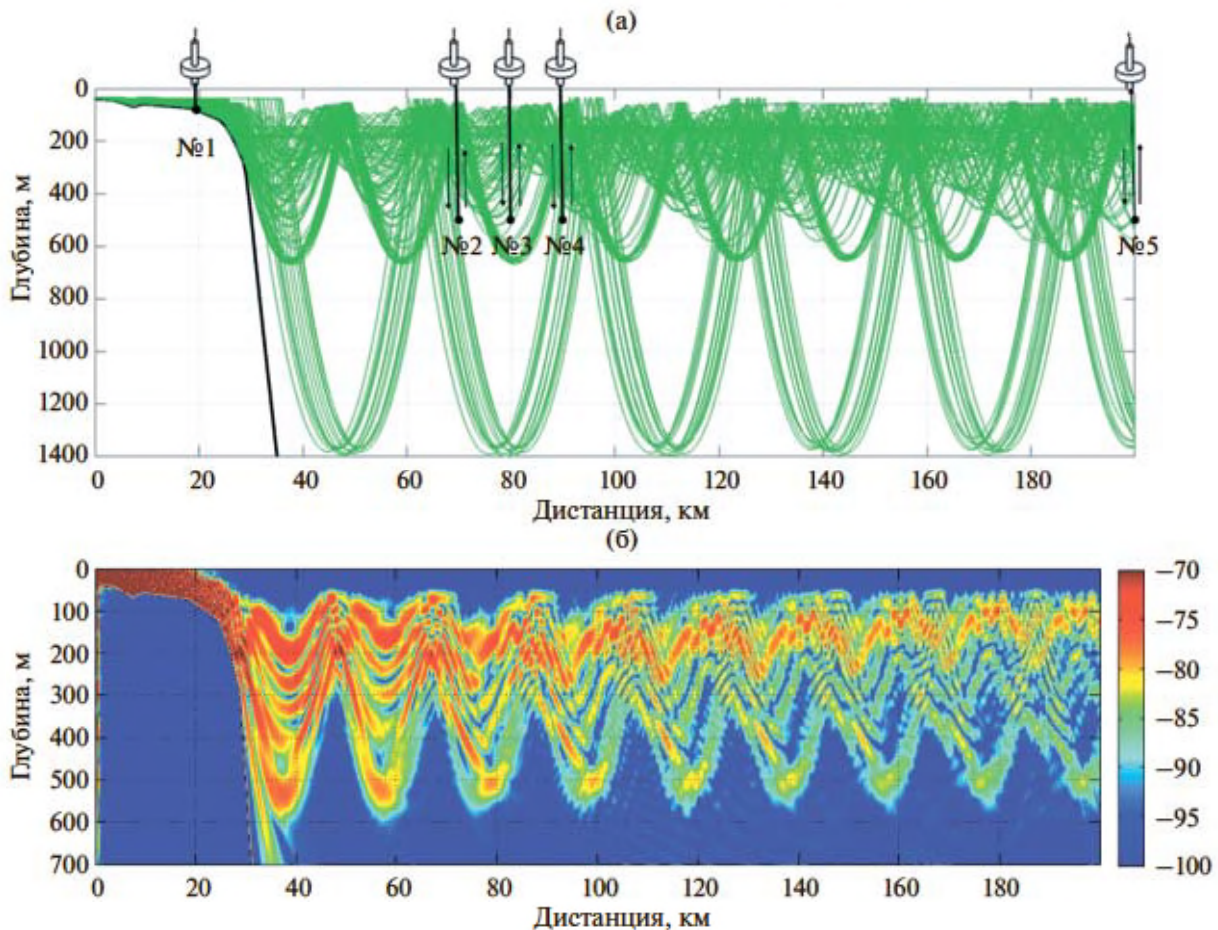


Рис. 2. Результаты моделирования распространения акустической энергии. (а) – Лучевые траектории распространения, (б) – рассчитанные с помощью широкоугольного параболического уравнения уровни акустического давления (в дБ относительно 1 м от источника) для частоты 400 Гц.

Остальные точки для приема сигналов в глубоководной части трассы выбирались из следующих соображений. Расчеты пространственной структуры акустического поля и по модовой и по лучевой теории [9, 10] показали схожие результаты с наличием на трассе заметных зон тени, характерных для распространения в глубоком море (рис. 2). Так как в нашем случае имеется 20-ти километровый мелководный участок, который предположительно может внести коррективы в формирование пространственной структуры поля, нами были выбраны точки для приема сигналов и в зонах освещенности и в зонах тени (рис. 2а).

Для приема сигнальной информации применялась специально разработанная для этих целей распределенная вертикальная приемная система, которая состоит из нескольких автономных ненаправленных гидрофонов, размещаемых в произвольных точках на фале длиной 500 м, который соединен с дрейфующей вехой. На вехе установлен GPS приемник с передачей информации о местоположении системы по радиоканалу на

обеспечивающее судно. Каждый автономный гидрофон представляет собой устройство, предназначенное для непрерывной регистрации звукового давления и текущей глубины точки приема сигналов. Формирование, накопление пакетов (кадров) информации от гидрофона и датчика глубины осуществляется посредством автономного цифрового блока регистрации с записью на SD-карту. Распаковка информации производится после извлечения карты с преобразованием в стандартные звуковой и текстовый форматы данных.

В заданных точках трассы с яхты «Светлана» осуществлялась постановка приемной системы следующим образом. На фале с помощью быстрозъемных зажимов крепились автономные гидрофоны. На рис. 1 приведены вертикальные профили скорости звука, построенные по данным гидрологических измерений в точках № 2, 3 и 5. Глубина крепления каждого гидрофона задавалась после проведения гидрологических измерений для решения целевой задачи эксперимента. В нашем случае это был один гидрофон с возмож-

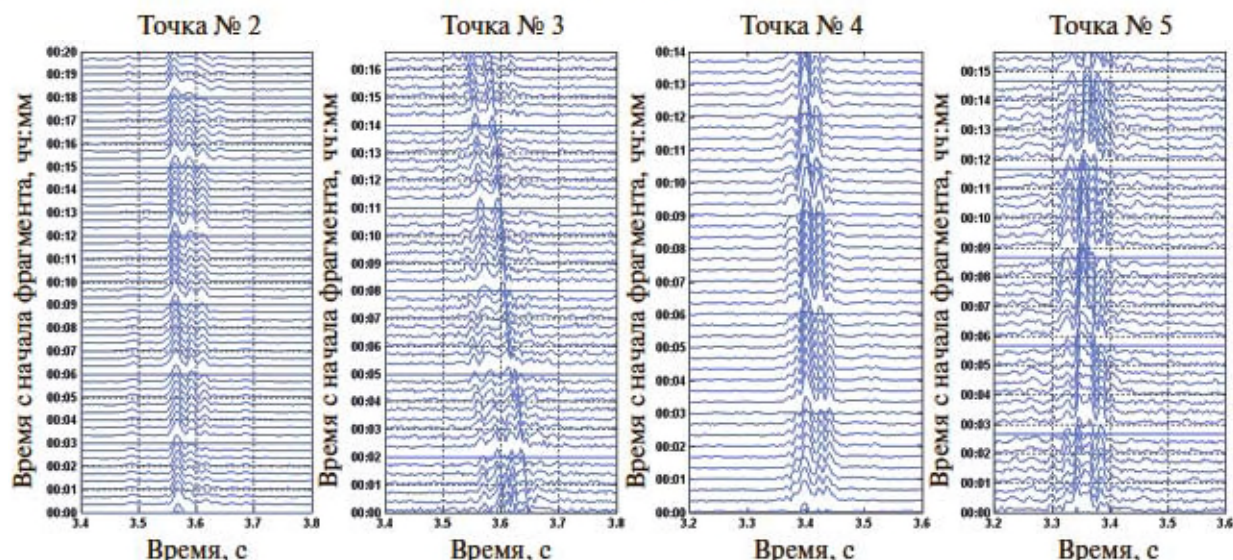


Рис. 3. Импульсные характеристики волноводов в точках: № 1 – 68 км; № 2 – 86 км; № 3 – 90 км; № 4 – 198 км.

ностью заглубления до 500 м (максимальная глубина), на котором регистрировались длительные сеансы излучения после постановки приемной системы. На рис. 3 приведены фрагменты импульсных характеристик волноводов, полученных после корреляционной обработки сигналов, принятых на глубине 500 м в точках № 2–5. При этом был зафиксирован важный результат, который заключался в том, что импульсные характеристики, полученные в предсказанных расчетах зонах освещенности и тени, имеют схожую амплитудно-временную структуру из 2–3 приходов акустической энергии. Следовательно, косвенно можно предположить, что наличие шельфового участка на трассе распространения акустической энергии приводит к довольно равномерной заливке волновода на глубинах ниже ПЗК.

Далее рассмотрим основные экспериментальные и теоретические результаты, посвященные решению непосредственно целевой задачи данной работы. В точках, удаленных на 68 км (точка № 2) и 198 км (точка № 5) от ИНС, были проведены измерения, направленные на получение зависимости эффективных скоростей распространения сигналов от глубины приема. Для этого гидроакустическая информация с гидрофона в непрерывном режиме принималась на всех глубинах при погружении и подъеме системы. Рис. 4а и 4б наглядно иллюстрирует весь процесс проведения экспериментов в точках № 2 и № 5. Наблюдаются процессы погружения и подъема гидрофона, дрейф приемной системы и импульсные отклики волноводов. Три вкладки рисунков позволяют в любой момент времени определить импульсную характеристику волновода в зависимости от глубины погружения нижнего гидрофо-

на, времени прохождения сигнала и расстояния между корреспондирующими точками.

Анализ зависимости структуры импульсной характеристики от глубины в точке № 2 показывает, что сигнал начинает фиксироваться приемной системой только с глубины 85 м и достигает максимума амплитуды в диапазоне глубин 130–300 м (рис. 4а). При этом энергия сигнала в основном канализируется в одном импульсе. Ниже отметки 300 м происходит изменение структуры импульсных откликов. На горизонтах до 500 м наблюдаются ансамбли из трех приходов, в которых сосредоточена основная акустическая энергия (рис. 5).

На рис. 4б представлены данные измерений в точке № 5. В этом случае сигнал начинает детектироваться с горизонта 78 м, но до глубины 100 м его уровень сравним с уровнем корреляционных шумов. В диапазоне глубин 150–440 м наблюдается стабильная картина с уровнем амплитуд, значительно превосходящим уровень корреляционных шумов. При этом в диапазоне глубин 150–200 м фиксируется в основном один приход акустической энергии, а глубже энергия распределяется на три импульсных прихода. Ниже отметки 440 м также фиксируются три прихода, но с существенно меньшими амплитудами. Результат сравнения импульсных характеристик с разных глубин представлен на рис. 6. Анализ результатов измерений, полученных на расстояниях 68 и 198 км от ИНС, показывает, что процессы формирования импульсного отклика волноводов на глубинах до 500 м схожи.

Для решения целевой задачи исследования для обеих точек были произведены расчеты эффективной скорости прохождения импульсных сиг-

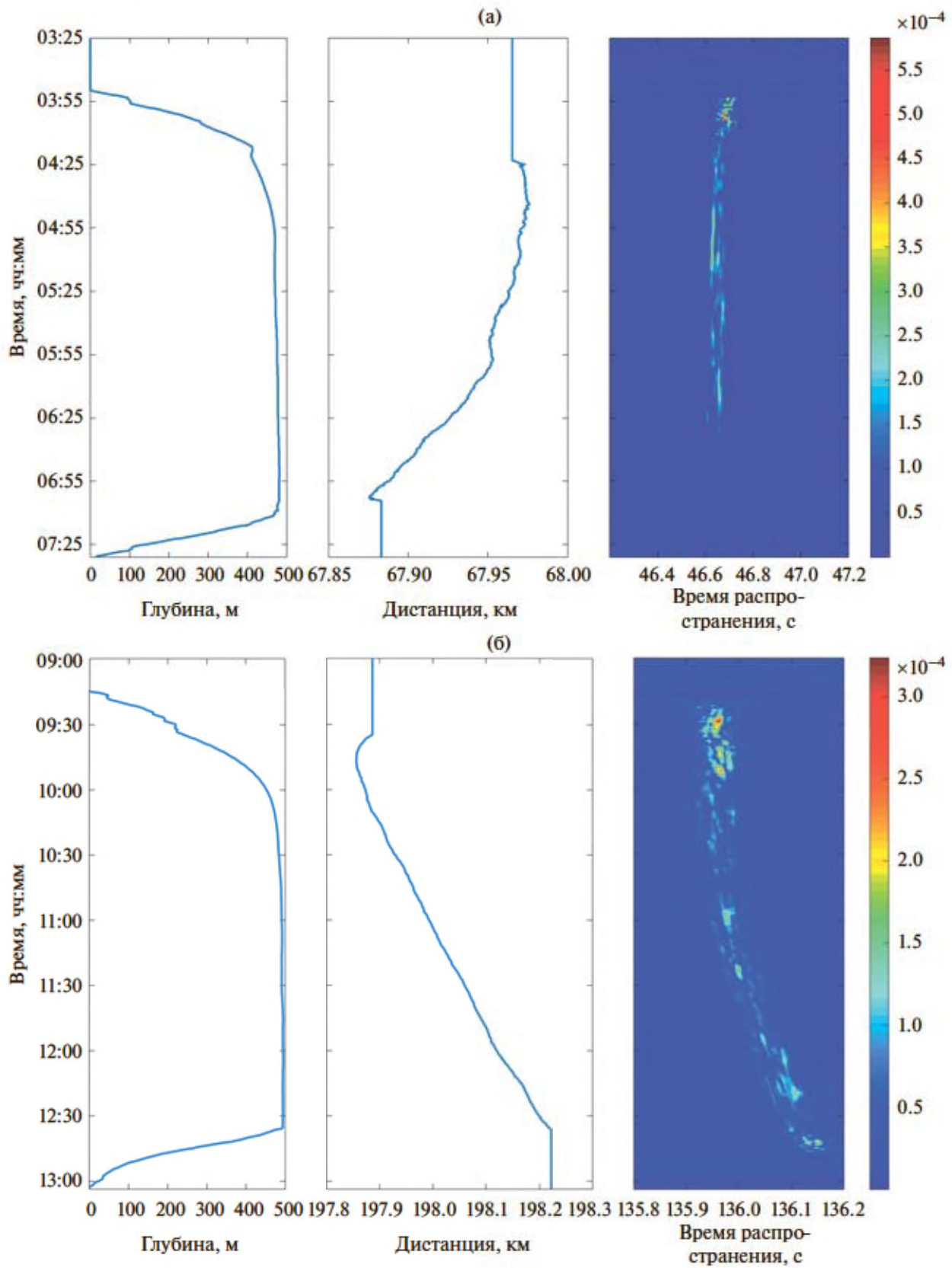


Рис. 4. (а) – Данные измерений в точке № 1, (б) – данные измерений в точке № 2.

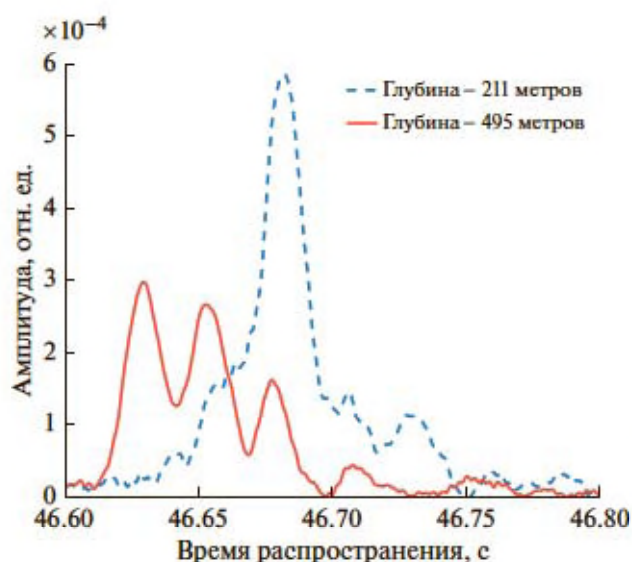


Рис. 5. Структура импульсных откликов на разных глубинах в точке № 1.

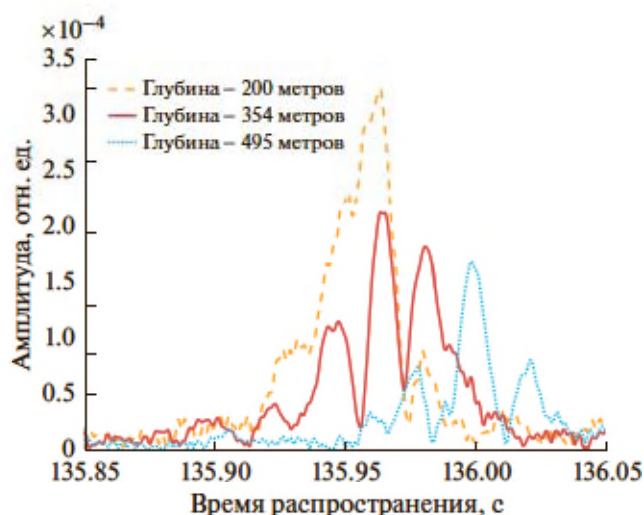


Рис. 6. Структура импульсных откликов на разных глубинах в точке № 2.

налов от ИНС до приемников, расположенных на разных глубинах. Для этого были использованы данные измеренных по GPS расстояний между ИНС и дрейфующей вехой и времен прохождения сигналов по данным импульсного отклика (рис. 4а, 4б). Результаты расчетов позволили зафиксировать для обеих точек очень важную закономерность, которая заключается в приближенном равенстве эффективных скоростей (~ 1455.5 м/с) на глубинах вплоть до 500 м (точки на рис. 7). В то же время и скорость звука на оси ПЗК, измеренная гидрологическим зондом, имеет приблизительно (в пределах 1 м/с) такое же значение (рис. 7). Физически этот важный для

практики результат может быть качественно объяснен на языке лучевой теории распространения звука следующим образом. Максимальная концентрация акустической энергии вблизи оси ПЗК в виде одного импульса формируется сигналами, распространяющимися под углами, близкими к нулевым, со скоростью, мало отличающейся от скорости звука на оси ПЗК [1–4]. Зафиксированные в эксперименте на больших глубинах (значительно ниже оси ПЗК) приходы в виде троек импульсов соответствуют звуковым волнам, распространяющимся под большими углами к оси канала. Эти импульсы проходят по лучевым траекториям большей длины, с точками поворота лучей на больших глубинах, где скорость звука существенно выше, чем на оси ПЗК. В нашем случае оказывается, что эти факторы – увеличение длины траектории и прирост скорости звука – уравновешивают друг друга, что и приводит к приближительному равенству эффективных скоростей распространения на всех горизонтах. Ниже будут приведены теоретические расчеты, которые в целом подтверждают эту версию.

Количественное объяснение того факта, что эффективные скорости распространения сигналов для различных горизонтов приема (интервал глубин от 50 до 500 м) в глубоководной части трассы практически одинаковы, можно получить, используя метод нормальных волн (модовую теорию распространения звука). Известно, что звуковое поле для каждой тональной компоненты $\hat{P}(f, r, z)$ импульсного сигнала может быть представлено в виде суперпозиции акустических мод в данном поперечном сечении волновода (т.е. при данном r) [12, 13]

$$\hat{P}(f, r, z) = \sum A_j(r) \varphi_j(r, z). \quad (1)$$

Здесь $A_j(r, z)$ – модовая амплитуда, а $\varphi_j(r, z)$ – модовая функция, т.е. собственная функция акустической спектральной задачи

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\omega^2}{c^2} \varphi - k^2 \varphi \right) = 0, \\ \varphi(0) = 0, \quad \varphi(H) = 0, \\ \varphi|_{z=h+0} = \varphi|_{z=h-0}, \\ \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \Big|_{z=h+0} = \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \Big|_{z=h-0}, \end{cases} \quad (2)$$

$k_j^2 = k_j^2(r)$ – соответствующее собственное значение. Здесь $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, $c = c(r, z)$ – скорость звука, $\rho = \rho(r, z)$ – плотность. В задаче (2) второе и третье уравнения – суть граничные условия на поверхности океана $z = 0$ и на нижней границе расчетной области $z = H$ соответственно (мы считаем, что H достаточно велико, так что можно пренебречь волнами, отраженными

ми от этой границы). Четвертое и пятое уравнения в (2) выражают условия непрерывности давления и колебательной скорости на границе раздела вода–дно $z = h(r)$ (в волноводе сравнения для данного поперечного сечения реального волновода), при этом $z = h \pm 0$ суть точки, находящиеся в дне и воде соответственно в непосредственной близости от границы раздела. Величины $k_j = k_j(r, \omega)$ называются горизонтальными волновыми числами мод. Для j -ой модальной компоненты звукового поля $A_j(r)\Phi_j(r, z)$ распространение акустической энергии в горизонтальном направлении в данной точке трассы r происходит с групповой скоростью данной моды в данном поперечном сечении, которая может быть вычислена по формуле [12]

$$v_j^g(f) = \frac{d\omega}{dk_j}. \quad (3)$$

С каждой модой может быть ассоциирован некоторый угол распространения волн [12, 13] (относительно оси ПЗК), а также слой ее локализации, вне которого модовая функция экспоненциально затухает (границы этого слоя могут быть ассоциированы с точками заворота луча, связанного с модой) [13]. В глубоком океане групповые скорости обычно растут с номером моды (т.е. с увеличением соответствующего ей угла распространения относительно оси ПЗК).

Расчеты импульсных характеристик для летне-осенних гидрологических условий в рамках лучевой модели RAY показывают (см. рис. 2, а также [3, 4]), что в глубоководной части практически вся энергия звукового поля переносится волнами с углами распространения, не превышающими 5 градусов относительно оси ПЗК. Это связано с тем, что в ходе распространения по шельфовому участку углы скольжения лучей относительно горизонтали уменьшаются при каждом отражении от дна и, таким образом, оказываются малы при попадании в ПЗК. Заметим, что этот тип распространения соответствует модам малых номеров (в нашем случае – моды с номерами от 1 до 30 в поперечных сечениях глубоководной части).

Таким образом, следует ожидать, что в глубоководной части трассы наиболее выраженными (максимальными по амплитуде) будут самые медленные приходы для каждого значения глубины z . Следовательно, для решения задачи акустической дальнометрии на некотором горизонте (не обязательно совпадающем с осью ПЗК) необходимо оценить групповую скорость моды с наименьшим номером $v^g(z)$, интервал (вертикальной) локализации модовой функции которой содержит данный горизонт z . Результаты такого расчета представлены на рис. 7 (сплошная линия).

Зависимость групповой скорости моды минимального номера $v^g(z)$, “зацепляющей” данный горизонт z , от глубины очень слабая для горизон-

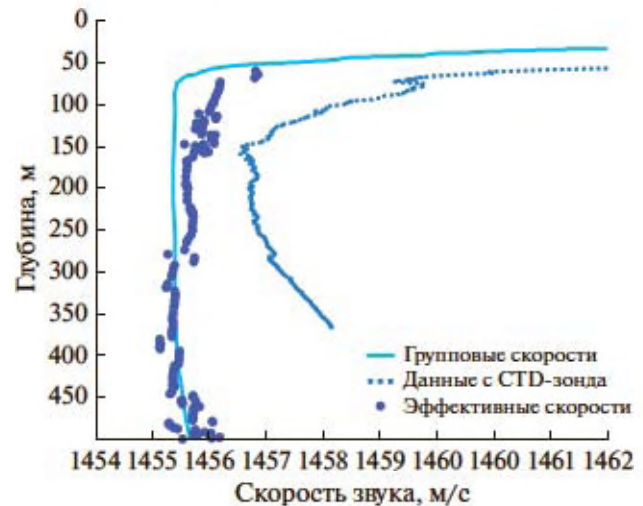


Рис. 7. Результаты сравнения групповых скоростей наиболее медленных мод, “зацепляющих” данный горизонт, с эффективными скоростями максимальных приходов на этих горизонтах.

тов от 50 до 500 м (можно считать эту величину равной 1455.3 м/с, она несколько меньше значения скорости звука на оси ПЗК, составляющей около 1456 м/с). Поэтому для глубин от 50 до 500 м можно ожидать высокой точности определения дистанции до излучателя, если использовать именно это значение скорости распространения. Важно, что для этого слоя данная величина от глубины практически не зависит. При нахождении приемника на больших глубинах (от 500 м) следует использовать уточненные минимальные групповые скорости мод. Отметим также, что характер зависимости групповой скорости моды минимального номера $v^g(z)$ от глубины z почти одинаков на 68 и 198 км от излучателя.

Из рис. 7 видно, что рассчитанные по описанной выше методике эффективные скорости для каждого горизонта (т.е. минимальные групповые скорости мод на данном горизонте) в интервале глубин от 50 до 500 м хорошо согласуются с эффективными скоростями, наблюдаемыми в эксперименте (с точностью около 1 м/с).

Следует сделать ряд важных замечаний к приведенному здесь описанию методики расчета эффективных скоростей. Во-первых, следует отметить, что групповые скорости мод зависят от профиля скорости звука в данном поперечном сечении волновода, а также от частоты. Возникающие в связи с этим вариации групповых скоростей могут быть заметными для моды фиксированного номера j . Для групп мод, однако, эти зависимости выражены более слабо. В частности, как показали вычисления, значения минимальных групповых скоростей для данного горизонта (которые дают оценку эффективных скоростей)

практически не зависят ни от частоты (в диапазоне 300–500 Гц), ни от выбора поперечного сечения волновода в глубоководной части (расчеты производились для точек № 2 и 5). Во-вторых, отметим, что в рамках данной методики не устраняется необходимость внесения поправок к эффективным скоростям, обусловленным наличием шельфового участка. При построении графика на рис. 7 этого не требовалось, так как измеренное значение эффективной скорости на шельфовом участке (1456 м/с) фактически совпадает со значениями минимальных групповых скоростей на различных горизонтах.

Заметим также, что теоретическая оценка эффективных скоростей распространения для различных горизонтов может быть выполнена и с помощью использованной ранее лучевой модели RAY. Соответствующая расчетная процедура представляется, однако, методически неудачной. Во-первых, для каждого конкретного значения глубины приемника требуется решение задачи стрельбы с целью определения всех собственных лучей, приходящих туда из точки излучения, что сопряжено со значительными вычислительными сложностями. Во-вторых, в рамках модовой теории расчетные значения эффективных скоростей определяются локально, по одному лишь профилю скорости звука в одном или нескольких поперечных сечениях, в то время как задача трассировки лучей является глобальной (т.е. такой, что ее необходимо решать с учетом всего многообразия характеристик волновода протяженностью сотни километров). Наконец, стандартная лучевая теория неприменима в случае, когда приемник расположен в фокальной точке семейства лучей [14] (например, на каустике).

В ранних работах авторов [5–7, 15] было экспериментально показано, что ошибки измерения расстояний акустическими методами при использовании в расчетах времени распространения навигационных сигналов и значений скорости звука на оси ПЗК не превышают 100–150 м при удалении АПА до 200 миль. Следовательно, приведенные выше результаты о равенстве эффективных скоростей при приеме на глубинах до 500 м и скорости звука на оси ПЗК позволяют рассчитывать на такие же точности позиционирования АПА при выполнении миссий на глубинах до 500 м.

В заключение сформулируем основные результаты и выводы, полученные при выполнении целевой задачи исследования.

1) Зафиксирован важный результат, который заключается в том, что импульсные характеристики, полученные в предсказанных теоретическими расчетами зонах освещенности и тени, имеют схожую амплитудно-временную структуру из 2–3 приходов акустической энергии. Следова-

тельно, можно предположить, что наличие шельфового участка на трассе распространения акустической энергии приводит к более равномерной засветке волновода на глубинах ниже оси ПЗК.

2) Структура импульсных характеристик волновода с глубиной существенно изменяется. При приеме сигналов вблизи оси ПЗК фиксируется в основном один мощный импульс. На больших глубинах принимаются до трех импульсов, разнесенных по времени на 20–30 мс. При этом максимальным по амплитуде может быть любой из трех импульсов. Поскольку расчеты дистанций между ИНС и АПА проводятся по времени прихода максимального импульса, ошибка в расчете расстояния по этой причине может быть в пределах 40–60 м.

3) Основным результатом данного исследования заключается в том, что измеренные эффективные скорости и эффективные скорости, рассчитанные по предложенной методике, при приеме навигационных сигналов на глубинах до 500 м и расстояниях до 200 км с точностью до 1 м/с совпадают со значением скорости звука на оси ПЗК. Следует отметить, что в общем случае может возникнуть необходимость внесения поправок к эффективным скоростям, обусловленная наличием шельфового участка. В нашем случае этого не требовалось, т.к. значение эффективной скорости на шельфовом участке (1456 м/с) фактически совпадает со значениями минимальных групповых скоростей мод на различных горизонтах и скоростью звука на оси ПЗК.

4) Теоретические расчеты звуковых полей и групповых скоростей для условий экспериментов с применением теории нормальных волн показали хорошую применимость для физической интерпретации результатов натурных экспериментов, а также для проведения конкретных численных расчетов. Дополнительные исследования в этом направлении позволят разработать универсальную методику расчетов полей скоростей звука в горизонтальной и вертикальной плоскостях для различных гидролого-акустических условий.

Таким образом, результаты натурных экспериментов и теоретических расчетов показали возможность эффективного решения задач позиционирования АПА при их функционировании на глубинах до 500 м в северо-западной части Японского моря в летне-осенних гидрологических условиях. Показано, что ИНС, размещенный вблизи берега на глубине 35 м и развивающий акустическое давление 1500 Па/1 м, позволяет обеспечить необходимое превышение сигнала над помехой в приемном блоке АПА для корреляционной обработки навигационных сигналов, принятых на глубинах от 50 до 500 м, при удалении от ИНС до 200 км. При этом в расчетном блоке координат АПА эффективная скорость звука

принимается равной скорости звука, измеренной гидрологическим датчиком на оси ПЗК. Показано, что эти результаты позволят обеспечить позиционирование АПА с ошибкой, не превышающей 150 м. Этот факт имеет большое прикладное значение, т. к. при выполнении сложных миссий на больших глубинах АПА может с практически той же точностью определять своё местоположение без всплытия на глубину оси ПЗК при наличии достаточного превышения сигнала над помехой.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН 15-II-1-046, 15-I-012 о, ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (тема АААА-А17-117030 110041-5 2017-219).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2469346. Способ позиционирования подводных объектов / Моргунов Ю. Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Голов А.А. Заявл. 11.07.2011. Оpubл. 10.12.2012. Бюл. № 34.
2. 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. P. 757–762.
3. 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 J. Oceanic Engineering.* 2003. V. 28. № 2. P. 297–302.
4. 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.
5. 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.
6. 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 формирование импульсной характеристики в глубоком море // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
7. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // *Докл. Акад. наук.* 2009. Т. 426. № 6. С. 821–823.
8. 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.
9. Акуличев В.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Применение псевдослучайных сигналов для подводной дальнометрии на шельфе // *Докл. Акад. наук.* 2010. Т. 432. № 4. С. 541–543.
10. Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н. Пилотный акустический эксперимент по определению координат подводного объекта в шельфовой зоне Японского моря // *Докл. Акад. наук.* 2010. Т. 433. № 3. С. 394–396.
11. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Картавенко В.А. Телеметрический измерительный комплекс для акустико-гидрофизических исследований // *Приборы и техника эксперимента.* 2013. № 1. С. 110–114.
12. Jensen F.B., Porter M.B., Kuperman W.A., Schmidt H. *Computational Ocean Acoustics.* N.Y.: Springer-Verlag, 2000.
13. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics / Eds. Simmen J.A. et al.* N.Y.: Springer, 2012.
14. Petrov P.S., Sergeev S.A., Tolchennikov A.A. Modeling of pulse signals in 3D propagation problems of deep-water acoustics based on the modified Maslov's canonical operator // *Russian J. Mathematical Physics.* 2018. V. 25. № 1. P. 102–112.
15. Моргунов Ю.Н., Буренин А.В., Безответных В.В., Голов А.А. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях японского моря // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 6. С. 646–650.