

УДК 534.222

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ ИЗ ПРОТЯЖЁННОГО ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОЕ МОРЕ ПРИ ПРИЁМЕ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ

© 2024 г. Ю. Н. Моргунов, А. А. Голов*

Поступило 24.05.2024 г.

После доработки 03.06.2024 г.

Принято к публикации 18.06.2024 г.

Обсуждаются результаты эксперимента, проведённого в Японском море в августе 2023 г. на акустической трассе протяжённостью 144.4 км при летне-осенних гидрологических условиях. Исследован случай распространения импульсных псевдослучайных сигналов из протяжённого шельфа в глубокое море при осуществлении приема на глубинах 69, 126, 680 и 914 метров. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показал, что на всех горизонтах фиксируется группа лучевых приходов длительностью около 0.5 с с максимальным в центре. Эксперимент по приёму широкополосных импульсных сигналов с центральной частотой 400 Гц проводился на удалении 144.4 км от источника навигационных сигналов (ИНС), установленного на шельфе на глубине 30 м при глубине моря 45 метров. Для приёма сигнальной информации была использована система с распределёнными по глубине до 1000 метров гидрофонами с возможностью длительной регистрации сигналов на фиксированных глубинах или в процессе погружения. Результаты экспериментов позволили исследовать импульсные характеристики акустического волновода, рассчитать эффективные скорости распространения сигналов, принимаемых на различных глубинах, а также сформулировать выводы о возможности решения задач климатического мониторинга морских акваторий с использованием измерительных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) на горизонтах до 1000 метров.

Ключевые слова: гидроакустическое зондирование, глубоководный приём, контроль изменения климата, сложные фазоманипулированные сигналы

DOI: 10.31857/S2686739724100164

Исследования взаимодействия гидроакустических и гидрофизических полей в слоистой водной среде при сложном рельефе дна актуальны при решении задач акустической дальнометрии и термометрии в интересах климатического мониторинга морских акваторий. 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 различного назначения. Особенно это важно при проведении разработок систем

позиционирования и управления измерительными автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА), 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 по особенностям распространения низкочастотных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море [1–5].

В работе [1] 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 метров) береговой черты. Эти результаты базируются на эффекте “акустического оползня”, который заключается

Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской Академии наук, Владивосток, Россия
*E-mail: golov_alexander@inbox.ru

в фокусировке акустической энергии на шельфе, переходе её на ось подводного звукового канала (ПЗК) в глубоком море и далее распространяться по траектории близкой к прямолинейной [2–4]. Такой характер распространения звука из шельфа в глубокое море позволяет использовать простой алгоритм расчёта расстояния, заключающийся в 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 АНПА вблизи оси ПЗК, и в некоторых случаях это условие существенно ограничивает возможности эффективного выполнения миссий АНПА.

Целью данного исследования было проведение экспериментов, направленных на обоснование применимости эффекта “акустического оползня” для решения задач позиционирования автономных подводных аппаратов при их функционировании на глубинах, существенно превышающих глубину оси подводного звукового канала (ПЗК). Исследования строились таким образом, чтобы реализовать измерения импульсных характеристик волновода, включающего шельф и глубокое море, при приёме низкочастотных фазоманипулированных сигналов на глубинах до 1000 метров и удалении от источника сигналов на расстояние около 144 километров. Импульсные характеристики использовались для расчётов эффективных скоростей распространения звука при приёме сигналов на различных глубинах.

Эксперименты заключались в приёме на различных глубинах сложных фазоманипулированных сигналов, излучаемых источником, расположенном на шельфе, и вычислении импульсных характеристик волноводов путём свертки принятых сигналов с репликой излученного. Методика проведения эксперимента была следующей. В 150 метрах от береговой черты на глубине 25–30 метров (при глубине моря 40 метров) был вывешен с борта судна широкополосный излучатель, соединённый кабелем с бортовым постом управления. Один раз в 6 минут излучался сложный фазоманипулированный сигнал (М-последовательность, 1023 символов, 16 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 400 Гц. Длительность сеансов излучения составила более 12 часов. Условия эксперимента характеризовались наличием протяжённого 60-километрового шельфа и слабым градиентом изменения скорости звука с глубиной на

шельфе из-за влияния прошедшего ранее тайфуна “KHANUN”. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Для приёма сигнальной информации применялась специально разработанная для этих целей распределённая вертикальная приёмная система, которая состоит из нескольких автономных ненаправленных гидрофонов, размещаемых в произвольных точках на фале длиной свыше 1000 м, который соединён с дрейфующей вехой. На вехе установлен GPS-приёмник с передачей информации о местоположении системы по радиоканалу на обеспечивающее судно. Каждый автономный гидрофон представляет собой устройство, предназначенное для непрерывной регистрации звукового давления.

С яхты “Светлана” осуществлялась постановка приёмной системы следующим образом. На фале с помощью быстростъёмных зажимов крепились автономные гидрофоны. Глубина крепления каждого гидрофона задавалась после проведения гидрологических измерений для решения целевой задачи эксперимента. В нашем случае это были глубины 69, 126 метров (глубина оси ПЗК), 680 и 914 метров, на которых регистрировались длительные сеансы излучения после постановки приёмной системы. Гидроакустическая информация с этих же гидрофонов в непрерывном режиме принималась при погружении и подъёме.

Анализ зависимости структуры импульсных характеристик от глубины, приведённых на рис. 2, показывает, что сигнал начинает фиксироваться приёмной системой с глубины 69 метров и достигает максимума амплитуды на глубине 126 метров, что соответствует заглублению оси ПЗК. При этом на всех глубинах энергия сигнала в основном канализируется в 0.5-секундной пачке импульсов с максимальным ближе к середине. Неожиданно схожие импульсные характеристики, полученные на оси ПЗК и на других глубинах, могут быть объяснены особенностями вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) на протяжённом шельфе, обусловленного сильным перемешиванием воды после тайфуна (рис. 3). Отсутствие ярко выраженного придонного канала распространения (см. сравнение с ВРСЗ 2022 года) привело к большей засветке приосевых глубин ПЗК.

Тем не менее, отмечается самая большая амплитуда максимального прихода акустической энергии на горизонте 126 метров, что подтверждает распространение по траектории, близкой к прямолинейной.

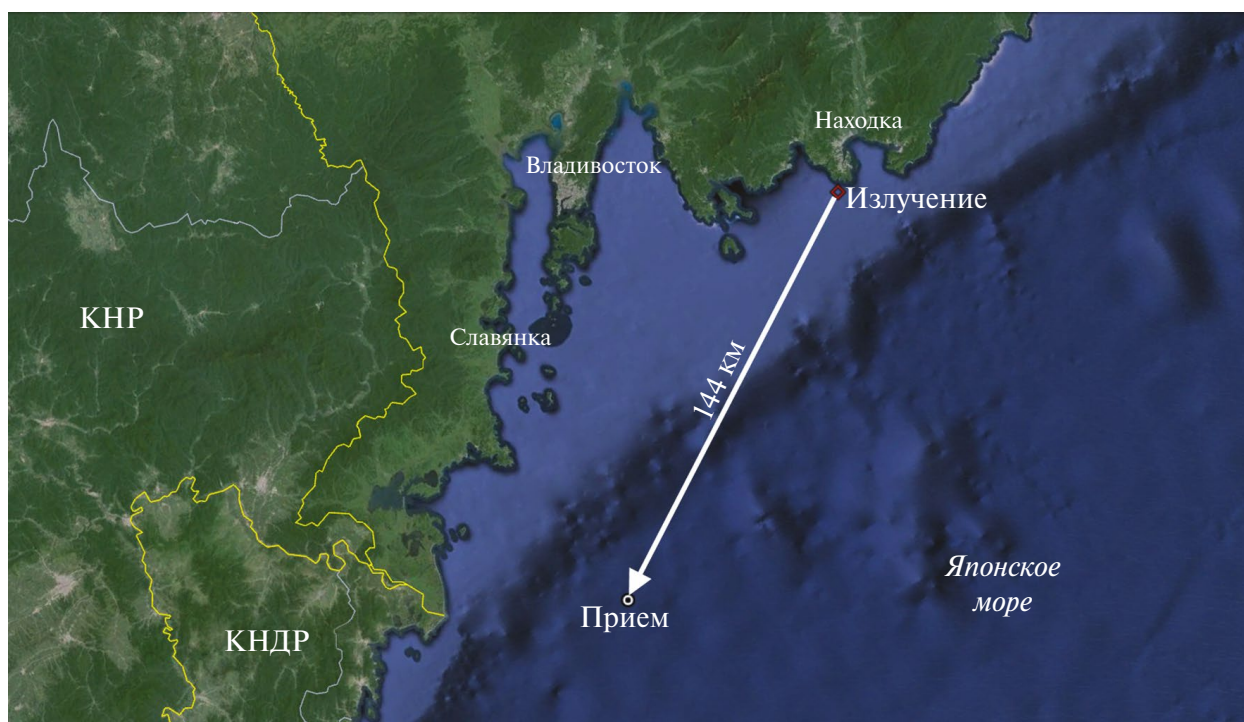


Рис. 1. Схема эксперимента на карте.

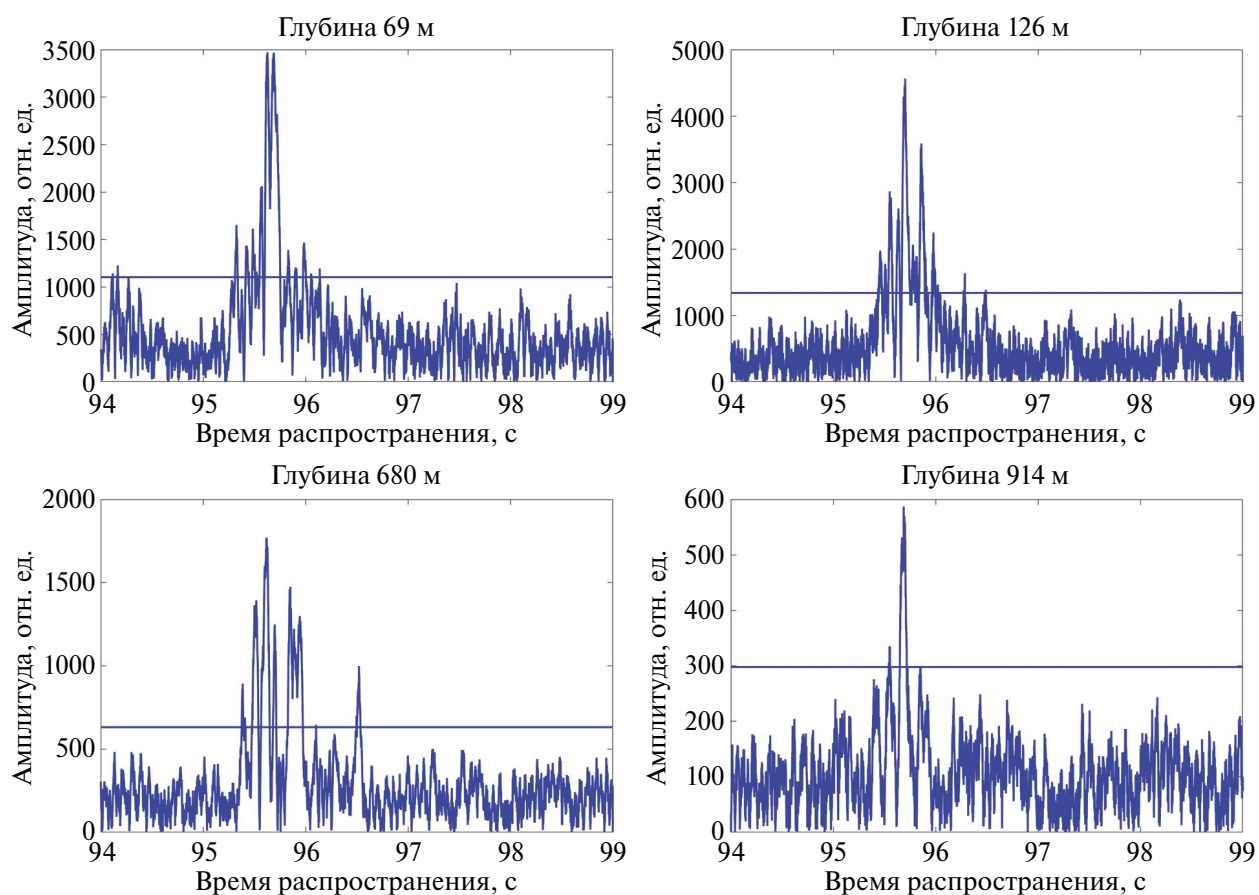


Рис. 2. Импульсные характеристики волновода, полученные на горизонтах 69, 126, 680, 914 метров.

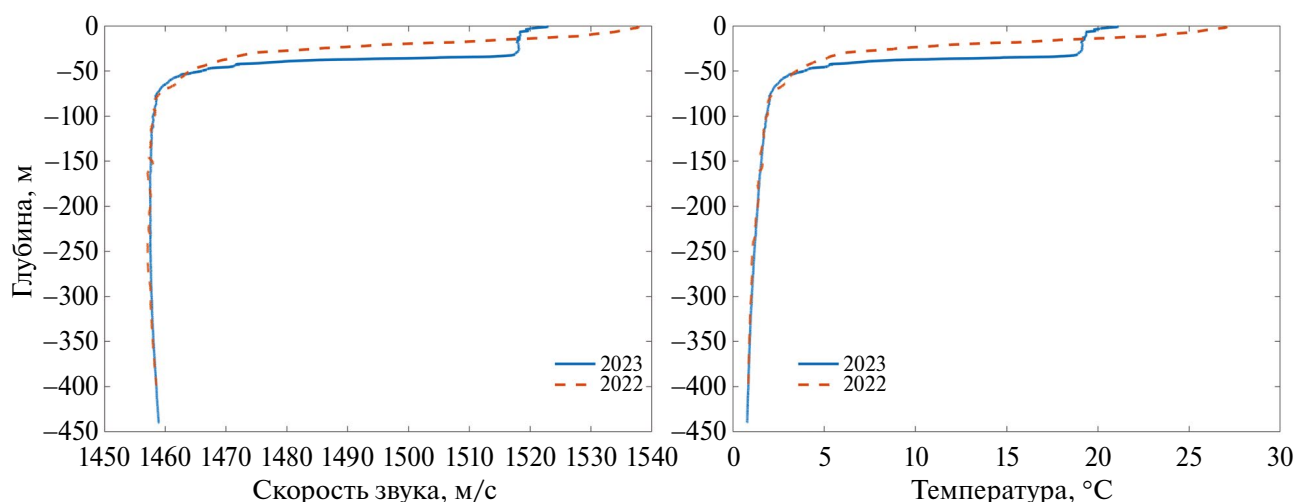


Рис. 3. Измеренные STD-зондом вертикальное распределение скорости звука (а) и температуры (б) по глубине в 2022 и 2023 годах.

Для решения целевой задачи исследования были произведены расчёты эффективной скорости прохождения импульсных сигналов от ИНС до приёмников, расположенных на разных глубинах. Эффективные скорости рассчитывались путём деления значений расстояния между источником и приёмником на момент регистрации сигнала по данным GPS на время распространения, определённое по моменту регистрации максимального пика импульсного отклика. Результаты расчётов позволили зафиксировать очень важную закономерность, которая заключается в приблизительном равенстве эффективных скоростей (1478 м/с) на глубине расположения оси ПЗК и на глубинах вплоть до максимальной. Физически этот важный для практики результат может быть качественно объяснён на языке лучевой теории распространения звука следующим образом. Максимальная концентрация акустической энергии вблизи оси ПЗК 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 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 – уравнивают друг друга, что и

приводит к приблизительному равенству эффективных скоростей распространения на всех горизонтах. Следует подчеркнуть, что приведённые результаты имеют очень важное прикладное значение при решении задач управления АПА при выполнении миссий на больших (сотни км) удалениях от ИНС и больших глубинах (до 1000 м).

В ранних работах авторов [1, 3–5] было экспериментально показано, что ошибки измерения расстояний акустическими методами при использовании в расчётах времени распространения навигационных сигналов и значений скорости звука на оси ПЗК не превышают 100–150 метров при удалении АНПА до 200 миль. Следовательно, приведённые выше результаты о равенстве эффективных скоростей при приёме на глубинах до 1000 метров и скорости звука на оси ПЗК позволяют рассчитывать на такие же точности позиционирования АНПА при выполнении миссий на глубинах до 1000 метров.

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

1. Показано, что ИНС, размещённый вблизи берега на глубине 35 метров на шельфе Японского моря, развивающий акустическое давление более 7000 Па/1м, позволяет обеспечить необходимое превышение сигнала над помехой для корреляционной обработки навигационных сигналов на всех глубинах от 69 до 914 метров при удалении от ИНС на 144 км. При этом, звуковое поле в глубоком море, возбуждаемое источником на шельфе, не обнаруживает

сколь-нибудь выраженных зон тени. Глубины от 69 до 1000 м засвечены весьма равномерно, что позволяет обеспечивать устойчивый прием навигационных сигналов в любом слое между этими горизонтами.

2. Выявлены важные для практики особенности формирования импульсного отклика волновода после воздействия мощного тайфуна “KHANUN”, прошедшего через исследуемую акваторию. Отсутствие придонного звукового канала на шельфе (обычно формируемого в летние месяцы) из-за перемешивания воды привело к тому, что структура импульсных характеристик волновода на всех глубинах представляет собой пачку импульсов длительностью 0.5 секунды с максимальным по амплитуде импульсом, расположенным ближе к середине. При этом зафиксировано, что времена приёма и эффективные скорости распространения максимальных импульсов приблизительно одинаковы на всех глубинах и могут эффективно применяться для решения задач позиционирования измерительных АНПА при их функционировании на глубинах до 1000 метров.

3. Уникальность и важность для практики экспериментальных результатов, полученных с применением сценария реального позиционирования группы макетов АНПА на глубинах до 1000 метров, предполагает проведение дальнейших расширенных исследований с использованием методов теоретического моделирования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования финансированы и выполнены в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН: Тема “Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред”. Регистрационный номер:

124022100075-6. Анализ и интерпретация данных финансированы и выполнены в рамках темы “Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования”, 2023–2024 гг. По гос. регистрации 123072000039-5.

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. *Wolfson M. A., Spiesberger J. L., Tappert F. D.* Internal wave effects on long-range ocean acoustic tomography // The Journal of the Acoustical Society of America. 1995. V. 97. P. 3235.
3. *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 // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
4. *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 // Акустический журнал. 2016. Т. 62. № 3. С. 341–347.
5. *Безответных В. В., Буренин А. В., Голов А. А., Моргунов Ю. М., Лебедев М. С., Петров П. С.* Экспериментальные исследования импульсной характеристики волновода японского моря с использованием псевдослучайных последовательностей в навигации подводных объектов // Акустический журнал. 2021. Т. 67. № 3. С. 291–297.

PROPAGATION FEATURES OF PULSE PSEUDO-RANDOM SIGNALS FROM AN EXTENDED SHELF INTO THE DEEP SEA DURING RECEPTION AT DIFFERENT DEPTHS

Yu. N. Morgunov, A. A. Golov[#]

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: golov_alexander@inbox.ru*

The article discusses the results of an experiment conducted in the Sea of Japan in August 2023 on an acoustic path with a length of 144.4 km under summer-autumn hydrological conditions. The study focused on the propagation of pulsed pseudo-random signals from an extended shelf into the deep sea

when received at depths of 69, 126, 680, and 914 meters. An analysis of the experimentally obtained impulse characteristics revealed a group of ray arrivals with a duration of approximately 0.5 sec, with a maximum close to a center at all depths. The experiment involved receiving broadband pulse signals with a central frequency of 400 Hz at a distance of 144.4 km from the source of navigation signals (SNS) located on the shelf at a depth of 30 m and a sea depth of 45 meters. Signal information was received using a system equipped with hydrophones distributed up to a depth of 1000 meters, allowing for long-term signal recording at fixed depths. The experimental findings facilitated the study of impulse characteristics of the acoustic waveguide, determination of effective signal propagation speeds at different depths, and formulation of conclusions regarding the potential for utilizing autonomous underwater vehicles (AUVs) for climate monitoring of marine areas at depths up to 1000 meters

Keywords: hydroacoustic sounding, deep-sea reception, climate change monitoring, complex phase-shift keying signals