

*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, beaglebone.*

**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.

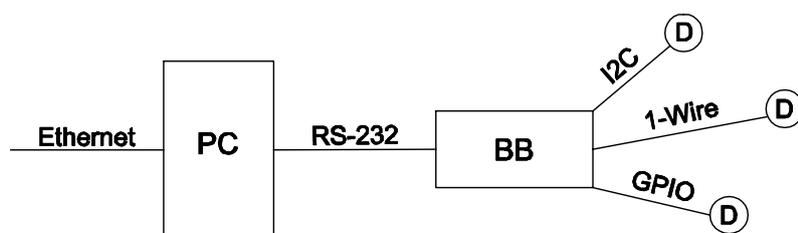


Рис. 1. Схема подключения измерительной станции: PC — береговой компьютер, BB — донная станция, D — измерительные устройства.

### 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).

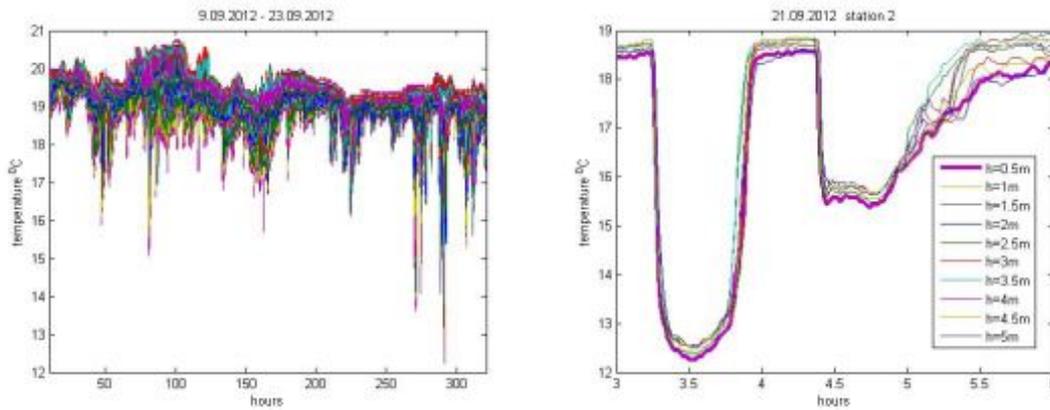


Рис. 2. Изменение температуры в придонном 15-метровом слое, глубина 30,5 м. Слева: измерения продолжительностью 2 недели, справа: фрагмент записи в нижнем 5-метровом слое.

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

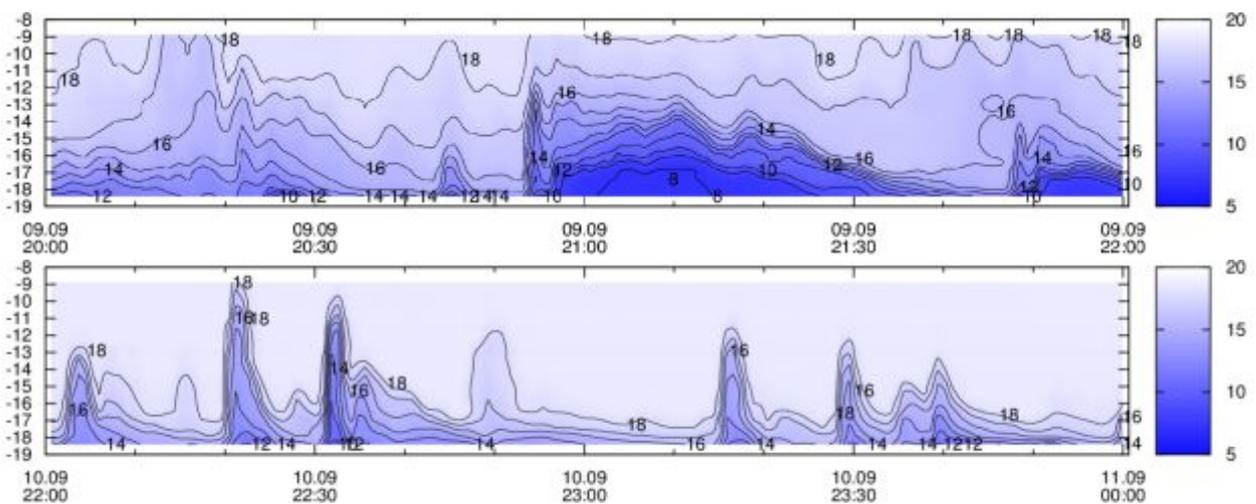


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры в придонном 10-метровом слое, глубина 19 м.

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.*

