

УДК 517.465

А.И. Зайцев^{1,2,3}, И.С. Костенко¹, Р.В. Леоненков¹,
К.И. Кузнецов^{1,3,4}, А.Р. Гиниятуллин³, Ю.А. Панфилова³

ОРГАНИЗАЦИЯ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ О. САХАЛИН

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований,
Южно-Сахалинск¹,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород²,
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород³,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск⁴

Цель: Создание и эксплуатация программно-аппаратного комплекса для наблюдений опасных морских явлений в прибрежной зоне о.Сахалин в режиме реального времени.

Научный подход: Проектирование и разработка прибора и программного обеспечения. Проведение экспериментальных наблюдений поверхностного волнения и анализ результатов.

Результат: Представлена архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса Свободный на юго-восточном побережье о. Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря в период с ноября 2011 по май 2012 гг., зарегистрированных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано около 200 аномально больших волн за 70 дней наблюдений в безледный период.

Новизна: разработана архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени мыса Свободного на юго-восточном побережье о.Сахалин. В период эксплуатации было зарегистрировано около 200 аномально больших волн.

Ключевые слова: натурные данные, аномально-высокие волны.

Введение

Необходимость развития современной прибрежной инфраструктуры диктует жесткие требования к качеству оперативной и статистической информации о волновых режимах в исследуемых регионах [1], что невозможно без проведения длительных высокоточных наблюдений, численного моделирования и развития систем мониторинга. Постоянный мониторинг опасных морских явлений в портовых бухтах и других прибрежных районах представляет большой научный интерес и имеет выраженный прикладной аспект, связанный с обеспечением безопасности в зонах морской деятельности. Начиная с 2009 года, Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов о. Сахалин (заливы Анива, Мордвинова) [3]. В 2009 году измерения проводились на мысах залива (мыс Анива и мыс Крильон) и в глубине акватории на западном и восточном побережье (п. Новиково и п. Кириллово). В 2011 году работы так же проводились в районе мыса Свободный.

В данной работе представлены результаты измерений проводимых в районе мыса Свободный, юго-восточное побережье о. Сахалин (рис. 1).

Средства измерения

Измерения проводились с помощью автономных донных регистраторов придонного давления АРВ-К12, произведённых в КБ г. Углич. Прибор выполнен в корпусе из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. На рис. 2 показана принципиальная 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) до 100 м, точность по давлению 0,06%, диапазон рабочих температур от -4 до 40 градусов по Цельсию (°C). Автономность приборов составляет около 6 мес. Дискретность измерений 1 с. Глубина постановки прибора на мысе Свободный составляет 10 м. Из-за малой глубины ветровые волны здесь являются мелководными, и их измерение может производиться с помощью датчиков давления с использованием гидростатических формул пересчета. Эти приборы уже использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 года и Невельского цунами 2007 года [2], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [8].

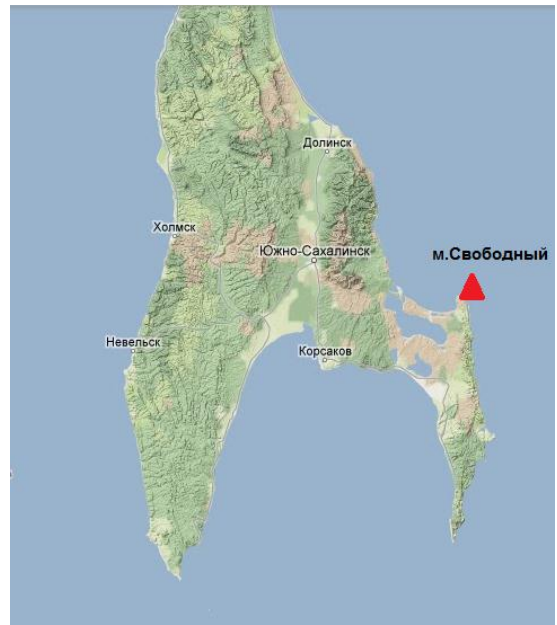


Рис. 1. Местоположение района проведения натуральных наблюдений в районе м. Свободный, юго-восточная часть о. Сахалин, 2011-2012 гг.

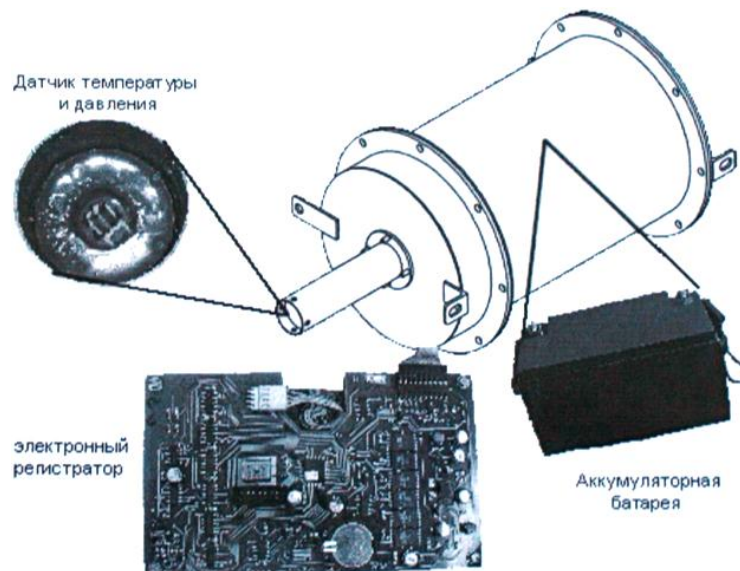


Рис. 2. Принципиальная конструкция автономного регистратора придонного давления (АРВ-К12)

Использование автономного прибора АРВ-К12 является удобным, так как установка и обслуживание являются достаточно нетрудоемкими. Но этот подход исключает передачу данных в режиме реального времени. СКБ САМИ ДВО РАН с 2010 года проводит измерения с помощью прибора, который позволяет передачу 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 передаёт данные на сервер www.skbsami.ru.

Для хранения и обработки полученных данных разработана и реализована система хранения гидрологических данных. 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 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. Данная система позволяет проводить пространственный анализ волновых процессов. Она проходит адаптацию и в скором времени будет доступна на сайте www.skbsami.ru.

Определение колебаний уровня моря по данным пульсаций давления на дне

Датчик придонного давления регистрирует колебания давления, которые в общем случае не совпадают с колебаниями уровня моря. Как известно, поверхностные волны затухают с глубиной, поэтому если использовать гидростатические соотношения, то донный датчик давления будет занижать амплитуду волн. Эта проблема специально изучалась [4, 5], и в рамках линейной потенциальной теории легко получить выражение для спектрального коэффициента ослабления поверхностных волн

$$R(\omega) = \frac{\text{ch}(kd)}{\text{ch}(kD)}, \tag{1}$$

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

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

где g – ускорение силы тяжести. Разрешить дисперсионное соотношение (2) относительно волнового числа невозможно, поэтому удобнее использовать следующее приближенное решение:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{ghG(\alpha)} + \frac{\omega^4}{g^2}, \tag{3}$$

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

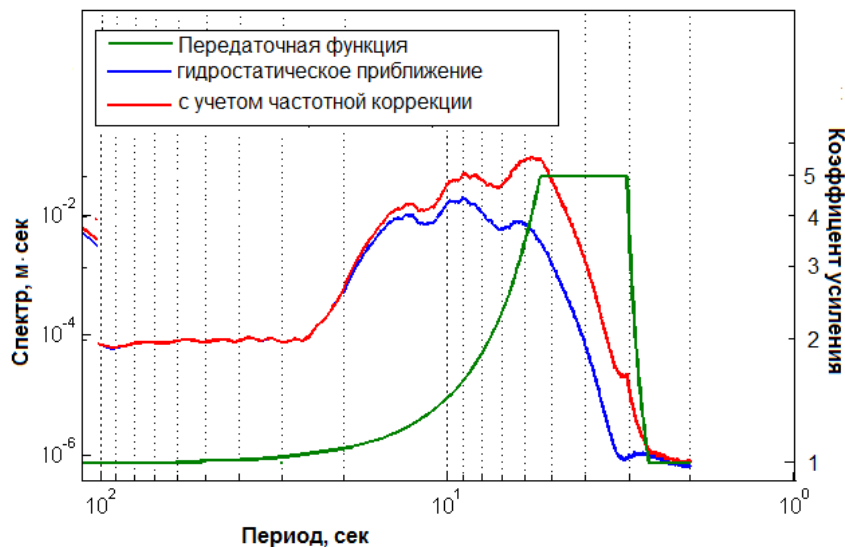


Рис. 4. Пример передаточной функции для глубины 16 м и усредненные спектры рассчитанного уровня моря по формуле (1) и в гидростатическом приближении

Фактически, соотношение (1) определяет связь спектральных компонент давления и смещения водной поверхности в Фурье-спектрах волновых полей. Рассчитанное с помощью (1) и (3) оно представлено на рис. 4 для интересующего диапазона изменения глубин и периодов волн. Как видно, негидростатические эффекты в поле ветровых волн являются принципиальными и могут кардинально влиять на оценки высот волн.

На рис. 4 представлены амплитудные спектры ветрового волнения и используемая передаточная функция, рассчитанная для этой записи. Поскольку передаточная функция экспоненциально нарастает в области высоких частот (малых периодов) и шум здесь значительно усиливается, то мы в соответствии с рекомендациями ограничили значения передаточной функции величиной 5 и обрезали спектр на 0,33 Гц.

В результате введенной частотной коррекции поправка в определении смещения уровня воды оказалась существенной и увеличилась примерно вдвое по сравнению с гидростатическим значением (рис. 5). Отметим также, что период и фаза колебаний уровня моря, как видим из рис. 5, не меняется при использовании частотной коррекции, а меняется только амплитуда волн.

В соответствии с описанной методикой процедуру предварительной коррекции прошли все анализируемые в работе записи. Был разработан программный комплекс, состоящий из набора вычислительных программ, реализованных в C++, и скриптов на языке Matlab, для отображения и анализа результатов вычислений, особенно вычислений высот и периодов волн.

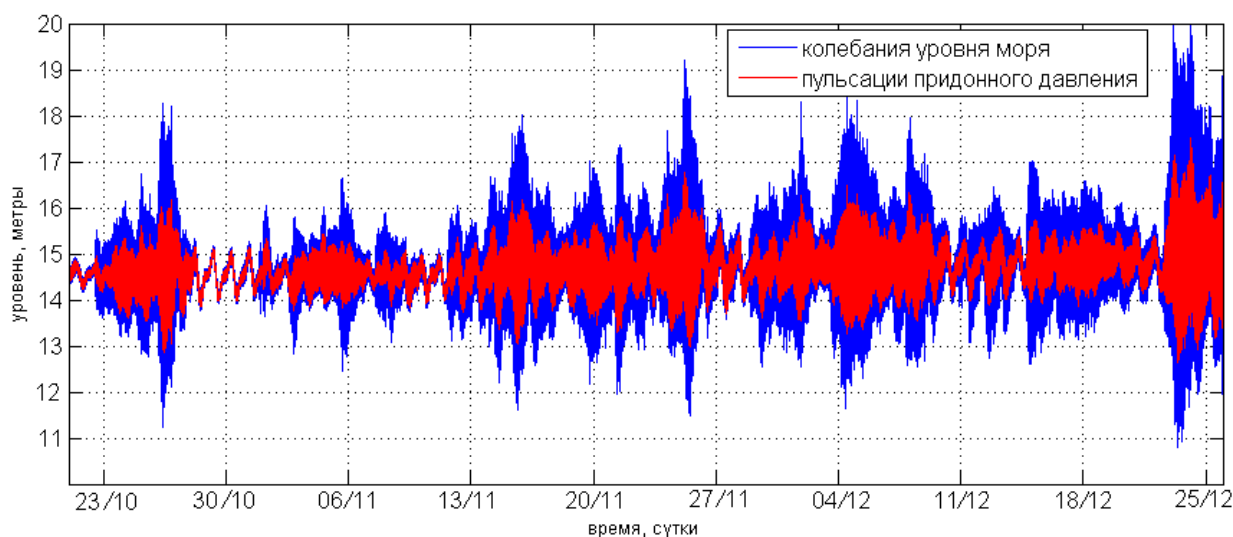


Рис. 5. Отличие в форме рассчитанных колебаний уровня моря при использовании гидростатической формулы (жирная линия) и с помощью частотной коррекции (тонкая линия). Глубина постановки датчика 15 м в районе м. Свободный

Анализ полученных данных на наличие anomalно больших волн

В соответствии с описанной методикой были скорректированы данные, полученные в результате эксперимента в районе мыса Свободный с октября 2011 по май 2012 гг. График уровня моря, рассчитанный по этим данным с учетом гидростатической поправки, представлен на рис. 6.

Предварительный анализ колебаний обнаруживает множество сильных штормов в период наблюдений с ноября по декабрь 2011 года. Наиболее сильный шторм отмечается в конце декабря – начале января с амплитудой ветрового волнения до 9 м. Далее представлен график значительных высот волн, рассчитанный по этим колебаниям, по которому также можно отметить высокую штормовую активность и связанные с этим относительно большие значительные высоты волн, что в целом является характерным для данного региона (рис. 7).

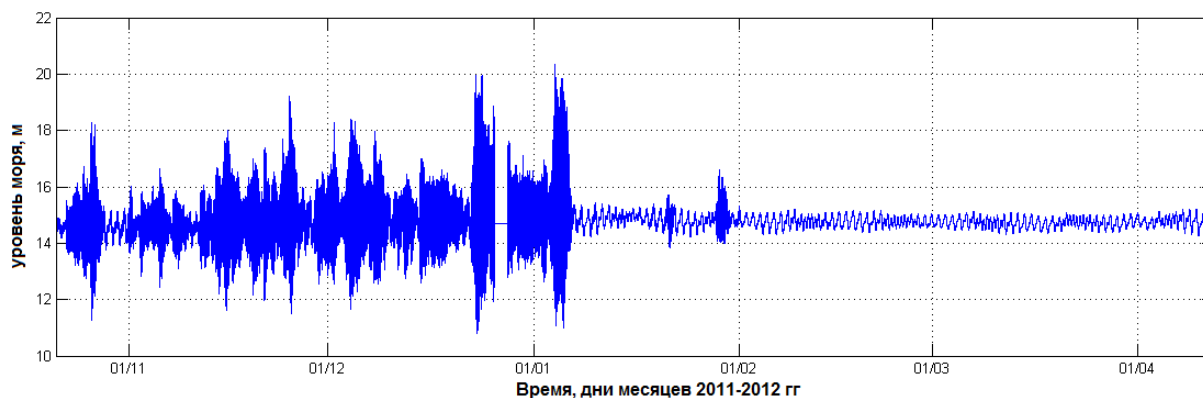


Рис. 6. График уровня моря, рассчитанный с учетом гидростатической поправки, по данным натуральных наблюдений в районе м. Свободный 2011–2012 гг.

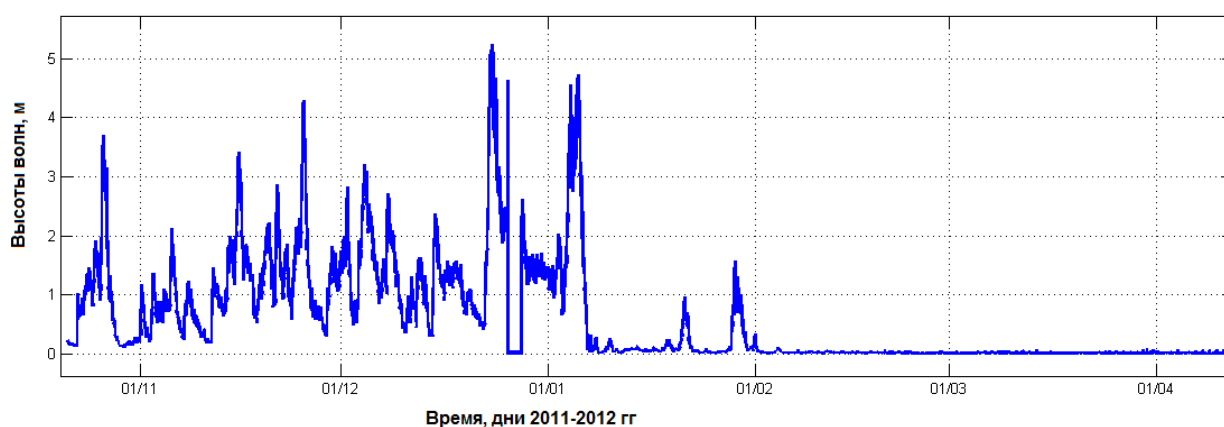


Рис. 7. Значительные высоты волн, рассчитанные с учетом гидростатической поправки по инструментальным наблюдениям в районе м. Свободный 2011–2012 гг.

Одной из интересных отличительных особенностей полученных записей является то, что на них присутствуют участки, когда датчик регистрировал волнение моря, покрытого льдом [10]. Таким образом, у нас есть возможность отследить изменение различных характеристик (спектральных, статистических) волнения не только во время изменения режима волнения, но и во время установления ледового покрова.

Для оценки изменения спектральных характеристик во времени по всей записи был построен текущий спектр, представленный на рис. 8, а, б.

По рис. 8, а, б видно, что периоды наиболее сильных спектральных пиков приходятся на диапазон волнения от 5 до 12 с. На записи удалось зарегистрировать два наиболее сильных шторма: 24 декабря 2011 года и 5 января 2012 года. Во время этих событий заметно существенное усиление не только ветровых волн и волн зыби, но и энергии в области инфрагравитационных волн. Стоит особо отметить резкое изменение спектра волн после этих штормов. 7 января энергия в области ветровых волн, высокочастотной и среднечастотной зыби резко падает, что очевидно связано с влиянием ледового покрова моря на волнение. Вероятно, лед был подогнан к берегу сильными штормами. 22 и 29 января на спектре отмечаются интересные усиления в области зыби с периодами 15–18 с, зародившейся, вероятно, еще в Тихом океане, поскольку такие низкие периоды зыби нехарактерны для зыби, образующейся в Охотском море.

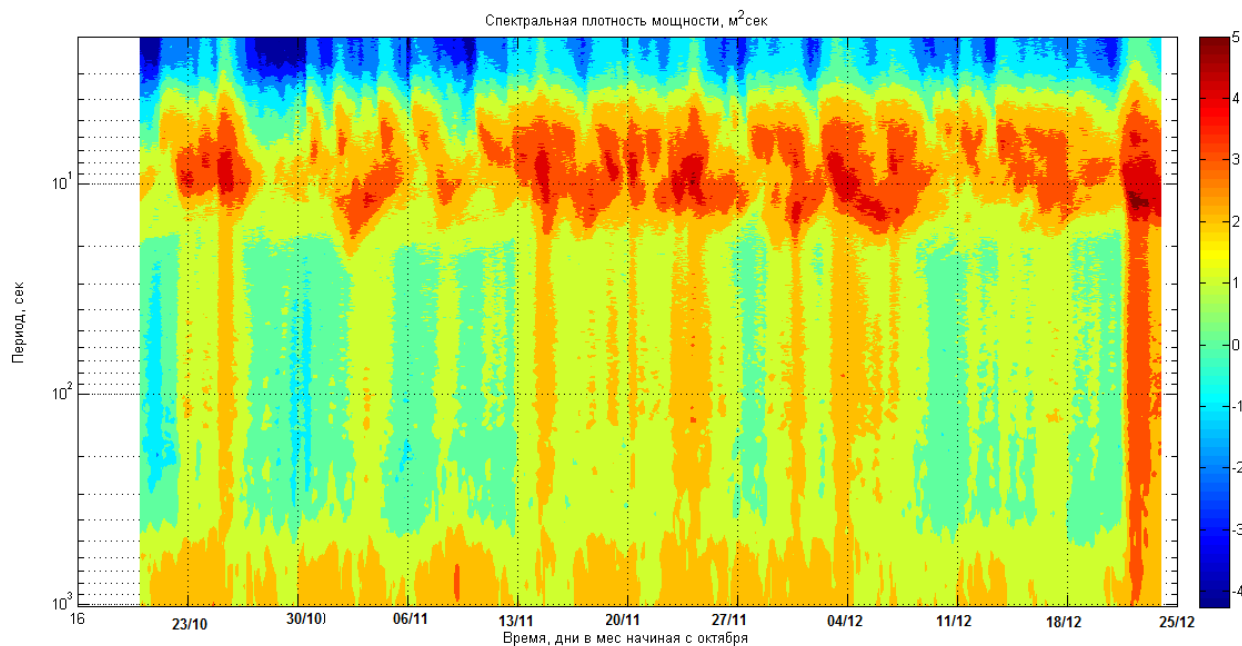
Также был выполнен поиск аномально больших волн, или так называемых волн-убийц. Основным свойством и признаком этих волн является их внезапно большая высота и

крутизна [6–15]. На практике чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения аномально высоких волн:

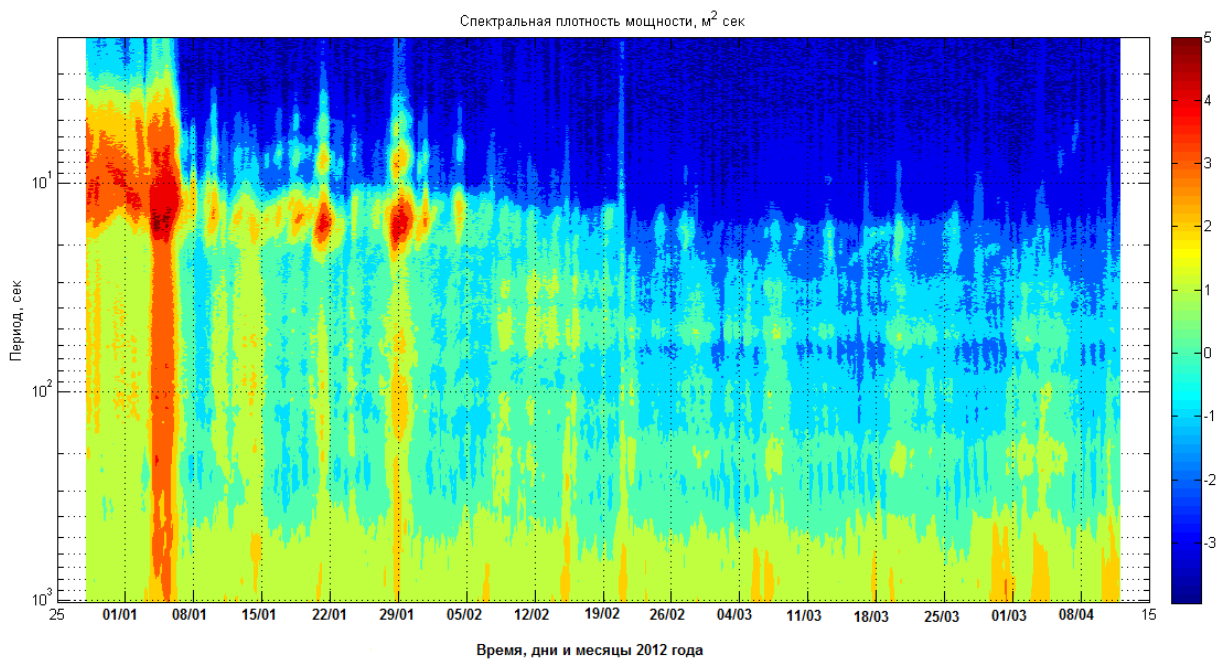
$$H/H_s > 2, \quad (4)$$

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.



a)



б)

Рис. 8. Текущий спектр (по данным, полученным вблизи м. Свободный), рассчитанный для участка записи:

a – с 23.10.2011 по 25.12.2011; *б* – 01.01.2012 по 10.04.2012

Выводы

Разработана архитектура прибора, позволяющего организовать регистрацию измерений и передачу данных в режиме реального времени. В качестве полигона использовался мыс Свободный. Приведены данные наблюдений аномально больших волн у оконечности мыса на юго-восточном побережье о. Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря за октября 2011 по май 2012 года, полученных с помощью донной станции (глубина постановки 16 м). Было зарегистрировано около 200 волн за 70 дней наблюдений в безледный период.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы, при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216-а, 11-05-92002-ННС_а), МК-4378.2011.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5.

Библиографический список

1. Глуховский, Б.Х. Исследование морского ветрового волнения / Б.Х. Глуховский. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 284 с.
2. Зайцев, А.И. Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 2. С. 1–4.
3. Зайцев, А.И. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин / А.И. Зайцев [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 4. С. 35–42.
4. Заславский, М.М. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн / М.М. Заславский [и др.] // Океанология. 2001. Т. 41. № 2. С. 195–200.
5. Кабатченко, И.М. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 / И.М. Кабатченко [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С. 150–155.
6. Куркин, А.А. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин [и др.] – Нижний Новгород: ННГУ, 2004. – 157 с.
7. Куркин, А.А. Физика волн-убийц в океане. «Нелинейные волны-2004» / А.А. Куркин [и др.]. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 37–51.
8. Левин, Б.В. Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесённой сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 2. С. 1–6.
9. Лидбеттер, М. Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер. – Москва: Мир, 1989. – 391 с.
10. Fessel, D. Wave measurements using upward looking in marginal and polar sea ice regimes / D. Fessel [et al.] // ASL Environmental sciences. 2002
11. Kharif, Ch. Rogue Waves in the Ocean / Ch. Kharif [et al.] // Springer, 2009. – 216 p.
12. Kharif, C. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon. European J Mechanics / C. Kharif [et al.] // B – Fluid, 2003, vol. 22, No. 6. P. 603–634.
13. Kharif, Ch. Freak wave phenomenon: physical mechanisms and modeling. Chapter 3. Waves in Geophysical Fluids (Eds. Grue J. and Trulsen K.). / Ch. Kharif [et al.] // CISM Courses and Lectures, No. 489. Springer, 2006. P. 107–172.
14. Nikolkina, I. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006–2010. / I. Nikolkina [et al.] // 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>

Дата поступления
в редакцию 16.10.2012