

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АВТОНОМНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ

**А.А. Тагильцев, В.В. Безответных,
Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹

Распределенная вертикальная автономная приемная система разработана для экспериментальных исследований по изучению распространения низкочастотных акустических сигналов из области шельфа в глубокое море. В эксперименте система с помощью четырех разнесенных по глубине автономных цифровых гидроакустических регистраторов обеспечивает непрерывную запись сигналов на SD-карту в течение 36 часов, имитируя возможные положения гидроакустической приемной антенны подводного аппарата, осуществляющего позиционирование по находящимся на шельфе гидроакустическим маякам. Регистраторы помимо акустического тракта снабжены датчиками гидростатического давления для непрерывной записи глубины погружения. Имея общую длину до 1000 м, конструкция системы допускает ее постановку как в дрейф, так и на якорь. Надводная часть в виде буя-вехи снабжена GPS-приемником и радиопередатчиком для отслеживания обеспечивающим судном ее местоположения в реальном времени. В данной работе представлено описание элементов системы и результаты ее тестирования в натуральных условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой, требующей решения в связи с тенденциями развития подводных робототехнических комплексов высокой автономности, является обеспечение позиционирования подводного аппарата, выполняющего работы без всплытия на поверхность и в отсутствие судов обеспечения. Так, в США в настоящее время активно ведутся теоретические и экспериментальные работы в направлении создания подводного аналога системы GPS [1]. Как зарубежные, так и отечественные исследования сопровождаются значительными объемами натуральных экспериментов по изучению распространения звука на большие дистанции [2, 3].

Одной из задач исследований является определение для подводного аппарата диапазона глубин, в котором может осуществляться при данной гидрологии уверенный прием навигационных и связных сигналов от гидроакустических маяков. Эта задача предполагает численное, а также физическое моделирование процессов распространения звука в среде, причем последнее связано с расстановкой гидроакустических излучателей и приемных систем на больших дистанциях в условиях морских полигонов.

Подготовка и проведение гидроакустических экспериментов в натуральных условиях сопряжены с прокладкой сигнальных кабельных линий, которые в условиях эксплуатации подвержены воздействию различного рода помех. В то же время использование кабельных линий, особенно большой длины, усложняет и удорожает постановку эксперимента, а зачастую и ограничивает функциональные возможности измерительной аппаратуры.

В тех случаях, когда получение данных в реальном времени не является определяющим фактором, альтернативой передачи сигналов по кабельным линиям связи становится использование автономных регистраторов – как в виде самостоятельных устройств, так и в составе гидрофизических или гидроакустических станций. Отечественный и зарубежный опыт разработки и эксплуатации подобных устройств [4–6] свидетельствует о широком диапазоне решаемых с их помощью задач, незаменимости их при глубоководных исследованиях, а также при регистрации акустических сигналов и шумов на больших по площади акваториях.

¹ 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (4232) 311631.
E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

В процессе выполнения экспериментальных исследований в области дальней подводной навигации и связи нами был сделан вывод о необходимости применения гидроакустических регистраторов с характеристиками, обеспечивающими получение новой информации об особенностях распространения сигналов на протяженных акустических трассах. Не заменяя традиционно используемые в этих целях, но дорогостоящие и сложные в эксплуатации многоканальные вертикальные гирлянды гидрофонов, регистраторы обладают преимуществами при адаптации к задачам эксперимента: могут быть оперативно развернуты в виде распределенных приемных систем, в том числе вертикальных гирлянд, поставлены на грунт или закреплены на контролируемых объектах. Кроме того, синхронный прием сигналов гидроакустических маяков заглубленными на различных горизонтах регистраторами позволяет верифицировать разрабатываемые расчетные модели распространения сигналов и оценить возможность приема навигационной и связной информации подводными аппаратами в заданном диапазоне глубин. Ниже изложены результаты, полученные в ТОИ ДВО РАН по созданию таких устройств для экспериментальных исследований.

1. Состав и технические характеристики автономного регистратора

Для решения задач по приему акустических сигналов на глубинах до 1000 метров в 2015–2017 гг. разработан, изготовлен и прошел проверку в лабораторных и натуральных условиях комплект автономных цифровых гидроакустических регистраторов звукового диапазона частот. С учетом больших дистанций и особенностей постановки экспериментов основными требованиями при разработке регистраторов были высокая чувствительность, компактность, длительность записи акустических сигналов на SD-карту не менее 36 часов.

Каждый автономный цифровой гидроакустический регистратор представляет собой устройство, предназначенное для непрерывной регистрации акустических колебаний и текущей глубины его погружения. Регистратор, внешний вид которого представлен на рис. 1., имеет цилиндрический гермокорпус из стали 12X18Н10Т с крышками, на которых расположены гермоввод гидрофона и датчик глубины. Гидрофон типа ПР-1 находится в ограждении и защищен мелкоячеистой сеткой. Количество автономных регистраторов в комплекте (4 шт.) может быть увеличено при необходимости.



Рис. 1. Гидроакустические цифровые регистраторы

Электронная часть устройства, находящаяся в гермоконтейнерах, включает (рис. 2): тракт усиления сигналов гидрофона с аналоговым фильтром низких и высоких частот, 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микроконтроллер STM32F103, модуль определения глубины, накопитель данных на основе SD-карты, термокомпенсированный генератор 8 МГц (ТСХО) и блок электропитания (БП), поддерживающий автономную работу устройства без подзарядки в течение 36 часов. Тракт усиления акустических сигналов с полосовой фильтрацией выполнен на ОУ ОРА2353, в качестве АЦП применена микросхема ADS8131.

Формирование, накопление пакетов информации от гидрофона и датчика глубины с записью на SD-карту осуществляется под управлением микроконтроллера. Распаковка информации производится после извлечения карты из устройства с дальнейшим преобразованием и сохранением ее в стандартных звуковом и текстовом форматах данных.

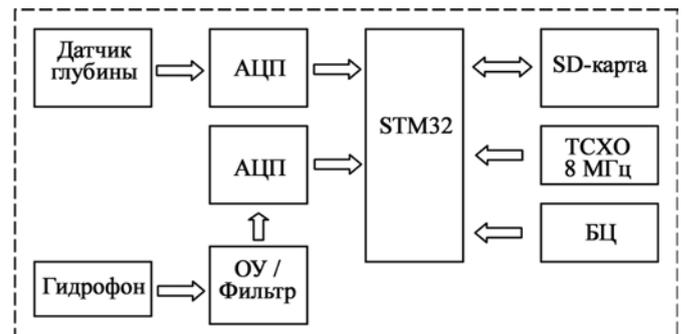


Рис. 2. Структурная схема регистратора

Формат сохраняемых значений – 16-разрядный знаковый целочисленный дополнительный двоичный код (Signed Integers 16). SD-карта работает в 4-битном режиме SD-интерфейса с файловой системой FAT32. При данной частоте дискретизации (24 кГц) и разрядности (16 бит) скорость заполнения памяти составляет 164,8 Мб/ч, или 3,86 Гб/сутки.

Технические характеристики автономного цифрового гидроакустического регистратора:

- рабочая полоса частот – 40–12000 Гц;
 - чувствительность гидрофона – 160 мкВ/Па;
 - коэффициент усиления сигналов – до 4500;
 - динамический диапазон – 75–80 дБ;
 - точность определения глубины – $\pm 0,1$ м;
 - частота измерения глубины – 4 Гц;
 - тип накопителя – SDHC карта до 32 Гб;
 - автономность по питанию – 36 часов;
 - тип аккумуляторных батарей – Li-Ion;
 - допустимая глубина погружения – 1000 м;
 - габариты с гидрофоном – $\varnothing 75 \times 530$ мм;
- масса в сборе на воздухе – 5,1 кг, в воде – 3,4 кг.

В тех случаях, когда необходима синхронизация материала, записываемого на SD-карты регистраторов, может быть использовано несколько способов, в том числе дополнение электронной части устройств блоками системы единого времени (СЕВ). Однако на практике с достаточной точностью задача решается за счет применения гидроакустического синхронизирующего устройства – пингера, излучающего короткие акустические сигналы типа М-последовательности, синхронизированные с временной шкалой GPS/ГЛОНАСС-спутников с точностью 10^{-6} секунды. Группа регистраторов перед расстановкой погружается за борт в непосредственной близости от излучателя пингера, где и происходит синхронная запись его сигнала. Таким образом, в начале записи будут присутствовать метки времени (М-последовательности), что позволит, точно определять временные интервалы в записи при последующей камеральной обработке. Синхронизация пингера с GPS-спутниками производится каждую минуту.

Другим способом синхронизации является одно-временное воздействие в воздушной среде на гидрофоны акустическим сигналом в контейнере «малого объема». Для этого все регистраторы загружают в контейнер с жесткими стенками, гидрофоны располагаются рядом. В объеме камеры внешним излучателем формируется низкочастотный акустический сигнал, позволяющий на записях сформировать метку времени. Процедуры синхронизации могут быть повторно проведены после окончания эксперимента.

2. Распределенная вертикальная автономная приемная система

Исследования и разработки отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН включают выполнение экспериментальных работ в заливе Петра Великого и юго-западной части Японского моря с использованием стационарных излучающих систем и постановкой радиогидроакустических буев. Обработываются методики, режимы и схемы применения гидроакустических сигналов различных типов, в том числе сложных сигналов, позволяющих при корреляционной обработке достичь высоких параметров разрешения по времени и на этой основе повысить точность определения дистанций между точками излучения и приема сигналов. Динамика скорости звука на этих весьма протяженных дистанциях является отдельным предметом исследований, что также предполагает развитие специальных технических средств получения экспериментальных данных.

Учитывая преимущества гидроакустических регистраторов в плане адаптации к задачам эксперимента и условиям его проведения, на их основе нами была специально разработана, изготовлена и прошла тестирование в натуральных условиях распределенная вертикальная автономная приемная система. Ее конструкция предполагает произвольное разнесение по глубине точек приема гидроакустических сигналов как для верификации численного моделирования распространения звука, так и для имитации возможных положений в этих точках гидроакустической антенны подводного аппарата, осуществляющего позиционирование по удаленным гидроакустическим маякам или получающего от них команды управления. Система представляет собой гирлянду из четырех гидроакустических цифровых автономных регистраторов, подвешенную через эластичные амортизирующие лонжи к группе плавучестей и поверхностному бую-вехе (рис. 3). Система включает следующие элементы (рис. 4): капроновый фал диаметром 8 мм, набор плавучестей, выборочный конец, веху с приемником GPS и радиопередатчиком, амортизирующие лонжи, набор быстросъемных зажимов, концевой груз или якорное устройство. GPS-приемник и радиопередатчик на вехе установлены для отслеживания в реальном времени местоположения системы сопровождающим судном.

Так как обычно существуют ограничения по грузоподъемности палубных механизмов и рабочему пространству на палубе судна, при постановке и выборке приемной системы используются быстросъемные зажимы, которыми на фале крепятся

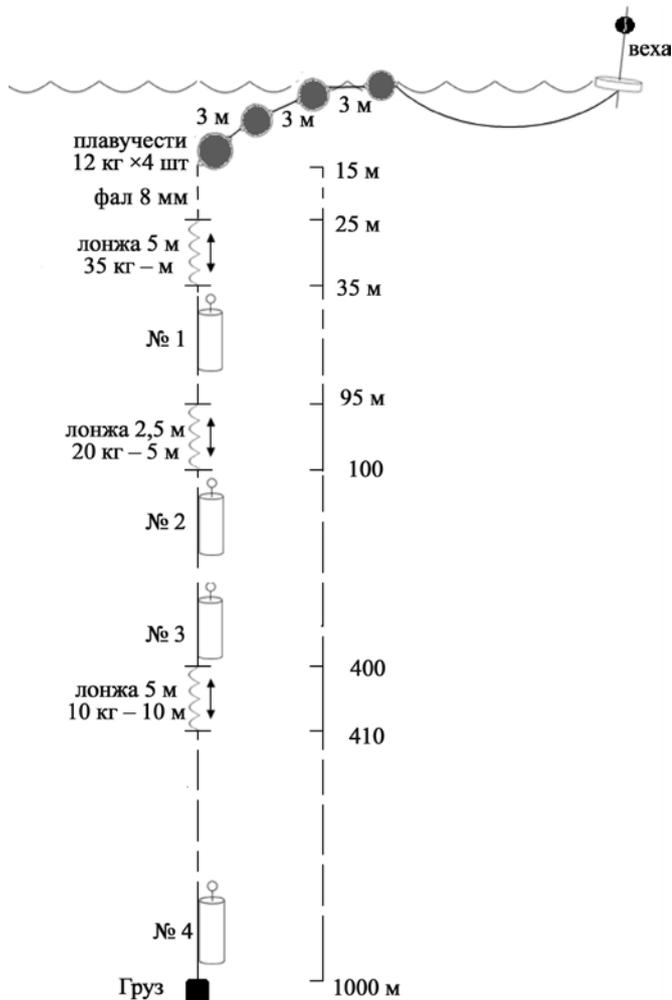


Рис. 3. Схема постановки распределенной приемной системы

автономные регистраторы, лонжи и плавучести, при этом положение каждого элемента задается разметкой на фале. Изменение заглубления регистраторов производится после подъема на борт судна всей системы с последующей переустановкой их в новую позицию. Разнесенные по фалу амортизирующие лонжи обеспечивают защиту гидрофонов от вибрации под воздействием поверхностного волнения и течения. Все элементы системы могут быть оперативно заменены или дополнены, а система переконфигурирована. Для постановки-выборки системы используется электромеханическая лебедка.

3. Результаты тестирования распределенной приемной системы в натуральных условиях

На морской экспериментальной станции Мыс Шульца ТОИ ДВО РАН проведено предварительное тестирование приемной системы при исследовании особенностей распространения акустической энергии вблизи океанического свала (области перехода из шельфовой зоны в глубокое море). Система устанавливалась с яхты «Светлана» на расстоянии 30 км от гидроакустического стационарного излучателя, расположенного у береговой черты вблизи мыса Шульца на глубине 35 м. В эксперименте фазоманипулированный сигнал типа М-последовательности с несущей частотой 400 Гц (511 символов, 4 периода несущей частоты на символ) излучался дважды в минуту. После подъема системы принятые и записанные регистраторами сигналы подвергались корреляционной обработке для получения импульсной характеристики соответствующих волноводов.

Во время эксперимента были проведены батиметрическая съёмка акустической трассы и гидрологическое профилирование в месте постановки системы. По результатам измерений был построен профиль вертикального распределения скорости звука (рис. 5), определена глубина подводного звукового канала и проведено математическое моделирование картины распространения сигнала в лучевом приближении (рис. 6).

Из рис. 5 видно, что до глубины порядка 30 м скорость звука практически постоянна и составляет 1505 м/с, ниже обнаруживается слой скачка и скорость звука резко падает до значения 1460 м/с на отметке 100 м. Минимум скорости звука (1457 м/с) зарегистрирован на глубинах 200–250 м.

Результаты численного моделирования показали, что слой скачка должен полностью отражать восходящие лучи в сторону дна, а канализация энергии должна происходить в диапазоне 200–400 м.

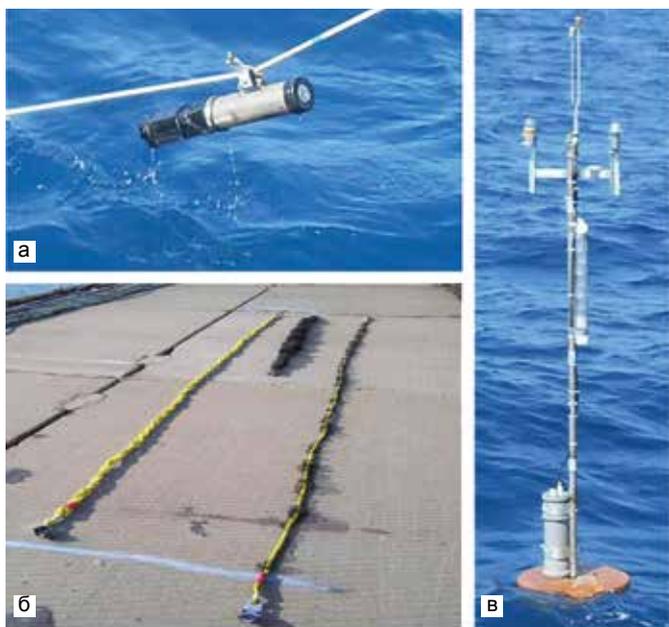


Рис. 4. Внешний вид элементов приемной системы: а – автономный гидроакустический регистратор на фале; б – амортизирующие лонжи; в – надводная часть в дрейфующем варианте постановки

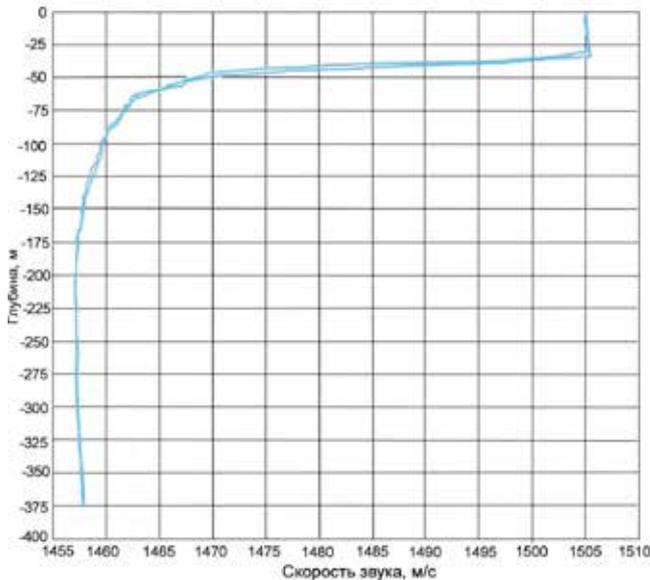


Рис. 5. Профиль вертикального распределения скорости звука в точке постановки приемной системы

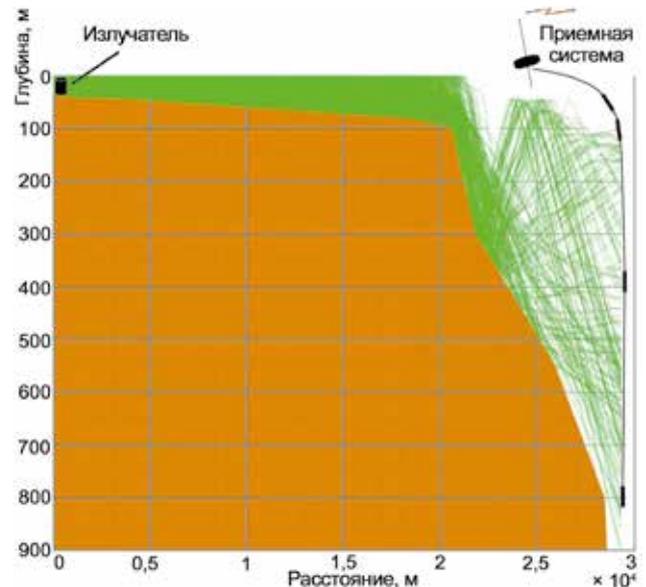


Рис. 6. Лучевая картина распространения акустической энергии на трассе «излучатель–приемная система»

Отдельные лучи достигают предельной глубины моделирования (900 м).

По результатам обработки акустической информации было определено, что на гидроакустических регистраторах № 1 и № 2 (глубина погружения 50 и 100 м соответственно) за всё время проведения эксперимента зондирующий сигнал зарегистрирован не был. На рис. 7 и 8 представлены результаты обработки информации с регистраторов № 3 и № 4 (максимальная глубина погружения соответственно 390 и 800 м, разрешение во времени составляет 10 мс).

До глубины 203 м гидрофон № 4 опускался в течение 5 мин со средней скоростью 0,7 м/с. За время спуска сигнал зарегистрирован не был. Начиная с 203 м до 395 м наблюдался стабильный приём сигнала, принято 40 посылок. Далее до предельной глубины погружения сигнал не регистрировался. С 62-й минуты погружения (гидрофон № 4 находился на глубине 802 м) до момента начала подъёма системы фиксировался крайне низкий уровень сигнала, сравнимый с уровнем окружающих шумов, восстановить отклик канала при таком уровне не удалось.

Подъём системы начинался со 182-й минуты измерений. До отметки 464 м сигнал на гидрофоне регистратора № 4 не наблюдался, в диапазоне глубин 464–177 м фиксировался стабильный один приход сигнала. Выше указанного диапазона сигнал не наблюдался.

На гидрофоне регистратора № 3 начиная с 50-й минуты записи (глубина 390 м) стабильно фиксируется один приход сигнала. Отсутствие сигнала на этом гидрофоне до 50-й минуты связано с паузой в рабо-

те излучателя. Этот интервал времени соответствует 24–62-й минутам для регистратора № 4 (рис. 8).

Из приведенного анализа записанной регистрацией информации следует, что полученные результаты по приему сигналов на различных глубинах полностью коррелируют с картиной распределения акустической энергии в точке постановки системы (рис. 6).

Как постановка, так и выборка системы потребовали около 1 ч, что является допустимым для графика работ в изменяющихся метеоусловиях. Тем не менее при оснащении обеспечивающего судна более мощной лебедкой указанное время может быть уменьшено.

Таким образом, предварительное тестирование распределенной вертикальной автономной приемной системы показало, что регистраторы сигналов и система в целом оказались работоспособны, позволив в условиях достаточно сложного гидроакустического эксперимента получить новый и достоверный результат. Тем самым подтверждена правильность выбранных технических решений и возможность применения разработанных устройств в задачах исследования гидроакустических полей, в том числе на больших дистанциях от источника сигнала. Распределенная приемная система может быть также применена в качестве имитатора возможных положений гидроакустической антенны подводного аппарата при отработке систем звукоподводной связи и позиционирования на больших дистанциях от гидроакустических маяков.

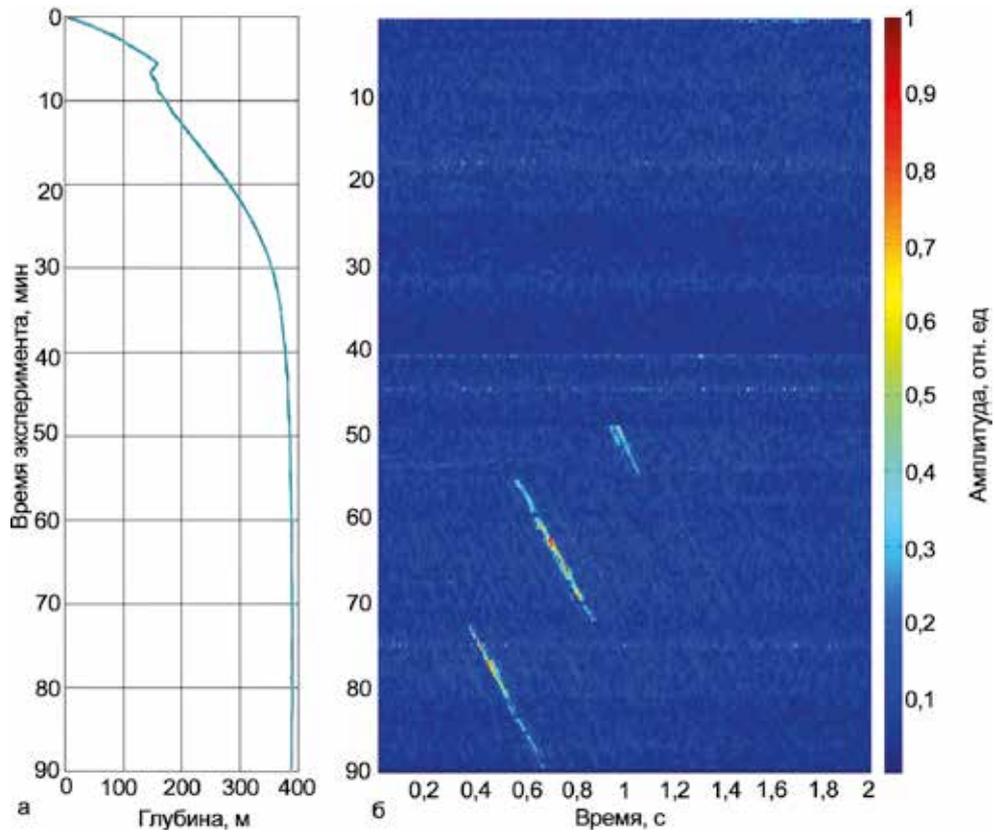


Рис. 7. Результаты обработки информации с регистратора № 3: а – глубина нахождения регистратора во время измерений; б – результаты обработки полученной акустической информации

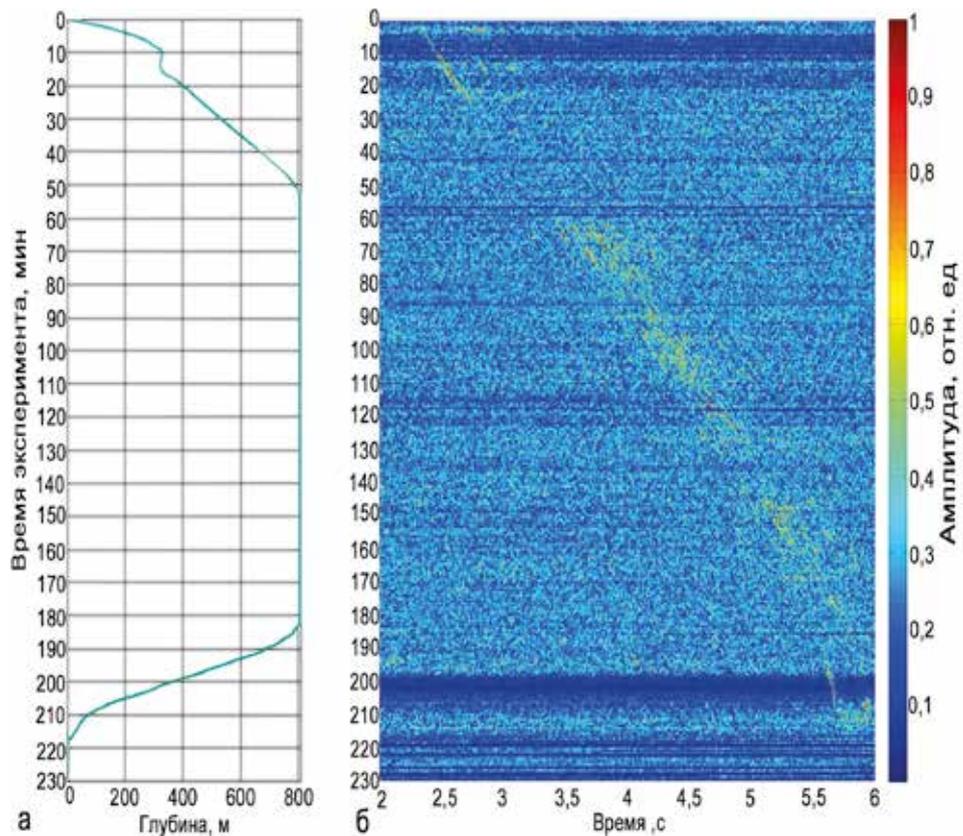


Рис. 8. Результаты обработки информации с гидроакустического регистратора № 4: а – заглубление регистратора во время измерений; б – результаты обработки полученной акустической информации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестирование распределенной вертикальной автономной приемной системы продемонстрировало ее функциональность и работоспособность в обусловленном интервале времени и заявленном диапазоне глубин. Компактность и невысокая масса элементов системы, а также применение быстросъемных зажимов для их крепления позволили обеспечить оперативность постановки и выборки системы. Характеристики автономных гидроакустических реги-

страторов позволяют осуществлять качественный прием и запись информации, а в составе распределенной системы успешно применяться для исследований распространения акустической энергии как в условиях шельфа, так и в глубоком море.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке госбюджетной темы № АА-АА-А17-117030110031-6 и темы № ААА-А-А18-118071390002-2 программы «Приоритетные научные исследования в интересах комплексного развития Дальневосточного отделения РАН».

ЛИТЕРАТУРА

1. Precision Ocean Interrogation, Navigation, and Timing (POINT) POSYDON – MIT – BBN. – URL: <http://mseas.mit.edu/Research/POSYDON-POINT/index.html#> (дата обращения: 04.04.2019).
2. Lermusiaux P.F., Subramani D.N., Lin J., Kulkarni C.S. et al. *A Future for Intelligent Autonomous Ocean Observing Systems // J. Marine Res.* 2017. Vol. 75. P. 765–813.
3. Моргунов Ю.Н. Исследование особенностей акустической подводной дальнометрии в зимних гидрологических условиях Японского моря // *Подводные исследования и робототехника.* 2017. № 1 (23). С. 57–61.
4. Кочетов О.Ю., Смирнов П.Н. Четырехканальный высокоскоростной цифровой регистратор сигналов // *Материалы XVI школы-семинара им. Л.М. Бреховских «Акустика океана».* М.: ГЕОС, 2018. С. 325–328.
5. Caldas-Morgan M., Alvarez-Rosario A., Padovese L.R. An autonomous underwater recorder based on a single board computer // *PloS one.* 2015. Vol. 10, No. 6. e0130297.
6. Самченко А.Н., Швырев А.Н., Пивоваров А.А., Коротченко Р.А. Распространение низкочастотного акустического сигнала в мелком море с учетом влияния неоднородностей в донных осадках // *Подводные исследования и робототехника.* 2011. № 2 (12). С. 52–56.

