

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА В НАТУРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА ШЕЛЬФЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

**А.А. Пивоваров, А.Н. Самченко,  
А.Н. Швырев, И.О. Ярошук**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН<sup>1</sup>

Осенью 2019 года на шельфе Японского моря в заливе Петра Великого проводился комплексный натурный эксперимент с целью изучения влияния внутренних волн на распространение сложных низкочастотных сигналов. Экспериментальные работы проводились с помощью нового гидрофизического исследовательского комплекса. В состав комплекса входили: вертикальная 8-элементная приемная антенна, автономная широкополосная излучающая станция, многоэлементные термогирлянды и регистраторы гидростатического давления. В течение суток проводились излучение и прием пакетов различных ЛЧМ и фазоманипулированных сигналов с одновременным измерением характеристик поля внутренних волн по трассе распространения. В ходе выполнения натурального эксперимента были подтверждены технические характеристики гидрофизического исследовательского комплекса и получен опыт проведения комплексных океанологических экспериментов. Выявлены различия в использовании линейных частотно-модулированных и псевдослучайных фазоманипулированных сигналов, показано характерное на данной акватории влияние гидрологических возмущений на распространение акустических сигналов.

## ВВЕДЕНИЕ

В ТОИ ДВО РАН разработан новый гидрофизический исследовательский комплекс для решения задач акустической томографии в шельфовой зоне с помощью широкополосных когерентных (частотно-модулированных, фазоманипулированных) гидроакустических сигналов на стационарных исследовательских трассах. В состав комплекса входят следующие устройства:

- автономная низкочастотная излучающая станция;
- регистраторы гидрофизических полей;
- автономные термогирлянды и регистраторы поля гидростатического давления.

Наибольший вклад в пространственно-временные изменения интерференционной структуры акустического поля в условиях шельфа вносят интенсивные внутренние волны. Для каждой акватории существуют особенности в формировании звукового поля, обусловленные влиянием группы таких характерных для нее факторов, как гидрологический режим акватории и очертания береговой линии. В случае использования низкочастотных акустических сигналов на их распространение также оказывают определяющее

влияние структура и толщина осадочных пород [1]. На полигоне ТОИ ДВО РАН в заливе Петра Великого в течение многих лет проводятся различные гидроакустические экспериментальные исследования с применением сложных сигналов, например [2, 3].

Основная задача данного исследования состояла в опытной эксплуатации нового гидрофизического комплекса, а также в оценивании влияния проходящих внутренних волн на вертикальную структуру низкочастотного акустического поля. Применение в качестве зондирующих линейных частотно-модулированных (ЛЧМ) и фазоманипулированных сигналов (модулированных М-последовательностью) различной протяженности позволяет сравнить и оптимизировать их информативность и энергозатраты.

## ■ Схема эксперимента

В октябре 2019 года в Японском море в акватории залива Петра Великого на полигоне ТОИ ДВО РАН был проведен натурный эксперимент с применением отмеченного выше гидрофизического исследователь-

<sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел. +7 (423) 231-26-17.  
E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

ского комплекса. В эксперименте использовались автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция, вертикальная приемная гидроакустическая антенна из автономных термогирлянд и автономных регистраторов течения и гидростатического давления. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Научное оборудование в составе гидрофизического исследовательского комплекса имеет следующие характеристики. Автономная низкочастотная

широкополосная гидроакустическая излучающая станция с глубиной погружения до 500 м предназначена для генерации широкополосных гидроакустических сигналов в частотном диапазоне 420–520 Гц и создает акустическое давление в рабочем диапазоне 2000 Па (приведенное к 1 м от оси излучателя) [4]. Внешний вид станции показан на рис. 2, а. Станция состоит из герметичного контейнера с аккумулятором и аппаратурой и электроакустического преобразователя электромагнитного типа. Контей-

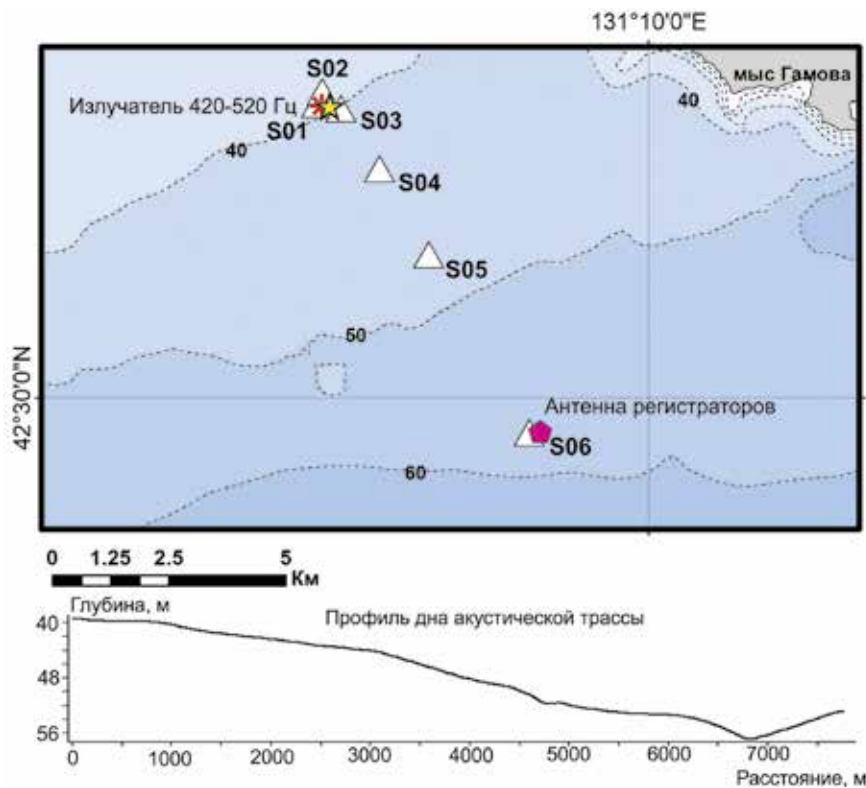


Рис. 1. Схема эксперимента. Батиметрический профиль дна акустической трассы

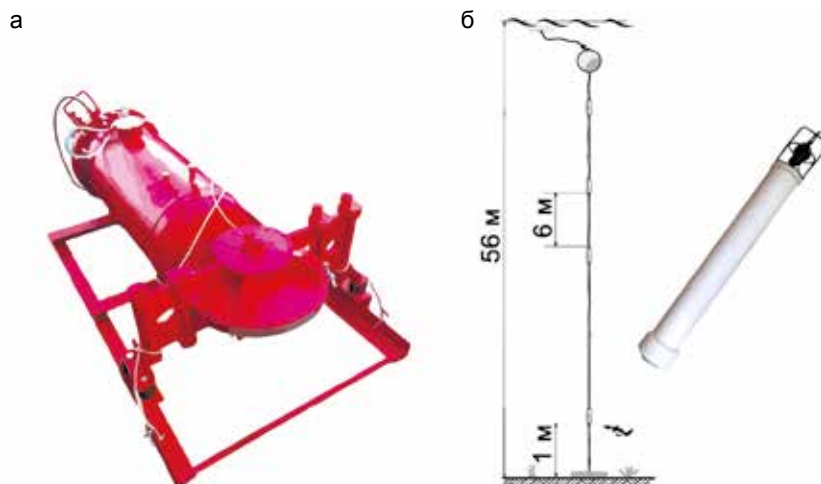


Рис. 2. Внешний вид приборов: а – автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция 420–520 Гц; б – автономный регистратор гидрофизических полей

нер с аппаратурой и преобразователь закреплены на несущей металлической раме. Снаряженная масса станции составляет 100 кг. Автономность в зависимости от типа и скважности сигналов до 3 суток. Станция имеет возможность синхронизации с другими устройствами в составе гидрофизического комплекса. Дополнительной опцией является возможность использовать автономную излучающую станцию в качестве ретранслятора гидроакустических сигналов и маяка для позиционирования подводных аппаратов.

Приемная вертикальная гидроакустическая антенна составлена из автономных регистраторов гидрофизических полей [5]. Внешний вид регистратора и схема вертикальной антенны показаны на рис. 2, б. Регистратор предназначен для записи гидроакустических сигналов в диапазоне 10–3000 Гц, гидростатического давления и температуры водной среды. Для этого он снабжен гидрофоном, датчиком гидростатического давления и цифровым датчиком температуры. Регистратор гидрофизических полей обладает максимальной рабочей глубиной погружения до 200 м и автономностью до 14 суток и возможностью синхронизации между собой и с другими устройствами комплекса. Датчики расположены на внешней стороне пластикового герметичного корпуса, внутри которого находится система регистрации и блок аккумуляторов. Система регистрации состоит из микроконтроллерного блока управления, твердотельной карты памяти micro SD, 24-разрядного АЦП и предварительного усилителя для канала гидрофона, 16-разрядного АЦП для канала записи гидростатического давления и цифрового канала для цифрового датчика температуры. Датчик гидростатического давления позволяет с высокой точностью определять положение регистратора по глубине и, в случае небольшой глубины погружения, определять характеристики поверхностного волнения. С помощью датчика температуры определяются структура и флуктуации поля скорости звука в точке постановки автономного регистратора.

Термогирлянды представляют собой автономные системы для регистрации вертикальной структуры поля температуры водной среды [6]. Термогирлянда состоит из эквидистантно расположенных на кабеле цифровых датчиков температуры (до 40 штук) и герметичного контейнера с аккумуляторной батареей и системой регистрации. Датчики температуры позволяют достичь точности до 0,01°C. Система регистрации на основе микроконтроллера опрашивает датчики и записывает результат на твердотельную

карту памяти micro SD. Срок автономности термогирлянд составляет до 14 суток.

Автономные регистраторы гидростатического давления предназначены для измерения флуктуаций гидростатического давления и используются для регистрации сейшевых колебаний, характеристик поверхностного волнения, а также определения глубины расположения гидрофизических приборов в составе комплекса. Регистратор состоит из датчика давления и пластикового герметичного корпуса, в котором расположены аккумулятор и микроконтроллерная система управления, обеспечивающая опрос датчика давления с частотой 8 Гц и сохранение результата на карту памяти micro SD. Автономность регистратора при данных параметрах составляет до 3 месяцев.

На рис. 1 пунктирной линией и цифрами отмечены изобаты глубин в районе эксперимента. Условный знак «звездочка» обозначает место постановки на дно автономной излучающей станции на глубине 38 м, а пятиугольником отмечена точка установки вертикальной приемной восьмиэлементной антенны. Треугольниками обозначены места установки автономных термогирлянд. В ходе эксперимента автономная станция с периодом 300 с в течение суток излучала пакет из нескольких широкополосных сигналов. В состав сигналов входили два линейных частотно модулированных (ЛЧМ) сигнала в полосе 400–560 Гц продолжительностью 10 и 2 с и два фазоманипулированных сигнала в виде псевдослучайных M-последовательностей длиной 63 и 255 символов по 10 периодов на символ на несущей частоте 480 Гц.

Прием акустических сигналов осуществлялся на 8-элементную вертикальную антенну, составленную из синхронизированных регистраторов гидроакустического поля. Антенна располагалась на расстоянии 8 км от излучающей станции в направлении свала глубин в точке с глубиной места 56 м. Регистраторы распределены по антенне в следующем порядке: первый на высоте 1 м от дна, следующие семь с интервалом 6 м. На время эксперимента, для определения вертикальной структуры поля температуры воды, были установлены шесть многоэлементных автономных термогирлянд. Три термогирлянды устанавливались в виде треугольника со стороной около 500 м вблизи точки постановки донной станции для определения направления распространения фронта внутренних волн. Одна термогирлянда находилась в непосредственной близости от приемной вертикальной антенны и две термогирлянды располагались по трассе распространения гидроакустического сигнала.

## ■ Обсуждение результатов

Анализ акустического поля основывался на вычислении функций корреляции между излученным станцией сигналом и сигналами, принятыми вертикальной антенной. Интерпретировать корреляционные максимумы можно как моды, распространяющиеся с некоторой групповой скоростью. Для удобства визуализации результаты с дискретной антенны аппроксимированы в непрерывную вертикальную структуру поля, где интенсивностью цвета показано значение корреляционной функции. На рис. 3, а, б представлены нормированные корреляционные функции ЛЧМ сигнала продолжительностью 2 с и 10 с. Из рисунка следует, что пятикратная разница в энергетике сигнала не приводит к заметным различиям между ними. Это говорит о достаточности ЛЧМ сигнала продолжительностью 2 с для

данной излучаемой энергетике и дистанции. Аналогичные результаты показывают свертки М-последовательности различной длины, представленные на рис. 3, в, г. Корреляционные функции ЛЧМ и фазоманипулированных сигналов качественно повторяют вертикальную модовую структуру поля, но у фазоманипулированного сигнала близкие по скоростям моды частично сливаются между собой, что говорит в пользу более высокой разрешающей способности и информативности ЛЧМ сигнала. В дальнейшем, при анализе флуктуаций акустического поля под действием внутренних волн, будем опираться на ЛЧМ сигнал продолжительностью 2 с.

Из рис. 3 следует, что первая мода, приходящая с максимальной групповой скоростью и пространственным максимумом в середине глубины волновода, обладает низкой интенсивностью. Это хорошо согласуется с модельными расчетами, так как излу-

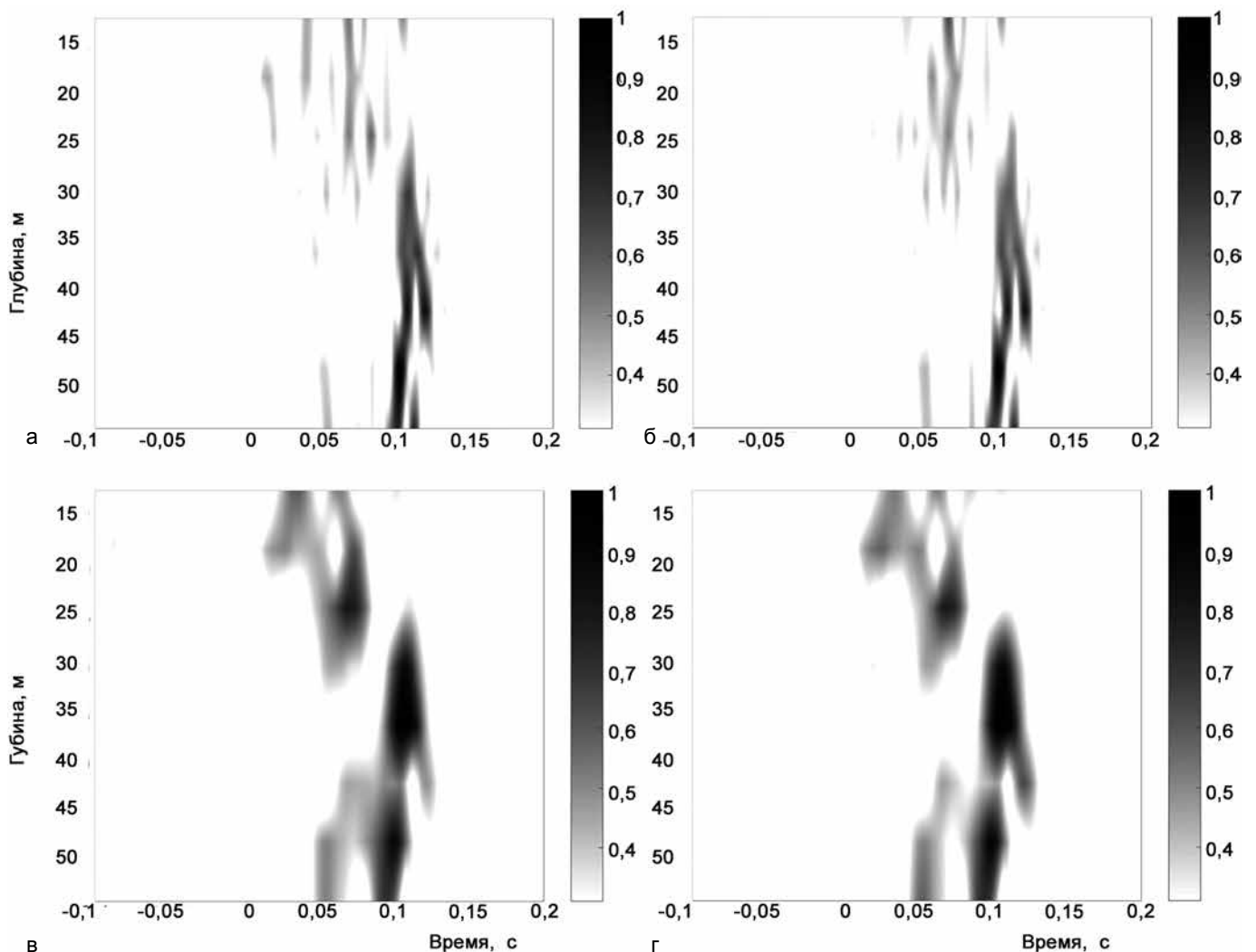


Рис. 3. Нормированные корреляционные функции принятых сигналов на антенне: а – ЛЧМ сигнал 2 с; б – ЛЧМ сигнал 10 с; в – М-последовательность длиной 64 символов; г – М-последовательность 256 символов

чатель установлен на дно и первая мода возбуждается с малым коэффициентом. Также заметно, что последующие моды значительно теряют энергетику интерференционных максимумов в верхней части волновода. Это обусловлено гидрологической структурой водного слоя, имеющего придонный волновод с выраженным слоем скачка в диапазоне глубин 20–30 м.

На рис. 4 показана вертикальная структура корреляционной функции ЛЧМ сигнала продолжительностью 2 с в различное время в течение суток. Вертикальное распределение температуры водного слоя по трассе в соответствующее время в точках постановки термогирлянд S03, S04, S05, S06 представлено на рис. 5. Из рис. 4, а и 5, а следует, что в случае, когда гидрологическая структура максимально близка к слоистой, наблюдаются четкие корреляционные максимумы, соответствующие первым пяти модам

с учетом влияния придонного волновода. Когда же гидрология по трассе становится существенно неоднородной, как показано на рис. 4, в и 5, в, диапазон групповых скоростей значительно увеличивается. Такие эффекты, связаны, по-видимому, с трансформацией и взаимодействием мод.

Отметим следующие основные результаты эксперимента:

- отработана методика применения гидрофизического исследовательского комплекса в натуральных экспериментах;
- для данной дистанции и энергетики излучаемого сигнала достаточно использовать ЛЧМ и фазоманипулированные сигналы протяженностью 2 с;
- ЛЧМ сигналы обладают большей разрешающей способностью и информативностью по отношению к М-последовательностям одинаковой протяженности;

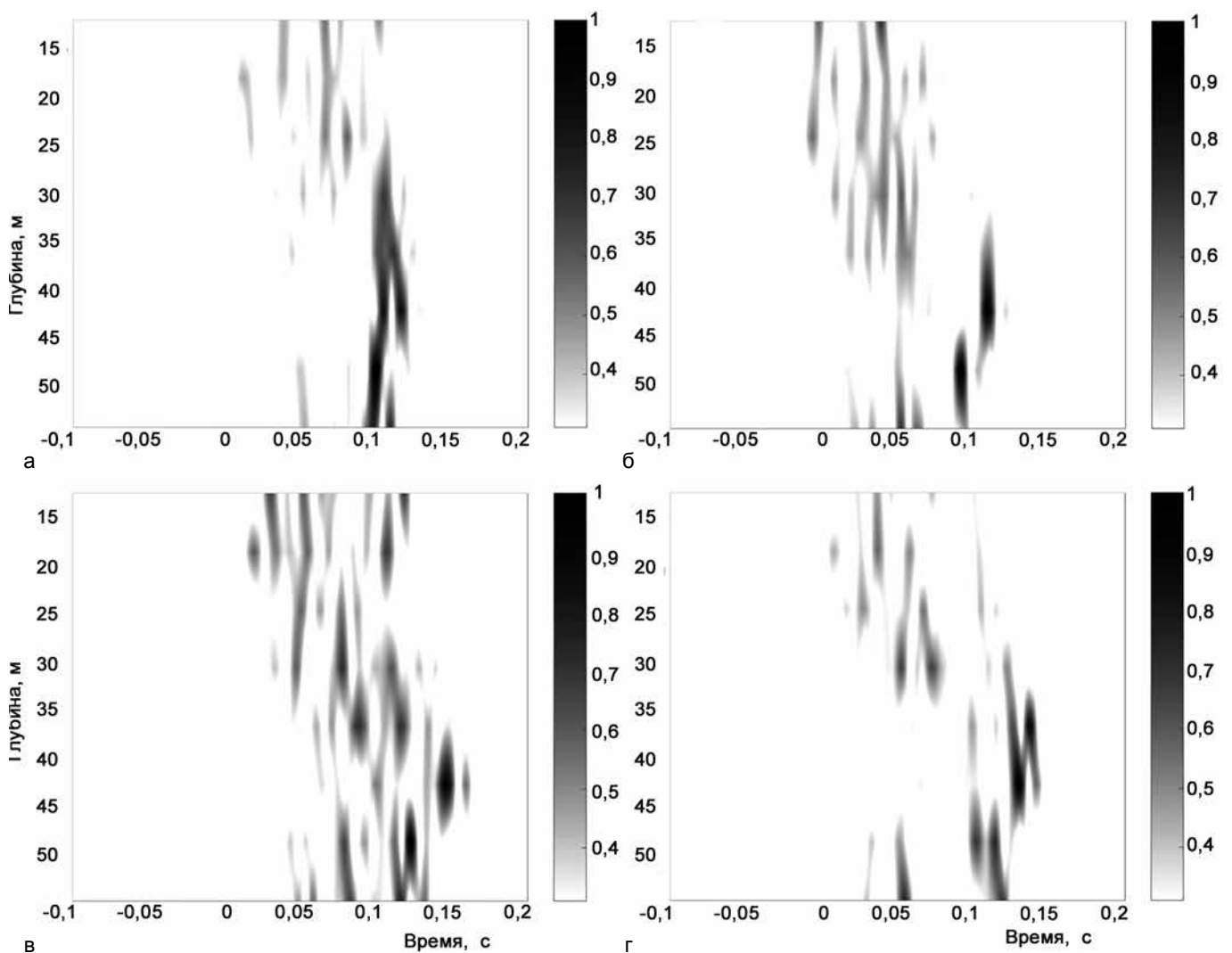
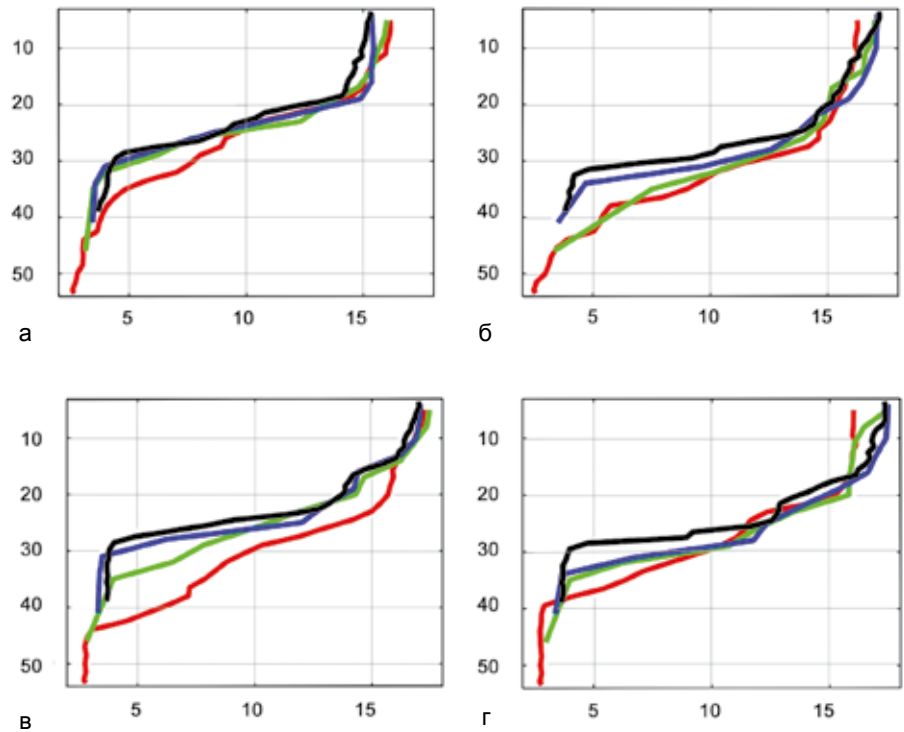


Рис. 4. Нормированные корреляционные функции ЛЧМ сигнала продолжительностью 2 с: а – принятые 10.10.2019 12:30; б – 10.10.2019 18:30; в – 11.10.2019 00:30; г – 11.10.2019 06:30

Рис. 5. Вертикальная структура поля температуры в точках установки термогирлянд S 3 – черный, S 4 – синий, S 5 – зеленый, S 6 – красный: а – 10.10.2019 12:30; б – 10.10.2019 18:30; в – 11.10.2019 00:30; г – 11.10.2019 06:30



• в зависимости от гидрологической ситуации наблюдаются существенные трансформации интерференционных максимумов мод и скоростей их распространения.

Работа выполнена по госзаданию номер: ААА-А-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самченко А.Н., Долгих Г.И., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. Экспериментальные исследования на шельфе залива Петра Великого с использованием низкочастотных гидроакустических излучателей // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 3 (29). С. 54–60. DOI: 10.25808/24094609.2019.29.3.007
2. Тагильцев А.А., Безответных В.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Экспериментальное тестирование распределенной вертикальной автономной приемной системы // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (28). С. 47–53. DOI: 10.25808/24094609.2019.28.2.006
3. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoaoustic sediment model // Chin. Phys. Lett. 2014. Vol. 31, Is. 12. P. 124–301.
4. Пат. 176198 РФ, МПК Н04В 13/00. Автономная низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая станция / Пивоваров А.А., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н. – № 2017133585; заявл.: 26.06.2017; опубл.: 12.09.2018, Бюл. № 24.
5. Пат. 171967 РФ, МПК G01V 1/38. Автономный регистратор гидрофизических полей / Пивоваров А.Н., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Леонтьев А.П. – № 2017109315/28; заявл.: 20.03.2017; опубл.: 22.06.2017, Бюл. № 17.
6. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 1. С. 128–135.