

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.232

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ШЕЛЬФЕ

© 2018 г. Д. Г. Ковзель

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041 г. Владивосток, ул. Балтийская 43, Россия
e-mail: dgk06@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2018 г.

Представлена новая модификация измерительно-регистрационного комплекса, разработанного в ТОИ ДВО РАН для мониторинга уровней антропогенных шумов на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Описаны функциональные возможности оригинальных устройств, модулей и программ. Базовым устройством комплекса является гидроакустическая донная станция “Шельф-2014”, ведущая запись вариаций акустического давления в диапазоне частот 2–15000 Гц. Для работы в режиме реального времени станция дополняется поверхностным телеметрическим буюм. Каналом передачи данных с морских буюв служит спутниковая сеть Иридиум. Программное обеспечение берегового поста позволяет отображать акустическую обстановку в режиме реального времени. Производится постоянный автоматический контроль координат и технического состояния донных станций и буюв. При выходе параметров за разрешенные пределы производится визуальное оповещение оператора. Модифицированный комплекс прошел проверку на шельфе Японского моря.

Ключевые слова: автономная акустическая станция, спутниковая телеметрия, акустический мониторинг на шельфе в реальном времени

DOI: 10.1134/S0320791918050040

ВВЕДЕНИЕ

На северо-восточном шельфе о. Сахалин полагаются традиционные районы летне-осеннего нагула занесенных в “Красную книгу РФ” серых китов – прибрежный Пильтунский и относительно глубоководный Морской [1]. Вблизи этих районов производится добыча углеводородов с помощью морских платформ и наклонного бурения с берега. Начиная с 1999 г. ТОИ ДВО РАН привлекается нефтедобывающими компаниями “Эксон Нефтегаз Лимитед” и “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани” для проведения акустических измерений на границах и внутри этих районов. Во время проведения на шельфе сейсморазведочных исследований с применением мощных импульсных сигналов [2–6], установки платформ и строительства подводных трубопроводов [7, 8] проводится акустический мониторинг уровней импульсных антропогенных шумов в режиме реального времени. При этом используются разработанные в ТОИ ДВО РАН автономные гидроакустические донные станции, поверхностные телеметрические буюи и другое оборудование [9, 10]. Аппаратно-программный комплекс на базе измерительной акустической донной станции “Шельф-2014” [11, 12] впервые был успешно применен на северо-восточном шельфе о. Сахалин в

2015 г. Накопленный в экспедициях 2015–2017 гг. опыт позволил провести ряд модернизаций, расширивших его функциональные возможности и повысивших надежность подготовки и работы устройств.

Для передачи данных в режиме реального времени в описываемом комплексе используется спутниковая сеть Иридиум. В настоящее время это решение уже можно считать типовым. Спутниковые системы широко применяются в морских исследованиях. Существует даже интернациональная организация DBCP (Data Buoy Cooperation Panel) при Мировой Метеорологической Организации (World Meteorological Organization, WMO) и Международной Океанографической Комиссии (Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC), регламентирующая применение морских буюв в масштабных научных проектах. На ее сайте имеется обзор [13] имеющихся буюв и рекомендации по их применению. Выбор именно Иридиум обусловлен сплошной зоной покрытия по всей территории земного шара, доступностью оборудования, наличием удобных сервисов передачи данных и тарифов.

Решаемые комплексом задачи не ограничиваются измерением уровней антропогенных шумов. Сделанные донными станциями записи акусти-

ческих сигналов могут быть использованы для обнаружения и изучения вокализаций морских млекопитающих. В ТОИ ДВО РАН эти записи используются для отработки алгоритмов автоматического поиска сигналов морских животных (МЖ) [14, 15]. В [16] сделан обзор существующих на 2013 г. автономных подводных акустических регистраторов (АПАР) и рассмотрены возможности их применения для пассивного акустического мониторинга (ПАМ) морских животных. Параметры качества измерения и записи акустического сигнала, обеспечиваемые станцией “Шельф-2014” (см. ниже), в сочетании с малым весом и габаритами, позволяют считать ее эффективным инструментом ПАМ МЖ. Наличие спутникового канала передачи данных открывает перспективы (после разработки соответствующих алгоритмов) использования комплекса для ПАМ МЖ в режиме реального времени. В работе [17] дано описание донно-поверхностного буя для мониторинга и идентификации морских млекопитающих, разработанных по Франко-Российскому проекту (OSEO-Innovation – FASIE, 2010). К сожалению, насколько известно из открытой печати, проект до настоящего времени не работает из-за недостаточной вычислительной мощности примененного в бую процессора Intel PXA270. В настоящее время эффективные алгоритмы обнаружения и идентификации МЖ, которые могли бы быть реализованы на этом процессоре, находятся на стадии разработки. Не менее актуальная область применения комплекса – исследования особенностей распространения акустических сигналов в отдельных районах шельфа. С этими целями АПАР могут применяться в сочетании с другими измерительными устройствами – вертикальными и горизонтальными акустическими приемными системами, излучателями, датчиками температуры, давления, измерителями течения [18–21].

В данной статье представлено современное состояние комплекса “Шельф-2014”, после существенных модернизаций, проведенных с учетом практического опыта его применения на северо-восточном шельфе о. Сахалин.

СОСТАВ КОМПЛЕКСА

Морская часть комплекса включает донные станции, поверхностные телеметрические буи и аппаратуру гидроакустической связи со станциями. Донная станция (см. рис. 1) ведет непрерывную запись вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц, ее собственные шумы не превышают –140 дБ от предельного уровня сигнала в 1-герцовом окне БПФ. По кабельной линии цифровой сигнал, измеренный в частотном диапазоне 2–2000 Гц, поступает на поверхностный телеметрический буй, где производится его специальная обработка. Ее результаты

передаются на центральный пост (ЦП) мониторинга и, в случае необходимости, на резервные посты через глобальную систему спутниковой связи Иридиум. Управление работой буя с ЦП осуществляется также через Иридиум. Для дистанционного контроля состояния станции “Шельф-2014”, установленной без телеметрического буя (см. рис. 1), она оснащена встроенным акустическим модемом [22]. Опрос станции производится посредством специально изготовленного телекомандного устройства (ТКУ) с борта судна. На рис. 1 показаны возможные варианты постановки и взаимодействие устройств комплекса. Береговая инфраструктура комплекса включает сети передачи данных, сервер электронной почты, сервер-диспетчер резервных каналов передачи данных, а также центральный и резервные посты управления акустическим мониторингом [23]. Рассмотрим подробнее работу устройств комплекса.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДОННАЯ СТАНЦИЯ

Основным измерительным устройством комплекса является донная станция (см. рис. 2). В качестве первичного преобразователя используется гидрофон ГИ-50 производства ВНИИФТРИ, модифицированный производителем для работы на мелководном (10–20 м) шельфе с сильными приливными течениями, вызывающими интенсивные низкочастотные псевдошумы обтекания. Для предотвращения ограничения выходного сигнала гидрофона его предварительный усилитель имеет на входе фильтр верхних частот 3-го порядка с частотой среза 10 Гц. Аналоговые цепи станции минимизированы за счет применения 24-разрядного сигма–дельта АЦП AD7767-2 (Analog Devices) со встроенным набором выходных фильтров и дециматоров. Частота первичного преобразования этого АЦП превышает выходную частоту дискретизации (30.24 кГц) в 32 раза, и для защиты от наложения спектров достаточно фильтра 3-го порядка, совмещенного с буферным усилителем. Малое число элементов в аналоговых цепях позволило выполнить их из прецизионных электронных компонентов, что обеспечило идентичность АЧХ измерительных трактов всех станций (см. рис. 3б), низкие уровни собственных шумов и нелинейных искажений сигнала (рис. 3а). Накопление данных производится на сменные носители – карты памяти SDHC или SDXC. Конструктивно в корпус электронного модуля станции может быть установлено до 24-х карт, что при емкости карты 128 Гб может обеспечить запись акустического сигнала в течение 391 сут. Электропитание станции осуществляется от двух блоков по 40 батарей типоразмера D. При использовании алкалайновых батарей время непрерывной автономной работы станции без поверхностного

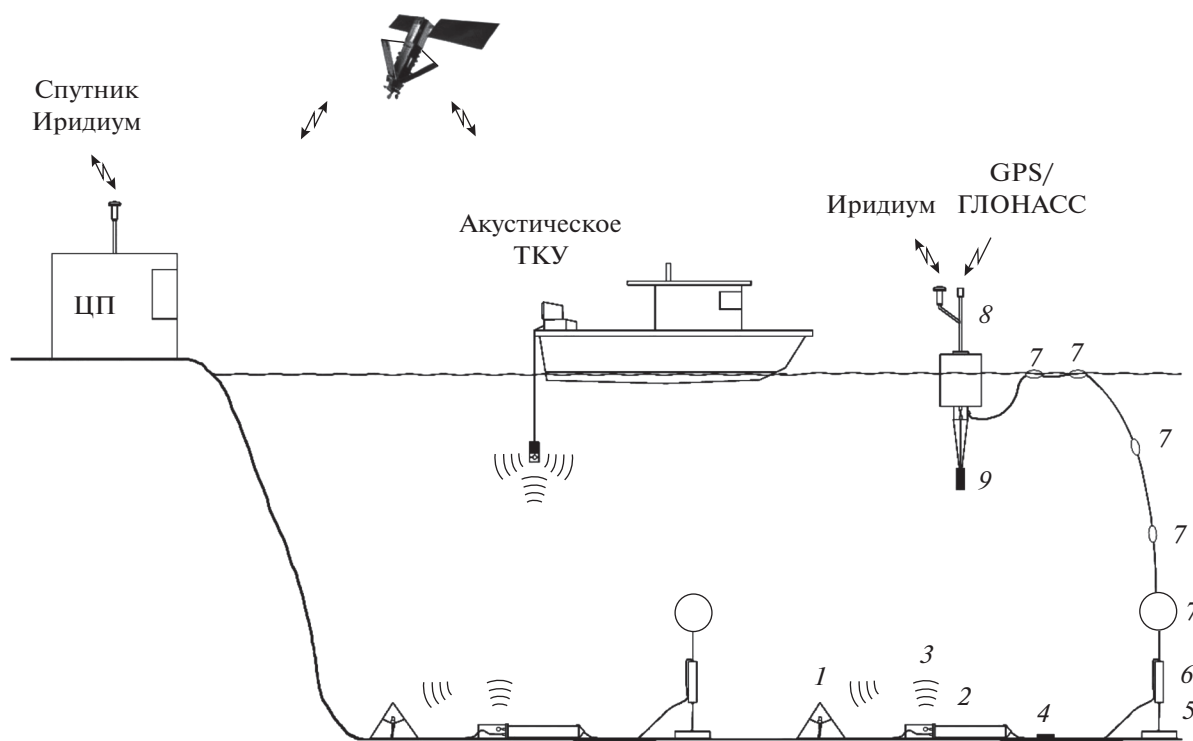


Рис. 1. Варианты постановки и взаимодействие устройств измерительного комплекса “Шельф-2014”. Обозначения: 1 – измерительный гидрофон ГИ-50, 2 – донная станция, 3 – передающий гидрофон акустического модема, 4 – дополнительный якорь 16 кг, 5 – основной сбрасываемый якорь 120 кг, 6 – акустический размыкатель, 7 – поплавки, 8 – телеметрический буй, 9 – киль.

буга составляет 200–240 сут, литий-ионных – более года. Работа всех модулей станции происходит под управлением микроконтроллера PIC32MX795F512H производства Microchip (рис. 2). В его функции входят также преобразование форматов данных, их буферизация и обработка. Система реальных датывремени станции на микросхеме DS3234 со встроенным термокомпенсированным кварцевым резонатором обеспечивает ошибку хода часов не более двух минут в год. При постановке станции “Шельф-2014” для работы в режиме реального времени, с поверхностным телеметрическим буюем, в электронный модуль станции устанавливается submodule SRC (Sample Rate Converter, конвертер частоты дискретизации) на основе цифрового сигнального процессора AD1895. В нем сигнал пересчитывается на частоту дискретизации 4200 Гц и по кабельной линии передается на буй. Вместо SRC может быть установлен другой submodule – монитор шины АЦП. Он позволяет передавать по кабельной линии весь цифровой поток с выхода АЦП донной станции в формате кабельных телеметрических систем, применяемых в ТОИ ДВО РАН [4]. В сочетании с устройством ввода–вывода стандарта RS-485 (например, последовательным сервером MOXA NPort 5430I или модулем последовательного интерфейса 9871 National Instruments) и программой ввода

данных это позволяет в реальном времени вводить в ноутбук акустический сигнал, записываемый станцией (до 15 кГц). Таким образом, станция с установленным модулем монитора шины АЦП может применяться как измерительное устройство систем кабельной телеметрии. Это используется, например, при кросс-калибровке наших акустических измерительных систем и при отладке программ донных станций.

По опыту экспедиций 2015–2017 гг. глубокой модификации подверглось рабочее программное обеспечение (ПО) станции – программы контроллера станции и submodule SRC. Отладка режимов считывания данных из АЦП позволила понизить уровни тональных компонент в спектре собственных шумов станции и оптимально распределить их по спектру. Реализован двунаправленный обмен данными между донной станцией и телеметрическим буюем – теперь буй подтверждает получение блоков данных от станции и может управлять ее работой. Такой режим позволяет отключать SRC, когда буй находится в пассивном состоянии (не передает данные на ЦП), что существенно экономит расход батарей питания донной станции. Развита сервисные режимы программы контроллера станции. Установка даты и времени донной станции выполняются автома-

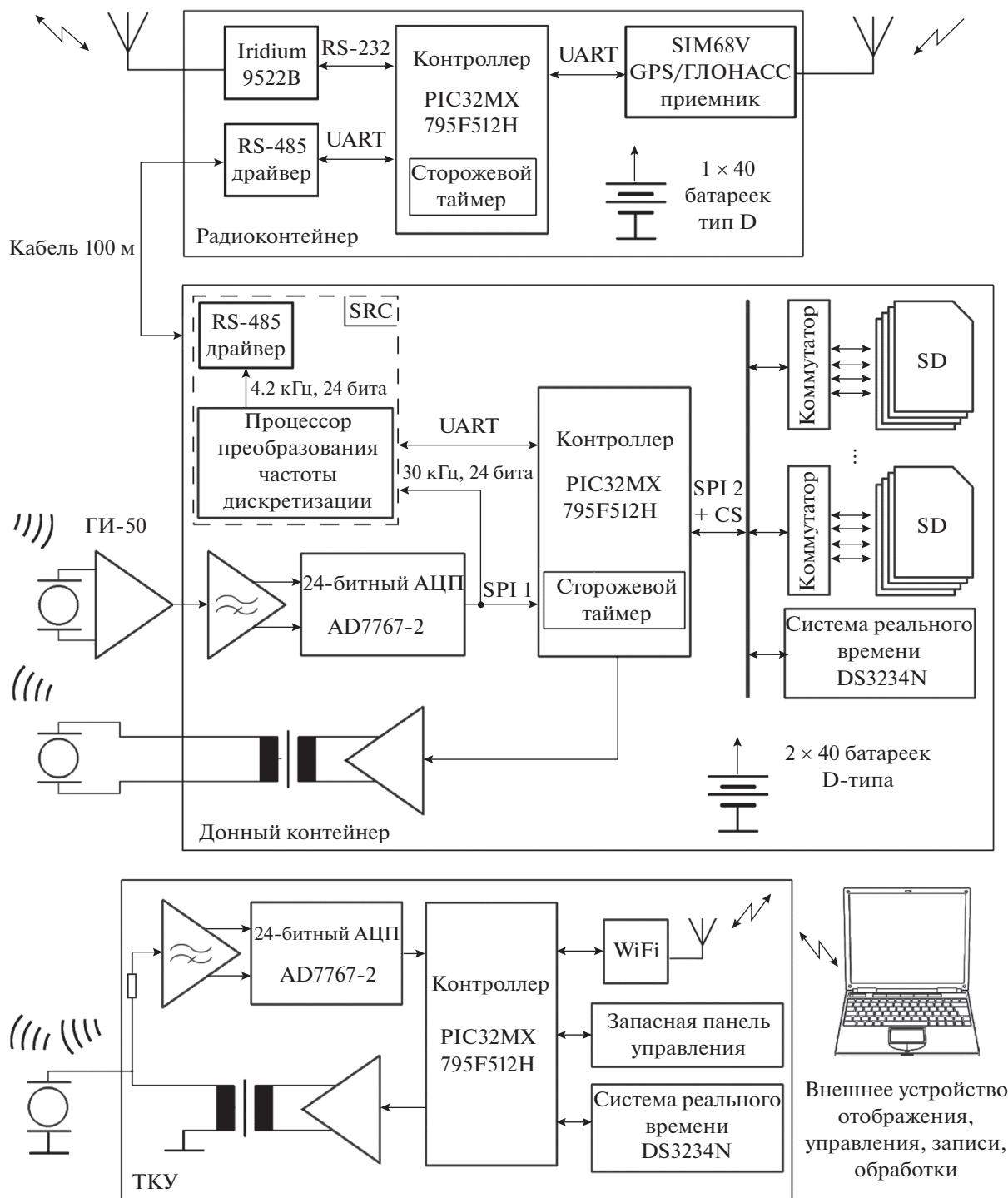


Рис. 2. Объединенная структурная схема основных устройств измерительного гидроакустического комплекса "Шельф-2014".

тически при подключении GPS к диагностическому разъему электронного модуля. При этом на компьютере автоматически ведется лог-файл (журнал) проделанных со станцией операций, что в долгосрочной перспективе позволяет повы-

сить точность хода часов станции путем автоматической коррекции в системе реальных даты-времени (RTCC). В станциях с подключенным телеметрическим бую коррекция времени станции производится постоянно по данным GPS поверх-

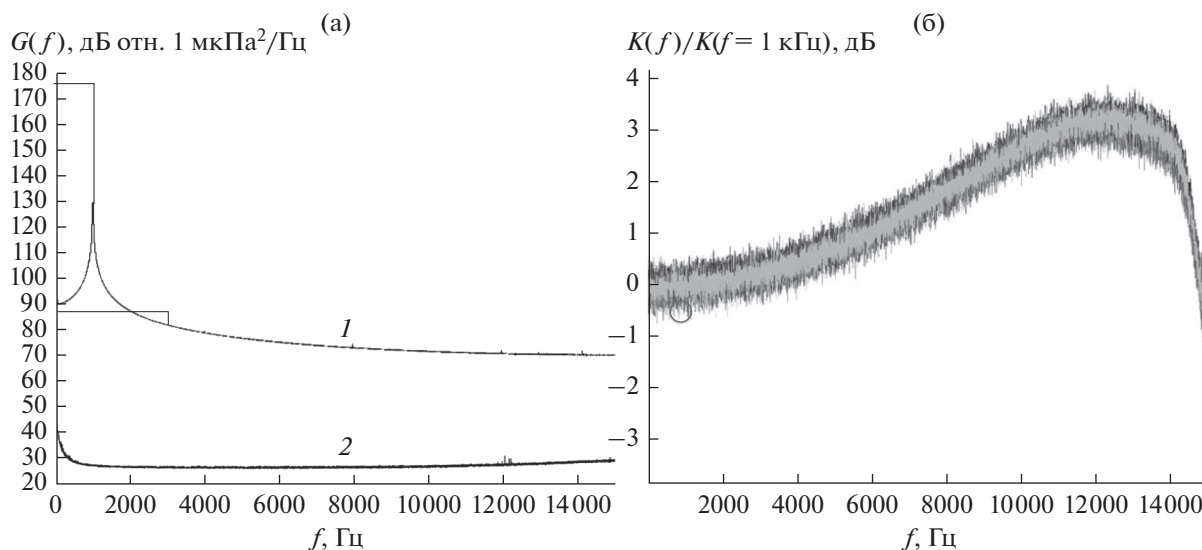


Рис. 3. (а) Линия 1 – результаты лабораторных обмеров измерительного тракта: спектр тонального сигнала с амплитудой, близкой к максимальной; линия 2 – спектр собственных шумов станции. (б) Графики АЧХ 48-ми донных станций.

ностного телеметрического буя. Существенно снижена вероятность человеческих ошибок при подготовке станции к постановке в море – при ее включении запускается программная процедура самодиагностики, результаты которой могут быть считаны при помощи встроенного акустического модема станции и телекомандного устройства (ТКУ). При этом проверяется исправность всех цепей донной станции, включая измерительный гидрофон. Для человека визуально отображаются номер станции, доступное время записи, напряжение батарей электропитания и усредненный по частотам и времени уровень сигнала запроса (для контроля исправности измерительного гидрофона станции). При проверке уже установленной в море станции отображается также расстояние до нее.

АППАРАТУРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ СО СТАНЦИЯМИ

При разработке аппаратуры гидроакустической связи приоритетной задачей было снижение потребляемой мощности модема в режиме приема, что необходимо для обеспечения длительного времени автономной работы станции. Это отразилось как в алгоритмах работы аппаратуры, так и в реализованных схемотехнических, программных и конструктивных решениях. Как можно видеть на рис. 2, аппаратные части модема включают только усилитель низкой частоты (УНЧ) с цепями питания, согласующий трансформатор и передающий гидрофон. Приемник и частично передатчик акустического модема реализованы как подпрограммы, работающие в контроллере донной станции параллельно с основной программой управления станцией и записи данных

на карты памяти. Приемник акустического модема использует для обнаружения информационного сигнала поток данных от АЦП станции. Дополнительным достоинством такого решения является то, что сам факт ответа станции на запрос подтверждает исправность измерительного тракта станции, включая измерительный гидрофон. Следует отметить, что все программы станции, включая и программу модема, активно используют разнообразные внутренние аппаратные средства микроконтроллера PIC32MX795F512H – умножитель, таймеры, порты ввода/вывода, модули широтно-импульсной модуляции и т.д. Программируемость режимов работы этих внутренних модулей микроконтроллера и связей между ними позволяет уже после изготовления станции реализовывать различные алгоритмы передачи данных по акустическому каналу связи. С целью снижения энергопотребления контроллера алгоритмы передачи данных оптимизированы для снижения количества выполняемых программных операций. Используется усовершенствованная частотная манипуляция (ЧМ) несущего акустического сигнала. Такой сигнал достаточно просто формируется и детектируется, стоек к искажениям.

На начальной стадии разработки в аппаратуре гидроакустической связи – экспериментальном экземпляре ТКУ и встроенном модеме на одной из донных станций – использовались экспериментальные программы, ориентированные на изучение канала связи (включая каналобразующую аппаратуру). Ряд проведенных экспериментов позволил определить оптимальный диапазон частот переноса информации акустического сигнала, выбрать конкретные сигнальные частоты.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приемо-передающих трактов была измерена в двух направлениях, определено ее влияние на надежность передачи сообщения. Была также проверена чувствительность приемного тракта к различным окружающим шумам. Однако экспериментальные программы не содержали специальных алгоритмов для обеспечения надежной передачи данных. В условиях Сахалинского шельфа дальность связи со станцией составляла 340–2000 м в зависимости от погодных условий. Основным результатом проведенных исследований можно считать определение типа канала связи. Согласно классификации в [24], образованный аппаратурой акустической связи “Шельф-2014” канал связи можно считать каналом второго рода с длинной памятью. Для него характерны глубокие частотно-избирательные замирания и межсимвольная интерференция с длительностью много больше длительности символа. Важной особенностью такого канала является то, что его пропускная способность принципиально ограничена его параметрами и не может быть увеличена более некоторого предела при любом соотношении мощностей сигнала к шуму. Вероятность правильного приема сообщения также не может быть более некоторой конечной величины без применения специальных алгоритмов передачи и приема сигналов. Для дальнейшего развития был сделан вывод, что увеличение дальности связи должно достигаться именно алгоритмическими мерами, а не увеличением мощности передатчика. Были разработаны и опробованы в морской практике несколько одновременно работающих алгоритмов подавления вредных последствий замираний. Применение оригинальных алгоритмов расширения спектра передаваемого сигнала [25] и частотно-временного разнесения с побитовой инверсией повторов сигнала [26], направленных на подавление влияния замираний, обеспечили в экспедициях 2016 г. дальность устойчивой работы более 6 км. Опрос установленных в море станций производился в условиях 2–4-балльного волнения, течений до 1.5 м/с, скорости ветра до 10 м/с. Станции были установлены на глубинах от 8 до 20 метров, судно перемещалось мористее 20-метровой изобаты. Не зафиксировано зависимости дальности связи от угла между береговой чертой и линиями ТКУ–станция. По данным гидрологического зондирования выраженная зависимость скорости звука от глубины отсутствовала. Достоверность переданных станцией данных в рабочих программах модема и ТКУ подтверждается контрольной суммой.

Телекомандное устройство в результате нескольких модификаций изменилось не только программно, но и конструктивно (рис. 2). Полностью изменена концепция интерфейса ТКУ с человеком. Если первоначально эксперименталь-

ный экземпляр ТКУ рассматривался как самостоятельное устройство, способное произвести опрос донной станции и предоставляющее человеку всю необходимую информацию о ее текущем состоянии, то в настоящее время ТКУ не имеет средств управления и отображения. Эти функции перенесены на внешнее устройство – ноутбук или смартфон. На экспериментальном образце ТКУ панель управления сохранена и может быть использована как запасная. Взаимодействие с внешним устройством управления производится дистанционно, по каналу WiFi. Такое решение имеет множество достоинств: ТКУ стало компактнее; его корпус, находящийся на палубе, герметичен и не подвержен коррозии; опрос станций ведется из удобного места, например, с мостика судна, и полученная информация быстрее может быть использована для управления судном. Стало возможным дальнейшее развитие программного обеспечения – например, автоматическое сопряжение ТКУ и GPS, автоматическая триангуляция станций с отображением на электронной карте при запросах. Автоматически ведется журнал (лог) всех действий по опросу станций.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЙ БУЙ

Для работы в режиме реального времени к донной станции кабельной линией подключается поверхностный телеметрический буй (рис. 2). От submodule SRC станции на контроллер буя поступает акустический сигнал в цифровой форме с частотой дискретизации 4200 Гц. Контроллер производит его специальную обработку и передает результаты заданным при организации мониторинга адресатам (центральный и запасные посты управления, технический контроль) посредством спутниковой сети Иридиум. Кроме того, в функции контроллера телеметрического буя входят: управление работой submodule SRC станции (см. рис. 2) с целью снижения расхода батарей питания станции; взаимодействие с GPS/ГЛОНАСС приемником; формирование слов состояния донной станции и буя; управление работой модема Иридиум, пересылка данных на ЦП, прием и отработка команд. По сравнению с первоначальной модификацией в телеметрическом бую произведены значительные аппаратные и программные доработки. Буй дополнен GPS–ГЛОНАСС-приемником, что позволяет контролировать его географическое положение. Координаты передаются на ЦП вместе со словом состояния донной станции и буя. Еще одна важная модернизация – отказ от использования УКВ–ЧМ-радиоканала, который стал возможен благодаря исследованиям, проведенным в ходе мониторинга сейсморазведочных работ 2015 г. Оценка параметров измеренных сейсмоакустических сигналов производилась парал-

тельно в контроллерах телеметрических буев и на компьютерах береговых приемных постов по двум различным методикам [11]. На береговых постах использовался сигнал, передаваемый телеметрическим буюм по цифровому УКВ-радиоканалу. Оценки параметров, обнаруженных программой компьютера берегового поста сейсмоимпульсов, передавались на ЦП по сети Интернет, а в случае ее отсутствия – посредством Иридиум. Результаты обработки акустического сигнала в контроллере буя ежеминутно передавались непосредственно на ЦП через Иридиум. Результаты расчетов по обеим методикам синхронно отображались на дисплее оператора ЦП. Совпадение результатов между собой, а позднее и с результатами обработки данных, записанных донными станциями на карты памяти, подтвердило их корректность и позволило в дальнейшем отказаться от применения УКВ. Отсутствие береговых радиоприемных постов не только упростило и удешевило мониторинг, но и устранило взаимосвязь между расположением постов и точек акустического мониторинга, т.е. сделало мониторинг глобальным. За счет снижения потребляемой буюм мощности, для его электропитания в течение всего экспедиционного сезона оказалось достаточно одного батарейного модуля из 40 алкалайновых элементов питания типоразмера D. Удалось отказаться от отдельного батарейного корпуса, заменив его легким килем (см. рис. 1). Масса буя уменьшилась приблизительно в два раза, что положительно сказалось на его устойчивости к воздействию волн и течений. Однако отказ от УКВ-канала имеет и отрицательные последствия. В 2015 г. при наличии хорошего интернета на ЦП и береговых постах оператор ЦП имел возможность при необходимости подробно рассмотреть и проанализировать акустический сигнал, используя удаленное подключение к компьютеру берегового поста. По каналу Иридиум передача такого потока данных невозможна. Данные передаются в виде пакетов данных малой длины – SBD-сообщений (SBD – Short Burst Data). Однако решение было найдено. Замена на буях модемов Иридиум модели 9603 на модель 9522 дает возможность пересылать SBD-сообщения объемом до 1960 байт. За счет этого по команде с ЦП посылки данных от телеметрического буя могут дополняться подробной огибающей акустического сигнала (1500 точек в минуту). Совместно с 1/3-октавным усредненным за минуту спектром акустического сигнала огибающая дает достаточно ясное представление об особенностях сигнала (см. рис. 4 и 6). Описание процедур формирования оценок сигнала и огибающей, а также сообщения от буя в целом приведено ниже. Расширены возможности программы контроллера буя в части обработки акустического сигнала. Командами с ЦП может быть выбран один из двух режи-

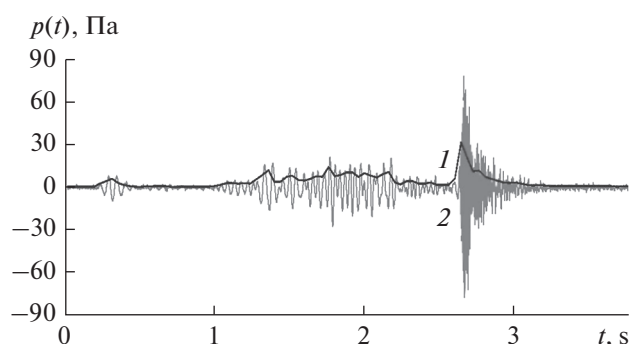


Рис. 4. Графики вариаций акустического давления в сейсморазведочном импульсе (кривая 2) и в его огибающей (кривая 1), передаваемой на ЦП мониторинга. Хорошо различимы донная и водная часть импульса.

мов. В первом режиме акустическая экспозиция SEL (Sound Exposure Level – уровень энергии акустических шумов в децибелах относительно 1 мкПа^2 в частотном диапазоне 15–2000 Гц) и пиковый уровень амплитуды сигнала SPL (Sound Pressure Level) рассчитываются на полусекундных временных интервалах с перекрытием 0.25 с. Далее последовательности полученных значений разделяются на пары и для каждой пары запоминается наибольшее значение. В конце каждой текущей минуты полученные ряды данных (120 значений SPL_{\max} и 120 значений SEL_{\max}) передаются на ЦП. Этот режим аналогичен режиму, использовавшемуся в мониторинге сейсморазведки 2015 г., и оптимален для импульсных сигналов. Второй режим предназначен для оценки квазистационарных сигналов. Расчет SEL и SPL производится на односекундных рядах данных без перекрытия. Программа буя обеспечивает гибкое управление буюм и в пассивном состоянии, когда он не передает данные на берег. Оператор ЦП может задать период, с которым контроллер буя сообщает координаты и состояние станции и буя на ЦП и проверяет наличие команд от ЦП. Управление этим периодом позволяет экономить как трафик, передаваемый по Иридиум, так и батареи питания буя и станции.

СООБЩЕНИЯ И КОМАНДЫ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО БУЯ

Малая пропускная способность и достаточно высокая стоимость трафика системы Иридиум приводит к необходимости максимально возможного уменьшения объема передаваемых данных. В командах и словах состояния это означает использование каждого бита для кодирования полезной информации. Для сжатия данных используется логарифмирование передаваемых по кана-

лу связи величин, затем они нормируются и преобразуются в целые числа:

$$Y = \text{int}(K \lg X + O), \quad (1)$$

где X – величина, преобразуемая для передачи по каналу Иридиум; Y – преобразованная величина; K – коэффициент нормирования; O – сдвиг. Нормирующие коэффициенты и сдвиги выбраны таким образом, чтобы в рабочем диапазоне значений X (от максимально возможного значения X_{\max} до минимального X_{\min}) значения преобразованной величины Y попадали в диапазон 0–255, т.е. могли быть представлены в виде однобайтного (двоичного 8-разрядного) целого положительного числа, которое и передается по каналу связи. При этом в качестве X_{\max} принимается число, определяемое разрядностью данного параметра. Например, для 32-разрядного беззнакового двоичного целого $X_{32\max} = 2^{32} = 4\,294\,967\,296$. В качестве X_{\min} принимается значение уровня приблизительно –150 дБ от X_{\max} , т.е. $X_{32\min} = 136$. Величина динамического диапазона 150 дБ выбрана исходя из точности, обеспечиваемой используемой 32-разрядной целочисленной процедурой БПФ, встроенной в 32-битный компилятор языка программирования Си разработки Microchip. В результате операции приведения к целому (1) происходит некоторая потеря точности, однако она не превышает $150/256 \approx 0.6$ дБ. На ЦП принятые числа подвергаются обратному нормированию и пересчитываются в дБ отн. 1 мкПа.

Как уже упоминалось выше, телеметрический буй взаимодействует с ЦП при помощи слов состояния, информационных пакетов (посылок) данных и команд управления буюм. В настоящее время применяются три команды управления буюм: включение передачи данных по Иридиум с установкой режима обработки акустического сигнала (с перекрытием временных интервалов или без него); выключение передачи данных с установкой периода проверки текущего состояния станции и бую и наличия входящих команд; передача слова состояния без изменения режимов работы бую. Длина SBD-сообщения с командой – 10 байт.

Слово состояния донной станции и бую имеет длину 19 байт и содержит: номер станции, доступный объем памяти для записи данных на станции, время начала записи последнего файла данных, напряжение батарей электропитания станции и бую, текущий режим обработки акустического сигнала (с перекрытием временных интервалов или без него), текущий установленный период проверки входящих команд, признак целостности кабеля между станцией и буюм, текущие географические координаты бую. Слово состояния передается в ответ на любую поступившую на буй

команду, а в пассивном режиме бую (без передачи данных на ЦП) – еще и при каждой проверке наличия входящих команд. Таким образом, даже если буй не передает данные, информация о его текущем состоянии регулярно обновляется на ЦП.

Посылка данных состоит из 5-байтного заголовка и поля данных. Заголовок содержит номер станции и время создания сообщения. Поле данных включает 25 байт усредненного за минуту 1/3-октавного спектра, а также поля SEL и SPL. Размер этих полей зависит от режима обработки сигнала, устанавливаемого командой с ЦП. При обработке на полусекундных рядах данных с перекрытием длина этих полей равна 120 байт, а суммарная длина посылки данных – 270 байт. На секундных рядах без перекрытия поля SEL и SPL имеют размер 60 байт, а длина посылки – 150 байт.

Как уже упоминалось выше, при обработке акустического сигнала в контроллере бую используется методика, отличная от применяемой на компьютерах береговых приемных постов. В основе обеих методик лежит контроль в режиме реального времени величин уровня пикового значения амплитуды

$$\text{SPL}_{\text{peak}}^{\text{imp}}(\Delta t) = 20 \lg \left(\frac{\max_{\Delta t} |p(t)|}{p_0} \right) \quad (2)$$

и акустической экспозиции

$$\text{SEL}(\Delta f, t') = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f, t') df}{p_0^2 \Delta t_0} \right), \quad (3)$$

где $p(t)$ – зависимость акустического сигнала в точке приема от времени; p_0 – акустическое давление 1 мкПа; Δf – полоса частот от f_1 (15 Гц) до f_2 (2000 Гц), для которой определяется значение параметра; Δt – временной интервал, на котором определяется значение параметра; $\Delta t_0 = 1$ с; $G(f, t')$ – периодограмма вариаций $p(t)$ на интервале времени $t' - (t' + \Delta t)$, где время t' выступает в качестве параметра и изменяется с шагом Δt . Заметим, что расчет SEL производится не по временному ряду, а по спектру сигнала в диапазоне частот 15–2000 Гц, что позволяет снизить влияние на оценку низкочастотных псевдошумов обтекания гидрофона и других шумов.

В 2015 г. на компьютерах береговых радиоприемных постов программа автоматического поиска определяла для каждого обнаруженного импульса границы временного интервала $T_{90\%}$, в котором сосредоточено 90% его энергии, и оценки параметров $\text{SEL}_{90\%}^{\text{imp}}$ и $\text{SPL}_{\text{peak}}^{\text{imp}}(T_{90\%})$ рассчитывались для этих интервалов. Однако применение этого алгоритма в контроллере телеметрического бую привело бы к существенному ухудшению экс-

платационных качеств буя. Поэтому в контроллере телеметрического буя реализована альтернативная методика. Программа не производит поиск импульсов. Расчет оценок сигнала проводится непрерывно на фиксированных временных интервалах, в зависимости от установленного командой с ЦП режима обработки. Рассчитываются не SEL и SPL, а пропорциональные им величины SEL' и SPL', не учитывающие чувствительность гидрофона и пределы входных напряжений АЦП донной станции. Иными словами, в качестве входного сигнала для алгоритма обработки принимается не зависимость $p(t)$, а последовательность отсчетов сигнала в цифровой форме. Нормировка, восстанавливающая значения SEL и SPL, производится уже на ЦП при дальнейшей обработке данных. Такое решение необходимо для обеспечения универсальности рабочей программы контроллера буя, ее независимости от условий, которые могут изменяться по ходу работ – например, замена гидрофона донной станции перед очередной постановкой или замена submodule АЦП при модернизации станции. С учетом (1)

$$SPL'(\Delta t) = K_{SPL} \lg(\max |n_j|) + O_{SPL}, \quad (4)$$

где j – порядковый номер отсчета входного сигнала в ряду данных, соответствующему Δt и являющемуся входным рядом данных для дискретной целочисленной процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ); n_j – значение j -го элемента во входном ряду данных; K_{SPL} и O_{SPL} – нормирующий коэффициент и сдвиг для параметра SPL.

$$SEL'(\Delta f, t') = K_{SEL} \lg \left(\sum_{i=a}^{i=b} (Re_i^2 + Im_i^2) \right) + O_{SEL}, \quad (5)$$

где i – порядковый номер частотного интервала в выходном ряду данных процедуры БПФ; Re_i – значение реальной части i -го элемента в выходном ряду данных процедуры БПФ; Im_i – значение мнимой части i -го элемента в выходном ряду данных процедуры БПФ; a – порядковый номер частотного интервала БПФ, соответствующего f_1 ; b – порядковый номер частотного интервала БПФ, соответствующего f_2 ; K_{SEL} и O_{SEL} – нормирующий коэффициент и сдвиг параметра SEL.

По команде с ЦП отсчеты данных могут дополняться огибающей сигнала. Каждый отсчет огибающей ENV формируется как средний модуль по 168 отсчетам входного сигнала с частотой дискретизации 4200 Гц, т.е. на временном интервале 40 мс:

$$ENV = \frac{\sum_{j=1}^{j=168} |n_j|}{168}. \quad (6)$$

Далее полученные отсчеты огибающей (1500 за минуту) логарифмируются, нормируются и округляются до целого согласно (1), после чего добавляются к посылке данных. Длина посылки в таком случае равна 1770 байт для режима с перекрытием и 1650 байт для режима без перекрытия.

Посылки данных передаются на ЦП только в активном состоянии буя, ежеминутно. Программой ЦП каждая полученная посылка данных разделяется на поля, соответствующие переданным параметрам акустического сигнала, и производится их пересчет в дБ отн. 1 мкПа. При этом учитывается нормировка логарифмированных величин, сделанная в контроллере буя, а также чувствительность гидрофона, подключенного к донной станции, и пределы входных напряжений АЦП станции.

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

Схема передачи данных приведена на рис. 5. Данные от морских буев поступают на сервер системы Иридиум, далее на специально организованный почтовый сервер, затем на ЦП. Радиотелеметрические буи оснащены спутниковыми трансиверами, работающими в режиме SBD. Трансивер обменивается данными со спутником пакетами небольшого размера – от 270 до 1960 байт, в зависимости от конкретной модели модема и направления передачи. Сеанс связи со спутником инициирует аппаратура, управляющая трансивером – микроконтроллер телеметрического буя или персональный компьютер на ЦП. В результате сеанса связи происходит передача не более одного пакета данных в каждом из направлений (от спутника и на спутник), после чего сеанс автоматически завершается. Длительность сеанса определяется в основном объемом передаваемой информации (при том, что предельная пропускная способность канала составляет 2400 бит в секунду), а также текущими условиями радиосвязи (дальность, высота над горизонтом, помехи). При благоприятных условиях трансивер может осуществить, например, до 6 сеансов связи в минуту и передать около 2 кбайт. Далее пакет данных передается по спутниковой сети на наземную станцию сопряжения и на шлюз. На шлюзе к пакету применяются заранее заданные (при прописке трансивера в системе связи) правила переадресации. Возможны три варианта переадресации:

- 1) пакет передается обратно в спутниковую сеть с назначением передачи на другой трансивер, зарегистрированный в системе (для адресации используется его уникальный индивидуальный номер – IMEI);
- 2) пакет отсылается по протоколу SMTP в виде прикрепленного файла на заданный адрес электронной почты;

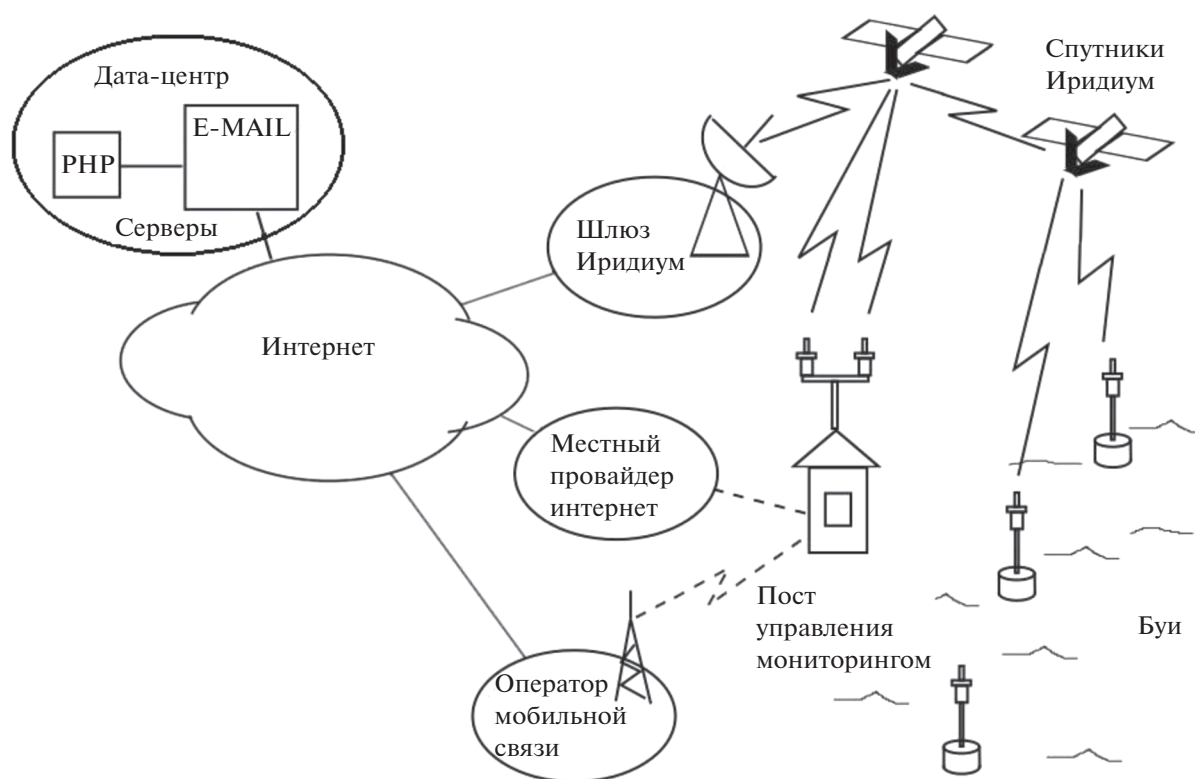


Рис. 5. Схема передачи данных и команд управления буями.

3) пакет по специальному протоколу DirectIP (собственный протокол системы Иридиум) передается на сервер с заданным IP-адресом в сети Интернет.

Поскольку тарифицируются только эфирные передачи данных (с трансивера на спутник, со спутника на трансивер), при передаче данных максимально используются возможности сети Интернет. Из последних двух вариантов (SMTP и DirectIP) был выбран SMTP ввиду его широкого распространения и довольно высокого уровня, позволяющего автоматизировать обработку с помощью самых разнообразных программных средств. В связи с тем, что в процессе гидроакустического мониторинга создается довольно много сообщений электронной почты, а бесплатные сервисы электронной почты, как правило, имеют ограничения на число отправляемых писем в единицу времени, было принято решение организовать свой почтовый сервер в надежном коммерческом дата-центре, на так называемом хостинге. В схеме передачи данных на рис. 5 каналы связи, подходящие непосредственно к постам управления (показаны пунктирными линиями), обычно обладают высокой пропускной способностью и низкой стоимостью трафика (проводное подключение в здании расположения поста, либо беспроводное, через сеть оператора мобильной связи), но непрерывность их не гарантируется. Для

резервирования таких каналов предусмотрено оснащение постов спутниковыми трансиверами с возможностью установки снаружи зданий (их работа возможна исключительно при прямой видимости спутника, связь будет надежной только при максимально открытом горизонте). Трансиверы аналогичны установленным на телеметрических буях, но дополнены специальными интерфейсами для подключения к компьютеру оператора ЦП. Эти трансиверы необходимы также в случае размещения ЦП вне зон обслуживания провайдеров Интернет. В обычном режиме, при наличии подключения поста управления к сети Интернет, данные с буев, а также команды управления пересылаются прикладной программой ЦП по электронной почте (протоколы SMTP, POP3). В случае отсутствия или временного обрыва интернет-подключения программа поста управления автоматически включает опрос спутникового трансивера (или нескольких, в зависимости от необходимого объема получаемых данных). Выход в эфир спутникового трансивера берегового поста автоматически обнаруживается сервером-диспетчером, размещенным на надежной площадке какого-либо коммерческого дата-центра. Функционал сервера-диспетчера реализован в виде периодически запускаемой программы (скрипта) на языке PHP (рис. 5), в среде виртуальной Linux-машины. Сервер-диспетчер пересылает данные, не получен-

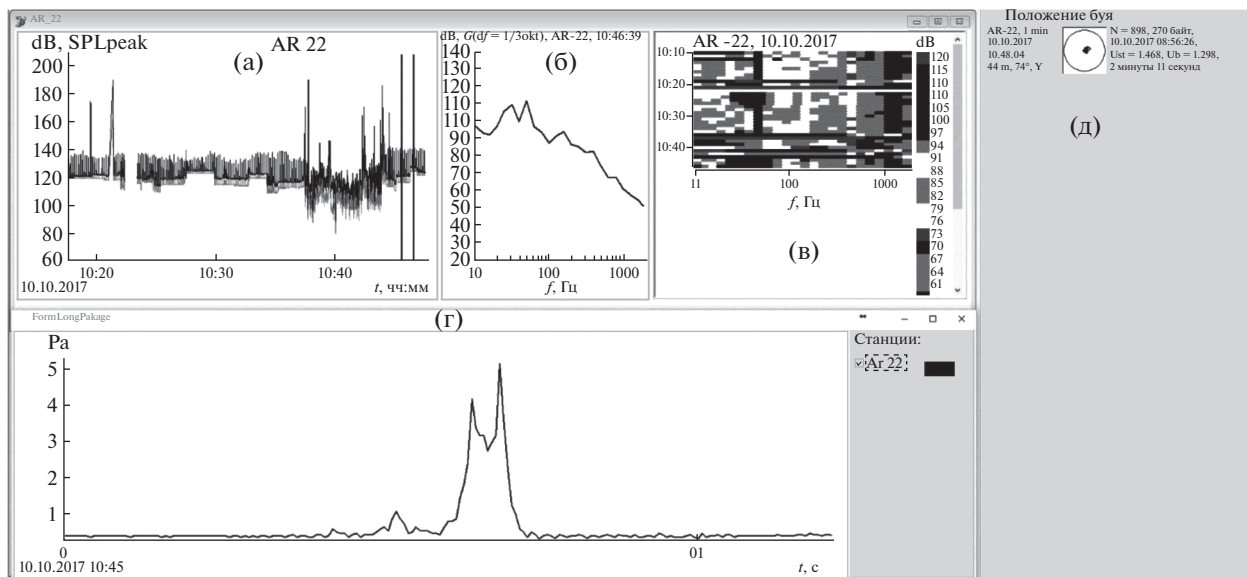


Рис. 6. Данные, отображаемые на экране оператора ЦП (пояснения см. в тексте).

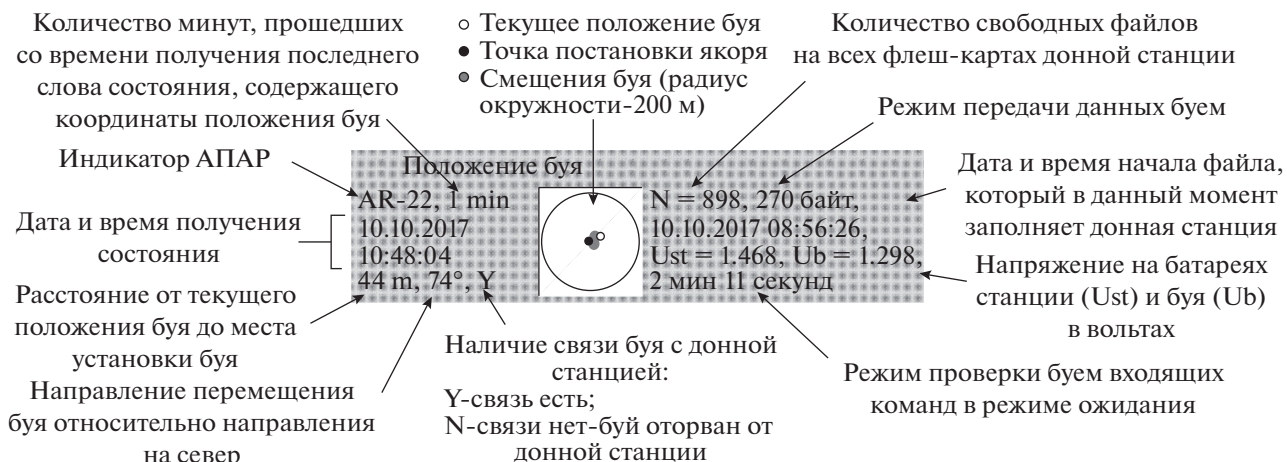


Рис. 7. Индикация текущего состояния донной станции и буя на мониторе оператора ЦП.

ные береговым постом с почтового сервера, через систему спутниковой связи Иридиум непосредственно на трансивер, с которого поступил запрос. Сервер-диспетчер в ходе работы производит разбор и анализ сообщений электронной почты, прикрепленных файлов с данными, извлекает команды и данные, а при пересылке заново формирует сообщения с необходимыми атрибутами.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОСТА УПРАВЛЕНИЯ МОНИТОРИНГОМ

Обновленное программное обеспечение центрального поста позволяет оператору управлять работой телеметрического буя – в активном режиме выбирать режимы обработки акустических данных и включать–выключать передачу огибаю-

щей, а в пассивном – выбирать период, с которым буй проверяет и передает на ЦП слово состояния и проверяет наличие команд от ЦП. ПО визуализации данных позволяет оператору в режиме реального времени выводить на экран проходящие с буев значения SEL и SPL_{peak} в виде линейных графиков (см. рис. 6а), значения 1/3-октавного спектра как в виде линейного графика (рис. 6б), так и в виде текущего спектра (рис. 6в), детально проанализировать значения огибающей сигнала на любом принятом за последние 24 часа 1-минутном интервале (рис. 6г). Подсистема анализа поступающих слов состояния (рис. 6д и рис. 7) расшифрует и покажет на экране принятые от буя значения, а также визуально проинформирует оператора: о выходе буя из зоны его постановки, ограниченной радиусом безопасности 200 м; о том, что через 14 дней закончится место для за-

писи данных в донной станции; о том, что приблизительно через 14 дней закончится запас электропитания буя или станции; о том, что буй оторвался (при этом каждые 6 мин буй будет сообщать на ЦП свои координаты, расстояние до буя от точки его постановки и направление его перемещений).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерительно-регистрационный комплекс “Шельф-2014” успешно решает поставленные при его разработке задачи и продолжает развиваться. Повышается надежность подготовки и работы устройств комплекса, совершенствуются режимы их работы.

Качество измерения акустического сигнала в диапазоне частот 2–15000 Гц, массогабаритные характеристики станции и время ее автономной работы соответствуют лучшим современным зарубежным образцам автономных подводных акустических регистраторов [27–30]. Модульность конструкции позволяет в случае необходимости расширить функциональность станции – например, дополнить ее высокоскоростным АЦП и гидрологическими датчиками.

Имеющиеся характеристики и состав комплекса открывают широкие возможности для его дальнейшего развития. Наличие встроенного акустического модема, не влияющего на энергопотребление донной станции и обеспечивающего связь на дистанциях в несколько километров, позволяет рассмотреть возможность организации системы взаимного позиционирования станций, совмещенной с сетью передачи данных по гидроакустическому каналу связи, подобно тому, как это сделано в современных системах USBL (ultra-short baseline – системы позиционирования на ультракороткой базе) на базе акустических модемов [31–34]. Акустические станции (а возможно, и другое оборудование), образующие эту сеть, могут иметь общий выход в глобальные сети через спутниковый канал связи.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам ТОИ ДВО РАН С.В. Борисову, В.А. Гриценко, И.В. Медведеву и А.Н. Рутенко, принимающим активное участие в эксплуатации и модернизации представленного измерительно-регистрационного комплекса, а также компании “Эксон Нефтегаз Лимитед” за поддержку данных работ и исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тюрнева О.Ю., Машинов М.К., Швецов Е.П., Фадеев В.И., Селин Н.И., Яковлев Ю.М.* Сезонные перемещения серых китов (*Eschrichtius robustus*) между кормовыми районами на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Морские млекопитающие Голарктики / Сб. науч. тр. 4-й межд. конф. С-Петербург: СПб ун-т, 2006. 530 с.

2. *Rutenko A.N., Borisov S.V., Gritsenko A.V., Jenkerson M.R.* Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. V. 134. P. 21–44.
3. *Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А., Путов В.Ф., Соловьев А.А.* Мониторинг параметров сейсмоакустических импульсов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 2. С. 248–257.
4. *Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Путов В.Ф., Соловьев А.А., Манульцев Д.С.* Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 3. С. 348–362.
5. *Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Воекголт М.* Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
6. *Racca R., Rutenko A., Broker K., Gailey G.* Model based sound level estimation and in-field adjustment for real-time mitigation of behavioral impacts from a seismic survey and post-event evaluation of sound exposure for individual whales / *Proceed. Acoust.* 2012. 21–23 November 2012, Fremantle, Australia.
7. *Рутенко А.Н., Racca R.* Организация и результаты акустического мониторинга во время постановки оснований нефтедобывающих платформ “Лунское” и “ПА-Б” на шельфе о. Сахалин / *Акустика океана. Докл. XI-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских.* М.: ГЕОС, 2006. С. 353–356.
8. *Рутенко А.Н., Гриценко В.А.* Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
9. *Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Автономная гидроакустическая станция с радиоканалом для акустических измерений на шельфе // *ПТЭ.* 2008. № 5. С. 1–6.
10. *Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н.* Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // *ПТЭ.* 2009. № 6. С. 102–106.
11. *Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А.* Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 4. С. 500–511.
12. *Донная станция гидроакустического измерительно-регистрационного комплекса.* Пат. RU 162221 U1. Российская федерация / Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н. – 2015151300/28; заявлено 30.11.2015; опубликовано 27.05.2016, Бюл. № 15.
13. <http://www.jcommops.org/dbcp/platforms/types.html>.
14. *Гриценко В.А.* Метод автоматизированного поиска вокализаций серых китов / *Акустика океана. Докл. XV-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских.* М.: ГЕОС, 2016. С. 285–288.

15. *Коротченко Р.А., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Акустические сигналы серых китов, записанные на северо-восточном шельфе о. Сахалин / Акустика океана. Докл. XV-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 212–215.
16. *Renata S. Sousa-Lima, Thomas F. Norris, Julie N. Oswald, Deborah P. Fernandes* A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals // *Aquatic Mammals*. 2013. V. 39(1). P. 23–53.
17. *Веденев А.И., Кочетов О.Ю., Иванов В.Н., Bouzidi M., Keryer G., Souami Y.* Разработка спутникового гидроакустического буя для мониторинга и идентификации морских млекопитающих по франко-российскому проекту (oseo-innovation – fasie, 2010) / Акустика океана. Докл. XIII-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2011. С. 315–319.
18. *Newhall A.E., Duda T.F., Keith von der Heydt, Irish J.D., Kemp J.N., Lerner S.A., Liberatore S.P., Ying-Tsong Lin, Lynch J.F., Maffei A.R., Morozov A.K., Shmelev A.A., Sellers C.J., Witzell W.E.* Acoustic and oceanographic observations and configuration information for the WHOI moorings from the SW06 experiment / Woods Hole Oceanog. Inst. Tech. Report. 2007.
19. *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.
20. *Коротченко Р.А., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Результаты экспериментальных и теоретических исследований распространения низкочастотного звука на шельфе / Акустика океана. Докл. XII-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2009. С. 95–98.
21. *Рутенко А.Н., Соловьев А.А., Ущиповский В.Г., Jenkinson M.R.* Построение оценок спектра антропогенных шумов на основе предварительных экспериментальных и теоретических исследований / Акустика океана. Докл. XIV-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 223–226.
22. Гидроакустическая станция, совмещенная с акустическим модемом. Пат. RU 161978 U1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2015153340/28; заявлено 11.12.2015; опубликовано 20.05.2016, Бюл. № 14.
23. *Ковзель Д.Г., Гриценко В.А., Медведев И.В., Фершалов М.Ю.* Измерительно-регистрационный комплекс для мониторинга в реальном времени акустических параметров сейсморазведочных сигналов на шельфе / Акустика океана. Докл. XV-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2016. С. 313–316.
24. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 728 с.
25. Способ передачи дискретной информации по каналу связи с многолучевым распространением. Пат. RU 2647656 С1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2017104787; заявлено 14.02.2017; опубликовано 16.03.2018, Бюл. № 8.
26. Способ передачи дискретной информации по каналу связи с многолучевым распространением. Пат. RU 2638760 С1. Российская федерация / Ковзель Д.Г. – 2017106552; заявлено 27.02.2017; опубликовано 15.12.2017, Бюл. № 35.
27. www.jasco.com/amar.
28. <http://www.loggerhead.com/acoustic-dataloggers-2/>.
29. http://www.desertstar.com/ru_RU/passive-recorders.
30. <http://turbulentresearch.com/tr-orca>.
31. <https://www.evologics.de/en/products/USBL/index.html>.
32. <http://www.link-quest.com/html/intro2.htm>.
33. <https://www.sonardyne.com/product-category/type/system/>.
34. <http://www.teledynmarine.com/trackit/?BrandID=2>.