

АКУСТИКА ОКЕАНА.

ГИДРОАКУСТИКА

УДК 534.222

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБОКОВОДНОГО ПРИЕМА
ИМПУЛЬСНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ИЗ
ПРОТЯЖЕННОГО ШЕЛЬФА В ЯПОНСКОМ МОРЕ**

Ю.Н. Моргунов, А.В. Буренин, А.А. Голов*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041 Владивосток, ул. Балтийская 43
Тел.: (423-2)311-613; Факс: (423-2)312-600
E-mail: golov_alexander@inbox.ru

Аннотация. В статье обсуждаются теоретические и экспериментальные результаты исследований распространения импульсных псевдослучайных сигналов в Японском море на акустической трассе протяженностью 144,4 км при воздействии последствий тайфуна на гидрологические условия. Исследован случай распространения сигналов с центральной частотой 400 Гц из протяженного шельфа в глубокое море при осуществлении приема на глубинах 69, 126, 680 и 914 метров. Для приема сигналов была использована дрейфующая система с распределенными по глубине до 1000 метров гидрофонами с возможностью длительной регистрации на фиксированных глубинах. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показал, что на всех горизонтах с одинаковым временем, фиксируется группа лучевых приходов длительностью около 0.5с с максимальным в центре. По результатам эксперимента были рассчитаны эффективные скорости распространения сигналов, принятых на различных глубинах, и сформулированы выводы о возможности решения задач высокоточного позиционирования подводных объектов (ПО) различного назначения на глубинах до 1000 метров и удалении на сотни километров от постов управления.

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

Для эффективного решения актуальных задач освоения океанов и морей в современных условиях все чаще обращаются к использованию перспективных гидроакустических методов и средств. Акустическая томография неоднородностей морской среды, акустическая термометрия, подводная навигация и управление

подводными объектами - вот далеко не полный перечень задач, решаемых с применением подводных акустических технологий [1-3]. Технические и финансовые проблемы при практической реализации результатов решения этих задач требуют, в большинстве случаев, проведения специальных экспериментов, направленных на выявление особенностей формирования акустических полей, которые могут повлиять на эффективность функционирования гидроакустических комплексов и систем. Например, это актуально при проведении разработок и испытаний систем позиционирования и управления ПО, выполняющими миссии на больших глубинах и удалениях от источников навигационных и информационных сигналов, размещаемых вблизи береговой черты.

Целью настоящего исследования в августе 2023 года в Японском море было проведение экспериментального и численного моделирования процесса излучения и распространения импульсных широкополосных сигналов из протяженного шельфа в глубокое море и приема их группой из четырех ПО, функционирующих на глубинах до 1000 метров и удалении свыше ста километров. Полученные экспериментально и численно импульсные характеристики волноводов на трассах от источника навигационных сигналов (ИНС) до каждого ПО были использованы для решения задач их высокоточного позиционирования.

Гидрологические и батиметрические условия проведения исследований были существенно осложнены прошедшим перед началом работ по акватории тайфуном «KHANUN», который привел к перемешиванию воды на протяженном (около 60 км) шельфе. На рис.1 приведены вертикальные распределения скорости звука (ВРСЗ), которые демонстрируют отличие гидрологической обстановки на шельфе в 2023 году после прохождения тайфуна от обычной ситуации для летне-осеннего сезона, зафиксированного нами в 2018 году в этом районе на аналогичной акустической трассе [4].

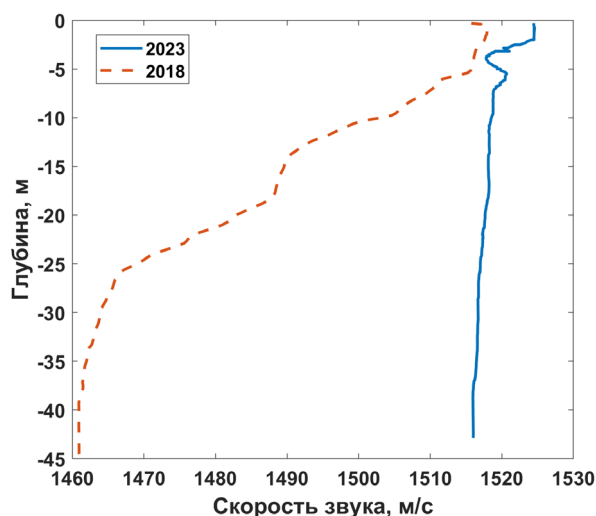


Рис.1. Измеренные вертикальное распределение скорости звука в точке излучения в 2018 году, и после тайфуна «KHANUN» в 2023 году.

В работе [4] авторами показана экспериментально и теоретически возможность эффективного решения задач акустической дальнометрии (навигации) в Японском море в осенне-летний период на глубинах до 500 метров и расстояниях до 200 км от ИНС, расположенного вблизи (150 метров) береговой черты. Получены уникальные данные по формированию импульсных характеристик при приеме на различных глубинах, анализ которых показал равенство эффективных скоростей на оси ПЗК и остальных горизонтах приема до 500 метров. Важно, что эти результаты были подтверждены численно с применением модовой теории. Полученные данные были взяты за основу при формировании методических и технических аспектов приведенного в данной статье исследования, а также были использованы для сравнения при анализе получаемых результатов.

Методика проведения предлагаемого для обсуждения эксперимента была следующая. В 150 метрах от береговой черты на глубине 25-30 метров (при глубине моря 40 метров) был вывешен с борта заякоренного судна широкополосный излучатель, соединенный 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 сеанса излучения составила более 12 часов. Уровень звукового давления при излучении поддерживался в пределах 7000 Па/м. Схема эксперимента приведена на рис. 2.



Рис.2. Схема эксперимента

Для приема сигнальной информации применялась распределенная вертикальная приемная система, которая состоит из четырех автономных ненаправленных гидрофонов, размещаемых в произвольных точках на фале длиной свыше 1000 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 принятых сигналов и текущей глубины точки приема сигналов.

В заданной точке трассы (рис.2) с яхты «Светлана» осуществлялась постановка приемной системы следующим образом. На фале с помощью быстросъемных 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 в глубоком море), 680 и 914 метров. После окончания сеанса излучения и подъема приемной системы на борт производилась свертка принятых сигналов, с маской излученного для определения импульсного отклика волноводов на заданных глубинах (рис.3). Для удобства анализа помеховой обстановки в период проведения эксперимента были рассчитаны и обозначены на графиках максимумы корреляционного шума ортогональной последовательности.

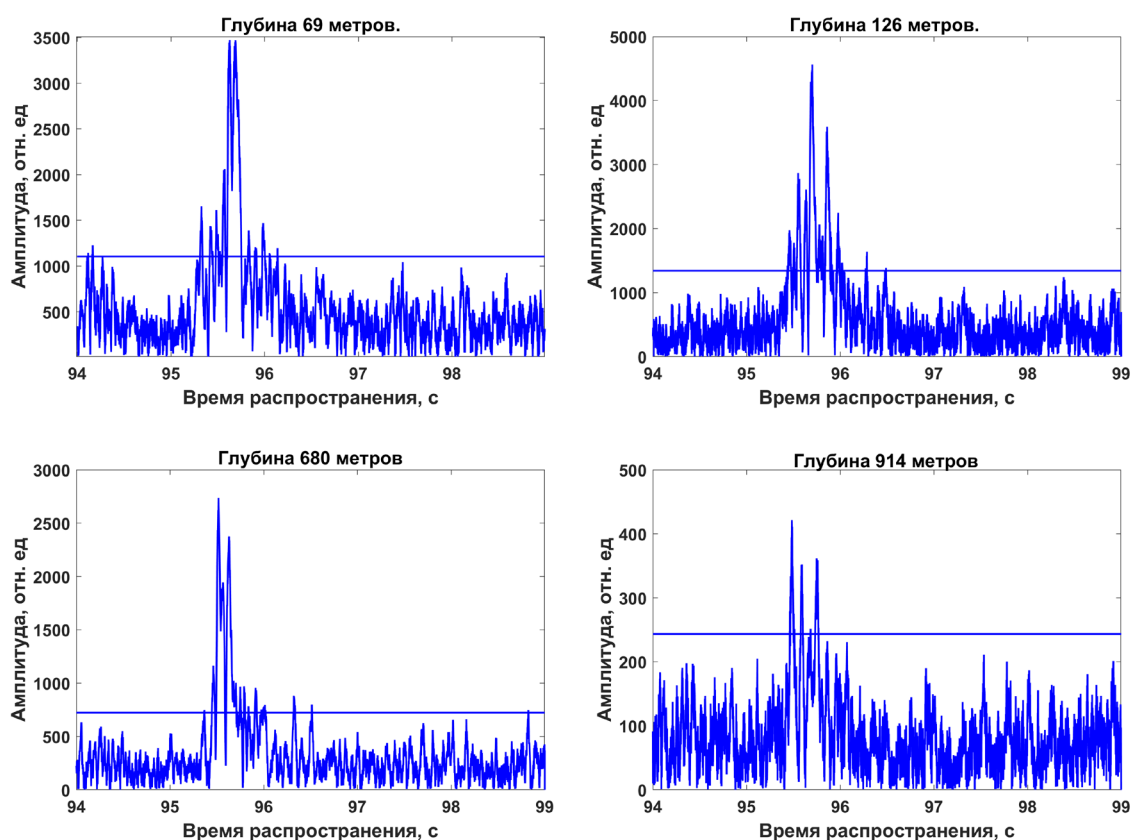


Рис.3. Импульсные характеристики волновода, полученные на горизонтах 69, 126, 680, 914 метров. Горизонтальной линией обозначен максимум корреляционного шума ортогональной последовательности.

Анализ зависимости структуры импульсных характеристик от глубины приема, приведенных на рис.3, показывает, что сигнал фиксируется приемной системой на всех глубинах с превышением над помехой, достаточным для анализа. На всех глубинах энергия принятого сигнала в основном концентрируется в пачке импульсов длиной 0.5 секунд с максимальным импульсом, расположенным около середины. Схожие по длительности и структуре импульсные характеристики, полученные на оси ПЗК и на других глубинах, могут быть объяснены особенностями ВРСЗ на протяженном шельфе, обусловленных перемешиванием воды после тайфуна (рис.1). Отсутствие ярко выраженного придонного звукового канала распространения привело к существенному затягиванию импульсных откликов на всех горизонтах, по сравнению с фиксируемыми в обычных летне-осенних условиях [1-6]. В этом случае энергия излучения придонного ИНС распространяется в более широком спектре углов по всему волноводу шельфовой и глубоководной частям акустической трассы. При этом часть энергии захватывается ПЗК в глубоководной части трассы...и распространяется под углами, близкими к нулевым по практически прямолинейной траектории. Поэтому на рис.3 отмечается самая большая амплитуда максимального прихода акустической энергии на глубине 126 метров.

Для решения целевой задачи исследования были произведены расчеты эффективных скоростей прохождения импульсных сигналов от ИНС до приемников, расположенных на разных глубинах. Эффективные скорости рассчитывались путем деления значений расстояния между источником и приемником на момент регистрации сигнала по данным GPS на время распространения, определенное по моменту регистрации максимального пика импульсного отклика.

Результаты расчетов позволили, как и в [4], зафиксировать очень важную закономерность, которая заключается в приблизительном равенстве эффективных скоростей (1478 м/с) на глубине расположения оси ПЗК и на глубинах вплоть до 914 метров. Физически этот важный для практики результат может быть качественно объяснен 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 [4-7]. Зафиксированные в эксперименте на больших глубинах (значительно ниже оси ПЗК) времена приходов 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 компенсируют друг друга, что и приводит к приближительному равенству времен и эффективных скоростей распространения на всех горизонтах.

Это подтверждают результаты численного моделирования, которое выполнялось с помощью программы RAY, созданной на основе лучевых представлений распространения акустических волн (рис.4). В качестве граничных параметров использовались реальный профиль дна и измеренные на трассе ВРСЗ. Средний угол наклона дна на шельфе составляет $\beta=0.06$ градусов. Глубина в точке излучения $z_0=42$ м, глубина излучателя $z_S=35$. В глубоком море среднее значение глубины около 3 км. Расстояние между излучателем и приемником $R=141.44$ км. В результате численного моделирования были рассчитаны собственные лучи между излучателем и приемниками и импульсные характеристики волноводов в интервале глубин от 60 до 1000 м с шагом между горизонтами в 1 метр. Далее определялось время распространения по максимальному приходу акустической энергии в импульсной характеристике волновода. В большинстве случаев максимум располагался в середине. На последнем этапе, для расчета эффективной скорости звука расстояние между источником и приёмником делилось на время распространения..

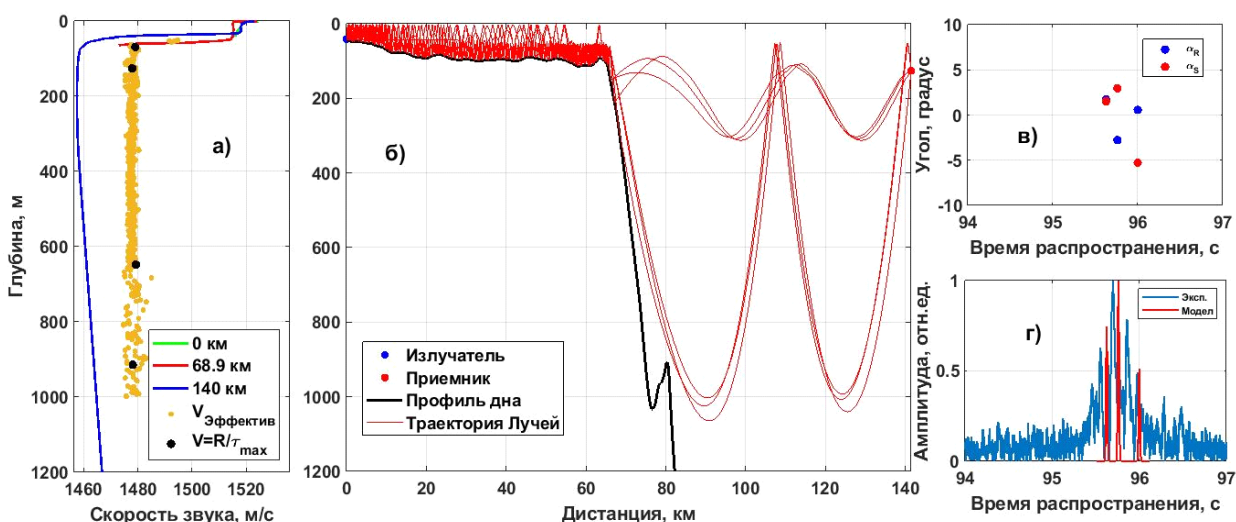


Рис. 4. Результаты численного моделирования: (а) вертикальные распределения скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); вычисленное в лучевом приближении вертикальное распределение эффективной скорости звука (оранжевые точки); экспериментально измеренные значения эффективной скорости звука на заданных глубинах с помощью импульсных характеристик волновода (черные точки); (б) рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы при приеме на глубине 126 метров; (в) угловая структура поля в точке приема (красные точки углы выхода из излучателя, синие – углы входа в приемник); (г) импульсная характеристика волновода в точке приема на горизонте 126 метров (синим цветом изображена экспериментальная ИХВ, а красным - смоделированная).

Из рассмотрения рисунка 4 видно, что рассчитанные эффективные скорости (оранжевые точки) для каждого горизонта хорошо согласуются с эффективными

скоростями (черные точки), наблюдаемыми в эксперименте (с точностью около 1 м/с для горизонта 600 метров и 0.1 м/с для остальных горизонтов). Задача добиться точного совпадения рассчитанных и экспериментально полученных импульсных характеристик не ставилась, но было получено численное подтверждение расширения до 0,4 секунд импульсных откликов волноводов и наличие максимального прихода в середине, как и в эксперименте. Это свидетельствует о перспективности применения программы RAY для моделирования и физической интерпретации процессов распространения акустических волн в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

В ранних работах авторов [1-4] показано, что ошибки позиционирования ПО в ПЗК при использовании в расчетах расстояний измеренного с большой точностью времени распространения сигналов и известных (или измеренных) значений скорости звука на оси ПЗК не превышают 100-150 метров при удалении ПО от ИНС до 200 миль. Следовательно, приведенные выше экспериментальные и теоретические результаты о равенстве эффективных скоростей при приеме на оси ПЗК и других заданных глубинах позволяют рассчитывать на такие же точности позиционирования при выполнении реального маневрирования группы ПО на глубинах до 1000 метров и удалении на сотни километров от постов управления.

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

1. Обсуждаемый в статье эксперимент технически и методически является подобием описанного в [4], но получен для существенно отличающихся условий. Тем не менее, экспериментально и теоретически, с использованием лучевых и модовых представлений, подтвержден основной научный и практический результат о равенстве эффективных скоростей распространения навигационных сигналов от ИНС до подводных объектов на глубинах до 1000 метров.

2.. Показано, что ИНС, размещенный на 60-ти километровом шельфе Японского моря вблизи берега, развивающий акустическое давление около 7000 Па/1м, позволяет обеспечить необходимое превышение сигнала над помехой на приемных системах 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.

3. 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 около 0.5 секунды с максимальным по амплитуде импульсом, расположенным ближе к середине. При этом зафиксировано, что времена и эффективные скорости распространения максимальных импульсов приблизительно одинаковы на всех глубинах. Это открывает возможности для решения задач позиционирования группировок ПО при их функционировании на глубинах до 1000 метров.

4. Уникальность и важность для практики экспериментальных и теоретических результатов акустических дальномерных измерений, полученных в разные годы для сценария реального маневрирования группы ПО на глубинах до 1000 метров и удалении на сотни километров от постов управления, предполагает проведение дальнейших расширенных исследований с использованием методов теоретического моделирования. Показана перспективность применения вычислительной программы RAY для моделирования и физической интерпретации процессов распространения акустических волн в сложных гидрологических и батиметрических условиях.

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. No гос. регистрации 123072000039-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang Y., Xiao Y., Li T. A survey of autonomous underwater vehicle formation: Performance, formation control, and communication capability // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2021. Vol. 23, No. 2. P. 815.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток, 2018. 368 с.
3. Селезнев И.А., Ясников А.И. Перспективы применения подводных глайдеров для океанографии и освещения подводной обстановки. Обзор по материалам зарубежной печати // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 1 (43). С. 4–13.
4. 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 // Акустический журнал. 2019. Том 65. № 5. С. 641–649.
5. 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.
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 формирования импульсной характеристики в глубоком море // Акустический журнал. 2010. Т. 56, № 1. С. 51–52.
7. 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.
8. 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.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Измеренные вертикальное распределение скорости звука в точке излучения в 2018 году, и после тайфуна «KHANUN» в 2023 году.

Рис.2 — Схема эксперимента

Рис.3 — Импульсные характеристики волновода, полученные на горизонтах 69, 126, 680, 914 метров.

Рис.4 — Результаты численного моделирования: (а) вертикальные распределения скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (синяя, красная и зеленая кривая); вычисленное в лучевом приближении вертикальное распределение эффективной скорости звука (оранжевые точки); экспериментально измеренные значения эффективной скорости звука на заданных глубинах с помощью импульсных характеристик волновода (черные точки); (б) рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы при приеме на глубине 126 метров; (в) угловая структура поля в точке приема (красные точки углы выхода из излучателя, синие — углы входа в приемник); (г) импульсная характеристика волновода в точке приема на горизонте 126 метров (синим цветом изображена экспериментальная ИХВ, а красным - смоделированная).

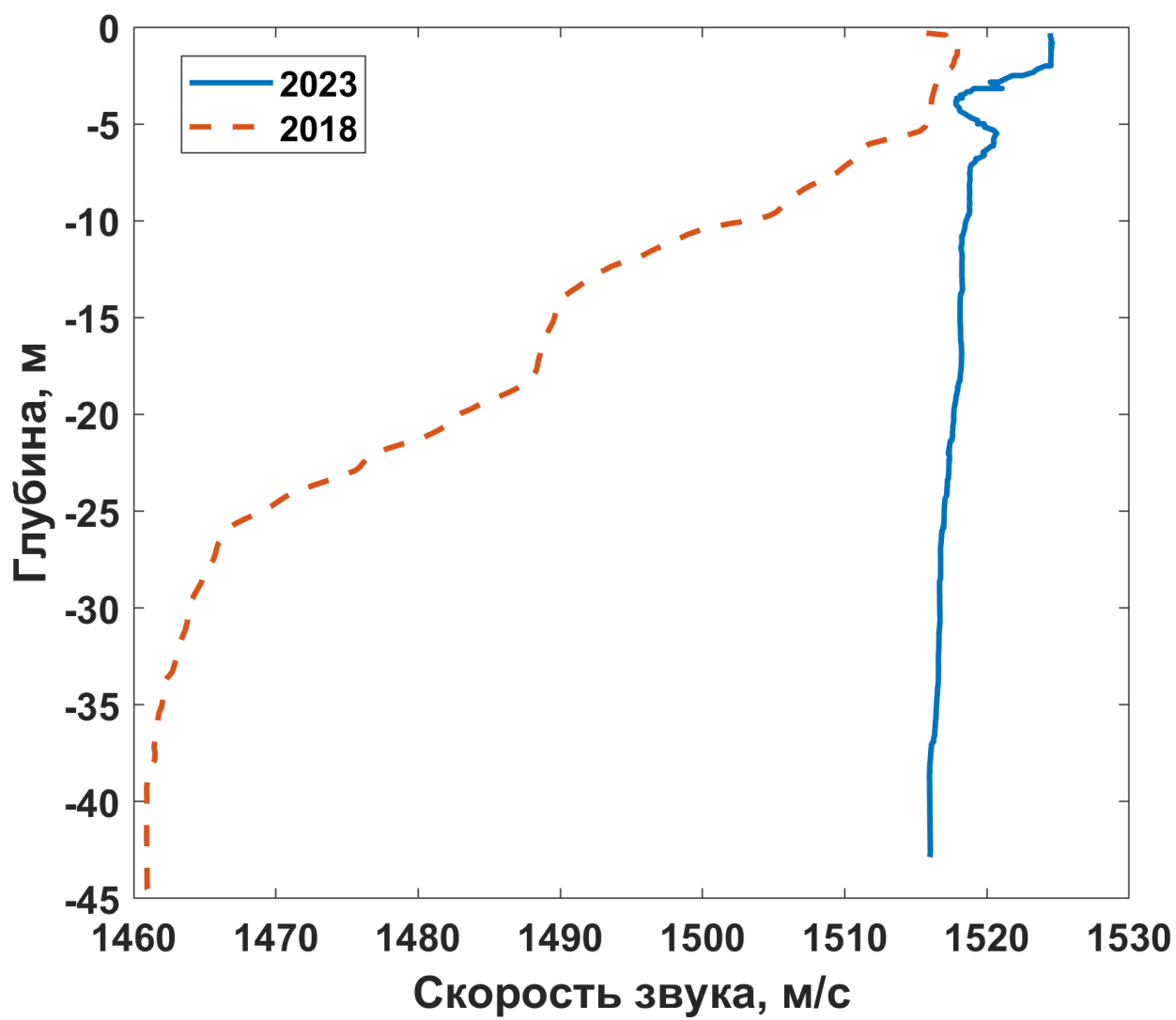


Рис.1.



Рис.2

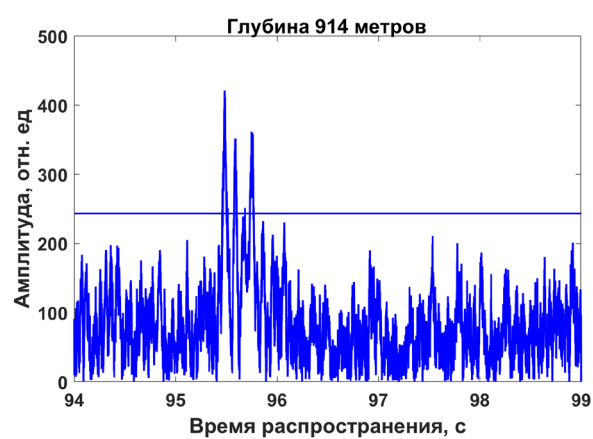
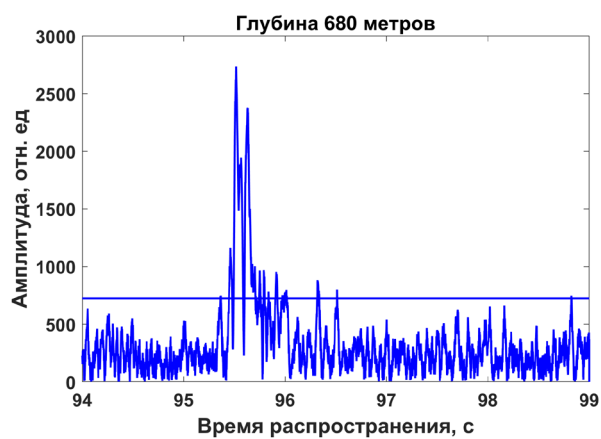
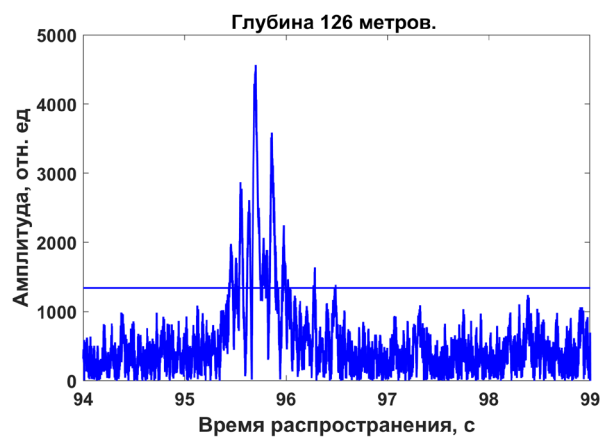
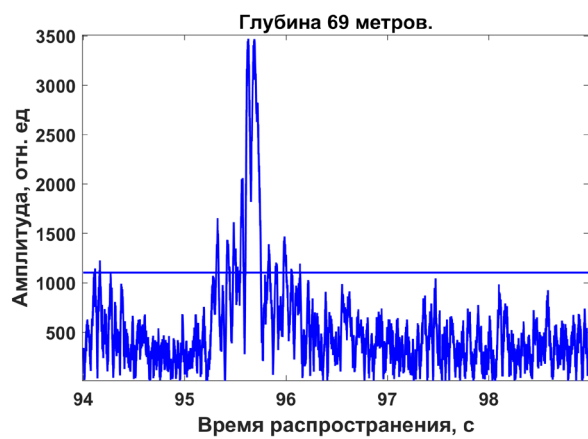


Рис.3

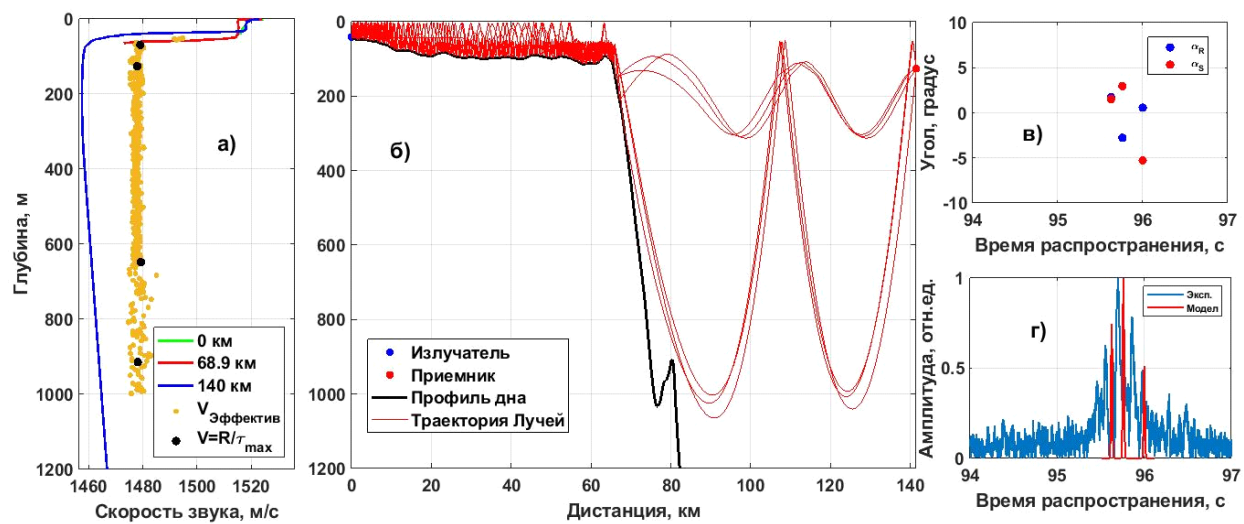


Рис.4

STUDY OF THE FEATURES OF DEEP-WATER RECEPTION OF PULSE BROADBAND SIGNALS EMISSION FROM THE EXTENDED SHELF IN THE SEA OF JAPAN

Yu.N. Morgunov, A.A. Golov, A.V. Burenin

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

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

Abstract. The article discusses theoretical and experimental results of studies of propagation of pulse pseudorandom signals in the Sea of Japan on an acoustic path with a length of 144.4 km under the influence of typhoon consequences on hydrological conditions. The case of propagation of signals with a central frequency of 400 Hz from an extended shelf to the deep sea with reception at depths of 69, 126, 680 and 914 meters is studied. To receive signals, a drifting system with hydrophones distributed over a depth of up to 1000 meters with the possibility of long-term recording at fixed depths was used. Analysis of experimentally obtained pulse characteristics showed that at all horizons with the same time range, a group of ray arrivals with a duration of about 0.5 s with a maximum in the center is recorded. Based on the results of the experiment, the effective propagation speeds of signals received at various depths were calculated, and conclusions were formulated on the possibility of solving problems of high-precision positioning of underwater objects for various purposes at depths of up to 1000 meters and at a distance of hundreds of kilometers from control centers.

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия, 690041 Владивосток, ул. Балтийская, д.43; Тел.: (423-2)311-613; Факс: (423-2)312-600

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Переписку ведет:

Голов Александр Александрович, с.н.с., к.т.н.

ТОИ ДВО РАН, Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д.43

Тел.: (423-2)311-631; Факс: (423-2)312-600

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

Соавторы:

Моргунов Юрий Николаевич, с.н.с., д.т.н.

ТОИ ДВО РАН, Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д.43

Телефон: (423-2)311-631; Факс: (423-2)312-600

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

Буренин Александр Викторович, с.н.с., к.ф.-м.н.

ТОИ ДВО РАН, Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д.43

Телефон: (423-2)311-631; Факс: (423-2)312-600

E-mail: shurick_burenin1@mail.ru