

РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ АНТРОПОГЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ И ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ НА ШЕЛЬФЕ

© 2015 г. А. Н. Рутенко, С. В. Борисов, Д. Г. Ковзель, В. А. Гриценко

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева

690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

Приводится описание и технические характеристики автономной гидроакустической станции, разработанной в ТОИ ДВО РАН для стационарных измерений вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц на шельфе у дна. Для организации мониторинга параметров сейсморазведочных импульсных сигналов и промышленных акустических шумов в реальном времени станция дополнительно оснащается цифровым УКВ–ЧМ радиотелеметрическим каналом. По нему на береговой пост передаются акустические данные, измеренные в полосе частот 2–2000 Гц, а также спутниковым радиотелеметрическим каналом “Иридиум”. С его помощью осуществляется управление работой УКВ–ЧМ радиопередатчика и передаются результаты специального анализа акустических данных, полученных на последовательных временных интервалах, равных одной минуте.

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

DOI: 10.7868/S0320791915040097

ВВЕДЕНИЕ

Представляемая в данной работе акустическая станция “Шельф-14” разработана для проведения ежегодных акустических измерений на северо-восточном шельфе о. Сахалин на границах и внутри двух традиционных районов летне-осеннего нагула серых китов. Это прибрежный, примерно до 20 м изобаты, Пильгунский район и относительно глубоководный, 30–50 м, Морской район [1]. Вблизи этих районов производится добыча углеводородов с помощью установленных в море платформ, и наклонного бурения с берега. Акустические измерения позволяют контролировать уровни антропогенных шумов, генерируемых данной производственной деятельностью. В сочетании с наблюдениями за физическим состоянием серых китов с помощью методов фотоидентификации [2], внутрисезонном их распределением [3], а также за их кормовой базой [4], они дают необходимую информацию об условиях существования данной популяции в этих двух важных районах ее кормления.

Во время проведения необходимых для рационального освоения месторождений сейсморазведочных исследований [5–8], а также во время установки платформ и строительства подводных трубопроводов [9, 10], проводится акустический мониторинг в реальном времени. При превышении заданных критериев прекращается излучение

сейсморазведочных сигналов или останавливается производственная операция, которая сформировала в районе нагула китов уровень антропогенных шумов, превысивший заданный критерий. С воздействием антропогенных шумов и сейсморазведочных импульсов на серых китов можно ознакомиться в работе [11].

В 2002 г. группе специалистов из ТОИ им. В.И. Ильичева ДВО РАН, занимающихся мониторингом промышленных акустических шумов на северо-восточном шельфе о. Сахалин [12], представителями компаний “Эксон Нефтегаз Лимитид” и “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” было сделано предложение разработать и изготовить мелкую серию автономных донных акустических регистраторов, с помощью которых можно было бы проводить измерения уровней антропогенных и фоновых акустических шумов, включая возможность проведения акустического мониторинга в реальном времени.

Измерения вариаций акустического давления надо было проводить в частотном диапазоне 2–15000 Гц с возможностью передачи в реальном времени части акустических данных по радиотелеметрическому каналу на береговой пост или борт судна. Данная акватория характеризуется пологим песчаным дном с уклоном меньше 0.004, сложными гидродинамическими условиями, скорость приливных течений может достигать 1.5 м/с. Поскольку глуби-

на моря в основных точках акустического мониторинга равна 10–20 м, то на измерительный гидрофон могут оказывать существенное влияние как приливно-отливные течения, так и орбитальное движение частиц воды в штормовых поверхностных волнах и волнах зыби, вызывая низкочастотные псевдшумы обтекания. Кроме того, на изобате 10 м мигрирующий под действием поверхностных волн песок может закопать стационарный гидрофон или донный контейнер, расположенные на дне. Другими словами, помимо обеспечения корректных акустических измерений необходимо было решить и гидродинамические задачи, найти оптимальные соотношения между геометрическими размерами и весом устройств, устанавливаемых на дне.

Первые четыре автономных подводных акустических регистратора (АПАР) были испытаны на северо-восточном шельфе о. Сахалин в 2003 году. Эти АПАР обеспечивали запись акустических сигналов в диапазоне частот 2–15 000 Гц, с динамическим диапазоном измерений равным 96 дБ. В 2005–2007 гг. для мониторинга в реальном времени антропогенных акустических сигналов в диапазоне частот 10–5000 Гц АПАР оснащались аналоговыми УКВ–ЧМ радиотелеметрическими каналами [13]. Известно, что реальный динамический диапазон измерений при использовании аналогового УКВ–ЧМ радиотелеметрического канала зависит от уровня его собственных шумов. Поэтому для его оценки и контроля собственных шумов радиотелеметрического канала в акустической станции применялся тестовый сигнал со сложным, но стабильным спектром. В соответствии с программой на вход радиопередатчика вместо акустического сигнала на три минуты подключался тестовый сигнал. Анализ его спектра на приемном пункте позволял оценить реальный динамический диапазон и собственные шумы радиотелеметрического канала на разных частотах.

Корректный мониторинг в реальном времени параметров сейсморазведочных сигналов потребовал разработки и применения акустических станций с цифровым УКВ–ЧМ радиотелеметрическим каналом типа “Шельф-09” [14], обеспечивающих непрерывную передачу акустических сигналов, измеряемых в частотном диапазоне 2–2000 Гц на расстояние до 16 км с отношением сигнал/шум не менее 96 дБ. Практика эксплуатации станции “Шельф-09” на северо-восточном шельфе о. Сахалин показала ее высокую надежность при использовании как кабельной [6], так и УКВ–ЧМ радиотелеметрии [7]. К сожалению, из-за отсутствия возможности управления УКВ-радиопередатчиком (включение, выключение, изменение мощности излучения) требуется неоправданно большой расход электроэнергии питания. Например, при мониторинге параметров сейсморазведочных импульсов во время сейсморазведки, проведенной в 2010 г. на Пильгун-Ас-

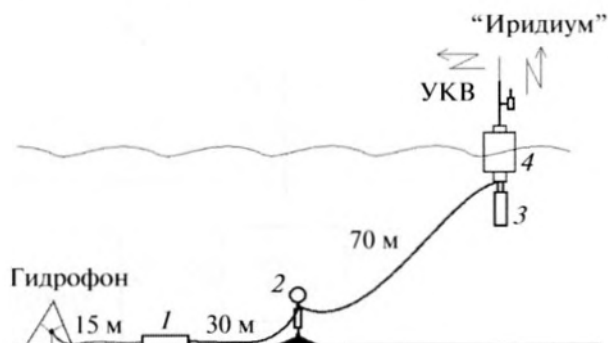


Рис. 1. Схема постановки радиогидроакустической станции “Шельф-14” в море. Обозначение: 1 – контейнер с автономным подводным акустическим регистратором и двумя блоками питания, 2 – акустический размыкатель, 3 – контейнер с двумя блоками питания, 4 – радиобуй с одним блоком питания.

тохском углеводородном месторождении [7], чистое время работы сейсморазведочного судна на профилях составило 142 ч, а время непрерывной работы цифрового УКВ–ЧМ радиотелеметрического канала – 26 сут.

В настоящее время новое поколение высокопроизводительных малопотребляющих микроконтроллеров и твердотельных накопителей (SD-карт) позволило отказаться от применения в АПАР ЭВМ и жестких дисков, что приводит к существенному – более чем в 15 раз – уменьшению энергопотребления. Применение спутникового радиотелеметрического канала типа “Иридиум” позволяет решить проблему управления работой УКВ–ЧМ радиопередатчика и получать, практически в реальном времени, результаты специального анализа измеренного акустического сигнала.

В данной работе приводится описание автономной акустической станции нового поколения “Шельф-14” с цифровым УКВ–ЧМ и спутниковым “Иридиум” радиотелеметрическими каналами, основанной на применении 24-разрядного сигма-дельта АЦП, малопотребляющих контроллеров и SD-карт. На рис. 1 показана схема постановки “Шельф-14” в море.

СОСТАВ И РАБОТА РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Основным измерительно-регистрационным устройством станции “Шельф-14” является автономный акустический регистратор АР-2013, который в различных вариантах станции в соответствии с решаемыми задачами дополняется специализированными модулями и устройствами, такими как акустический модем или телеметрические каналы для передачи части акустических данных или результатов их специального анализа в режиме реального

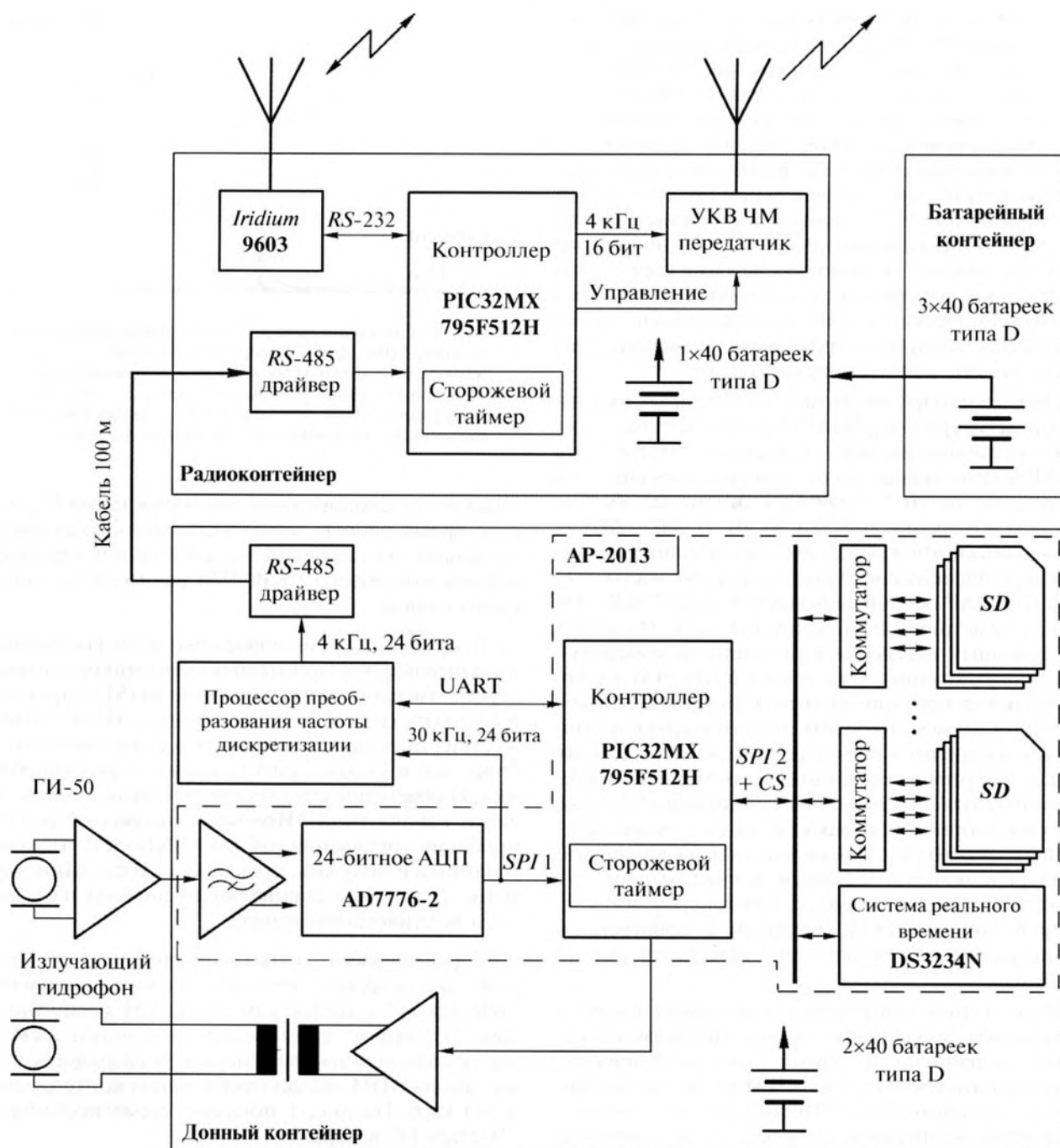


Рис. 2. Объединенная структурная схема станции «Шельф-14».

времени. Структурные схемы всех этих устройств объединены на рис. 2.

АКУСТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР

Акустический регистратор AP-2013 предназначен для работы в составе автономной акустической донной станции. Его основная функция — измерение аналогового сигнала на выходе гидрофона и запись результатов на съемные твердотель-

ные устройства энергонезависимой памяти типа SD-карт в форме цифрового кода. На рис. 2 узлы, входящие в состав AP-2013, обведены пунктирной линией.

Для преобразования вариаций акустического давления $p(t)$ в аналоговое напряжение используется измерительный гидрофон типа ГИ-50 производства ВНИИФТРИ. Измерительные цепи AP-2013 основаны на 24-разрядном сигма-дельта

АЦП AD7776-2 производства Analog Devices. Разводка печатной платы выполнена в соответствии с рекомендациями, представленными в [15]. Это обеспечило динамический диапазон измерений (в 1-герцовом окне БПФ) 140 дБ и максимальную частоту дискретизации 31 кГц. С выхода АЦП данные по последовательному интерфейсу SPI поступают на микроконтроллер PIC32MX795F512H, осуществляющий управление работой АЦП, накопителя и дополнительных модулей, а также преобразование форматов данных, их буферизацию и обработку. Для накопления данных используются SD-карты. Такая карта емкостью 128 Гб при 24-разрядном кодировании данных и частоте дискретизации 30 кГц заполняется за 16,3 суток. АР-2013 может комплектоваться любым необходимым количеством SD-карт.

Файлы, создаваемые акустическим регистратором, выполнены в формате FAT32 и совместимы с Windows. Однако процесс записи данных в акустической станции отличается от стандартного. Целью использования нестандартных процедур является необходимость повышения надежности записи и сохранности данных при неожиданных нарушениях работы регистратора – пропаланиях питания, механических повреждениях, сбоях. Все файлы данных имеют размер 1 Гб (107374824 байт) и создаются заранее, сразу после форматирования SD-карты. Далее ни в каких режимах работы “Шельф-2014” никаких изменений файловой системы, корневой директории и параметров файлов не производится. Это обеспечивает целостность данных при любых нештатных ситуациях.

Каждый файл помимо акустической информации содержит заголовок (10 байт в начале каждого файла), в который записываются время и дата начала записи данных, номер станции, номер слота в станции (разъема, в который была установлена данная карта в станции), признаки заполнения файла и разрядности данных, некоторые подробности процесса записи, напряжение на батареях питания станции. Вся эта информация обеспечивает возможность правильной автоматической сортировки записанных файлов при их обработке даже в случае аварийных ситуаций. Запись данных на карты производится последовательно. Однако в случае какого-либо сбоя запись переносится на следующую карту, не заполняя ту, при записи которой произошел сбой. Если все пустые карты заполнены, программа контроллера просматривает не заполненные до конца карты и продолжает на них запись.

Регистратор включает также часы реального времени на микросхеме DS3234 с встроенным термокомпенсированным кварцевым резонатором. Ошибка не превышает 3 минут за год. Часы имеют независимый буферный источник питания – литий-ионную батарею. Примененный в регистраторе микроконтроллер PIC32MX795F512H имеет бога-

тый набор встроенных периферийных устройств и большой запас вычислительной мощности. Это позволяет с минимальными аппаратными затратами дополнять регистратор дополнительными программными функциями и аппаратными модулями. Электропитание АР-2013 осуществляется от двух батарейных модулей, каждый из которых содержит 40 батареек типа D. Включение акустического регистратора производится перед его постановкой в море или по внутреннему таймеру. Возможны варианты его включения специальным разъемом на корпусе регистратора или кодовым сигналом, принятым акустическим модемом (ТОИ ДВО РАН).

На примере акустических измерений, проведенных в 2014 г. на северо-восточном шельфе о. Сахалин во время сейсмозазведки, проиллюстрируем измерительные характеристики АР-2013 на натуральных данных. На рис. 3 показаны вариации $p(t)$, измеренные у дна на глубине 20 м во время сейсмозазведки (графики “Импульс”) и через 15 ч в штительных условиях при отсутствии вблизи акустической станции судов (графики “Фон”). Видно, что согласующий усилитель-корректор гидрофона ГИ-50 и 24-разрядное сигма-дельта АЦП, применяемые в АР-2013, на практике реализуют динамический диапазон акустических измерений в 1 Гц окне БПФ больше 120 дБ. Максимальная амплитуда вариаций $p(t)$, которая могла быть измерена данным АПАР, равна 4500 Па.

АКУСТИЧЕСКИЙ МОДЕМ

В случае постановки АР-2013 в море на длительный срок становится актуальной возможность контроля его состояния без прерывания работы. Для этой цели АР-2013 дополнен функцией акустического модема. На борту судна размещается специально разработанное с этой целью телекомандное устройство (ТКУ), включающее приемно-излучающий пьезокерамический преобразователь и блок управления. ТКУ формирует и излучает акустическую кодовую посылку, которая принимается с помощью основного измерительного гидрофона станции и анализируется специальной программой в микроконтроллере. Работа программы основана на непрерывном расчете БПФ принятого сигнала и анализе его спектра. Обнаруженные последовательности сигнальных частот в свою очередь анализируются и преобразуются в цифровой код. Если код совпадает с номером станции, контроллер станции формирует ответную посылку, содержащую номер станции, количество заполненных карт и файлов, количество неисправных (сбойных) карт, напряжение питания батарей питания станции. Затем эта посылка излучается станцией. Для этого АР-2013 дополняется высокоэффективным ШИМ (PWM) усилителем нижних частот (MP3106 произ-

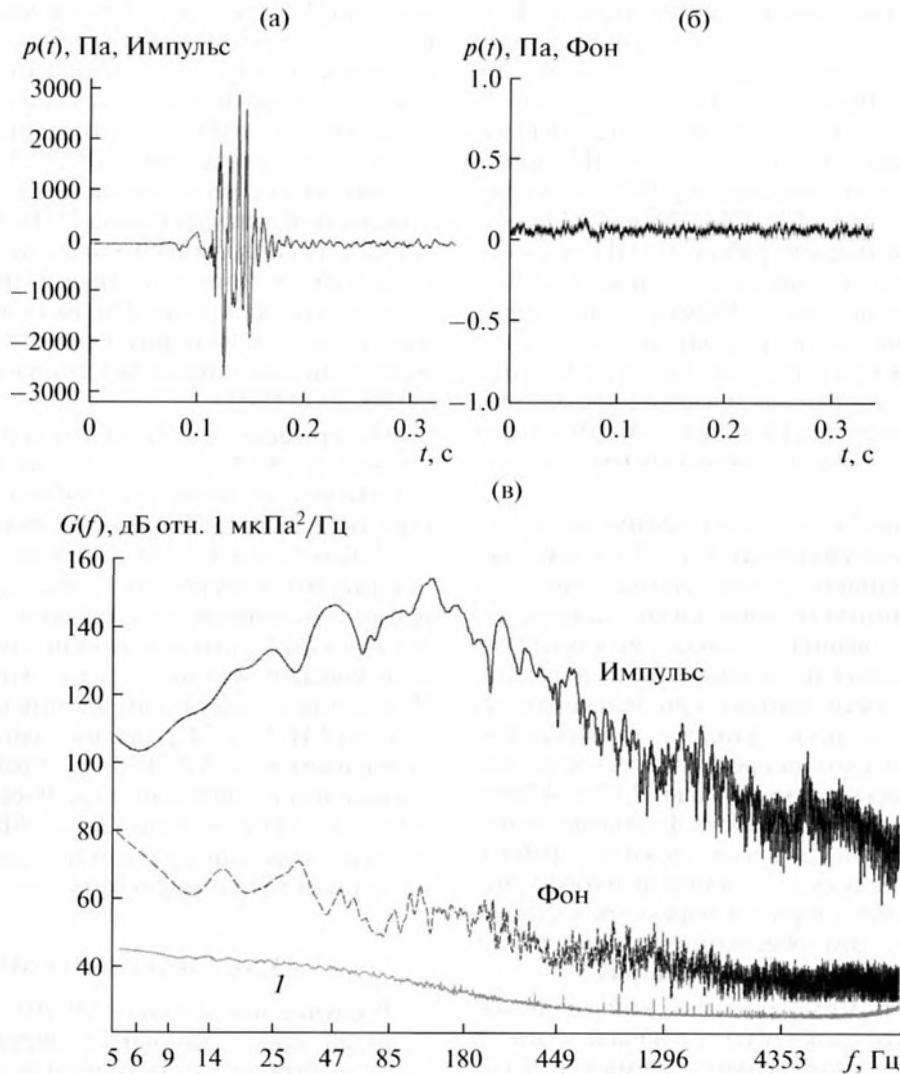


Рис. 3. Вариации акустического давления $p(t)$, измеренные гидрофоном AP-2013 у дна на глубине 20 м: (а) во время сейсморазведки – график “Импульс”, (б) в штительных условиях – график “Фон”; (в) оценки их спектров. Кривая I на графике (в) иллюстрирует спектр собственных шумов измерительно-регистрационного тракта AP-2013.

водства МастерКит), повышающим трансформатором и пьезокерамическим излучателем (рис. 2).

Ответ станции принимается ТКУ подобно тому, как станция принимала запрос ТКУ (хотя кодировки сигналов и алгоритмы приема несколько отличаются с целью снижения энергопотребления станции). Далее результаты приема через COM-порт вводятся в ноутбук для визуализации. Натурные испытания в бухте Витязь Японского моря показали, что при средней глубине моря 30 м и сложной береговой линии акустический модем надежно работает при дальностях до 2 км.

ЦИФРОВОЙ КОНВЕРТЕР ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

При работе акустической станции “Шельф-2014” в режиме мониторинга в реальном времени

AP-2013 дополняется телеметрическими каналами – приемопередающим спутниковым “Иридиум” и однонаправленным (с буя на приемный пост) УКВ–ЧМ каналом. Однако пропускная способность этих каналов не позволяет передавать всю измеренную акустическую информацию. По каналу “Иридиум” могут быть переданы только краткие результаты анализа исходного сигнала, а УКВ–ЧМ канал способен передать данные с частотой дискретизации 4.1 кГц и 16-разрядными отсчетами сигнала. Соответственно, перед передачей информации по каналу связи частота дискретизации должна быть понижена.

Кроме того, для передачи по кабелю от донного контейнера до радиобуя всех акустических данных, записываемых на SD-карты (рис. 1), требуется почти столько же энергии, сколько расходует

вся станция для измерения и записи акустического сигнала. По этой причине было принято решение снизить частоту дискретизации акустических данных, передаваемых на радиобуй, в донном контейнере. При этом за счет снижения количества данных в единицу времени энергозатраты на их передачу по кабелю составляют не более 30% от исходного потребления станции.

Для решения этой задачи разработан цифровой модуль конвертера частоты дискретизации (Sample Rate Converter) на основе цифрового сигнального процессора AD1895 производства Analog Devices [15]. Эта микросхема производит цифровую фильтрацию и интерполяцию входного потока данных в реальном времени, а затем делает выборки значений сигнала в соответствии с новой частотой дискретизации. Проведенные обмеры показали, что преобразование частоты дискретизации с 30 кГц до 4.1 кГц действительно не вносит дополнительных шумов и искажений в измеренный акустический сигнал. Кроме AD1895 модуль конвертера частоты дискретизации содержит микропроцессор PIC32MX110F016B для согласования интерфейсов и форматов данных, а также драйвер кабельной линии стандарта RS-485 ADM2682E с гальванической развязкой от линии, что повышает надежность системы.

Как показано на рис. 2, модуль использует тот же сигнал от АЦП, что и основной контроллер станции. С выхода модуля сигнал с частотой дискретизации 4.1 кГц подается в кабельную линию и далее на радиобуй. Кроме того, контроллер модуля по интерфейсу UART получает от основного контроллера станции информацию о состоянии станции в том же формате, что и в ответе на запрос акустического модема, и она также передается по кабелю на контроллер радиобуя. Таким образом, контроллер радиобуя постоянно имеет информацию о работе станции и может передать ее на береговой пост по запросу через систему “Иридиум”.

Электропитание всей аппаратуры, установленной в донном контейнере станции “Шельф-2014”, осуществляется от двух батарейных модулей, каждый из которых содержит 40 батареек типоразмера D. Время непрерывной работы “Шельф-2014” от этих модулей (расчетное) составляет 8 месяцев в автономном варианте и 4–6 месяцев при необходимости подключения телеметрических каналов. Включение акустической станции производится специальным герморазъемом типа Subconn на корпусе станции перед ее постановкой в море, но возможен вариант ее включения по внутреннему таймеру или по команде с “Иридиума” или акустического ТКУ.

РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЙ БУЙ СТАНЦИИ “ШЕЛЬФ-2014”

Радиобуй станции “Шельф-2014” (см. рис. 1 и 2) объединяет в себе драйвер кабельной линии стан-

дарты RS-485, контроллер, двунаправленный спутниковый канал связи “Иридиум” и УКВ–ЧМ радиоканал. Как описано выше, по кабельной линии на контроллер буя (PIC32MX795F512H) поступает последовательность 24-разрядных слов акустических данных с частотой дискретизации 4.1 кГц, а также информация о состоянии донной части станции.

Контроллер обеспечивает прием данных с кабельной линии, специальную обработку акустических данных, результаты которой передаются по спутниковому телеметрическому каналу, прием и исполнение команд, передаваемых с берегового поста по спутниковому каналу (управление УКВ–ЧМ радиоканалом, передачей данных по спутниковому каналу, передача информации о состоянии донной части станции и буя). Кроме того, контроллер осуществляет преобразование входных данных в канальный код для передачи по УКВ–ЧМ радиоканалу. При этом последовательность 24-битных слов данных преобразуются в 16-битные слова данных. Производится выбор необходимого коэффициента передачи цифрового радиотелеметрического тракта в диапазоне от 1 до 256 по командам управления, переданным по спутниковому каналу (при включении буя автоматически устанавливается коэффициент 1). Далее 16-битные слова данных дополняются битами синхронизации и перекодируются в код OQPSK [14], после чего через согласующий каскад код подается в УКВ–ЧМ радиоканал, который аналогичен радиоканалу станции предыдущего поколения “Шельф-09”. Сигналы радиобуя “Шельф-2014” могут быть приняты оборудованием радиоприемного поста, представленного в работе [14]. Особенностью радиобуя станции “Шельф-2014” является возможность дистанционного управления УКВ–ЧМ радиоканалом командами, передаваемыми на контроллер буя по спутниковому каналу “Иридиум”. Это команды включения–выключения, переключения мощности излучения (1, 2.5, 5 Вт), выбора коэффициента передачи цифрового тракта.

СПУТНИКОВЫЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЙ КАНАЛ “ИРИДИУМ”

В станции “Шельф-2014” система “Иридиум” используется в режиме SBD (Short Burst Data – режим передачи коротких сообщений), причем применены миниатюрные модемы 9603, не требующие SIM-карты. Для этих модемов максимальная длина исходящего сообщения равна 360 байт, а входящего – 270 байт. Для обеспечения гарантированно малой максимальной задержки сообщения (25 с) основным рабочим режимом выбран режим “точка–точка”, т.е. передача данных с одного модема (размещенного в радиобуе) на другой (подключенный к ноутбуку на посту приема–управления). На самом деле сообщения идут по цепочке буй–спутник–сервер–“Ириди-

ум”–спутник–приемный модем. Команды управления работой станции передаются обратно по этой цепочке. Таким образом, максимальная длина одного сообщения для “Шельф-2014” равна 270 байт.

Любой модем (размещенный на бую или на береговом посту) может отправлять свои сообщения по пяти (или менее) адресам, заранее указанным в договоре с провайдером сети “Иридиум”. В качестве адреса может быть использован модем (в этом случае используется IMEI – индивидуальный номер модема) или адрес электронной почты. Во втором случае время доставки сообщения определяется сетью “Интернет” и не гарантировано. Однако при хорошей работе Интернета время доставки в этом случае составляет несколько секунд.

В составе радиобуя (рис. 2) модем “Иридиум” работает под управлением контроллера. Один раз в минуту контроллер формирует результаты обработки акустического сигнала в полосе до 2 кГц и передает их через модем на пост. При этом предварительно делается проверка, доставлено ли предыдущее сообщение. Если предыдущее сообщение не доставлено, оно стирается и заменяется новым. Для приема команд управления работой станции используется сервис RING – вызов. В этом режиме при отправке команды с поста управления сеть “Иридиум” подает соответствующую команду на принимающий модем в бую, а он посылает на контроллер сообщение “gingalert”. Получив это сообщение, контроллер считывает информационное сообщение, исполняет содержащиеся в нем команды и отправляет на пост подтверждение и необходимую информацию.

ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА И ФОРМИРОВАНИЯ ДАННЫХ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ ПО СПУТНИКОВОМУ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОМУ КАНАЛУ

Основной задачей акустического мониторинга, проводимого в реальном времени, является контроль за величинами

$$\begin{aligned}
 SPL_{rms}(t') &= 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\int_{t'}^{t'+\Delta t} p^2(\tau) d\tau / \Delta t}}{p_0} \right) \cong \\
 &\cong SPL_{rms}(\Delta f; t') = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G(f; t') df}}{p_0} \right), \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SEL(t') &= 10 \lg \left(\frac{\int_{t'}^{t'+\Delta t} p^2(\tau) d\tau}{p_0^2 \Delta t_0} \right) \cong \\
 &\cong SEL(\Delta f; t') = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f; t') df}{p_0^2 \Delta t_0} \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Здесь $p(\tau)$ – зависимость акустического сигнала в точке приема от времени τ (предполагается, что сигнал зарегистрирован в полосе частот $[f_1 \dots f_2]$); Δt – время усреднения; p_0 – акустическое давление 1 мкПа; $\Delta t_0 = 1$ с; $G(f, t')$ – периодограмма вариаций $p(\tau)$ на интервале времени $t' \dots t' + \Delta t$, где время t' выступает в качестве параметра и изменяется с шагом Δt ; $SPL_{rms}(\Delta f)$ – уровень среднеквадратичного значения акустических шумов в дБ отн. 1 мкПа в частотном диапазоне $\Delta f = f_2 - f_1$; $SEL(\Delta f)$ – уровень акустического воздействия или уровень энергии акустических шумов в дБ отн. 1 мкПа² с в частотном диапазоне Δf на временном интервале Δt . Данные формулы записаны для квазистационарных акустических шумов, но они применяются и для импульсных акустических сигналов, только в этом случае $\Delta t = T_{90\%}$ – временной интервал, на котором сосредоточено 90% энергии акустического импульса.

Таким образом, при оценивании показанных на рис. 4 параметров акустических импульсов, генерируемых во время сейсмозаземки или забивки фундаментных свай на берегу [7, 16], нужно в сигнале $p(t)$ обнаружить квазипериодическую серию импульсов, отвечающих работе буксируемого сейсмоизлучающего комплекса из пневмопушек (рис. 4а) или ударам копра по забиваемой в грунт свае (рис. 4в). Далее следует определить положение каждого анализируемого импульса на временной оси, оценить временной интервал $T_{100\%}$, соответствующий 100% энергии импульса, а затем определить начало $t_{5\%}$ и конец $t_{95\%}$ временного интервала, на котором сосредоточено 90% энергии этого импульса. После определения для анализируемого импульса временного интервала $T_{90\%}$ можно оценить его параметры во временной области:

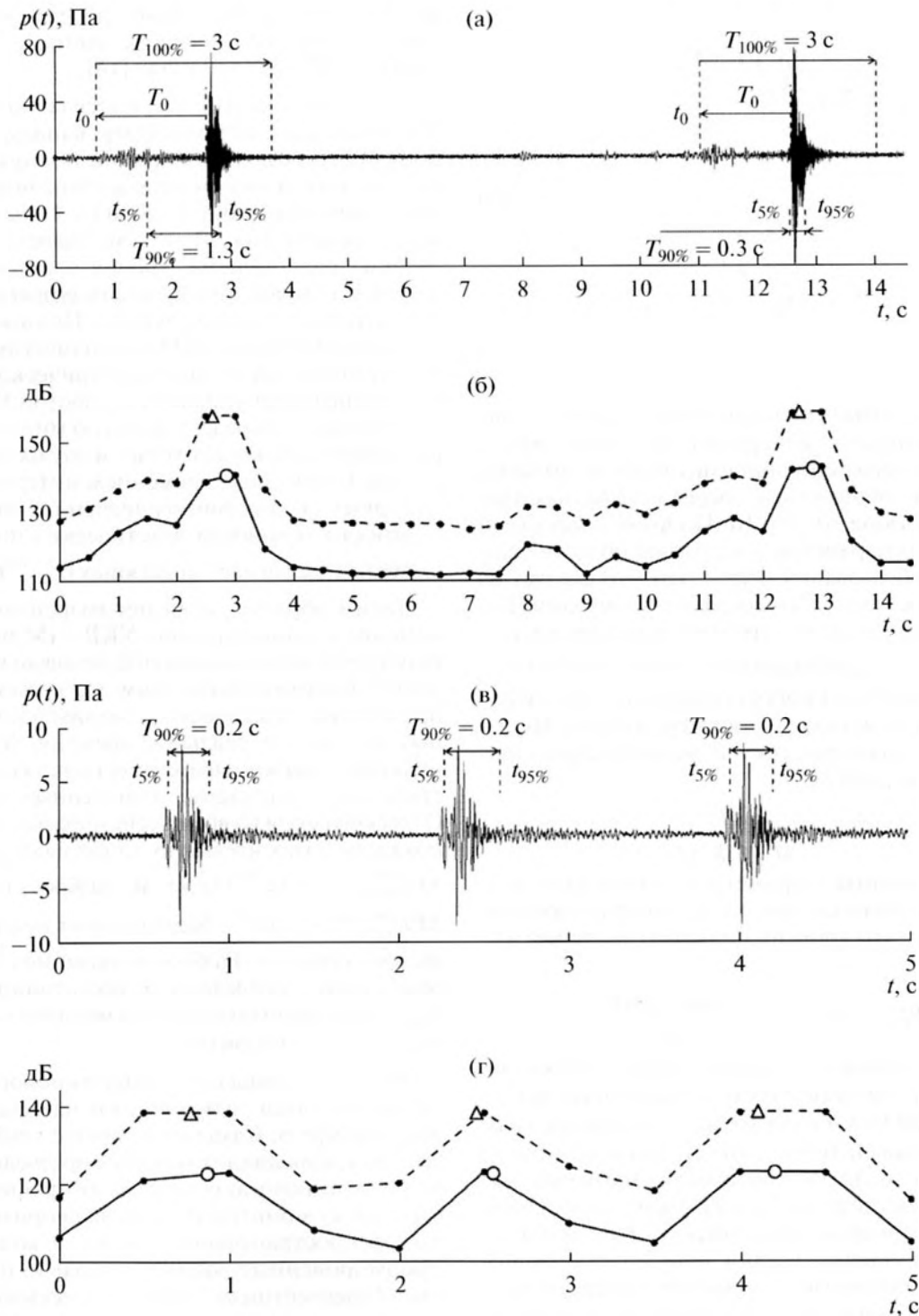


Рис. 4. Примеры акустических импульсов, измеренных на северо-восточном шельфе о. Сахалин во время сейсморазведки (а) и забивки на берегу фундаментальных свай (в). Результаты анализа, проведенного по акустическим импульсам на временных интервалах $T_{90\%}$ и по ряду $p(t)$ на 0.5-секундных интервалах с 50% перекрытием – (б) и (г). Обозначения: Δ – $SPL_{\text{peak}}^{\text{imp}}(T_{90\%})$, пунктирная линия – $SPL_{\text{peak}}^{\text{max}}(\Delta t = 0.5 \text{ c})$, о – $SEL_{90\%}^{\text{imp}}$ (15–2000 Гц), сплошная линия – $SEL_{\Delta t=0.5 \text{ c}}^{\text{max}}$ (15–2000 Гц).

$$SPL_{rms}^{imp} = 20 \lg \left(\frac{\int_{t_{95\%}}^{t_{99\%}} p^2(t) dt / T_{90\%}}{p_0} \right), \quad (3)$$

$$SEL^{imp} = 10 \lg \left(\frac{\int_{t_{95\%}}^{t_{99\%}} p^2(t) dt}{p_0^2 \Delta t_0} \right).$$

В данном случае анализ проводится во всем частотном диапазоне измерений вариаций $p(t)$, а энергия сейсморазведочных импульсов, и тем более импульсов от забивки свай, сосредоточена, как правило, в диапазоне 10–400 Гц. Поэтому корректней определять их параметры в частотной области с помощью преобразования Фурье, как это следует из теоремы Парсеваля [17] и показано формулами (1) и (2). В этом случае легко перейти в заданном частотном диапазоне к абсолютным значениям $\hat{G}(f)$ в мкПа²/Гц благодаря корректировке на частотную зависимость чувствительности гидрофона $M(f)$ и частотную характеристику измерительного аналогового тракта $K(f)$:

$$\hat{G}(f) = \frac{G(f)}{M^2(f)K^2(f)}.$$

Еще один важный параметр акустического импульса определяется при его анализе во временной области: это уровень пикового значения амплитуды

$$SPL_{peak}^{imp}(\Delta t) = 20 \lg \left(\frac{\max_{\Delta t} |p(t)|}{p_0} \right),$$

где Δt – временной интервал на котором определяется пиковое значение амплитуды вариаций $p(t)$.

В ТОИ ДВО РАН разработана программа, в которой реализован метод автоматического поиска в акустическом сигнале импульсов, применяемых в морской сейсморазведке и формируемых в море во время забивания свай на берегу. Этот метод основан на применении порога, определяемого автоматически с помощью оценивания процентильного распределения взятых по модулю и усредненных за 10 мс значений акустических сигналов, измеренных на 3–5 минутном временном интервале [18]. Решение о принадлежности обнаруженных импульсов к сейсморазведке принимается на основе алгоритма проверки периодичности их следования и соответствия этого периода частоте излучения. Эта программа применяется при анализе акустических сигналов, измеренных в частотном диапазоне 2–15000 Гц и записанных на SD-карте AP-2013, после подъема акустической станции, а так-

же во время мониторинга в реальном времени при анализе акустических данных, получаемых по УКВ–ЧМ радиоканалу [14].

Акустические данные, поступающие по УКВ–ЧМ радиотелеметрическому каналу, позволяют получить в реальном времени полную информацию об акустическом поле в точке мониторинга в частотном диапазоне 2–2000 Гц. Однако его дальность ограничена 10–15 км, зависит от высоты “точки” радиоприема, уровня электромагнитных помех, а главное, нужно иметь разрешение на его применение в данном районе. Поэтому акустическая станция “Шельф-14” дополнительно оснащена спутниковым радиотелеметрическим каналом. Он обеспечивает управление работой УКВ- радиопередатчика и передачу (каждую минуту) данных о параметрах низкочастотных импульсов, измеренных на 1-минутном временном интервале, а также о средних за одну минуту значениях спектральной плотности мощности акустических шумов в 1/3-октавных частотных диапазонах $G^{1/3\text{-oct}}(f)$.

Таким образом, если нет разрешения на применение в данном районе УКВ–ЧМ радиоканала, то остается использовать спутниковый канал “Иридиум”, поэтому рассмотрим его возможности для проведения акустического мониторинга импульсных сигналов в реальном времени. Многолетняя практика оценки параметров низкочастотных акустических импульсов, измеренных на шельфе Охотского моря во время сейсморазведочных работ, показала относительную стабильность значений $SPL_{peak}^{imp}(r)$, $SEL^{imp}(\Delta f, r)$ и разброс в значениях $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, r)$, где r – расстояние от точки излучения до точки приема. Разброс в значениях $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, r)$ обусловлен определением временного интервала $T_{90\%}$, на котором оценивается мощность импульсного акустического сигнала.

На рис. 4а показан пример типового акустического импульса, измеренного на северо-восточном шельфе о. Сахалин в точке с глубиной моря 20 м во время движения сейсморазведочного судна по заданному акустическому профилю. Видно, что в точку мониторинга сначала приходят сигналы, распространившиеся в дне, а затем сигналы, сформированные водными модами, причем донные “предвестники” могут на несколько секунд опережать акустические волны, распространяющиеся в водном слое. Из рис. 4а видно, что при определении начала $T_{100\%}$ следует разумно ограничить интервал отступа от переднего фронта водного импульса T_0 . Практика показала, что при анализе параметров сейсморазведочных сигналов достаточным ограничением для величины $T_{100\%}$ является 3 с. При определении $T_{90\%}$ его величина и соответственно значение $SPL_{rms}^{imp}(\Delta f, r)$ могут измениться при переходе от одного импульса к дру-

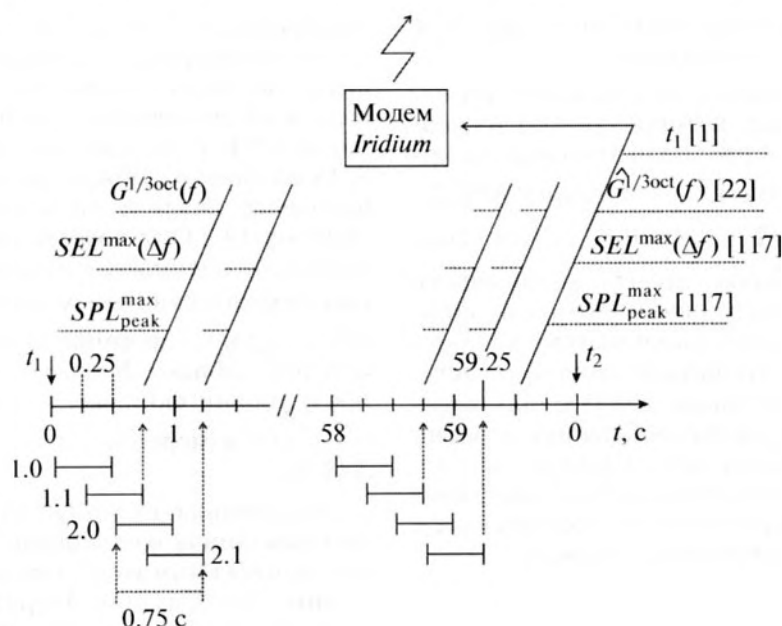


Рис. 5. Схема алгоритма работы программы оперативного анализа акустических данных и передачи его результатов на береговой пост по спутниковому радиотелеметрическому каналу.

гому на 10 дБ, при этом значения $SPL_{\text{peak}}^{\text{imp}}(r)$ и $SEL^{\text{imp}}(\Delta f, r)$ изменяются только на 0.5 и 1.5 дБ соответственно. Поэтому мы полагаем более рациональным при мониторинге в реальном времени следить именно за двумя этими параметрами импульсов. Отметим, что на восточной границе Пильгунского района нагула серых китов во время проведения компанией “Сахалин Энерджи Инвестмент Лтд.” 4D-сейсморазведки на Пильгун-Астохском месторождении в 2010 г. береговой командой было зарегистрировано, что когда значение SEL^{imp} , пересчитанное на серого кита, достигло 150 дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2 \text{ с}$, кит, продолжая движение на север, поплыл ближе к берегу, где значение достигало 141 дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2 \text{ с}$ [8].

В удобном для нас режиме пропускная способность спутникового телеметрического канала “Иридиум” равна 270 байт/посылка. В акустической станции “Шельф-14” используется режим работы “точка–точка” и передаются результаты специального анализа акустических данных, записанных за 1 мин, в виде блоков данных через каждую минуту, поскольку задержка при передаче может достигать 20 с. На рис. 4б, 4в для сравнения представлены значения параметров измеренных акустических импульсов, полученных с помощью стандартной методики, основанной на оценивании параметров импульса на временном интервале $T_{90\%}$ и по предлагаемой в данной работе методике, представленной ниже. Видно, что при достаточно высоких отношениях сигнал/шум значения этих оценок совпадают.

Специальный анализ акустических данных для передачи его результатов по телеметрическому каналу “Иридиума” с периодом 60 с (рис. 2) производится с помощью расположенного в радиобуе контроллера по методике, представленной ниже. Программа анализа, в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 5, по акустическим данным значений $p(t)$, измеренных в частотном диапазоне 2–2000 Гц, по реализациям длиной 0.5 с производит расчет следующих величин:

$$SPL_{\text{peak}}(\Delta t) = 20 \lg \left(\frac{\max_{\Delta t} |p(t)|}{p_0} \right),$$

$$SEL(\Delta f) = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} G(f) df}{p_0^2 \Delta t_0} \right) \text{ и } G^{1/3-\text{oct}}(f),$$

где $\Delta t = 0.5 \text{ с}$, $f_1 = 15 \text{ Гц}$, $f_2 = 2000 \text{ Гц}$. Расчеты проводятся по 0.5-секундным рядам данных $p(t)$ со сдвигом 0.25 с, т.е. на каждом временном интервале, равном 0.75 с, имеются две оценки значения $SEL_{\Delta t}(\Delta f)$ и $SPL_{\text{peak}}(\Delta t)$. Запоминаются максимальные значения

$$SPL_{\text{peak}}^{\text{max}} = \max \{ SPL_{\text{peak}}^i(\Delta t), SPL_{\text{peak}}^{i+1}(\Delta t) \}$$

$$\text{и } SEL_{\Delta t}^{\text{max}}(\Delta f) = \max \{ SEL_{\Delta t}^i(\Delta f), SEL_{\Delta t}^{i+1}(\Delta f) \},$$

где $i = 1, \dots, 117$, $\Delta t = 0.5 \text{ с}$, $\Delta f = 15\text{--}2000 \text{ Гц}$. На рис. 4б, 4г приведены результаты такого анализа. Рассчитанные значения $SPL_{\text{peak}}^{\text{max}}$ и $SEL_{\Delta t}^{\text{max}}(\Delta f)$ по-

казаны точками, соединенными пунктирной и сплошной линиями соответственно.

Таким образом, в конце 59.25 с получаем отправляемое сообщение, которое состоит из значения времени начала проанализированного интервала времени (8 байт), 117 значений $SPL_{\text{peak}}^{\text{max}}$, 117 значений $SEL_{\Delta f}^{\text{max}}$ и 22 значений $\hat{G}^{1/3-\text{oct}}(f)$. Здесь $\hat{G}^{1/3-\text{oct}}(f)$ – усредненные по 117 реализациям оценки значений спектральной плотности мощности акустических шумов, рассчитанные в 1/3-октавных частотных диапазонах для интервала частот $\Delta f = 15\text{--}2000$ Гц. За оставшиеся 0.75 с программа упаковывает ряды значений в сообщение и передает его спутниковому модему для отправки. Для исключения ситуации зависания данная программа запускается главной программой в соответствии с началом следующего минутного интервала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе современной элементной базы удалось создать автономный донный акустический регистратор AP-2013, который при потреблении от источника питания 0.3 Вт обеспечивает измерение вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц с динамическим диапазоном 150 дБ и записью данных на SD-картах. Данные параметры необходимы для корректных измерений антропогенных акустических шумов и оценки параметров импульсных сейсморазведочных сигналов в районах шельфа, используемых морскими животными и людьми в их производственной деятельности, связанной, например, с разведкой и разработкой углеводородных месторождений [5–10].

Оснащение AP-2013 разработанным в ТОИ ДВО РАН акустическим модемом позволяет контролировать его работу в море, что бывает особенно важно при проведении на заданном интервале времени ответственных измерений. Применение в акустической станции “Шельф-14” цифрового УКВ–ЧМ радиотелеметрического канала позволяет в реальном времени точно контролировать уровень антропогенных шумов и параметры импульсных сейсморазведочных сигналов, измеренных в частотном диапазоне 2–2000 Гц (динамический диапазон не менее 96 дБ) на границах данного района. Например, кормления серых китов на шельфе, с целью корректировки производственной деятельности [10] или остановки сейсморазведки [7], если визуально контролируемый кит попадает в зону опасного для его здоровья акустического воздействия [11].

Оснащение станции “Шельф-14” спутниковым телеметрическим каналом “Иридиум” позволяет существенно экономить автономный энергоресурс станции благодаря дистанционной

возможности управления УКВ–ЧМ передатчиком. Спутниковый телеметрический канал “Иридиум” не требует получения специального разрешения на его применение в конкретном районе шельфа РФ. С его помощью в режиме 1-минутного SMS-сообщения можно получать результаты специального анализа, производимого на станции “Шельф-14”. Они позволяют в реальном времени корректно оценивать как параметры низкочастотных акустических импульсов $SPL_{\text{peak}}(\Delta t = 0.5\text{с})$, $SEL_{\Delta t=0.5\text{с}}(\Delta f)$, формируемых сейсморазведкой или при забивке фундаментных свай на берегу, так и уровни фоновых и антропогенных шумов $\hat{G}^{1/3-\text{oct}}(f)$, измеренных в частотном диапазоне 2–2000 Гц.

Автономная станция “Шельф-14” в разных комплектах востребована компаниями “Эксон Нефтегаз Лимитед” (оператор по проекту “Сахалин-1”) и “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” (оператор по проекту “Сахалин-2”) для организации и проведения ежегодного акустического мониторинга на северо-восточном шельфе о. Сахалин на границах и внутри районов кормления серых китов [1, 3], а также в режиме реального времени во время проведения компаниями морских сейсморазведочных исследований или забивки фундаментных свай на берегу. Реализованные в “Шельф-14” как технические и измерительные характеристики, так и алгоритмы оперативного анализа поступающих в реальном времени акустических данных с передачей его результатов по спутниковому телеметрическому каналу “Иридиум”, получили поддержку на седьмом совещании целевой группы по шумам – 7th Noise Task Force, – организованной при Международном союзе по сохранению природы – IUCN (International Union for Conservation of Nature), состоявшемся 3–5 октября 2014 г. в г. Южно-Сахалинске. “Шельф-14” рекомендован компании “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” к применению в 2015 г. при организации акустического мониторинга в реальном времени во время проведения компанией 3D-сейсморазведки на Пильгун-Астохском углеводородном месторождении [19].

Авторы выражают благодарность компаниям “Эксон Нефтегаз Лимитед” и “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” за поддержку данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турнева О.Ю., Маминов 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 межл. конф. С-Петербург: СПб ун-т, 2006. С. 530.

2. *Тюрнева О.Ю., Яковлев Ю.М., Томбах Р.К., Мейер С.К.* Серые киты охотско-корейской популяции у берегов острова Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2013. 244 с.
3. *Владимиров В.А., Стародымов С.П., Афанасьев-Григорьев А.Г., Корниченко М.С.* Распространение и численность серых китов охотско-корейской популяции в водах северо-восточного Сахалина / Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2010. № 19. С. 50–64.
4. *Демченко Н.Л., Фадеев В.И.* Состав и распределение амфипод у северо-восточного побережья о. Сахалин (Охотское море) // Изв. ТИНРО. Сб. науч. тр. Владивосток. 2011. Т. 166. С. 244–254.
5. *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.
6. *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.
7. *Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Voekholt M.* Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
8. *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.
9. *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.
10. *Рутенко А.Н., Гриценко В.А.* Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // *Акуст. журн.* 2010. № 1. С. 77–81.
11. *Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I., Thomson D.H.* Marine mammals and noise. Academic Press, 1995. 576 p.
12. *Борисов С.В., Гриценко А.В., Ковзель Д.Г., Лихачев В.В., Коротченко Р.А., Круглов В.М., Пенкин С.И., Рутенко А.Н.* Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натуральных экспериментах // *Вестн. ДВО РАН.* 2003. № 2. С. 16–29.
13. *Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г.* Автономная гидроакустическая станция с радиоканалом для акустических измерений на шельфе // *Приборы и техника эксперимента.* 2008. № 5. С. 132–137.
14. *Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н.* Автономная акустическая станция с цифровым радиотелеметрическим каналом для мониторинга сейсмоакустических сигналов на шельфе // *Приборы и техника эксперимента.* 2009. № 6. С. 102–106.
15. *Analog Devices, Inc.* AD7767.pdf. Data Sheet Rev A, 01/2009/www.analog.co.
16. *Blackwell S.B., Lawson J.W., Williams M.T.* Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island // *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. V. 115. Pt. 1. № 5. P. 2346–2357.
17. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. 465 с.
18. *Гриценко В.А.* Метод автоматического обнаружения сейсмоакустических импульсов / *Акустика океана. Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских.* М.: ГЕОС, 2013. С. 287–290.
19. <http://www.iucn.org/>