

АВТОНОМНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ АКУСТИКО-ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ «МОЛЛЮСК-19» И «МОЛЛЮСК-21»

© 2024 г. **А. Н. Рутенко^а**, **Д. Г. Ковзель^{а,*}**, **В. А. Гриценко^а**

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

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

Поступила в редакцию 09.10.2023 г.

После доработки 17.03.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

Автономные вертикальные акустико-гидрофизические измерительные системы «Моллюск-19» и «Моллюск-21» разработаны для исследования пространственно-временных неоднородностей поля скорости звука и модовых структур низкочастотных звуковых полей и внутренних волн. В статье приведено описание схемотехнических, конструктивных и программных решений, обеспечивших решение основной задачи, поставленной при разработке новых систем — улучшение их эксплуатационных качеств. Возможности применения систем для решения поставленных задач иллюстрируются результатами натурных измерений, проведенных на шельфе залива Посыет Японского моря.

Ключевые слова: вертикальная приемная система, вертикальная антенна, температурный профиль

DOI: 10.31857/S0320791924040154 **EDN:** XAOZWA

1. ВВЕДЕНИЕ

Вертикальные акустико-гидрофизические системы являются полезным инструментом решения как чисто научных задач, таких как исследования влияния пространственно-временных неоднородностей на распространение звука на шельфе и исследования модовых структур низкочастотных звуковых полей и внутренних волн [1], так и более прикладных, например, в качестве приемника системы звукоподводной связи [2]. Общим для всех этих задач является необходимость долговременного и непрерывного измерения вариаций акустического давления синхронно с гидрологическими параметрами на нескольких горизонтах, что предполагает достаточно традиционный набор первичных преобразователей (ПП) — датчиков температуры, гидрофонов, иногда приемников колебательной скорости или ускорения.

Однако при схожих принципах измерений и составе датчиков, имеется множество вариантов конструктивного исполнения таких систем, каждый из которых характеризуется своими достоинствами и недостатками. Наиболее часто встречающимся вариантом в настоящее время можно считать установленную на гибком носителе акустическую приемную систему с аналоговой передачей сигналов

ПП до накопителя, в котором имеются каскады предварительной аналоговой обработки сигналов с фильтрами защиты от наложения спектров, многоканальный синхронный АЦП, как правило архитектуры SAR (последовательного приближения), и собственно накопитель данных, выполненный на картах флеш-памяти, жестком диске или SSD. Иногда вместо синхронного АЦП применяются аналоговые устройства выборки-хранения, коммутатор и быстродействующий одноканальный АЦП. Такая система дополняется отдельными независимыми регистраторами температуры и приборами регистрации других гидрологических параметров (например, гидростатического давления и скорости течения), которые представляют собой отдельные устройства, устанавливаемые на том же гибком носителе. Так, в статье [3] описано применение в эксперименте SWARM, проведенном на Атлантическом шельфе, 16-канальной автономной вертикальной акустической системы, которая была дополнена четырьмя независимыми регистраторами температуры. Система обеспечивала акустические измерения в частотном диапазоне до 1 кГц. Подобные измерительные системы применялись и в более поздних экспериментах PRIMER [4] (шельф Новой Англии) и ASIAEX [5] (Южно-Китайское море).

Такие системы имеют ряд качественных и эксплуатационных недостатков, обусловленных вышеописанными техническими решениями:

- Необходимость передачи большого количества аналоговых сигналов по кабелю требует соответствующего количества проводов в кабеле, что делает систему достаточно жесткой и громоздкой. Состав и количество ПП невозможно изменить без серьезной переделки системы, что снижает возможности адаптации системы к задачам и условиям конкретного эксперимента. В случае повреждения кабеля или ПП их быстрая замена невозможна в экспедиционных условиях.
- Передача сигналов по кабелю в аналоговом виде приводит к наводкам и взаимному проникновению сигналов разных ПП.
- Необходимость синхронизации записей множества разнородных устройств увеличивает затраты времени и усложняет обработку данных, повышает вероятность человеческих ошибок.

Первых двух недостатков лишена система, в которой не только гидрофизические, но и акустические ПП имеют каждый свой отдельный регистратор с накопителем данных на картах памяти, описанная в статье [6]. Акустические сигналы в этой системе записываются в каждом регистраторе независимо, а их взаимная синхронизация производится при обработке данных. Для этого используются записанные каждым регистратором сигналы внешних акустических маяков, служащих также для позиционирования системы. Однако очевидно, что обработка таких записей еще более трудоемка.

Улучшения качества измерения можно добиться, совместив первичные преобразователи с АЦП в модулях датчиков (МД) и передавая сигналы в накопитель в цифровой форме. Именно такое решение применено в комплексе «Нева-ИПФ» [7], который может применяться в буксируемом и вертикальном вариантах. Система состоит из последовательно установленных на гибком носителе и соединенных кабельными вставками цифровых гидрофонов ЦГП-1 или ЦГП-3, синхронизируемых от аппаратного блока с накопителем данных и источником питания. Гидрофизических датчиков комплекс «Нева-ИПФ» не имеет.

Лаборатория акустического зондирования океана ТОИ ДВО РАН, руководимая до 2020 г. доктором физико-математических наук А. Н. Рутенко, имеет многолетний опыт разработки и

применения ряда многоканальных вертикальных измерительных приемных систем с общим названием «Моллюск» [8–10]. Эти системы успешно применялись на шельфе Японского моря, а «Моллюск-07» и на северо-восточном шельфе о. Сахалин, где измерения проводились по заказам нефтедобывающих компаний «Эксон Нефтегаз Лимитед» и «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани».

В 2018 г. были сформулированы технические требования к системам нового поколения и компании-заказчики инициировали их разработку. Основным отличием от систем предыдущего поколения должно было стать существенное улучшение эксплуатационных характеристик. Потребовались системы, способные как к многочисленным кратковременным постановкам в течение полевого сезона, так и к долговременной работе. Масса и конструкция системы должны обеспечить возможность постановки и подъема без использования судовых механизмов как с крупного судна, так и с лодки, на глубинах от 10 м. Повысились требования по времени первичной обработки данных (спектрограммы, оценки уровней) — результаты часто необходимы сразу после подъема системы, в экспедиционных условиях. Набор измеряемых новой системой физических величин можно считать типовым — вариации акустического давления, гидростатическое давление (глубина), температура воды.

Результатом этой разработки и стали «Моллюск-19» и ее более поздняя модификация «Моллюск-21» [11]. Системы аппаратно и программно унифицированы с устройствами измерительного комплекса «Шельф-14» [12], что ускорило разработку и сделало применение новых систем удобнее.

КОНСТРУКЦИЯ

Конструктивно «Моллюски» представляют собой (рис. 1) последовательно соединенные кабельными вставками регистратор и модули датчиков (МД), укрепленные на несущем тросе. Модули датчиков и кабели взаимозаменяемы как внутри каждого из «Моллюсков», так и между ними и могут соединяться в любом порядке и любом необходимом количестве, что позволяет легко конфигурировать системы под задачи конкретного эксперимента. В рабочем положении системы ниже регистратора крепится акустический размыкатель и якорь, а на верхнем конце измерительной

линии — поплавков. При подъеме якорь сбрасывается при помощи акустического размыкателя. Оба конца линии — поплавок и модуль регистратора — имеют положительную плавучесть, что упрощает подъем системы и снижает механические нагрузки на измерительную линию.

СОСТАВ СИСТЕМ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В качестве датчика акустического давления во всех МД «Моллюсков» используется гидрофон МПУ, для аналого-цифрового преобразования применена микросхема AD7767-2, как в измерительном канале станции «Шельф-14». Этот АЦП выполнен по комбинированной архитектуре сигма-дельта — SAR (последовательного приближения) и его первичная частота дискретизации входного сигнала в 32 раза превышает частоту формирования выходных 24-разрядных слов данных. Благодаря этому отсутствует необходимость во входных аналоговых фильтрах защиты от наложения спектров (anti-aliasing) высокого порядка, являющихся основным источником шумов электроники. Достаточно ФНЧ 3-го порядка,

совмещенного с буферным усилителем, что существенно снижает собственные шумы и расширяет динамический диапазон акустического канала до 135–140 дБ. При предельных пиковых значениях акустического давления 2.4 кПа собственные шумы не превышают шумы тихого моря на шельфе. Таким образом, даже при мониторинге сейсморазведочных работ отсутствует необходимость переключения диапазонов чувствительности измерительных каналов, что существенно упрощает подготовку к постановке и расширяет возможности выбора точки постановки системы.

Частота дискретизации акустического сигнала программируемая и ограничивается скоростью записи на карту памяти по интерфейсу SPI — приблизительно 500 кБ/с. При 24-разрядном кодировании и 12-ти МД в составе системы частота дискретизации по каждому каналу не может превышать 14 кГц. Во всех постановках 2019–2023 гг. использовалась частота дискретизации 5053 Гц.

В МД, изготовленных для системы «Моллюск-19», применены 13-разрядные цифровые термометры DS1624, способные измерять температуру от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ с разрешением 0.031°C .

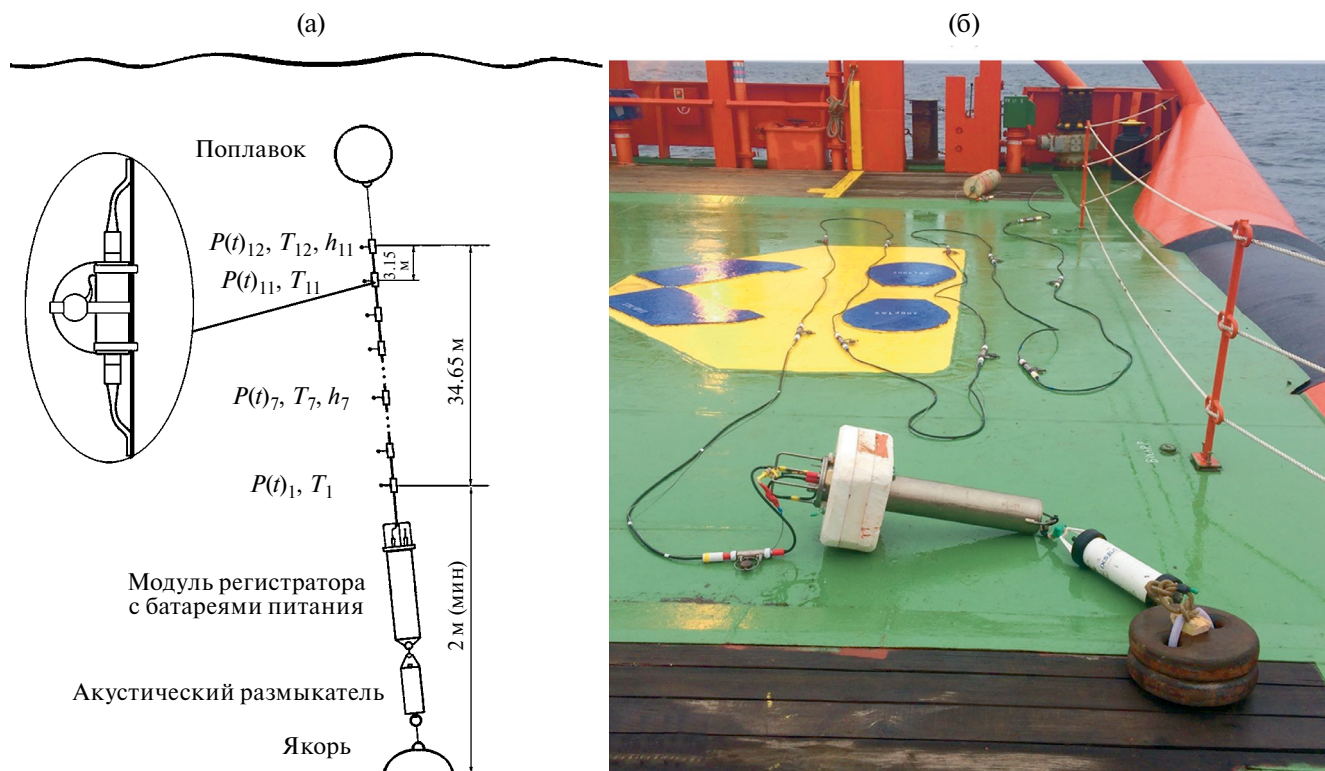


Рис. 1. (а) — Схема постановки автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-19» и (б) — ее фотография на борту судна перед постановкой.

В двух из 12 изготовленных МД имеются также прецизионные аналоговые датчики гидростатического давления PDCR-1830, а для преобразования их в цифровую форму используется встроенное в микроконтроллер модуля датчиков 10-разрядное АЦП, что обеспечивает точность измерения глубины 10 см. В модулях датчиков, изготовленных для «Моллюска-21», установлены датчики гидростатического давления температуры MS5837-30BA производства TE connectivity, обеспечивающие диапазон измерения давления до 30 бар с разрешением 0.2 мбар и температуры в диапазоне $-25^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$ с разрешением 0.0041°C . Датчики дешевы и при этом имеют стабильные параметры, однако не являются функционально и конструктивно завершенными. Полученные от них данные подвергаются специальной обработке в микроконтроллере МД — корректируются в соответствии с результатами фабричной калибровки, записанными в энерго-независимую память датчика, а гидростатическое давление корректируется в зависимости от температуры датчика. Полученные результаты представляются программой микроконтроллера в том же формате, который использован в «Моллюск-19», что обеспечивает совместимость МД между системами. Для установки MS5837-30BA изготовлены миниатюрные корпуса из нержавеющей стали, обеспечивающие герметизацию и хороший термодатчик с водой. Датчики в этих корпусах устанавливаются на торцах титановых корпусов МД через силиконовую проставку, обеспечивающую как гальваническую, так и температурную развязку. Частота опроса гидрологических датчиков программируемая, в настоящее время установлена 5 Гц. Необходимая абсолютная точность измерений для обеих систем обеспечивается кросс-калибровкой с гидрологическим зондом, производимой в начале каждого полевого сезона.

В настоящее время МД с разным составом гидрологических датчиков используются в системах смешанно, что обеспечивает достаточно полную информацию о глубине расположения модулей для обеих систем.

Как и АПАР «Шельф-14», регистраторы систем «Моллюск» имеют термокомпенсированную систему реальных даты-времени (RTCC), обеспечивающую уход времени не более 1 минуты в год.

Время автономной работы систем определяется батареями питания и при использовании 2-х блоков по 40 алкалиновых батареек типоразмера D составляет 20–25 суток.

РАБОТА СИСТЕМ «МОЛЛЮСК» ПО ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЕ

На рис. 2 представлена функциональная схема системы «Моллюск-21». Аналого-цифровое преобразование измеряемых физических величин производится в модулях датчиков. Результаты передаются в регистратор по кабельной линии в цифровой форме. Такая организация системы исключает межканальное проникновение сигналов, снижает шумы электроники и наводки. Данные продвигаются по измерительной линии к регистратору последовательно, ретранслируясь в каждом МД, что существенно снижает энергозатраты на передачу данных до регистратора.

Питание всей системы осуществляется от батарейных блоков, размещенных в корпусе регистратора. Регистраторы систем «Моллюск-19» и «Моллюск-21» идентичны и унифицированы с автономным подводным акустическим регистратором (АПАР) «Шельф-14». Работой всех частей регистратора управляет микроконтроллер

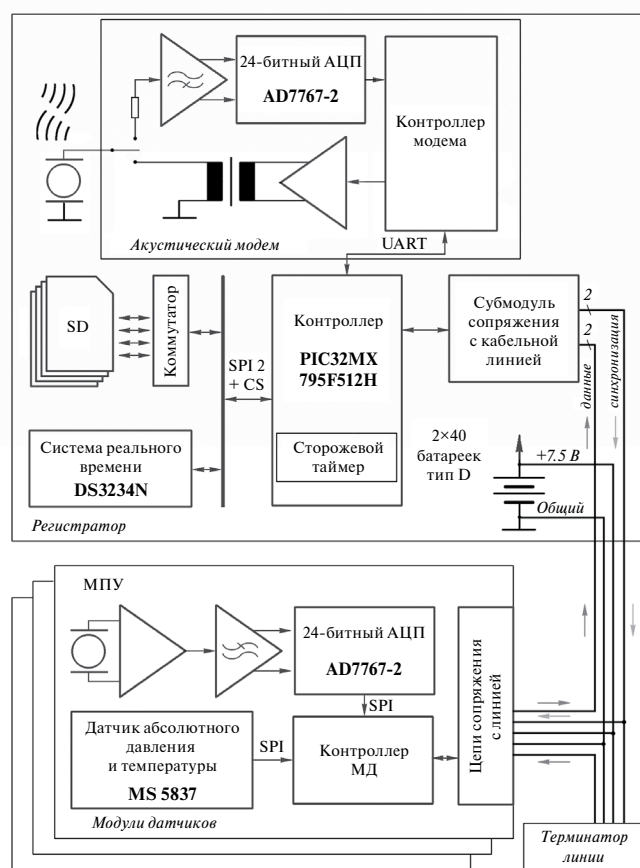


Рис. 2. Функциональная схема автономной вертикальной акустико-гидрофизической измерительной системы «Моллюск-21».

PIC32MX795F512H. Накопление данных производится на карты флеш-памяти SDXC или SDHC. Система реальных даты-времени (RTCC) на микросхеме DS3234N со встроенным термокомпенсированным кварцевым резонатором обеспечивает уход времени не более 1 минуты в год. Установка даты-времени может производиться как в ручном режиме от внешнего компьютера, так и автоматически, путем подключения приемника GPS/ГЛОНАСС к диагностическому разъему регистратора.

После включения питания контроллер регистратора начинает вырабатывать сигнал, подающийся по кабельной линии на все МД параллельно и синхронизирующий их работу. Каждый МД имеет свой микроконтроллер (PIC32MX150F128B), управляющий работой датчиков измеряемых величин, АЦП и других узлов МД. По синхросигналу регистратора контроллер МД начинает выводить в линию свое слово данных, принимая одновременно на вход данных слово от следующего МД. Слово данных содержит отсчет акустического сигнала (23 бита) и 1 бит низкочастотных (НЧ) данных, что обеспечивает автоматическую синхронизацию НЧ и акустических каналов при записи. Блок низкочастотных данных каждого МД встраивается в поток акустических данных этого МД с частотой опроса гидрологических датчиков. Он включает данные о глубине (гидростатическое давление) и температуре, индивидуальный номер МД (ID), записанный в идентификационную память его контроллера, и напряжение питания на входе МД, измеряемое встроенным АЦП контроллера. Напряжение питания МД используется для контроля целостности кабельной линии. Наличие ID, однозначно связанного с аппаратной частью МД, позволяет идентифицировать данные этого МД независимо от его положения в измерительной линии, что обеспечивает возможность автоматической фиксации текущей конфигурации системы при записи данных и автоматического выбора параметров модулей датчиков (чувствительность гидрофона, форма АЧХ, калибровочные коэффициенты датчиков температуры и глубины) при обработке записей регистратора «Моллюск». Вся эта информация содержится в специальном файле, формируемом по результатам калибровки систем и используемом программой обработки записанных «Моллюском» данных. Автоматизация обработки исключает риск человеческих ошибок и повышает надежность получаемых результатов.

Важно заметить, что к блоку низкочастотных данных могут быть добавлены дополнительные

блоки данных, например формируемые в модулях датчиков с расширенными или вообще иными функциями. Новая информация будет автоматически корректно идентифицирована контроллером регистратора и записана. При этом перепрограммирования контроллера регистратора не потребуется. Программы обработки записанных системой данных также корректно обработают типовый блок НЧ данных. Для обработки дополнительных блоков данных может быть написан дополнительный программный модуль.

После включения питания рабочая программа контроллера регистратора запускает передачу синхронизирующего сигнала на модули датчиков и ожидает, пока поток данных от МД стабилизируется (все МД войдут в синхронизацию с управляющим сигналом). Затем программа определяет количество подключенных МД и формирует слово состояния системы. Оно включает признаки исправности/неисправности акустических каналов модулей датчиков (смещение среднего уровня сигнала и слишком малая средняя амплитуда сигнала), число подключенных к регистратору МД, напряжение батарей питания регистратора, количество свободной для записи данных памяти в накопителе, время начала записи текущего файла. Слово состояния системы передается контроллеру акустического модема (см. рис. 2), а также заносится в заголовки формируемых файлов данных (как и в АПАР «Шельф-14»). Далее до конца каждого файла записывается поток данных от МД, дополненный синхронизирующими маркерами. Следует отметить, что в системах «Моллюск» использована та же структура потока данных, что и в ранее разработанных и используемых ТОИ кабельных системах серии «ЦРТС-08» [13]. В результате, «Моллюск-19» способен работать на кабельную линию и для ввода данных в компьютер в режиме реального времени могут использоваться уже имеющиеся аппаратные и программные средства.

В настоящее время оба «Моллюска» оснащены акустическим модемом [14]. При включении питания системы, после получения от контроллера регистратора слова состояния акустический модем подает через приемопередающий гидрофон (рис. 2) длинный звуковой сигнал и короткие сигналы, число которых равно числу подключенных к регистратору МД. Эти звуковые сигналы служат признаком нормальной работы системы.

Более полную информацию о состоянии системы можно получить, опросив «Моллюск» при помощи телекомандного устройства (ТКУ, TCU)

комплекса «Шельф-14». Аппаратура акустической связи обеспечивает проверку работоспособности систем перед постановкой и во время работы в море на дистанциях до 15 км, а в случае необходимости и поиск дрейфующей после сброса якоря системы методом трилатерации.

КРОСС-КАЛИБРОВКА СИСТЕМ «МОЛЛЮСК»

Кросс-калибровка, т.е. сравнение устройства с другими измерительными средствами, является типовой процедурой проверки оборудования, подготовленного к постановке в море. Но поскольку в составе «Моллюсков» на настоящее время не имеется сертифицированных гидрофонов и гидрологических датчиков, данные кросс-калибровки с сертифицированными измерительными средствами используются не только для проверки, но и для калибровки датчиков систем.

На рис. 3 показана система «Моллюск-19», подготовленная к калибровке в ходе экспедиции 2019 г. Акустические приемные тракты модулей датчиков сравнивались с АПАР на шумах судна, а датчики глубины и температуры калибровались по записям гидрологического зонда Valerport MIDAS CTD+500. Все оборудование было закреплено на деревянной палете и вывешено краном за борт судна, после чего были сделаны записи на нескольких глубинах. Практика показала, что для калибровки датчиков температуры и глубины такой калибровки вполне достаточно. Однако спектры акустических сигналов от гидрофонов МД подобны лишь до частот 600–800 Гц, а на более высоких частотах существенно различаются. Причина, вероятно, в большом пространственном разnose гидрофонов МД и в интерференции акустических волн на корпусе судна, дне и поверхности моря. Лучшие результаты (см. рис. 4) достигаются при калибровке группами из 4-х модулей датчиков и опорного гидрофона.

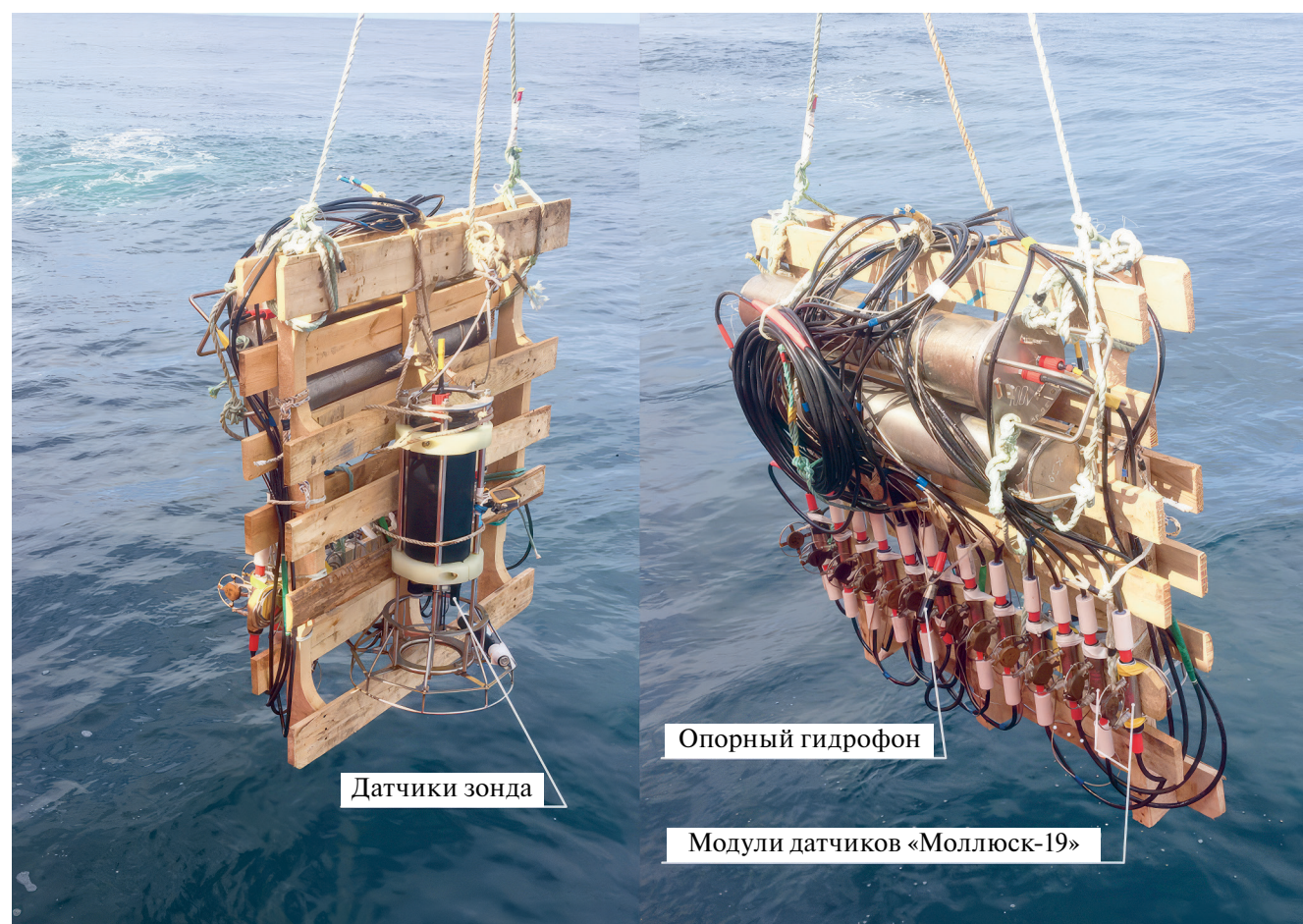


Рис. 3. Калибровка «Моллюск-19» по гидрологическому зонду Valerport MIDAS CTD+500 и АПАР №007.

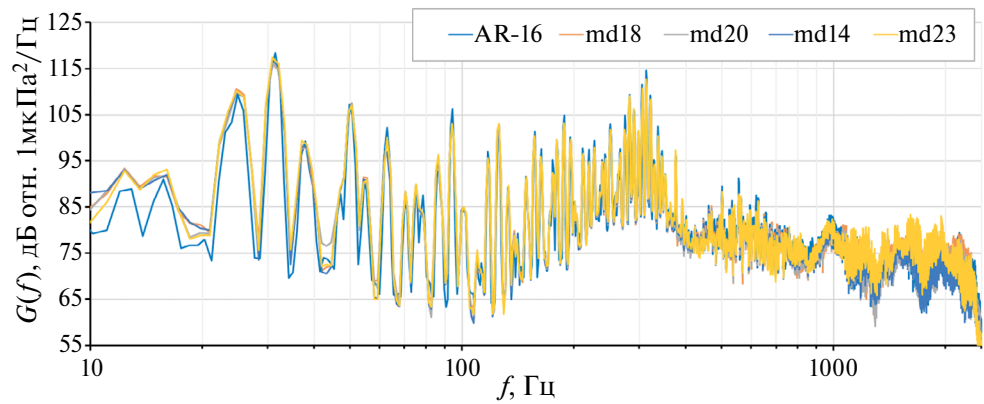


Рис. 4. Спектр акустического шума, измеренный опорным АПАР № 16 (голубая линия) и приведенные к нему спектры шумов, измеренные МД № 18, 20, 14, 23.

Результатом калибровки акустических приемных трактов являются значения чувствительности гидрофонов МД (см. таблицу) и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), применяемые к спектрам записанных сигналов при их обработке.

На рис. 4 показаны результаты калибровки четырех МД по сигналу, записанному опорным АПАР № 16, который предварительно прошел кросс-калибровку с другими АПАР. Голубая линия на рис. 4 представляет спектр шумов, записанных опорным АПАР, скорректированный на АЧХ этого АПАР. Таким образом, можно считать, что голубая линия соответствует реальным уровням акустического давления в точке установки опорного

гидрофона. Другие спектры на рис. 4 приведены к опорному путем обработки записей (синхронных с опорной) со значениями чувствительности согласно таблице, и коррекции полученных спектров на аппроксимирующие АЧХ:

$$I^r(f_i) = I^m(f_i) + M^{dB}(f_i) \text{ [дБ]},$$

где f_i — значение центральной частоты i -го частотного интервала, $I^r(f_i)$ — искомая интенсивность сигнала для i -го частотного интервала, $I^m(f_i)$ — интенсивность сигнала для i -го частотного интервала без коррекции, но с учетом чувствительности МД согласно Таблице, $M^{dB}(f_i)$ — АЧХ, выраженная в дБ.

Таблица. Чувствительность акустического тракта МД, приведенная к шкале входного напряжения АЦП ± 7.4 В.

№ МД	0	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12
$M_{\text{экв}},$ мкВ/Па	3918	3492	3148	3699	3412	3573	3532	3373	3112	3492	3492	3335

№ МД	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$M_{\text{экв}},$ мкВ/Па	3377	3251	3798	3908	3733	3606	4096	4164	3500	3443	3232	3524	3214

Корректирующие АЧХ были получены как аналитическая аппроксимация разности между спектром реального акустического сигнала и спектром, усредненным по группе МД с учетом чувствительностей, приведенных в таблице. Поскольку МД, изготовленные в 2019 г. (№№ 0–12) и в 2021 г. (№№ 13–25) имеют несколько отличающиеся номиналы элементов в аналоговых трактах гидрофонов, по результатам калибровки было принято две АЧХ:

для МД 0–12: $M^{dB}(f) = \frac{200}{f + 5} - \frac{f}{460} - 1.61 \text{ [дБ]},$

для МД 13–25: $M^{dB}(f) = \frac{200}{f + 5} - \frac{f}{1250} + 3 \text{ [дБ]}.$

Калибровка каналов глубины и температуры заключалась в расчете для каждого МД коэффициентов линейного уравнения, преобразующего

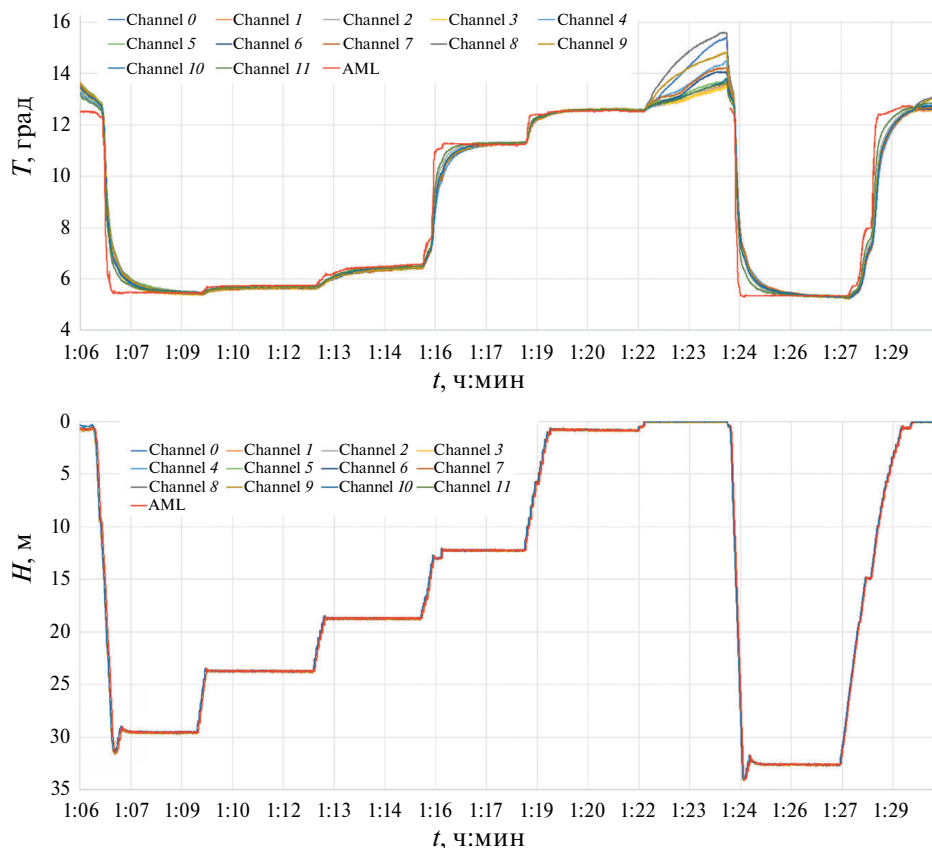


Рис. 5. Результат калибровки датчиков температуры и глубины системы «Моллюск-21» по записям CTD зонда.

данные, записанные регистраторами, в значения глубины и температуры, измеренной зондом. Результат такой аппроксимации для системы «Моллюск-21» показан на рис. 5. Видно, что датчики температуры на основе MS5837-30BA имеют значительные постоянные времени — до 15 с, однако они достаточно малы для регистрации распространяющихся через точку постановки системы внутренних волн.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ «МОЛЛЮСК»

Возможности систем «Моллюск» для исследования акустико-гидрофизических характеристик среды и параметров акустических импульсов можно оценить по данным испытаний, проведенных на шельфе залива Посьет Японского моря в июле 2023 г. «Моллюск-21» был установлен в точке в 1.5 км мористее береговой черты, с глубиной места 43 м. На расстоянии 500 м от точки постановки, с заякоренной лодки в море опускался мало-мощный пневматический импульсный излучатель

(пневмопушка). Выстрелы производились на горизонтах от 3 до 39 м, с шагом 3 м по глубине.

Для иллюстрации качества акустических приемных трактов систем «Моллюск» на рис. 6 показаны вариации акустического давления в импульсах пневмопушки, принятых модулями датчиков «Моллюска» на 12 горизонтах. Хорошо видны вариации формы принятых импульсов, обусловленные интерференцией акустических волн в точках приема. В нижнем ряду рисунка представлены импульсы, излученные на глубинах 6 (рис. 6а), 21 (рис. 6б) и 39 (рис. 6в) метров и измеренные опорной акустической станцией, гидрофон которой был установлен в 1.5 м под пушкой.

На рис. 7а приведены графики вариаций температуры воды за время эксперимента для каждого МД. Глубины МД, по показаниям датчиков гидростатического давления, в ходе эксперимента оставались неизменными, они отражены на рис. 7а в подписях на поле рисунка. На рис. 7б показаны рассчитанные по этим измерениям вариации температуры по глубине. Для интерполяции значений температуры между точками, в

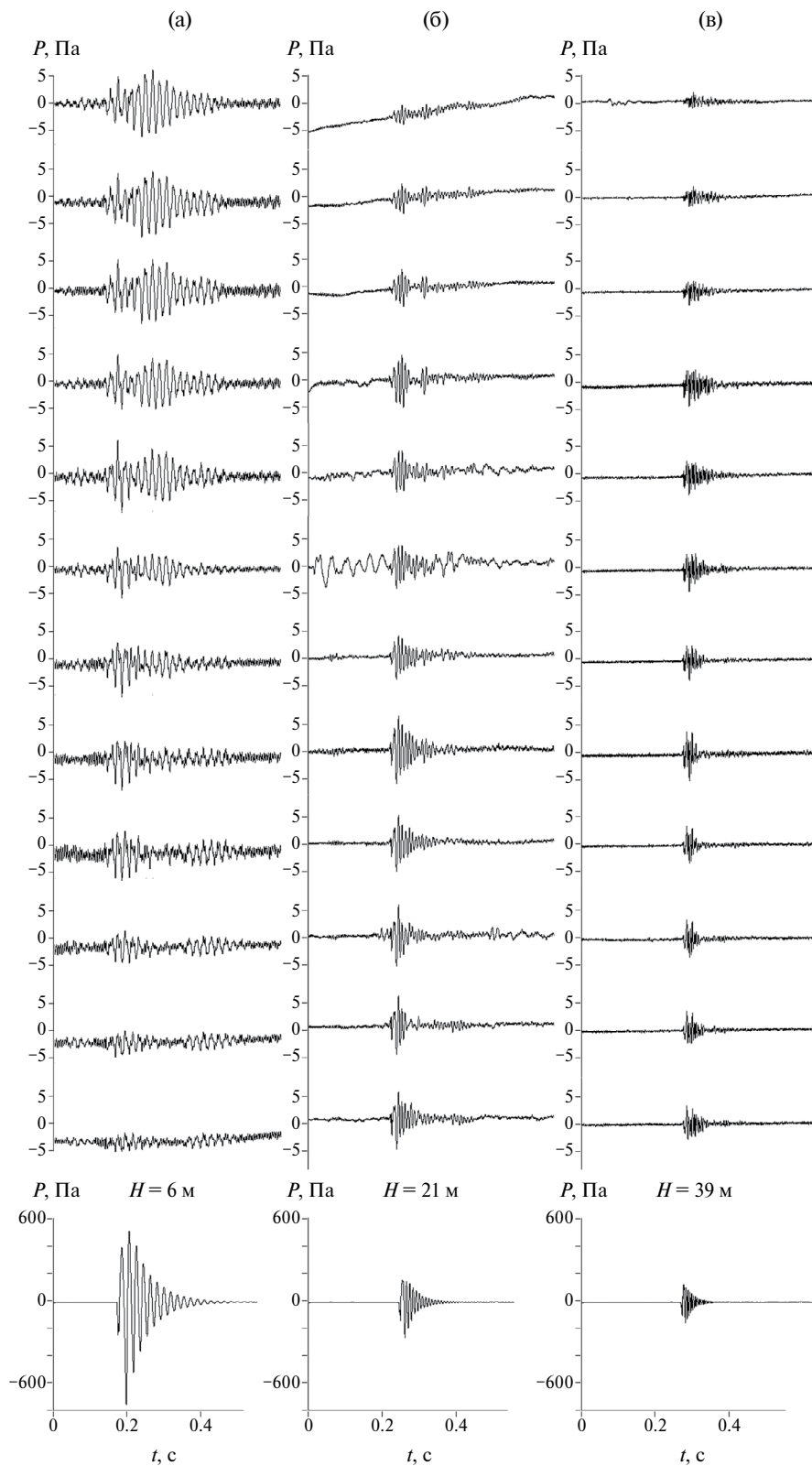


Рис. 6. Вариации акустического давления в импульсах, излученных пневмолушкой на глубине (а) — 6 м, (б) — 21 м и (в) — 39 м. Вариации акустического давления, измеренные опорным гидрофоном на расстоянии 1.5 м от излучателя — (нижний ряд) и на 12 горизонтах на расстоянии 500 м системой «Моллюск-21» — (верхние ряды). Гидрофоны приемной системы находились на глубинах 3.73, 6.7, 9.67, 12.67, 15.82, 18.77, 21.73, 24.75, 27.92, 30.89, 33.86, 36.7 м.

которых находились термодатчики МД, использовался сплайн Акима [15], предложенный Хироши Акима в 1970 г. Этот сплайн при построении коэффициентов интерполяционного полинома между любыми двумя узловыми точками использует только значения из пяти соседних узловых точек. Как следствие, система решаемых уравнений

достаточно проста. Преимуществом сплайна являются также малые значения нефизических колебаний в областях, где вторая производная базовой кривой быстро изменяется. Для продолжения интерполирующих кривых в области, где температурных датчиков не имелось, были добавлены две условные точки: 1 м — 22.3°C и 38 м — 13.8°C.

Модули датчиков систем «Моллюск» располагаются на расстоянии 3 м друг от друга, что достаточно, например, для расчета модового состава низкочастотного акустического поля, регистрируемого системой. Однако при измерении вертикального профиля температуры воды такой большой шаг может приводить к некоторым погрешностям. На рис. 8 приведен профиль, записанный зондом AML Oceanographic MINOS-X в интервале времени 12:39–12:42, (на рис. 7 этот интервал отмечен вертикальными черными линиями), а также показания температурных датчиков системы «Моллюск-21» в моменты начала и конца указанного временного промежутка и построенные по ним сплайны. Как можно видеть, во время эксперимента стратификация слоев морской воды была выражена очень резко, и количества горизонтов, на которых имелись термодатчики системы «Моллюск», недостаточно для точных измерений температурного профиля в зоне скачка температуры. Построенные сплайны дают приближенное, сглаженное представление о реальном распределении температуры морской воды. Тем не менее, рис. 7б позволяет получить качественное представление о процессах на шельфе. Следует заметить, что и профиль, записанный зондом, имеет существенную погрешность, порожденную уже не дискретностью измерений по вертикали, а значительным временем подъема зонда. Как можно видеть на рис. 7а, в указанный промежуток времени через точку зондирования проходила внутренняя волна (ВВ), профиль температуры непрерывно изменялся и полученный зондом профиль невозможно отнести к какому-то конкретному моменту времени.

Поскольку, по записям зонда, соленость морской воды во время эксперимента слабо менялась с глубиной, термоклин на горизонте 6 м (см. рис. 8) приводит к образованию соответствующего пикноклина, для которого характерны, в том числе, и показанные на рис. 7 короткопериодные ВВ. На рис. 7в показаны результаты расчета вертикальных смещений морской воды в проходящих через точку постановки системы ВВ. Расчет смещений $\xi(z, t)$ производился по формуле

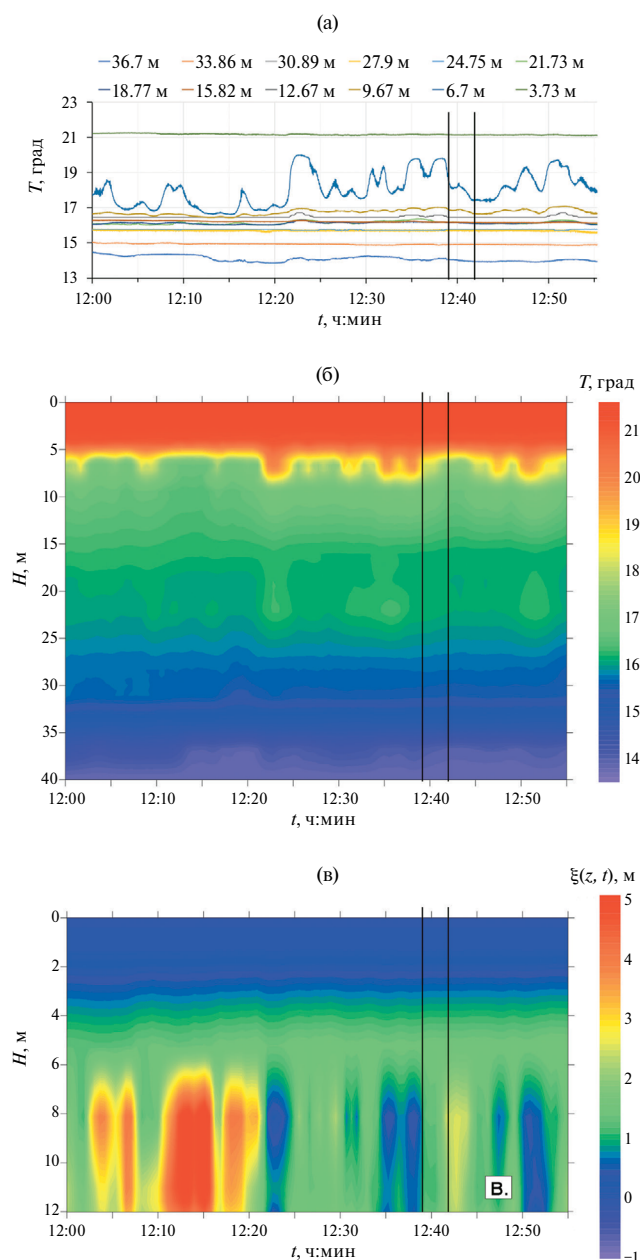


Рис. 7. (а) — Измеренные вариации температуры воды на 12 горизонтах, (б) — рассчитанные по этим измерениям вариации температуры воды по глубине, (в) — вертикальные смещения воды в приповерхностном 12-метровом слое.

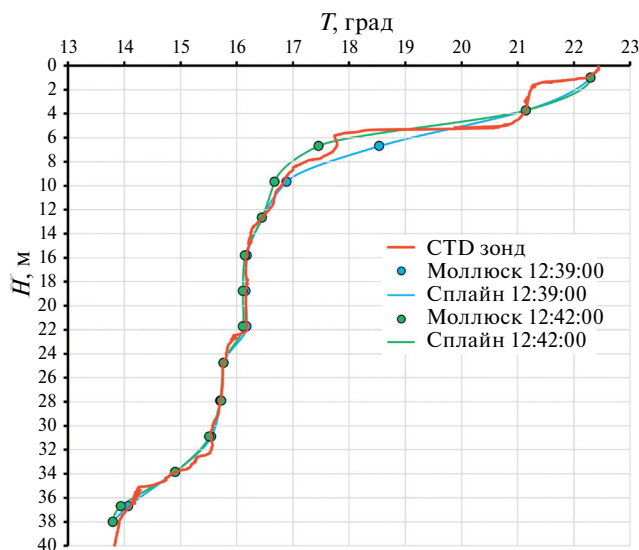


Рис. 8. Профиль температуры, снятый при помощи CTD зонда в интервале времени 12:39–12:42, показания температурных датчиков системы «Моллюск-21» в моменты начала и конца указанного временного промежутка (верхняя и нижняя точка — условные) и построенные по ним сплайны.

$$\xi(z, t) = \frac{\delta T(z, t)}{[d\langle T(z) \rangle / dz]}, \quad (1)$$

где $\langle T(z) \rangle$ — средняя за время эксперимента температура на горизонте; $\delta T(z, t)$ — отклонения температуры с течением времени от среднего значения на глубине z ; t — время.

Поскольку в формуле (1) используется линейная аппроксимация зависимости температуры от глубины, расчет смещений должен производиться с достаточно малым шагом по глубине. Для глубин, на которых система «Моллюск» не имеет датчиков температуры, использовались значения, рассчитанные при помощи сплайнов. Были произведены пробные расчеты с шагом 5 и 10 см, давшие близкие результаты. Дальнейшее уменьшение шага расчетов было признано нецелесообразным.

В дискретном по глубине (с шагом 5 или 10 см) и времени (для моментов отсчетов сигналов, синхронных для всех термодатчиков) представлении, знаменатель в формуле (1), т.е. градиент температуры по глубине, может быть выражен как:

$$d\langle T(z) \rangle / dz = (\langle T \rangle_{i+1} - \langle T \rangle_i) / (z_{i+1} - z_i),$$

где i и $i+1$ — номера горизонтов, $\langle T \rangle_i$ — средняя за время эксперимента температура на i -м горизонте, z_i и z_{i+1} — глубины i -го горизонта и горизонта выше i -го.

Эта величина, очевидно, соответствует горизонту, расположенному посередине между z_i и z_{i+1} . Тогда числитель в формуле (1), представляющий отклонение моментальной температуры на данном горизонте от средней для этого горизонта, можно выразить как

$$\delta T(z, t) = \frac{T(i, j) + T(i+1, j)}{2} - (\langle T \rangle_i + \langle T \rangle_{i+1}) / 2,$$

где j — номер отсчета времени, и формула (1) для горизонта, расположенного посередине между i -м и $i+1$, и отсчета j приобретает вид:

$$\xi_{i,i+1,j} = (T(i, j) + T(i+1, j) - \langle T \rangle_i - \langle T \rangle_{i+1})(z_{i+1} - z_i) / 2(\langle T \rangle_{i+1} - \langle T \rangle_i). \quad (2)$$

Очевидно, формулы (1) и (2) мало пригодны для температурных профилей, имеющих вертикальные участки (см. рис. 8), например, в случае перемешанной в слое воды, поскольку и числитель, и знаменатель дроби в формулах (1) и (2) стремятся к нулю и результат вычислений начинает сильно зависеть от погрешностей измерений и расчетов. Особенно это заметно для вертикальных систем, в том числе и для обсуждаемой системы «Моллюск», где, в отличие от зонда, измерение на разных горизонтах производится разными датчиками, а значения температуры и сдвигов рассчитываются при помощи сплайнов, имеющих колебания относительно аппроксимируемой кривой. В связи с этим вертикальные смещения жидкости, показанные на рис. 7в, рассчитывались для глубин не более 12 м.

Заметим, что для изучения распространения звука в поле ВВ одиночной вертикальной системы «Моллюск» недостаточно. Ее следует дополнить как минимум несколькими подобными системами или вертикальными гидрофизическими системами, что позволит исследовать влияние пространственной анизотропии ВВ на характеристики акустических полей в различных районах океанского шельфа с резким термоклином. Для большей информативности подобных исследований систему «Моллюск» в перспективе целесообразно дополнить 3-координатными измерителями течений, например, подобных описанному в [16]. При этом, за счет модульной структуры систем «Моллюск» и рабочего программного обеспечения, такое решение не потребует переделки регистратора или изменения его рабочей программы. Модификации подвергнется только необходимое количество МД.

Данные от новых низкочастотных устройств просто будут добавлены к блокам НЧ данных модулей датчиков, расположенных на соответствующих горизонтах. При обработке данных системы они будут автоматически идентифицированы программой и выделены в отдельный файл, данные в котором будут синхронизированы с системой RTCC «Моллюск», подобно тому, как это делается для данных температурных датчиков и датчиков гидростатического давления.

Поскольку влияние ВВ проявляется в наибольшей степени на глубине пикноклина, для их измерения может быть применено неэквидистантное размещение МД по глубине, с их концентрацией на глубинах предполагаемого нахождения пикноклина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принятые при разработке структурные, схемотехнические и программные решения позволили существенно улучшить эксплуатационные качества систем «Моллюск-19» и «Моллюск-21» по сравнению с системами предыдущих поколений:

- Построение «Моллюск-19» и «Моллюск-21» на основе взаимозаменяемых, автоматически индивидуально идентифицируемых измерительных модулей и цифровой передачи данных внутри систем обеспечило высокую адаптивность к задачам эксперимента, хорошую оперативную ремонтпригодность за счет быстрой замены МД, упрощение, ускорение и надежность при обработке данных за счет автоматизации выбора параметров;
- Размещение АЦП в модулях датчиков, в непосредственной близости к первичным преобразователям, обеспечило широкий динамический диапазон акустических измерительных трактов, достаточный для приема и регистрации сигналов всех уровней, от шума тихого моря до мощных сейсморазведочных импульсов, без переключения чувствительности измерительных каналов. Это расширило круг решаемых задач и упростило работу с системами;
- Применение единой цифровой шины для передачи данных всех первичных преобразователей позволило применить достаточно тонкий и гибкий кабель с малым количеством проводов, что в совокупности с малым энергопотреблением сделало габариты и вес систем возможными для переноски одним человеком. Малый вес и

положительная плавучесть обоих концов системы обеспечила возможность ее постановки и подъема одним человеком с лодки, без применения каких-либо механизмов.

- Встроенные в МД и регистраторы систем «Моллюск» средства самодиагностики в совокупности с наличием акустического модема, совместимого с аппаратурой передачи данных по акустическому каналу связи комплекса «Шельф-14», повысили удобство и надежность проверки систем перед постановкой и во время работы в море. Возможность акустического поиска дрейфующей системы методом трилатерации снижает вероятность потери систем при подъеме.
- В перспективе гибкость цифровых интерфейсов позволяет легко модифицировать системы и расширять их функциональность путем дополнения модулями датчиков новых типов. Функциональность существующих МД также может быть расширена подключением новых датчиков (как это произошло при замене термодатчиков на датчики гидростатического давления и температуры в модулях «Моллюск-21»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутенко А. Н. Влияние гидрологических условий на потери при распространении звука на шельфе // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 4. С. 469–474. <https://doi.org/10.7868/S0320791913040138>
2. Волков М. В., Григорьев В. А., Луньков А. А., Петников В. Г. О возможности применения вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи на арктическом шельфе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 332–342. <https://doi.org/10.1134/S0320791919030109>
3. Apel J. R., Badiy M., Chiu C.-S. et al. An Overview of the 1995 SWARM Shallow-Water Internal Wave Acoustic Scattering Experiment // IEEE J. Oceanic Eng. 1997. V. 22. № 3. P. 465–500.
4. Sperry B. J., Lynch J. F., Gawarkiewicz G. et al. Characteristics of Acoustic Propagation to the Eastern Vertical Line Array Receiver During the Summer 1996 // New England, Shelfbreak, PRIMER Experiment, IEEE J. Oceanic Eng. 2003. V. 28. № 4. P. 729–749.
5. Mignerey P. C. and Orr M. H. Observations of Matched-Field Autocorrelation Time in the South China Sea // IEEE J. Oceanic Eng. 2004. V. 29. № 4. P. 1280–1291.

6. 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. <https://doi.org/10.25808/24094609.2019.28.2.006>
7. <https://www.ipfran.ru/science/low-frequency-acoustics-of-the-ocean/hydroacoustic-antenna-complexes>
8. Рутенко А. Н. Вертикальная акустико-гидрофизическая антенна «Моллюск-97» // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 5. С. 141–144.
9. Борисов С. В., Гриценко А. В., Ковзель Д. Г., Лихачев В. В., Коротченко Р. А., Круглов М. В., Пенкин С. В., Рутенко А. Н. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натурных экспериментах // Вестник ДВО РАН. 2003. № 2.
10. Ковзель Д. Г., Рутенко А. Н., Ущиповский В. Г. Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система «Моллюск-07» // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 138–142.
11. Многоэлементная модульная акустико-гидрофизическая измерительная система. Пат. RU 2 794 710 С1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. — 2022126279; заявлено 10.10.2022, опубликовано 24.04.2023, Бюл. № 12.
12. Ковзель Д. Г. Технические средства гидроакустического мониторинга сейсморазведочных работ на шельфе // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 5. С. 605–617. <https://doi.org/10.1134/S0320791918050040>
13. Рутенко А. Н., Гаврилевский А. В., Ковзель Д. Г., Коротченко Р. А., Путов В. Ф., Соловьев А. А. Мониторинг сейсмоакустических сигналов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 248–257.
14. Ковзель Д. Г. Аппаратура акустической связи для контроля работы автономной гидроакустической донной станции на шельфе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 619–629. <https://doi.org/10.1134/S0320791919050113>
15. https://ru.wikibrief.org/wiki/Akima_spline
16. Автономное устройство для регистрации и направления течения жидкости и газа. Пат. RU 2503962 С1. Российская федерация / Ковзель Д. Г. — 2012134802/28; заявлено 14.08.2012, опубликовано 10.01.2014, Бюл. № 1.

AUTONOMOUS VERTICAL ACOUSTIC-HYDROPHYSICAL MEASURING SYSTEMS “MOLLUSK-19” AND “MOLLUSK-21”

A. N. Rutenko^a, D. G. Kovzel^{a,*}, V. A. Gritsenko^a

^a*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Baltiiskaya 43, Vladivostok, 690041 Russia*

^{*}*e-mail: dgk06@mail.ru*

Autonomous vertical acoustic-hydrophysical measuring systems "Mollusk-19" and "Mollusk-21" are designed to study spatio-temporal inhomogeneities of the sound speed field and mode structures of low-frequency sound fields and internal waves. The article provides a description of circuit, design and software solutions that provided a solution to the main task posed during the development of new systems — improving their performance qualities. The possibilities of using systems to solve problems are illustrated by the results of field measurements carried out on the shelf of Posiet Bay in the Sea of Japan.

Keywords: vertical receiving system, vertical antenna, temperature profile.