

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ОХОТСКОМ МОРЕ¹

А. И. Зайцев, И. С. Костенко, К. И. Кузнецов, Р. В. Леоненков,
А. Р. Гиниятулин, Ю. А. Панфилова

Представлены результаты непрерывных измерений колебаний уровня моря в южной части о. Сахалин в режиме реального времени. Рассмотрена разработанная система хранения гидрологических данных, доступ к которым возможен с любого компьютера из любой точки мира.

Ключевые слова: инструментальные измерения, передача данных в режиме реального времени, программно-аппаратный комплекс регистрации волнения.

ВВЕДЕНИЕ

Инструментальное наблюдение поверхностных волн в Охотском море в настоящее время вызвано необходимостью обеспечения безопасной работы буровых установок и нефтяных платформ в шельфовой зоне моря по добыче нефти и газа. До настоящего времени в инженерных расчетах практически не прослеживается вероятность появления в данной акватории аномально больших волн (волн-убийц), которые представляют для судов и морских сооружений большую опасность вплоть до возможности их потопления за считанные минуты.

Так как волны-убийцы, т. е. волны большой амплитуды, неожиданно появляются как бы из ниоткуда и так же быстро исчезают, то основным источником информации об их появлении являются в настоящее время судовые и спутниковые наблюдения. Для того чтобы изучить природу возникновения такого явления, как волна-убийца, а также оценить с достаточной точностью основные статистические характеристики волнения, необходимо проводить непрерывные измерения колебаний уровня моря [1].

Начиная с 2009 г., Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова Сахалин. Вначале измерения проводились на мысе Анива и в глубине Анивского залива на западном и восточном побережье (в районе п. Но-

виково и п. Кириллово), а с 2011 г. работы также проводятся в районе мыса Свободный (рис. 1).

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения проводились с помощью автономных донных регистраторов придонного давления АРВ-К12 производства КБ, г. Углич. Прибор выполнен в корпусе из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. На рис. 2 схематично показана конструкция датчика. В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Такой выбор не случаен: пьезорезонаторные элементы имеют малую температурную зависимость и высокую точность. Диапазон измерения давления (глубина погружения) достигает 100 м, относительная погрешность давления составляет 0,06 %, общий ток потребления 12 мА, разрешающая способность —

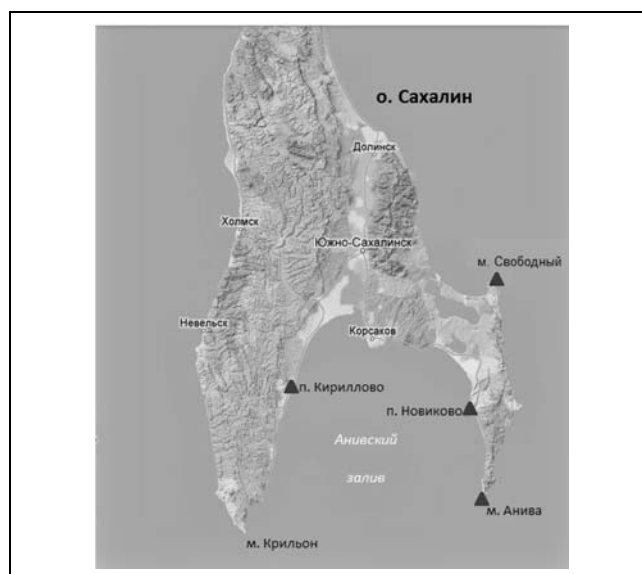


Рис. 1. Район проведения инструментальных наблюдений волнения моря СКБ САМИ ДВО РАН

¹ Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (соглашение № 14.В37.21.0642), а также при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5, гранта РФФИ 11-05-00216-а, гранта МК-5222.2013.5, гранта ДВО 13-III-B-07-050.

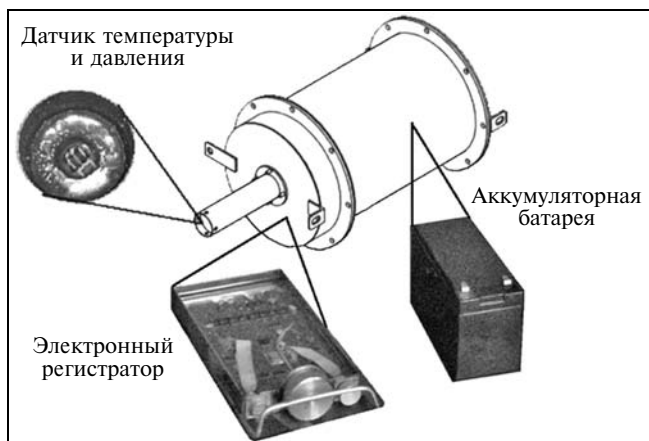


Рис. 2. Конструкция автономного регистратора придонного давления АРВ-К12

0,3 мм водного столба, диапазон рабочих температур от -6 до $+40$ °С. Прибор может автономно работать в течение 6 мес. Дискретность измерений 1 с. Прибор устанавливается на якорь. Он удобен в эксплуатации, его установка и обслуживание не представляет затруднений.

На мысе Свободный прибор установлен на глубине 12 м. Из-за малой глубины ветровые волны здесь мелководные, поэтому они могут измеряться при помощи датчиков давления с использованием гидростатических формул пересчета. Эти приборы уже использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 г. и Невельского цунами 2007 г. [2], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [8].

Установка прибора на дне моря продолжительностью 6 мес. исключает передачу данных в режиме реального времени. Специалистами СКБ САМИ ДВО РАН с 2010 г. ведутся работы по передаче данных в режиме реального времени на сервер СКБ САМИ с последующей автоматической обработкой. В качестве полигона используется мыс Свободный. К настоящему времени выполнены работы по установке веб-камеры, которая в режиме реального времени также передает данные на сервер www.skbsami.ru. В 2011 г. были проведены испытания прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных.

При организации наблюдений морского волнения в режиме реального времени существуют три основные проблемы: 1) непостоянный источник электроэнергии с высокой вероятностью перебоев в течение нескольких часов; 2) нестабильная связь с местом натуральных наблюдений, вызванная нестабильным и слабым сигналом сотовой станции; 3) ненадежное подключение датчиков к береговому комплексу.

Разработка СКБ САМИ позволяет решить эти проблемы с помощью относительно недорогих и, как показала практика, эффективных методов. В основе комплекса удаленного мониторинга морского волнения лежит персональный компьютер с низкой потребляемой мощностью и достаточно большим временем автономной работы (15 ч). К нему подключается дополнительная аккумуляторная батарея, позволяющая существенно продлить срок автономной работы комплекса. Датчик давления подключается к комплексу через схему согласования с микроконтроллером MSP430AFE253, который обеспечивает предварительную обработку аналогового сигнала с датчика давления. Кроме того, микроконтроллер позволяет дополнительно подключать другие аналоговые датчики, такие как датчики температуры, солености, электропроводности и т. д.

Данный микроконтроллер зарекомендовал себя, как надежное устройство. Он обеспечивает длительную работу устройств в портативных применениях благодаря гибкой системе энергосбережения, которая позволяет динамически переключаться между пятью уровнями производительности, снижая энергопотребление в те моменты, когда оно не активно, и возвращаться в активный режим со скоростью менее 1 мкс. В активном режиме микроконтроллер потребляет 220 мкА на 1 МГц, в спящем режиме 0,5 мкА на 1 МГц при напряжении питания 2,2 В.

Еще одной важной отличительной особенностью этого микроконтроллера является наличие модуля SD24_A, содержащего три независимых 24-битных сигма-дельта АЦП и генератор опорного напряжения. Каждый АЦП содержит три мультиплексированных дифференциальных входа. Один из входов используется для подключения внешних источников сигнала, два других канала каждого АЦП подключены к терморезистору для оценки температуры микроконтроллера и делителю напряжения питания. Аналого-цифровые преобразователи модуля SD24_A построены на базе сигма-дельта модулятора второго порядка и цифровых децимирующих фильтров. Коэффициент децимации может принимать значения до 1024. В случае необходимости, дополнительная децимация может быть реализована программно. В зависимости от выбранного коэффициента децимации разрядность результата преобразования составляет от 15 до 30 бит. По умолчанию установлен коэффициент децимации 256, что обеспечивает 24-битный результат на выходе цифрового фильтра.

Встроенный опорный генератор АЦП выдает напряжение 1,2 В. Этот сигнал может быть выведен на вывод VREF микроконтроллера. На этот же самый вывод подается опорное напряжение при использовании внешнего генератора. Несколько аналого-цифровых преобразователей могут быть синхронизированы между собой для осуществления одновременного захвата внешних сигналов. Каждый из преобразователей содержит встроенный усилитель с цифровым управлением и коэффициентом усиления до 32.

Микроконтроллер содержит также 16-битный аппаратный умножитель, сторожевой таймер, способный работать в режиме интервального таймера, 16-битный таймер общего применения с тремя регистрами захвата сравнения и универсальный последовательный интерфейс USART, конфигурируемый как UART либо SPI.

Данный контроллер посредством адаптеров RS-485/USB подключается к персональному компьютеру, где происходит предварительная обра-

ботка отсчетов, посылаемых микроконтроллером. В соответствии с этими алгоритмами обработки был разработан и отлажен специализированный программный комплекс, реализованный на Delphi со вставками ассемблерного кода.

Для организации связи комплекса с сервером мониторинга необходим стабильный интернет-канал. Мыс Свободный имеет слабое покрытие сотовой связью. Поэтому для увеличения стабильности сигнала была применена направленная антенна, ориентированная в сторону сотовой вышки, а также промышленный модем, обеспечивающий стабильный прием сигнала сотовой станции. Несмотря на то, что модем имеет существенно большую стоимость в сравнении с бытовыми GPRS-адаптерами, в нем отсутствует недостаток, выявленный при работе с бытовыми адаптерами. Бытовые GPRS-модемы, реализуемые сотовыми компаниями, не поддерживают постоянного подключения к Интернету более полутора суток. Для установления же соединения после подобного разрыва требуется не просто его включение-выключение, а снятие напряжения с USB порта, что вызывает большие трудности. Промышленные же модемы гарантируют постоянное соединение в течение долгого времени.

Данная разработка решает несколько проблем, возникающих при организации регистрации морского волнения в режиме реального времени. Схема блока регистрации, предварительной обработки и передачи данных приведена на рис. 3. Через Интернет здесь возможно подключение как спутникового канала передачи данных, так и сотового.

Для хранения и обработки данных, полученных в результате натурных экспериментов, разработана и реализована система хранения гидрологических данных, на которую получено свидетельство о регистрации ПО № (2011610808).

Информационная система представляет собой расчетный программный комплекс с модульной архитектурой. В качестве основных единиц декомпозиции продукта можно выделить следующие: блок хранения данных; пользовательский интерфейс, представленный в виде сайта; блок обработки данных (набор оптимизированных программ); блок управления запросами пользователя (набор php-скриптов).

В основе архитектуры системы лежит клиент-серверная технология. Соответственно, выделяют клиентскую и серверную стороны приложения. Клиентская сторона приложения функционирует на рабочем месте пользователя, в роли которого выступает браузер персонального компьютера, серверная сторона — на специализиро-

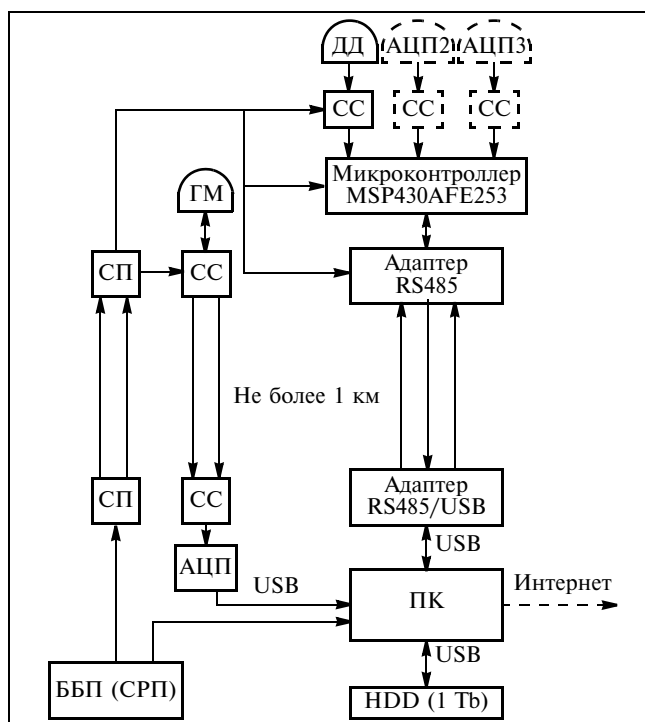


Рис. 3. Схема блока регистрации, предварительной обработки и передачи данных:

ДД — датчик давления (опрос с периодичностью 5...10 Гц); АЦП2, АЦП3 — возможность подключения дополнительных аналоговых датчиков с такой же периодичностью опроса; СС — схема согласования; MSP430AFE253 — микроконтроллер с трехканальным 24-битным сигма-дельта АЦП с дифференциальными входами; ГМ — гидрофонный модуль; СП — схема питания; ББП (СРП) — блок бесперебойного питания со схемой резервного питания; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — персональный компьютер; HDD — жесткий диск на 1 терабайт (его хватит на ~117 дней)

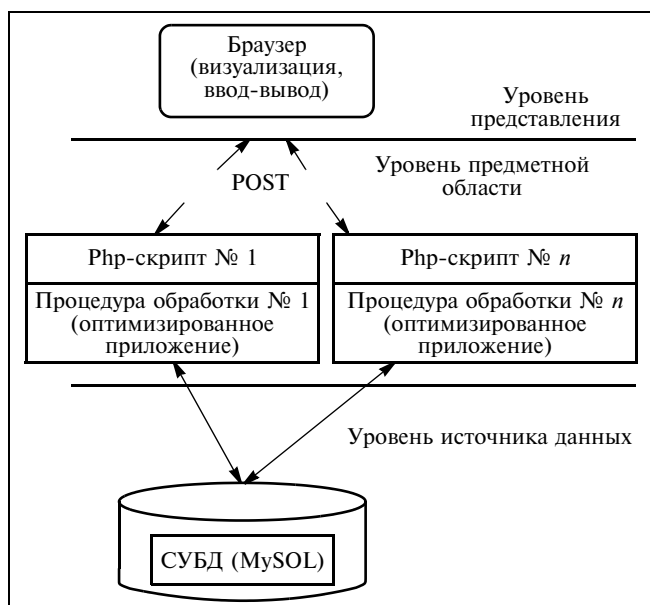


Рис. 4. Послойное представление архитектуры системы

ванном комплексе, включающем в себя мощные аппаратные средства, требуемый набор стандартного программного обеспечения, систему управления базами данных и собственно структуры данных. На рис. 4 изображено послойное представление архитектуры системы.

Взаимодействие клиентской и серверной частей приложения осуществляется через сеть — локальную или глобальную. При этом с точки зрения клиента и сервера взаимодействие осуществляется прозрачно, соответственно сетевой компонент включает в себя совокупность необходимого сетевого оборудования, набор программных технологий, обеспечивающих передачу данных между узлами сети, а также собственно протокол или протоколы для обмена запросами и результатами их выполнения.

Система состоит из трех слоев или компонент: компонент ввода-вывода, компонент прикладной логики и компонент хранения базы данных. При этом компонент прикладной логики находится на промежуточном слое, который является клиентом для базы данных и сервером для пользователя. На стороне пользователя выполняются только операции визуализации и ввода-вывода данных, а всю прикладную логику реализует сервер. Обмен между клиентом и сервером в таких системах осуществляется на уровне команд вывода данных на экран и результатов пользовательского ввода.

Пользовательский интерфейс представляет собой сайт, находящийся под управлением Joomla. Реализация интерфейса производилась с применением технологии AJAX (Asynchronous Javascript

and XML), позволяющей производить запросы на сервер без перезагрузки всей страницы. На рис. 5 представлен процесс построения графика нужного временного ряда.

Интерфейс предоставляет возможность авторизации пользователей и предоставление им доступа к различным функциям системы. Незарегистрированные пользователи смогут посмотреть расположение датчиков на карте и построить график нужного временного ряда. Функция экспорта из базы данных и добавления новых экспериментов доступны только авторизованным пользователям.

Подобная система позволяет структурировать и упорядочить собранные океанологические данные. Удобный доступ с помощью пользовательского интерфейса существенно упрощает работу с ними. Дополнительный плюс системы в том, что доступ к данным возможен с любого компьютера и из любой точки мира, при этом не требуется дополнительного программного обеспечения. Система позволяет пользователю получить данные с любой дискретностью в виде тестового файла с выбранными рядами данных. С такими файлами работает любая программа обработки данных. Подобный подход предоставляет пользователю абсолютную свободу в выборе программного инструмента для дальнейшей работы. Представление мест постановок на карте позволяет проводить пространственный анализ волновых процессов. Данная система проходит адаптацию и в скором времени будет доступна на сайте www.skbsami.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ ПО ДАННЫМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ДНЕ

Использование придонных датчиков позволяет получить долговременные записи колебания давления, что часто трудно сделать с волнографами в открытой части моря. Колебания придонного давления в общем случае не совпадают с колебаниями уровня моря, если волны не являются длинными. Эта проблема специально изучалась в работах [4, 5], и в рамках линейной потенциальной теории легко получить выражение для спектрального коэффициента ослабления поверхностных волн с глубиной:

$$R(\omega) = \text{ch}(kd)/\text{ch}(kD), \quad (1)$$

где D — глубина моря, d — высота постановки датчиков над дном (в наших измерениях $d = 0,3$ м), k — волновое число, связанное с частотой волны ω дисперсионным соотношением:

$$\omega(k) = \sqrt{gk \text{th}(kD)}, \quad (2)$$

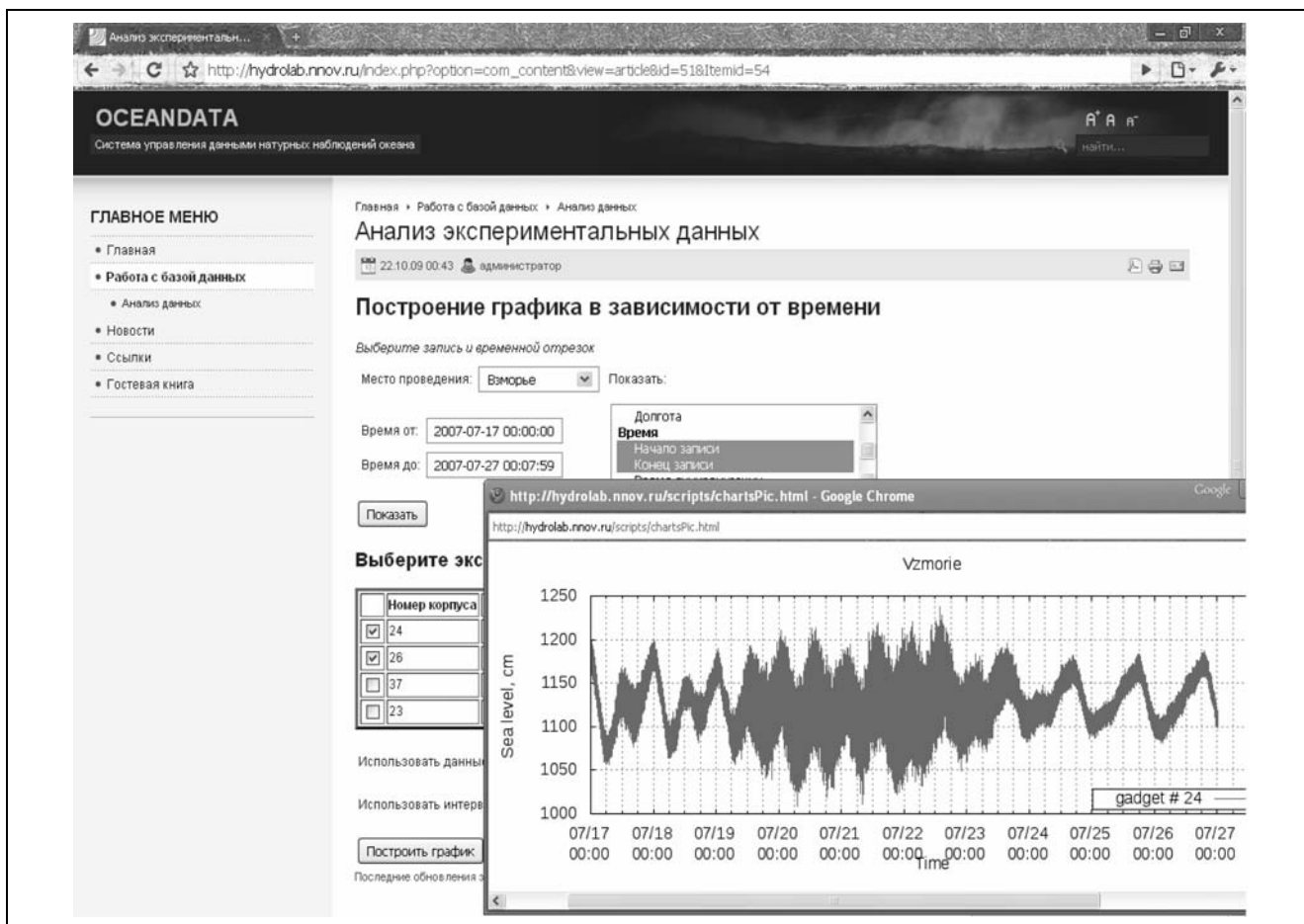


Рис. 5. Пользовательский интерфейс, построение временного ряда

где g — ускорение силы тяжести. На практике удобнее использовать следующую зависимость, аппроксимирующую дисперсионное соотношение (2):

$$k^2 = \omega^2/ghG(\alpha) + \omega^4/g^2, \quad (3)$$

где $G = 1 + 0,6522\alpha + 0,4622\alpha^2 + 0,0864\alpha^4 + 0,0675\alpha^5$, $\alpha = \omega^2 D/g$.

Фактически, соотношение (1) определяет связь спектральных компонент давления и смещения водной поверхности в Фурье-спектрах волновых полей с учетом множителя. Рассчитанная с помощью (1) и (3) передаточная функция дает экспоненциальное нарастание в области коротких волн, что приводит к сильному возрастанию также высокочастотного шума датчика, который начинает маскировать ветровые волны. Поэтому в соответствии с рекомендациями имеет смысл использовать рассчитанную передаточную функцию на частотах ниже 0,25 Гц, ограничивая ее постоянным значением 5 в диапазоне частот 0,25...0,33 Гц и обрезая сигнал на более высоких частотах (с периодом меньше 3 с).

АНАЛИЗ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ЗАПИСЕЙ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Был выполнен поиск аномально больших волн или так называемых волн-убийц в записях, полученных в 2011—2012 годах в районе м. Свободный (юго-восточное побережье о. Сахалин) [3]. Основным свойством и признаком этих волн является их внезапное появление, большая высота и крутизна [6, 7, 11—15]. На практике чаще всего используются амплитудным критерием выделения аномально высоких волн:

$$H/H_s > 2, \quad (4)$$

где H — высота отдельной волны, H_s — значительная высота волн.

Всего на анализируемой записи за 70 дней наблюдения волнения в безледный период было выделено около 200 волн, попадающих под определение амплитудного критерия, некоторые из них представлены на рис. 6.

По крайней мере две аномально большие волны до 6 м, зарегистрированные 24 и 25 декабря 2011 г., произошли во время движения циклона.

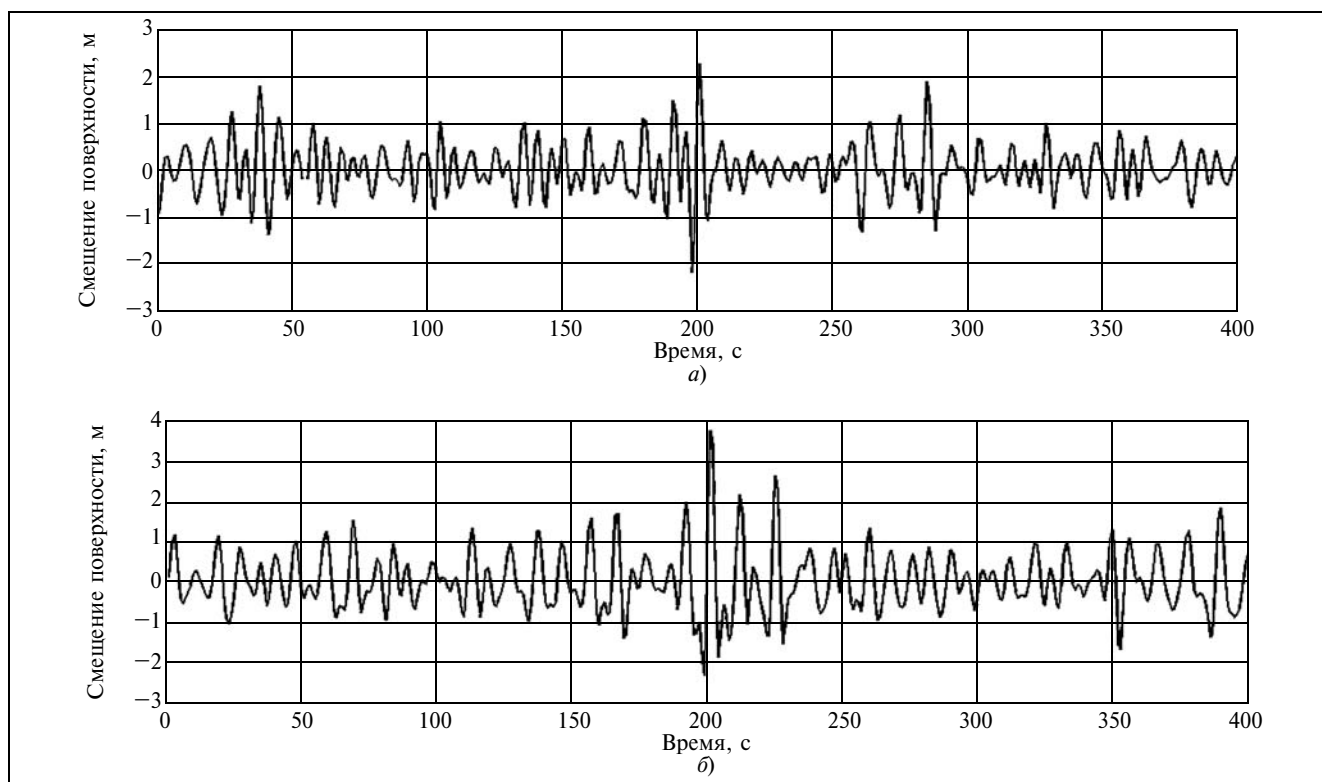


Рис. 6. Примеры anomalно больших волн (волн-убийц), зарегистрированных на м. Свободный:

а — волна-убийца, зарегистрированная 8 декабря 2011 г. высотой 4,48 м ($H/H_s = 2,43$); *б* — волна-убийца, зарегистрированная 24 декабря 2011 г. высотой 6,23 м ($H/H_s = 2,29$)

Его характеристики были даны на сайте Гидромета: “В течение нескольких дней на Охотском море сохраняется штормовая погода. Ветер северной четверти усиливался до 17...22 м/с, в порывах — до 25 м/с; высота волн до 4 м. Виной всему стал циклон, который 16 декабря приблизился к Камчатке. Сильный ветер охватил не только побережье Камчатки, но, практически, всю акваторию Охотского моря”. Стоит отметить, что при прохождении данного циклона 18 декабря в центральной части Охотского моря в 200 километрах от Сахалина потерпела крушение плавучая буровая платформа “Кольская”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана архитектура программно-аппаратного комплекса, позволяющего организовать регистрацию измерений уровня моря и передачу данных в режиме реального времени. В состав разработанного комплекса входит регистрирующая аппаратура, включающая в себя набор датчиков: температуры, давления, солености, а также управляющий микроконтроллер и блок передачи данных. Приведены данные наблюдений anomalно больших волн у оконечности мыса Свободный на южном побережье острова Сахалин. Они полу-

чены из анализа долговременных записей уровня моря за ноябрь—май 2011—2012 гг. сделанных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано 200 волн за 70 дней наблюдений в безледный период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глуховский Б. Х. Исследование морского ветрового волнения. — Л.: Гидрометеоздат, 1966. — 284 с.
2. Зайцев А. И. и др. Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование // Доклады Академии Наук. — 2008. — Т. 421, № 2. — С. 1—4.
3. Зайцев А. И., Малашенко А. Е., Пелиновский Е. Н. Anomalно большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2011. — Т. 4, № 4. — С. 35—42.
4. Заславский М. М., Красицкий В. П. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн // Океанология. — 2001. — Т. 41, № 2. — С. 195—200.
5. Кабатченко И. М., Косьян Р. Д., Красицкий В. П. и др. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 // Океанология. — 2007. — Том 47, № 1. — С. 150—155.
6. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. — Нижний Новгород: ННГУ, 2004. — 157 с.
7. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В. Физика волн-убийц в океане / Нелинейные волны-2004. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. — С. 37—51.

8. Левин Б. В. и др. Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций // Доклады Академии Наук. — 2009. — Т. 427, № 2. — С. 1—6.
9. Лидбеттер М., Ротсен Х., Линдгрен Г. Экстремумы случайных последовательностей и процессов. — М.: Мир, 1989. — 391 с.
10. Fessel D., Marko J., Melling H. Wave measurements using upward looking in marginal and polar sea ice regimes // *ASL Environmental sciences*. — 2002.
11. Kharif Ch., et al. Rogue Waves in the Ocean // Springer. — 2009. 216 p.
12. Kharif C., et al. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon // *European J. Mechanics, B — Fluid*. — 2003. — Vol. 22, N 6. — P. 603—634.
13. Kharif Ch., et al. Freak wave phenomenon: physical mechanisms and modeling. Chapter 3. Waves in Geophysical Fluids (Eds. Grue J. and Trulsen K.) // *CISM Courses and Lectures*. — Springer, 2006. N 489. — P. 107—172.
14. Nikolkina I., et al. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006—2010 // *Natural Hazards*, 2011b, DOI 10.1007/s11069-011-9945-y.
15. Slunyaev A., et al. Rogue waters // *Contemporary Physics*. — 2011.
16. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/products/wind-waves-products/index.html>

Андрей Иванович Зайцев — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией Специального конструкторского бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН);

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: aizaytsev@mail.ru

Ирина Сергеевна Костенко — аспирант, мл. научн. сотрудник СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: Irenka_k@rambler.ru

Константин Игоревич Кузнецов — аспирант, мл. научн. сотрудник СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: konstantin.kouznetsov@gmail.com

Роман Викторович Леоненков — научн. сотрудник СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-49-66

E-mail: skb@skbsami.ru

Айрат Рафаэлевич Гиниятуллин — аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ им. Р. Е. Алексеева);

☎ (831) 436-04-89

E-mail: araratishe@gmail.com

Юлия Александровна Панфилова — студентка НГТУ им. Р. Е. Алексеева.

☎ (831) 436-04-89

□

УДК 53.082.744:528.71

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ КОМПЛЕКСАХ

А. К. Волковицкий, Т. А. Вовенко, Е. В. Каршаков, Б. В. Павлов

Рассмотрены теоретические основы применения методов электромагнитного позиционирования для повышения точности аэроэлектроразведочных систем с нестабильной геометрией. Дано описание технической и алгоритмической реализации электромагнитной системы EM4Н, построенной с использованием средств электромагнитного позиционирования. На примере реальных данных показана точность электромагнитного позиционирования и эффективность использования системы EM-4Н.

Ключевые слова: электромагнитная система, относительное позиционирование, аэроэлектроразведка, EM-4Н.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы индуктивных электроразведочных систем основан на искусственном возбуждении вихревых токов в недрах горных пород с помощью мощного низкочастотного передатчика и измерении с помощью магниточувствительного приемника параметров вторичного поля, вызван-

ного этими вихревыми токами [1]. Метод, получивший название низкочастотной индуктивной аэроэлектроразведки, является одним из основополагающих при решении задач геологического картирования и поисках полезных ископаемых. Вихревые токи, наведенные в рудных залежах, обладающих высокой электропроводностью, оказываются более интенсивными, чем во вмещающих