

Применение платформы *Arduino* для регистрации ветровых волн

В. Е. Смолов, А. Ф. Розвадовский*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: rozvadovsky@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2020 г., после доработки – 06.04.2020 г.

Цель. Целью работы является описание разработки устройства регистрации ветровых волн на основе платформы *Arduino* для волнографа Морского гидрофизического института РАН, установленного на океанографической платформе в пгт Качивели. Устройство предназначено для записи и хранения данных волнографа в автономном режиме, при этом обеспечивается защита от скачков и перепадов напряжения питания, а также защита от воздействий внешней среды (пыль, влага, перепады температуры).

Методы и результаты. Представлены два варианта реализации устройства регистрации на основе платформы *Arduino* – для одно- и шестиструнного волнографов. Описаны их аппаратная и программная части, приведены блок-схема используемых программных алгоритмов и схемы электрических соединений. Особое внимание уделено стабильности работы устройств – непрерывности чтения, записи и хранения данных, а также синхронизации полученных результатов со временем регистрации. Приведен пример регистрации возвышений морской поверхности в течение года.

Выводы. Описаны разработка, реализация и тестирование устройства регистрации ветровых волн на основе платформы *Arduino*. Начиная с 2015 г. функционирование устройств показало их высокую эффективность, надежность и стабильность работы в автономном режиме с минимальными рисками потери информации о результатах измерений.

Ключевые слова: регистрация и хранение данных, платформа *Arduino*, морские волнографические измерения, океанографическая платформа в пгт Качивели.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей». Авторы выражают благодарность В. В. Малиновскому и В. А. Дулову за обсуждение работы и полезные замечания, Е. В. Скибе – за помощь в обработке исходных данных.

Для цитирования: Смолов В. Е., Розвадовский А. Ф. Применение платформы *Arduino* для регистрации ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 467–479. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-467-479

Application of the *Arduino* Platform for Recording Wind Waves

V. E. Smolov, A. F. Rozvadovskiy*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

*e-mail: rozvadovsky@yandex.ru

Purpose. The paper describes development of a device (placed on the *Arduino* platform) for recording wind waves. It is intended for the wave gauge of Marine Hydrophysical Institute, RAS, which is installed and applied at the oceanographic platform in Katsiveli. The device is designed to record and

© Смолов В. Е., Розвадовский А. Ф., 2020

store the wave gauge data in an off-line mode. At that, it is protected from power surges and environmental effects (dust, moisture, temperature drops).

Methods and Results. Two versions of the *Arduino*-placed recording device are represented: for the single- and six-string wave gauges. Their hardware and software are described; block diagram of the applied software algorithms and electrical connection schemes are given. Particular attention is paid to stable functioning of the devices, namely continuity of the data reading, recording and storing, as well as synchronization of the obtained measurement results with the time of record. The example of the sea level elevations recorded in course of a year is cited.

Conclusions. Development, construction and testing of the *Arduino*-placed device for recording wind waves are described in the paper. Since 2015, the off-line operation of the device has shown high efficiency, reliability and stability; at that, the risks of losing the measurement results are minimal.

Keywords: data record and storing, *Arduino* platform, wave gauge measurements, oceanographic platform in Katsiveli.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of state task No. 0827-2019-0004 “Complex interdisciplinary investigations of oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ coastal zone ecosystems”. The authors are grateful to V. V. Malinovsky and V. A. Dulov for their discussions and valuable remarks on the work, and to E. B. Skiba – for his assistance in processing the initial data.

For citation: Smolov, V.E. and Rozvadovskiy, A.F., 2020. Application of the *Arduino* Platform for Recording Wind Waves. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(4), pp. 430-441. doi:10.22449/1573-160X-2020-4-430-441

Введение

Волнение на морской поверхности воздействует в первую очередь на плавающие в морях суда и различные сооружения, находящиеся в прибрежной черте. Данные о ветровом волнении и зыби необходимы для многих практических целей (судостроение, гидротехническое строительство на морях, навигация, рыбный промысел, расчет гидрофизических, гидрохимических процессов в океане и т. д.) [1]. Эти данные также необходимы для развития теории ветрового волнения, усовершенствования методов его моделирования и прогноза. Знание основных элементов волн – высоты значительных волн, их длины и периода, а также направления распространения и крутизны – необходимо для оценки волнового климата [2, 3].

Одним из наиболее распространенных измерительных приборов для получения данных о ветровом волнении и зыби является волнограф. По месту установки различают береговые, буйковые и судовые волнографы, по принципу работы – струнные, акустические, поплавковые (с вертушкой) и др.

Наиболее распространенные и простые в исполнении – электродные волнографы, первичными измерительными преобразователями которых являются один или два электрода, погруженных вертикально в воду. По принципу измерения различают струнный (резистивный) и емкостной волнографы. Описание различных конструкций волнографов приведено ниже.

Основное внимание при разработке волнографов уделяется повышению их помехозащищенности, обеспечению линейности измерительной характеристики прибора, уменьшению поляризации резистивного датчика (струны), возникающей при использовании генераторов переменного (прямоугольного) напряжения, что приводит к искажению результатов измерений и механическому разрушению струны (резистивного датчика) и др.

При этом вопросу записи и хранения полученных данных уделяется намного меньше внимания. Отчасти это обусловлено тем, что при регистра-

ции данных волнографа предполагается присутствие оператора, который выбирает способ обработки, регистрации и хранения данных, а также контролирует процесс записи.

В ранних моделях волнографов для регистрации данных использовались осциллографы*, частотомер** и другие измерительные приборы.

В патенте*** в общих чертах рассмотрены микропроцессорный блок и блок памяти (флеш-память), которые осуществляют регистрацию и запись результатов измерений в течение одного сеанса зондирования. Результаты измерений считываются из блока памяти в компьютер после подъема прибора на поверхность, при этом максимальная длительность сеанса измерений ограничена и составляет 10 мин.

В патенте**** высоту погружения каждой струны волнографа регистрируют на матрице инфракрасного фотоприемника по положению границы раздела на струнах. Регистрация полученных результатов (изображений струн) производится на видеокамеру, которая имеет инфракрасный фильтр. Данный подход позволяет повысить точность измерений, однако он сопряжен с техническими сложностями при реализации. В частности, при его использовании требуется наличие инфракрасных источников света, обеспечивающих подсветку струн.

В патенте***** для регистрации используется матрица фотоприемников и также необходим дополнительный источник освещения.

Практически все рассмотренные выше решения не предполагают длительную автономную работу.

Специалистами Морского гидрофизического института РАН была разработана и запатентована конструкция струнного волнографа***** [4]. Достоинствами данного волнографа являются высокая точность измерений,

* А. с. 111740 СССР, Класс 42с 26₀₁. Устройство для дистанционного измерения и регистрации элементов морских волн в прибрежном мелководном районе моря / Я. Г. Виленский, Б. Х. Глуховский. – № 569794 ; заявл. 12.10.56 ; опубл. 01.01.58. 2 с. ; А. с. 152071 СССР, Класс G01C 42с 26₀₁. Электроконтактный волнограф / А. М. Ибрагимов, Э. С. Агаларов, Ш. Д. Мамедяров. – № 754734/26-10 ; заявл. 09.12.61 ; опубл. в «Бюллетене изобретений» № 23 за 1962 г. – 2 с. ; А. с. 176693 СССР, МПК G01C Класс 42с 26₀₁. Лабораторный волнограф / А. Н. Якшин. – № 895671/26-10 ; заявл. 17.04.64 ; опубл. 17.11.65, Бюл. № 23. – 2 с.

** А. с. 943526 СССР, МКИ G01C 13/00. Волнограф / А. Т. Гопко, В. А. Голоско, П. П. Веркеев, С. О. Колесов, В. А. Терещенко. – № 3219783/18-10 ; заявл. 18.12.80 ; опубл. 15.07.82, Бюл. № 26. – 3 с.

*** Пат. 2484428 Российская Федерация, МПК G01C 13/00, G01F 23/296, G01S 15/10, G01S 15/89, G01V 1/38, B06B 1/04. Гидроакустический автономный волнограф / Балакин Р. А., Тимец В. М. ; заявитель и патентообладатель Государственное учреждение "Арктический и Антарктический научно-исследовательский Институт" (ГУ "ААНИИ"). – № 2011132211/28 ; заявл. 29.07.11 ; опубл. 10.06.13, Бюл. № 16. – 5 с.

**** Пат. 2711585 Российская Федерация, МПК G01C 13/00, G01F 23/04. Струнный волнограф с инфракрасной регистрацией длины струн / Стерлядкин В. В., Куликовский К. В., Лихачева М. В. ; заявитель и патентообладатель Стерлядкин В. В. – № 2019120409 ; заявл. 01.07.19 ; опубл. 17.01.20, Бюл. № 2. – 4 с.

***** Пат. 2712755 Российская Федерация, МПК G01C 13/00. Оптический струнный волнограф / Стерлядкин В. В. ; заявитель и патентообладатель Стерлядкин В. В. – № 2019116825 ; заявл. 30.05.19 ; опубл. 31.01.20, Бюл. № 4. – 6 с.

***** Пат. 2016 146 953 Российская Федерация, МПК G01C 13/00, G01F 23/00. Струнный волнограф / Смоллов В. Е., Розвадовский А. Ф. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Морской гидрофизический институт РАН". – № 2016146953 ; заявл. 29.11.16 ; опубл. 29.05.18, Бюл. № 16. – 1 с.

помехозащищенность и увеличенный ресурс стабильной работы. Это достигается за счет преобразования напряжения сигнала, измеренного с резистивного датчика, в частоту управляющего сигнала и формирования, в зависимости от этой частоты, заданного сигнала (заданных синусоидальных колебаний, подаваемых на резистивный датчик).

В связи со спецификой работы данного волнографа на океанографической платформе в пгт Кацивели возникли следующие задачи при разработке его регистрирующей части, а именно: автономность работы; непрерывность записи данных; устойчивость записи и хранения данных к внешним воздействиям (снижение рисков потери данных); простота реализации.

Следует отметить, что для одно- и шестиструнного волнографов потребовалось разработать два отдельных устройства регистрации ветровых волн, что связано с различными скоростями передачи и объемами данных, передаваемых каждым из них. Большее число струн, более широкий спектр рабочих частот шестиструнного волнографа позволяют определять не только возвышения волн, но и их направления, что необходимо для оценки частотно-угловых спектров волн. Однако это требует больших вычислительных мощностей.

В данной работе приведен пример реализации записи и хранения данных, полученных от одно- и шестиструнного волнографов, с использованием аппаратно-программной платформы *Arduino*, приведены схемы подключения плат и блок-схемы программ. Большие вычислительные мощности для шестиструнного волнографа были достигнуты с использованием более производительной платы *Arduino Due*.

Аппаратная часть

Выбор платформы *Arduino* в качестве основы при разработке устройства для записи и хранения данных о ветровых волнах обусловлен оптимальным сочетанием аппаратных и программных характеристик [5]. Данная платформа имеет: свою собственную среду разработки *Arduino IDE*; встроенный бесплатный компилятор с языка *C/C++ (AVR GCC)*, обеспечивающий создание в результате компиляции двоичного файла программы пользователя с расширением *HEX*; бесплатную утилиту программатора *AVRDUDE*, передающую загрузчику микроконтроллера на плате *Arduino* код программы пользователя в виде *HEX*-файла; множество бесплатного инструментария (*AVR Studio, AVR GCC, AVR Libc, WinAVR*) и библиотек для него под различные операционные системы (*Windows, Linux, Mac*). Все это позволяет упростить и сократить время, необходимое для разработки и изготовления конечного изделия – устройства записи и хранения данных.

Задачи при разработке регистрирующей части струнного волнографа на основе *Arduino* решались следующим образом:

- непрерывность записи обеспечивалась за счет асинхронной передачи данных;
- помехоустойчивость обеспечивалась за счет автономности устройства (реализации в виде законченного изделия), у которого из внешних соединений используется только линия электропитания, защищенная фильтрами;

– простота реализации достигалась благодаря использованию самой платы *Arduino*, не требующей специальных средств настройки для подключения плат расширений (внутренних часов, индикатора времени, слота для *SD*-карт памяти).

Общая структурная схема данного устройства приведена на рис. 1.



Р и с. 1. Структурная схема записи данных на основе платформы *Arduino*

Fig. 1. Structural scheme of data recording based on the *Arduino* platform

В качестве интерфейса для приема данных был выбран *RS-232 (Recommended Standard 232)*, URL: http://www.bitsavers.org/pdf/datapro/communications_standards/2741_EIA_RS-232-E.pdf). Данный интерфейс используется для передачи результатов измерений в одно- и шестиструнном волнографах, для которых разрабатывалось устройство для записи и хранения данных. При этом он аппаратно и программно реализован для плат *Arduino* и не требует использования дополнительных устройств сопряжения и программных средств.

В качестве устройств хранения данных были выбраны *SD*-карты памяти (*Secure Digital Memory Card*). Данный выбор обусловлен тем, что волнограф предназначен для круглогодичного использования в различных (в том числе и сложных) метеоусловиях на океанографической платформе в пгт Кацевели в условиях изолированности. В этом случае не всегда возможно организовать проводной и/или беспроводный каналы для передачи данных. Поэтому было принято решение об использовании устройства для записи и хранения данных как составной части волнографа в автономном режиме. Данные при этом фиксируются непрерывно и забираются по мере заполнения *SD*-карт.

Платформа *Arduino* не имеет своих собственных встроенных часов реального времени, необходимых для привязки получаемых данных к временным интервалам, в которые проводились измерения. Для этого применяются внешние платы, наибольшее распространение из которых получили платы, выполненные с использованием микросхем *DS1302*, *DS1307*, *DS3231*.

При разработке устройства для записи и хранения данных на основе *Arduino* были рассмотрены различные варианты реализации часов реального времени. В итоге предпочтение было отдано микросхеме *DS3231*, так как только она имеет встроенную термостабилизацию, что позволяет получить повышенную точность по сравнению с *DS1302* и *DS1307* (URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>).

Структурная схема однострунного волнографа показана на рис. 2.

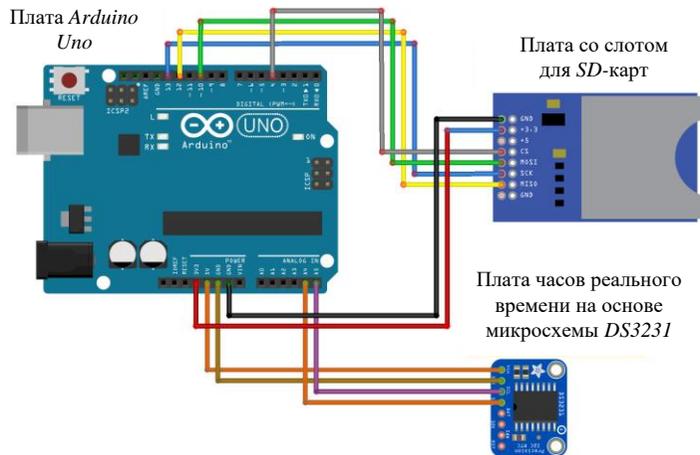


Рис. 2. Схема регистрирующей части однострунного волнографа на основе платы *Arduino Uno*
Fig. 2. Scheme of the recording part of a single-string wave gauge based on the *Arduino Uno*

В качестве основной платы использовалась *Arduino Uno*, в которой применен восьмьбитный контроллер фирмы *Atmel* семейства *AVR* модели *ATmega328* с тактовой частотой 16 МГц (URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf). Как было указано ранее, в качестве накопителя данных использовалась плата для *SD*-карт памяти. При этом для исключения потерь данных рекомендуется использовать накопители с классом скорости не ниже шестого (URL: https://www.sdcard.org/downloads/pls/latest_whitepapers/Application_Performance_Class_White_Paper.pdf).

В шестиструнном волнографе в отличие от однострунного в качестве основной платы в устройстве для записи и хранения данных использовалась *Arduino Due* (рис. 3).

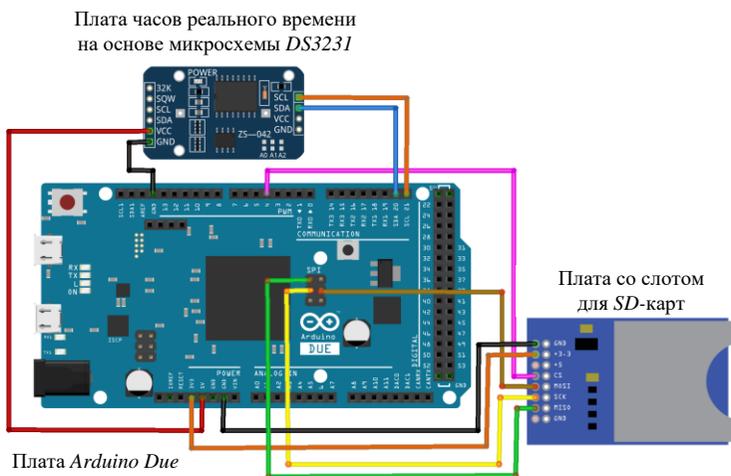
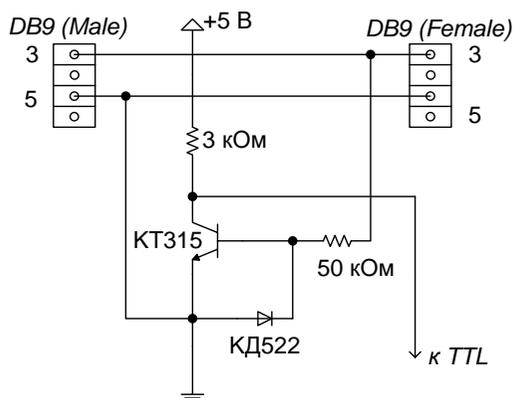


Рис. 3. Схема регистрирующей части шестиструнного волнографа на основе платы *Arduino Due*
Fig. 3. Scheme of the recording part of a six-string wave gauge based on the *Arduino Due*

Данная плата использует 32-битный микроконтроллер AT91SAM3X8E фирмы Atmel семейства ARM с ядром Cortex-M3, работающий на частоте 84 МГц (URL: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf), за счет чего достигается большая производительность.



Р и с. 4. Схема преобразователя напряжения на входе COM-порта платы Arduino
Fig. 4. Voltage converter scheme at the COM-port circuit input of the Arduino board

Встроенный COM-порт Arduino позволяет напрямую подключать к нему устройства по интерфейсу RS-232, логическому «0» которого соответствует положительное напряжение (от 5 до 15 В для передатчика), а логической «1» – отрицательное напряжение (от –5 до –15 В для передатчика). Однако с учетом того, что рабочими напряжениями микроконтроллеров на платах Arduino являются напряжения 5 или 3,3 В (в зависимости от модели платы), с целью защиты входных портов было использовано преобразование (понижение) напряжения при помощи преобразователя, схема которого приведена на рис. 4. Таким образом обеспечивается защита устройства записи и хранения данных от возможных перегрузок по COM-порту.

Программная часть

При разработке программной части основное внимание было уделено двум вопросам – чтению данных из COM-порта и привязке полученных результатов ко времени. Алгоритм программы приведен на рис. 5 (блоки выделены сплошными линиями).

Данная программа автоматически запускается в бесконечном цикле после подачи напряжения питания на плату Arduino и прерывается либо после прекращения его подачи, либо после перезапуска самой платы.

При разработке алгоритма программы особое внимание было уделено непрерывности считывания и записи данных, в том числе с целью минимизации потерь данных при пропадании напряжения питания устройства. Для этого, как было указано ранее, был выбран асинхронный режим чтения данных из COM-порта. Этот режим более низкоскоростной по сравнению с параллельным режимом, однако данные не хранятся в оперативной памяти (бу-

фере) устройства, а практически сразу записываются на карту памяти. Тем не менее даже в этом случае есть риск потери информации, а именно байта с данными, хранящимися в буфере *COM*-порта платы *Arduino*.

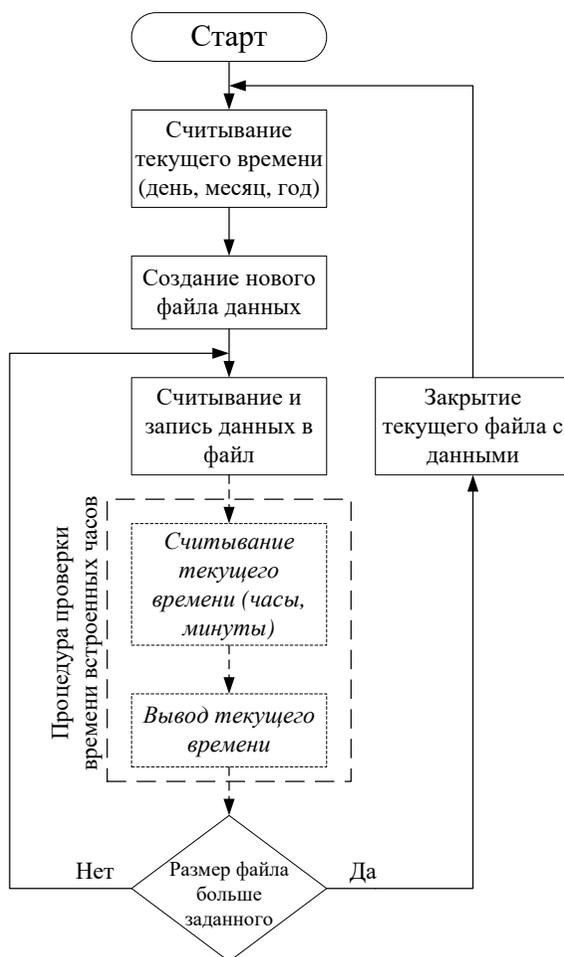


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы записи данных с использованием платы *Arduino*
Fig. 5. Flowchart for data recording algorithm using the *Arduino* board

Из двух вариантов реализации асинхронного режима чтения данных – побайтового и чтения блоками – был выбран второй. Это связано с тем, что чтение по одному байту для имеющихся скоростей передачи данных (9600 бит/с для однострунного и 38400 бит/с для шестиструнного волнографа) приводит к потере данных вследствие того, что устройство не успевает закончить программный цикл записи и хранения данных (рис. 5) до момента прихода следующего байта.

Размер блока был выбран минимально возможным, чтобы уменьшить потери данных из-за сбоев в работе устройства: для однострунного волнографа – 100 байт; для шестиструнного – 800 байт.

Другой вопрос, который необходимо было решить при разработке устройства записи и хранения, – это привязка полученных результатов ко времени. С учетом того, что данные от волнографа идут непрерывным потоком в виде кадров, вставка текущего времени в этот поток потребовала бы жесткой синхронизации каждого кадра на входе *COM*-порта платы *Arduino* и часов *DS3231*.

Для упрощения схемы было принято решение записывать входной поток данных в виде файлов фиксированного размера. При этом имя текущего файла соответствует времени начала записи, время последующего файла – времени окончания записи предыдущего.

С учетом того, что скорость записи данных – величина постоянная, а каждый кадр внутри файла имеет свой номер, используя эти данные, можно восстановить хронологию событий (записи информации с волнографа).

Важно отметить, что платформа *Arduino* имеет ограничение по длине имени файла – не более 8 символов. Поэтому имя файла было задано в следующем виде:

ММДДЧЧММ.wГГ,

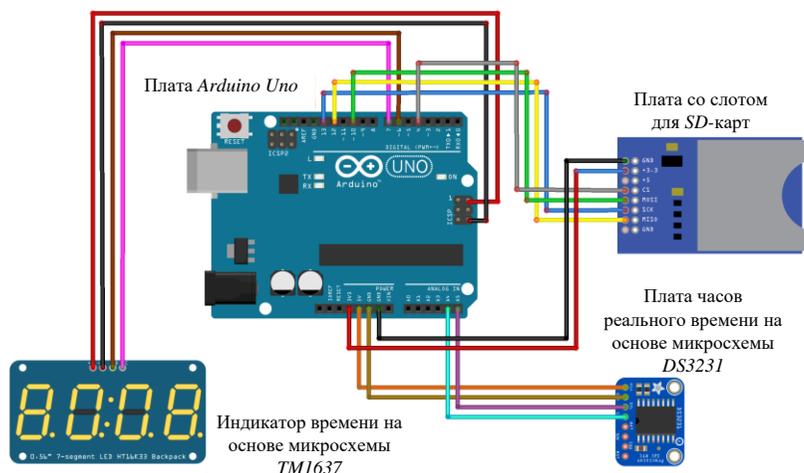
где ММ – месяц; ДД – дата; ЧЧ – часы; ММ – минуты; wГГ – расширение бинарного файла, в котором ГГ – цифры года.

Начальная установка времени часов *DS3231* проводится однократно при первом запуске программы при настройке устройства записи и хранения данных, после чего этот фрагмент кода комментируется.

Отсутствие индикации текущего времени приводит к тому, что контроль внутреннего времени регистрирующего устройства невозможен. Как следствие, любой сбой внутренних часов чреват тем, что в названии файлов будет указано недостоверное время и полученные данные будет сложно привязать ко времени их записи. Поэтому для непрерывного мониторинга текущего времени в состав регистрирующего устройства был включен индикатор времени на основе микросхемы *TM1637*.

В результате программный код претерпел изменения (см. блок-схему на рис. 5). В него была добавлена процедура обработки данных – текущего времени – и вывода результата на индикатор (выделено штриховой линией). Для вывода текущего времени в состав регистратора был добавлен четырехразрядный семисегментный индикатор на основе микросхемы *TM1637* (рис. 6).

Считывание времени с микросхемы *DS3231* и вывод на индикатор *TM1637* проводится каждый цикл чтения данных из *COM*-порта. Это позволяет в случае сбоя или зависания устройства определить момент времени, когда произошла нештатная ситуация, и проанализировать ее причины для исключения повторения в дальнейшем.



Р и с. 6. Схема регистрирующей части однострунного волнографа на основе платы *Arduino Uno* с индикацией текущего времени

F i g. 6. Scheme of the recording part of a single-string wave gauge based on the *Arduino Uno* board with indication of current time

Опыт использования

В устройстве для записи и хранения данных на основе платформы *Arduino* основная плата *Arduino Uno* и платы карты памяти, часов и индикатора размещены внутри пыле- и влагозащищенного корпуса, что обеспечивает их защиту от воздействий окружающей среды (рис. 7).

Два разъема *DB9* (*male* и *female*) включены параллельно с целью ретрансляции данных. В этом случае они не только записываются на внешний носитель – *SD*-карту (слот для ее подключения показан на рис. 7, *b*), но и могут выводиться на другое внешнее устройство (например, *COM*-порт персонального компьютера). Индикаторы показывают наличие сети питания и процесса передачи (регистрации) данных.



a



b

Р и с. 7. Внешний вид устройства записи и хранения данных для однострунного волнографа

F i g. 7. Appearance of the device for data recording and storing for a single-string wave gauge

Регистратор данных для однострунного волнографа начал использоваться в тестовом режиме для записи данных на океанографической платформе в пгт Качивели с мая 2015 г. С июля 2016 г. он уже работал в непрерывном круглогодичном режиме записи и хранения данных. За это время был получен массив данных порядка 10 Гбайт.

Первые пробные запуски регистрирующего устройства для шестиструнного волнографа проводились в период 3–10 июня 2019 г., тестовая эксплуатация – 9–26 сентября 2019 г. Опыт эксплуатации показал, что рассинхронизация времени устройства записи и хранения данных лежит в пределах ± 2 минуты в год и может быть программно скорректирована. Сбои в работе, которые имели место за это время, в 90% случаев обусловлены сбоями по электропитанию; по аппаратной и программной части отказов выявлено не было.

На рис. 8 приведен пример регистрации в течение 2019 г. основной волновой характеристики морской поверхности – высоты значительных волн H_s , полученной при помощи обсуждаемого устройства для однострунного волнографа. Разрыв в регистрации данных в октябре 2019 г. связан с выполнением работ по модернизации аппаратуры.

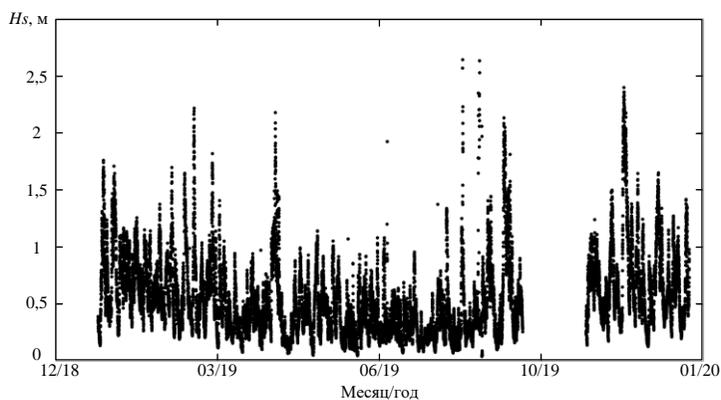


Рис. 8. Результаты регистрации высоты значительных волн H_s в течение 2019 г.
Fig. 8. Results of recording the significant wave heights H_s during 2019

Результаты, полученные с помощью данного регистратора на платформе *Arduino*, были использованы в рамках проекта ФЦП *RFMEF157714X0110* «Диагностика» («Разработка методов и создание экспериментального образца системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны Черноморского побережья Российской Федерации, включая Крымский полуостров, на основе спутниковых и контактных данных») и при выполнении госзаданий Морского гидрофизического института РАН, они опубликованы в работах [6–10].

Заключение

Описан вариант реализации устройства записи и хранения данных, полученных от струнного волнографа, с использованием аппаратно-программной

платформы *Arduino*. Предложенное решение обеспечивает непрерывность записи данных сразу на внешний носитель информации (*SD*-карту), минимизируя риск их потери при нарушении работоспособности. При этом устройство работает автономно, характеризуется малым энергопотреблением и не требует постоянного присутствия технических специалистов. Запись данных производится в бинарные файлы, при этом требования к их содержанию или формату отсутствуют.

Синхронизация по времени (привязка данных к моменту их записи) обеспечивается в названии файла, таким образом исключается искажение результатов измерений при внесении дополнительной информации устройством записи данных (самой платой *Arduino*).

Гибкость платформы *Arduino*, простота программирования и подключения внешних плат расширения (внешних носителей информации, внутренних часов, индикаторов и др.) упрощают реализацию и повышают надежность устройства записи и хранения данных в целом, о чем свидетельствует опыт его применения на океанографической платформе в пгт Качивели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goda Y.* Random seas and design of maritime structures // *Advanced Series on Ocean Engineering*. Vol. 15, Singapore : World Scientific Publishing Co., 2000. 443 p.
2. *Young I. R.* Wind Generated Ocean Waves // *Elsevier Ocean Engineering Series*. Vol. 2. Amsterdam : Elsevier, 1999. 287 p.
3. *Massel S. R.* Ocean Surface Waves. Their Physics and Prediction. Singapore : World Scientific Publishing Co., 2013. 800 p. (*Advanced Series on Ocean Engineering ; Vol 36*).
4. Ветровые волны в прибрежной зоне Южного берега Крыма – оценка качества моделирования на основе морских натуральных измерений / М. В. Шокуров [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 230–241. doi:10.7868/S0030157416020192
5. *Yurovsky Yu. Yu., Dulov V. A.* Compact low-cost Arduino-based buoy for sea surface wave measurements // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. Singapore. 2017. P. 2315–2322. doi:10.1109/PIERS-FALL.2017.8293523
6. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. doi:10.7868/S2073667318040068
7. Модуляция обрушений длинными ветровыми волнами // *Моря России: фундаментальные и прикладные исследования : Тезисы докладов всероссийской научной конференции*. г. Севастополь, 23–28 сентября 2019 г. / А. Е. Кориненко [и др.]. Севастополь : ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 350–351. URL: http://conf.mhi-ras.ru/news/2019/9/tezisy_dokladov_2019/morya_rossii-2019_tezisy.pdf (дата обращения: 16.07.2020).
8. Retrieval of the Statistical Characteristics of Wind Waves From the Width and Shift of the Doppler Spectrum of the Backscattered Microwave Signal at Low Incidence Angles / M. Panfilova [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, Vol. 58, iss. 3. P. 2225–2231. doi:10.1109/TGRS.2019.2955546

9. GNSS Reflectometry of the Black Sea Level in the Experiments at the Stationary Oceanographic Platform / A. M. Padokhin [et al.] // Moscow University Physics Bulletin, 2018, Vol. 73. P. 422–427. doi:10.3103/S0027134918040112
10. Ground-to-Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on the Coastal Zone of the Crimean Peninsula / V. G. Bondur [et al.] // Physical Oceanography. 2020. Vol. 27, iss. 1. P. 95–107. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-95-107

Об авторах:

Смолов Владимир Евгеньевич, ведущий инженер-электроник, лаборатория прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), vladimir.smolov@mail.ru

Розвадовский Андрей Федорович, младший научный сотрудник, лаборатория прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, rozvadovsky@yandex.ru