

*Alexander K. Khe,
ScD,*

Alexey V. Chebotnikov,

*Valery Yu. Liapidevskii,
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics
Novosibirsk State University*

*Vasily F. Kukarin,
Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry*

Bottom Measurement Station Based on a Single-board Computer

Key words: *measurement instruments, hydrology, embedded systems, beagbone.*

Annotation: *In this paper we describe a bottom station used to measure hydrological parameters of the internal waves in a shelf zone. The constructed measurement system is used in experiments at Japan Sea in Primorsky Region, Russia. The device is based on a BeagleBone single-board computer.*

Введение

Одним из важнейших факторов биопродуктивности океана является распределение гидрологических характеристик в вертикальном направлении. Известно, что наиболее продуктивными являются шельфовые зоны окраинных морей и крупных внутренних водоёмов. Кроме того, они же наиболее подвержены отрицательному антропогенному воздействию. Оба эти явления в большой степени определяются интенсивным вертикальным и горизонтальным перемешиванием в этих зонах, связанным с нелинейными процессами диссипации и разрушения поверхностных и внутренних волн. (1)

При устойчивой плотностной стратификации механизм турбулентной диссипации энергии морского прилива и мезомасштабных вихрей включается не сразу: сначала над континентальным склоном у границы шельфа генерируются внутренний прилив и пакеты коротких внутренних волн, которые трансформируются и разрушаются при движении к берегу. Во внутренних водоемах приливные волны менее выражены, но здесь постоянно наблюдаются сейшевые колебания уровня, которые могут играть значительную роль в генерации внутренних волн. Проблемам генерации внутренних волн на границе шельфовой зоны и формированию пакета интенсивных внутренних волн посвящено большое число натуральных, лабораторных и численных исследований (2–6).

Результаты натуральных и лабораторных экспериментов по разрушению поверхностных и внутренних волн в прибрежной зоне, полученные в последнее время в ведущих лабораториях мира, продемонстрировали эффективность нестационарных высокочастотных вихреволновых процессов и являются основанием для пересмотра

представлений о механизмах переноса в прибрежной зоне стратифицированных по плотности водоемов.

Для проведения подводных измерений в настоящий момент применяется широкий спектр аппаратных решений: как промышленные измерительные приборы и зонды, так и самостоятельно разработанные (7–9). Традиционные методы измерений гидрофизических величин дают, как правило, осредненную информацию об изменчивости параметров среды или о локальном поведении высокочастотных характеристик потока. Для адекватного представления о длинноволновых нелинейных процессах, связанных с трансформацией и обрушением волн в прибрежной зоне, требуется развитие новых измерительных систем с высоким пространственным и временным разрешением изучаемых параметров среды. Это приводит к необходимости разработки комплекса распределенных измерительных систем для дистанционного измерения коротковолновых процессов в режиме реального времени.

Теоретические модели указанных процессов, создаваемые на основе экспедиционных измерений и лабораторных экспериментов, требуют проверки и расширения. Для изучения механизмов и эффектов внутренних волн от их генерации до разрушения на мелководье была спроектирована и собрана подводная измерительная станция.

В последнее время большое распространение получило использование встраиваемых систем для контроля и управления различными автоматическими механизмами в режиме реального времени. Среди них средства автоматического регулирования и управления техпроцессами, станки, банкоматы, терминалы, телекоммуникационное оборудование. Встраиваемые системы используются при реализации концепции «Умный дом» и в робототехнике. Для построения подобных систем используются одноплатные компьютеры (SBC, single board computer) или однокристальные системы (SoC, system on a chip). Среди наиболее распространённых: Arduino, Raspberry Pi, PandaBoard и др.

Ранее нами была разработана и использовалась донная измерительная станция на базе микроконтроллера C8051F410 (Silicon Labs). Во время проведения полевых испытаний донных станций был выявлен ряд недостатков в конструкции станций, электронных модулей и используемых датчиков. В настоящей работе приводится описание измерительного комплекса, построенного на базе одноплатного компьютера BeagleBone (BeagleBoard.org Foundation, Richardson, Texas, USA).

Измерительный комплекс

Измерительный комплекс разработан на базе одноплатного компьютера BeagleBone (BeagleBoard.org Foundation, Richardson, Texas, USA) производства CircuitCo (Richardson, Texas, USA). Нами использовалась первоначальная версия платы BeagleBone ревизии А6. В настоящее время продаётся и производится модифицированная версия с названием BeagleBone Black.

Микрокомпьютер построен на процессоре ARM Cortex-A8 (AM335x), работающий на частоте 720 МГц. Размеры платы — 90×55 мм. На плате установлено 256 МБ DDR2 ОЗУ и 3D графический ускоритель.

Для коммуникаций имеется клиентский порт USB, который используется для FTDI, отладки по JTAG, виртуального COM-порта, подключения к персональному

компьютеру и питания устройства. Также на устройстве установлены родительский порт USB (USB хост), сетевой разъём Ethernet, а также два 46-контактных разъёма, используемых для подключения устройств расширения. Плата потребляет максимум 2,5 Вт (в пике при загрузке) и, благодаря малому энергопотреблению, не требует системы охлаждения.

Микрокомпьютер оснащён разъёмом для флеш-карт формата microSD и поставляется в комплекте с предустановленной операционной системой Ångström семейства Linux. В настоящий момент производителем также предоставляется возможность скачать образы флеш-карт с системой Debian. Кроме того, в комплект поставки входит предустановленная интегрированная среда разработки Cloud9 IDE на основе Node.js® и библиотеки BoneScript.

Для подключения периферийных устройств к микрокомпьютеру была разработана и изготовлена специальная плата расширения, которая обеспечивает функционирование различных типов измерительных устройств, подключаемых к микрокомпьютеру: 1-Wire — 8 линий, RS-232 — 2 линии, RS-485 — 1 линия; аналоговые входы на встроенные АЦП — 6 линий; входы бинарные для счетчиков импульсов — 4 линии (в зависимости от типа для двух или четырёх вертушек, используемых для измерения скорости течения); входы-выходы универсальные — 4 линии (для возможных добавлений, таких, как, например, управляющих реле). Подключение платы расширения осуществляется с помощью двух 46-контактных разъёмов на плате BeagleBone. Отладка программного обеспечения подключаемых модулей в различных конфигурациях осуществлялась либо через miniUSB, либо через Ethernet. В рабочем режиме для управления донной станцией и передачи данных использовался порт RS-232.

Микрокомпьютер осуществляет контроль технического состояния станции (напряжение питания, герметичность, отключает неисправные модули). Плата расширения с микрокомпьютером смонтирована в герметичном модуле электроники из нержавеющей стали. Для работы донной станции написаны программы на языке Python для каждого модуля и программная оболочка управления модулями, сбора, предварительной обработки данных и их передача удаленному пользователю. Написаны программы для представления поступающей информации в графическом виде в режиме реального времени.

Для формирования донных станций под конкретные задачи были разработаны и изготовлены различные модули.

Для измерения вертикального распределения температуры собраны термогирлянды по 20–30 датчиков на микрочипах 1-Wire® Digital Thermometer DS18B20 фирмы Dallas Semiconductor, расположенных на расстоянии 0,5 м. Погрешность измерения температуры не превышает 0,1°C в диапазоне от –5 до +40°C. Непосредственно к модулю электроники через герметичные вводы присоединялись термогирлянды, удаленные от донной станции на расстояние до 100 метров. Для подключения термогирлянд использовалась микросхема DS2482-800 — 8-канальная шина 1-Wire.

Для измерения горизонтальных компонент скорости водного потока был изготовлен модуль на базе двух вертушек с горизонтальными осями вращения, расположенными

перпендикулярно друг другу. Частота и направление вращения определялись с помощью датчиков Холла SS400. Сигнал поступал на вход GPIO микрокомпьютера.

Для определения ориентации донной станции при её установке на глубины до 40 метров был изготовлен специальный модуль, в который помещался цифровой компас серии Grove, созданный на базе микросхемы Honeywell HMC5883 с интерфейсом I2C. Точность ориентирования составляет порядка двух градусов.

Используемый одноплатный компьютер BeagleBone поставляется с предустановленной операционной системой Angstrom, являющаяся разновидностью систем семейства Linux. В установленной сборке имеются распространённые языки программирования (C, C++, Python). Кроме того, производителем платы предустанавливается интегрированная среда разработки Cloud9 IDE, использующей платформу Node.js® для программирования.

Для сбора, первичной обработки и передачи информации было написано соответствующее программное обеспечение на языке Python. Разработанные программные модули позволяют в режиме реального времени отслеживать измеряемые величины, а также управлять работой станции и её техническим состоянием.

Связь со станцией осуществлялась с помощью последовательного соединения по стандарту RS-232. Управление и передача данных проходила по 3-жильному соединению (передача, приём, заземление). Соединение станции по RS-232 использовалось для связи с береговым компьютером для мониторинга и управления станцией, а также для сбора данных. Далее, береговой компьютер подключался к локальной сети, доступ к которой осуществлялся стандартными способами. Нами использовалась связка VPN (Virtual Private Network — виртуальная частная сеть) и VNC (Virtual Network Computing — система удалённого доступа к рабочему столу компьютера). Схема подключения донной станции изображена на рис. 1.

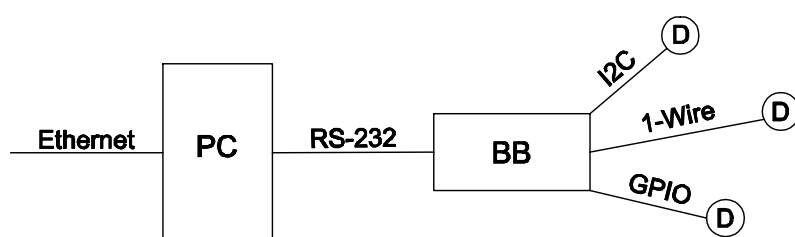


Рис. 1. Схема подключения измерительной станции: PC — береговой компьютер, BB — донная станция, D — измерительные устройства.

Результаты натурных наблюдений

Разработанная донная станция использовалась для проведения мониторинга волновых процессов в шельфовой зоне Японского моря. Экспедиционные работы проходили на гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» (п-ов Гамова, залив Посьет, бухта Витязь).

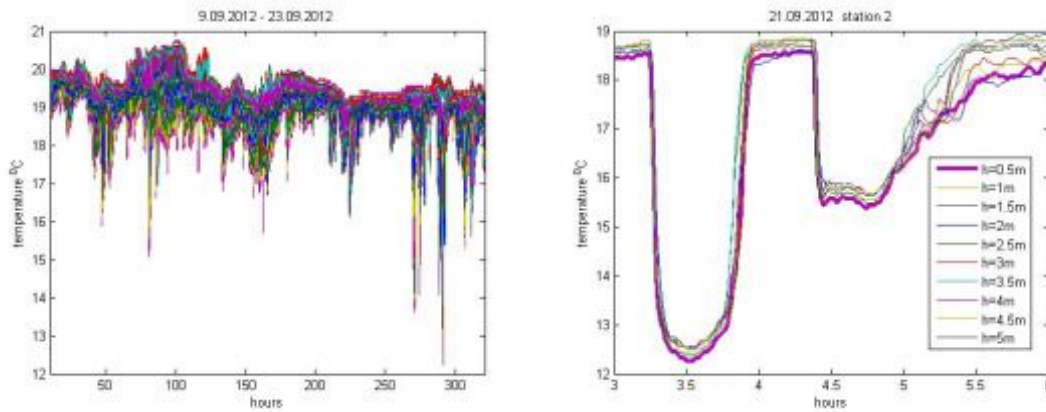


Рис. 2. Изменение температуры в придонном 15-метровом слое, глубина 30,5 м. Слева: измерения продолжительностью 2 недели, справа: фрагмент записи в нижнем 5-метровом слое.

На рис. 2 показаны примеры записи вариации температуры в придонном слое, полученные при помощи вертикальной гирлянды датчиков температуры в режиме on-line. Измерения демонстрируют высокую изменчивость поля температуры, связанную с прохождением придонных внутренних волн.

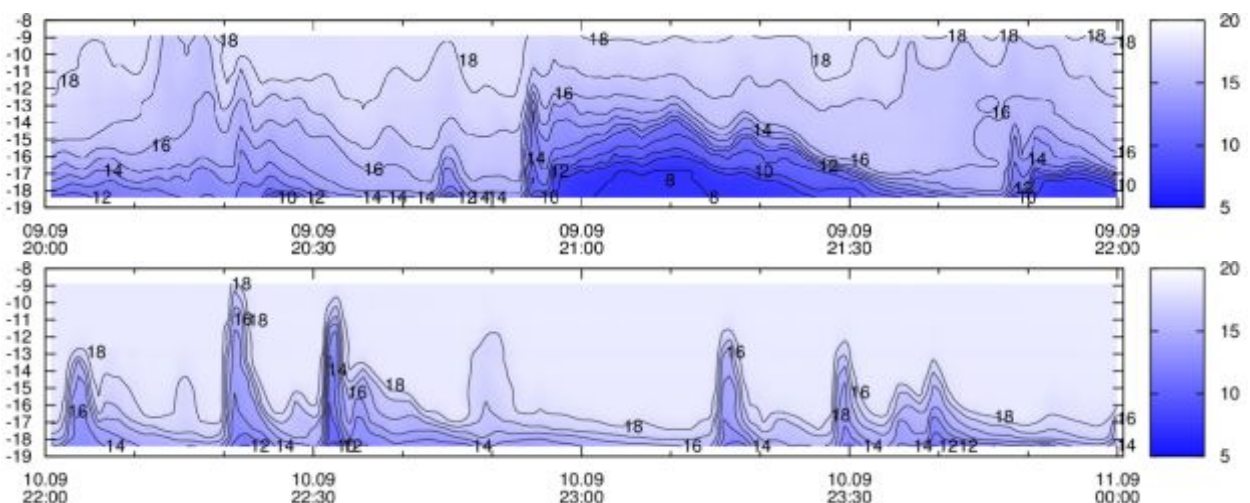


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры в придонном 10-метровом слое, глубина 19 м.

На рис. 3 показаны основные типы волн, наблюдаемые в зоне «заплеска» и измеренные при помощи распределенной системы датчиков температуры. Наблюдается прохождение симметричных линз холодной воды с периодом 5–30 мин, N-волн, а также комбинаций этих волн. На рис. 3 также можно проследить эффект частичной блокировки потока при обтекании «ядра» холодной воды более теплым потоком. При этом изотермы образуют крутой передний фронт, и течение приобретает вид N-волны с внутренним ядром. По мере продвижения к берегу холодное «ядро» отстает от фронта волны и N-волна начинает достаточно быстро разрушаться. Это поведение соответствует распространению волн «по сухому руслу».

В результате комплексного исследования на полигоне в шельфовой зоне моря, где происходит диссипация энергии морских приливов и внутренних гравитационных

волн, трансформация волнового режима течения в периодически вихревой и генерация мелкомасштабной турбулентности, получены новые сведения о характере течений и изменчивости уровня моря в прибрежной зоне, о водообмене бухты Витязь с открытой частью залива Посъет Японского моря, о влиянии на них различных факторов и о формировании термохалинной структуры вод в шельфовой зоне. Эти новые данные позволяют проследить изменчивость характеристик внутренних волн и тонкой структуры в зависимости от изменений параметров прилива и поля ветра.

Заключение

Разработанная система измерительной аппаратуры позволяет проводить комплексное исследование процесса разрушения внутренних волн на шельфе, включающее непрерывное дистанционное измерение параметров короткопериодных нелинейных внутренних волн в придонном слое. Созданный комплекс снабжен телеметрической системой сбора и обработки информации и передачи данных удаленному пользователю в режиме реального времени. Измерительная станция в настоящее время используется для зондирования внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00249) и Программы поддержки Интеграционных проектов СО РАН — ДВО РАН (интеграционный проект № 15).

References:

1. Nawrocki VV, Liapidevskii VY, Pavlov E. *Internal waves and their biological effects in the shelf zone of the sea: Bulletin FEB RAS*, 2012; 22-31.
2. Nawrocki VV, Liapidevskii VY, Pavlov E. *Features of Internal Waves in a Shoaling Thermocline: International Journal of Geosciences*. 2013, Vol. 4, No. 5; 871–879.
3. Kukarin VF, Liapidevskii VY, Nawrocki VV, Khrapchenko FF. *The evolution of large-amplitude internal waves in the shelf zone of the sea: Special issue of "Fundamental and Applied hydrophysics", St. Petersburg, 2013, Volume 6, № 2; 35-45.*
4. Gavrilov N, Liapidevskii VY, Gavrilova K. *Mass and momentum transfer by solitary internal waves in a shelf zone: Nonlin. Processes Geophys.* 2012, Vol. 19, No. 2; 265–272.
5. Gavrilov N, Liapidevskii VY, Liapidevskaya ZA. *Effect of dispersion on the internal waves offshore: Special issue of "Fundamental and Applied hydrophysics", St. Petersburg, 2013, T. 6, № 2; 25-34.*
6. Yaroshchuk IO, Leontiev AP, Kosheleva AV, Samchenko AN, Brewers AA, Khrapchenko FF, Shvyrev AN, Yaroshchuk EI. *Experimental studies of internal waves in the coastal area of the Japan Sea: Underwater research and robotics*. 2013, № 1 (15); 37-44.
7. Fomin LM, Kushnir VM, Titov VB, Monin AS. *The measurement of ocean currents: Science*, 1989; 196.
8. Hooper JA, Baringer M. ON. *Hydrographic Measurements Collected Aboard: UNOLS Ship R/V Atlantic Explorer, 15 March – 1 April 2014: Western Boundary Time Series Cruise AE1404 (AB1403): NOAA data report OAR AOML, Vol. 46. 2014; 181.*
9. Lund JM, Davis XJ, Ramsey AL, Straneo F, Torres D, Palter J, Gary S, Fratantoni DM. *CLIMODE Subsurface Mooring Report: November 2005 – November 2007: Woods Hole Oceanographic Institution, 2013; 93.*

