

Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований

Ю. Ю. Юровский *, О. Б. Кудинов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

** e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru*

Аннотация

Представлены прототипы волноизмерительных буй-логгеров, предназначенных для сбора исходных данных со встроенных в эти буи инерциальных датчиков без передачи информации на берег. Буи такого типа нуждаются в обслуживании, но имеют существенно более простую конструкцию и низкую стоимость по сравнению с необслуживаемыми аналогами, что может быть востребовано в различных прибрежных исследованиях. Цель работы – продемонстрировать в натурных условиях, что предлагаемый тип буй-логгера может эффективно использоваться для измерения характеристик волнения без потери качества данных. Испытания буй-логгера проведены в натурном эксперименте на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне Морского гидрофизического института РАН. В качестве референтной информации о волнах использованы данные измерений струнными волнографами, установленными на стационарной океанографической платформе (44.393047° с. ш., 33.984596° в. д.). Три одинаковых буя были установлены вблизи платформы с использованием разных вариантов удерживающего устройства: на массивном якоре с эластичной вставкой (амортизатором) и без нее, а также без якоря на подвесе с платформы. Непрерывные измерения велись в течение 7 сут, в течение которых высота значительных волн менялась от 0.2 до 1 м, скорость ветра от 0 до 15 м/с при его восточном, западном, северном направлениях. В этих условиях среднеквадратичная ошибка оценки высоты значительных волн составила не более 5–6 см (с амортизатором и без него) при отклонении коэффициента линейной регрессии от единицы не более чем на 5 %. Среднеквадратичные ошибки периода и направления волн спектрального пика составили 0.37–0.62 с и 50–65° соответственно при измерении буй-логгера с амортизатором и без него. Такие ошибки измерений сопоставимы с разрешающей способностью используемых методов и естественным статистическим разбросом средних оценок параметров волн.

Ключевые слова: буй, волнограф, инерциальные измерения, ветровые волны, параметры волн, океанографическая платформа, натурный эксперимент

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-27-00153 «Волнографические измерения с помощью малогабаритных буй-логгеров: методология, валидация, перспективы миниатюризации».

© Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Для цитирования: Юровский Ю. Ю., Кудинов О. Б. Волноизмерительный буй-логгер для прибрежных исследований // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 115–127. EDN UVGARW.

Wave Buoy Logger for Coastal Studies

Yu. Yu. Yurovsky *, O. B. Kudinov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

* e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru

Abstract

The paper presents prototype wave buoy loggers designed to collect raw data from a built-in inertial motion unit without transmitting the data to the user. These buoys require maintenance but have a significantly simpler design and much lower cost compared to unattended analogs, making them particularly useful for various coastal studies. The study aims to demonstrate that measuring wave parameters in field conditions with acceptable accuracy is achievable without loss of data quality. The buoys were tested in a field experiment at the Black Sea Hydrophysical Sub-Satellite Polygon of Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences. Reference measurements were obtained using wire wave gauges installed on the Stationary Oceanographic Platform (44.393047°N, 33.984596°E). Three identical buoys were deployed near the platform using different mooring configurations: a heavy anchor with an elastic insert (rubber cord), a heavy anchor without an elastic insert, and a buoy suspended directly from the platform without an anchor. Continuous measurements were conducted over seven days, during which significant wave height varied from 0.2 to 1 m, and wind speeds ranged from 0 to 15 m/s, coming from easterly, westerly, and northerly directions. Under these conditions, the root-mean-square error in estimating significant wave height was no more than 5–6 cm (both with and without the rubber cord), with the linear regression coefficient deviating from 1 by less than 5%. The root-mean-square errors for the spectral peak wave period and direction were 0.37–0.62 s and 50–65°, respectively. These errors are comparable to the resolution of the applied methods and the natural statistical variability of wave parameter estimates.

Keywords: buoy, wave gauge, inertial measurements, wind waves, wave parameters, oceanographic platform, field experiment

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Scientific Foundation grant 24-27-00153 “Measuring waves with small buoys: methods, validation, prospects of miniaturization”.

For citation: Yurovsky, Yu.Yu. and Kudinov, O.B., 2025. Wave Buoy-Logger for Coastal Studies. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 115–127.

Введение

В морских исследованиях часто возникает необходимость в эпизодических кратковременных наблюдениях за поверхностными волнами в рамках целевых экспериментов. Это особенно актуально в прибрежных исследованиях, например при изучении нелинейности волн в прибрежной зоне [1, 2], их взаимодействия с течениями [3], формирования донных наносов [4–6], динамики пляжей и береговой линии [7, 8] и многих других [9–12]. В таких условиях применение традиционных волномерных буйев, предназначенных для непрерывного

мониторинга волнения в любой точке океана, не всегда целесообразно из-за их довольно высокой стоимости. Для кратковременных прибрежных исследований многие их параметры оказываются избыточными, включая автономное энергоснабжение, увеличенный объем памяти, многоканальную систему связи с берегом, массивный высокопрочный корпус. Кроме того, часто в специализированных экспериментах требуется до нескольких десятков таких буюв, чтобы обеспечить одновременные измерения на разрезе или на сетке.

В связи с этим целесообразной представляется разработка простого измерителя волн, имеющего только функцию записи текущих измерений с датчика, чувствительного к волновому движению, т. е. бую-логгера. Решению этой задачи также способствует все более широкое внедрение в волноизмерительные приборы микроэлектромеханических инерциальных датчиков весьма малого размера и стоимости [11, 13–16].

В работе представлены результаты натурных испытаний разработанного в Морском гидрофизическом институте (МГИ) прототипа такого прибора. Эксперимент проведен с использованием трех одинаковых образцов буюв, но в разных вариантах их постановки. Известно, что на качество измерения волн буюковыми датчиками определенное влияние может оказывать удерживающее устройство^{1), 2)} [2]. Поэтому для увеличения срока службы всей системы, а также для смягчения рывков при взаимодействии корпуса с крутыми волнами в якорное устройство обычно включают упругий элемент – отрезок резинового жгута длиной несколько метров [17]. Для наглядной демонстрации эффекта удерживающей линии в эксперименте осуществлено три варианта крепления: стандартный якорный трос без упругой вставки; трос с максимально эластичным элементом (в пределах, обеспечивающих удержание на время эксперимента); методический вариант – бифилярный подвес без якоря с платформы.

Цель работы – продемонстрировать в натурных условиях, что для краткосрочных измерений характеристик волнения с приемлемым качеством можно использовать бую-логгеры, построенные на легкодоступной элементной базе.

Материалы и методы

Оборудование

Буй собран на базе инерциального датчика *MPU9250*, совмещающего в себе микроэлектромеханический акселерометр, гироскоп и магнитометр. Как было показано ранее [14, 18], такие датчики, несмотря на их сравнительно низкую стоимость, пригодны для оценки характеристик морского волнения. Исходные измерения трех компонент ускорений, скоростей вращений, магнитного поля, а также температуры датчика с частотой дискретизации 25 Гц записываются на карту памяти объемом до 32 Гб с помощью микроконтроллера *Atmega328p* с привязкой к мировому времени с помощью часов реального времени на базе *DS3231*.

¹⁾ Earle M. D. Nondirectional and directional wave data analysis procedures. Stennis Space Center, 1996. 43 p. (NDBC technical document 96-01).

²⁾ Грязин Д. Г. Расчет и проектирование буюв для измерения морского волнения. Санкт-Петербург : СПбГИТМО (ТУ), 2000. 134 с.

Схема собрана в пластиковом герметичном корпусе цилиндрической формы на плате, жестко зафиксированной в осевой плоскости корпуса. Инерциальный датчик отдален от оси корпуса не более чем на толщину платы (1.5 мм) и смещен по вертикали так, чтобы его центр находился как можно ближе к точке, вокруг которой происходят резонансные колебания корпуса. Корпус снабжен поплавком, выполненным в виде чечевицеобразного диска с фасками диаметром 40 см из вспененного полистирола толщиной 100 мм. К нижней части корпуса прикреплен рым из нержавеющей стали, к которому через вертлюг крепится балласт (для корректировки осадки корпуса) и удерживающий трос.

Питание осуществляется от шести литий-ионных аккумуляторов форм-фактора 18650 общей емкостью около 48 Вт·ч, расположенных в нижней части корпуса по обе стороны от платы.

В целях дополнительной проверки качества измерений с обратной стороны платы был размещен еще один инерциальный датчик такого же класса, но другой модели (*BNO055*). Оси обоих датчиков были по возможности сонаправлены (с точностью до поворота на 180°), а расстояние между центрами датчиков не превышало 4 мм.

Эксперимент

Эксперимент был проведен в октябре 2024 г. на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне вблизи стационарной океанографической платформы (рис. 1). Данные о батиметрии получены на сайте <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.

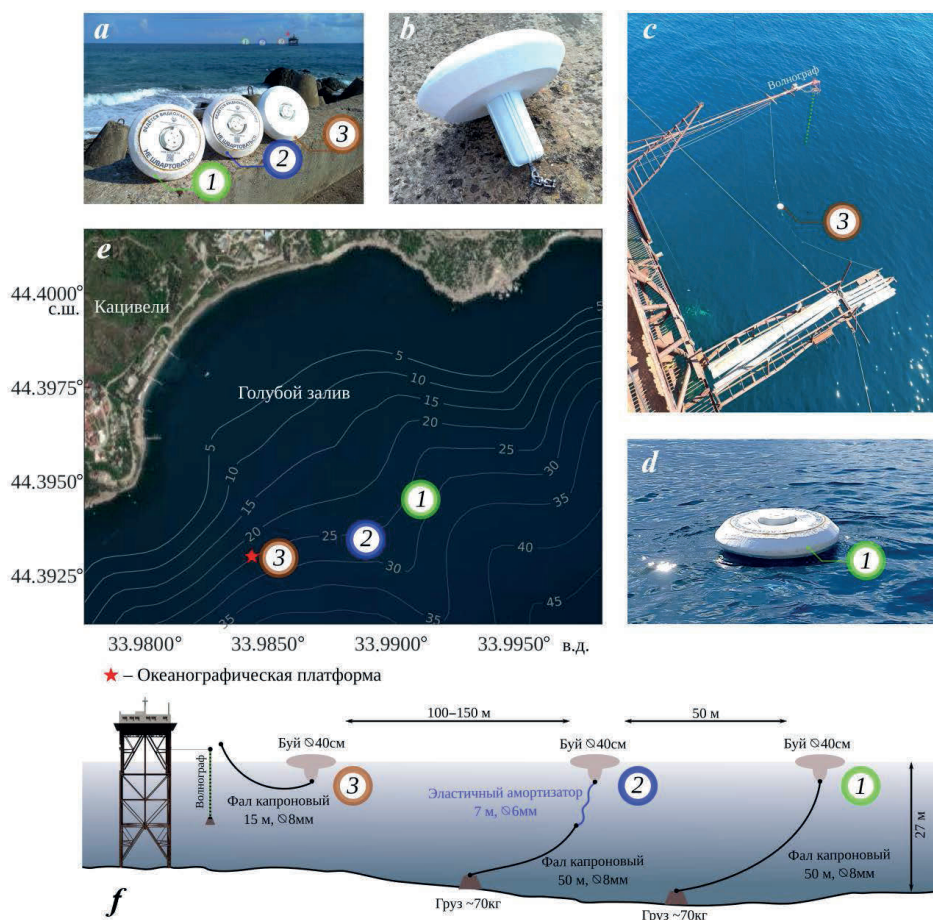
Буй 1 был установлен на расстоянии около 200 м от платформы в точке, где глубина моря составляет около 27 м. В качестве якоря использовался каменный массивный груз сухой массой около 70 кг. Буй крепился к грузу с помощью капронового восьмипрядного шнура с сердечником диаметром 8 мм.

Буй 2 располагался на такой же глубине, но приблизительно на 50 м ближе к платформе. В отличие от первого образца, буй соединялся с якорным тросом через резиновый жгут длиной 7 м и диаметром 6 мм в нейлоновой оплетке (далее – амортизатор). Параметры этого амортизатора выбраны таким образом, чтобы не допустить его обрыв в течение эксперимента и в то же время обеспечить максимальную эластичность связи.

Буй 3 располагался между двумя выстрелами платформы на бифилярном подвесе из капронового шнура на расстоянии около 8 м от свайного основания. Целью этой постановки была оценка возможности проведения методических работ с платформы без более затратных постановок/уборок с якоря.

Длительность постановки буев 1, 2 составила около 7 сут, в то время как буй 3 использовался только в последние сутки измерений.

С платформы велись параллельные измерения параметров волнения струнными резистивными волнографами, обеспечивающими регистрацию уровня морской поверхности с точностью ± 1 см в частотном диапазоне до 5 Гц [19, 20]. Данные измерений используются в работе в качестве референтных. Помимо этого, стандартными гидрометеорологическими приборами проводились вспомогательные метеонаблюдения. В частности, скорость и направления ветра на высоте 21 м измеряли с помощью чашечного анеморумбографа.



Р и с . 1 . Схема проведения натурного эксперимента: *a, b* – внешний вид буев; *c* – постановка буя 3 с платформы; *d* – постановка буя 1 на якорь; *e* – спутниковое изображение места проведения эксперимента с батиметрией (URL: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f>) (дата обращения: 25.08.2025); *f* – схематичный разрез по глубине, показывающий различия в постановке

F i g . 1 . Field experiment setup: *a, b* – buoy exterior design; *c* – deployment of Buoy 3 from the platform; *d* – deployment of Buoy 1 with anchor; *e* – satellite image of the study site with bathymetry overlay (URL: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f>) (Date of access : 25 August 2025); *f* – schematic depth profile illustrating buoy deployment configurations

Методика обработки данных

В работе исходными данными измерений буями являются временные ряды трех компонент ускорений, скоростей вращений и магнитного поля, струнными волнографами – синхронные измерения возвышений морской поверхности в шести точках (центр и вершины пятиугольника радиусом 25 см). Для оценки характеристик волнения использован хорошо известный метод, описанный в [21], позволяющий получить оценку частотно-углового спектра

в виде усеченного ряда Фурье по данным измерений вертикальных смещений и уклонов в двух ортогональных плоскостях:

$$S(f, \theta) = a_0 + \sum a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta), \quad (1)$$

где f – частота; θ – направление распространения волн (в соответствии с принятым соглашением, угол θ отсчитывается по часовой стрелке от направления на север и обозначает направление, откуда приходят волны).

Для измерений струнными волнографами мгновенные уклоны ζ и возвышение z оценивали путем аппроксимации (методом наименьших квадратов) плоскостью шести возвышений в точках с известными горизонтальными координатами. Коэффициенты для формулы (1) в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} a_0 &= C_{11}/\pi, \quad a_1 = Q_{12}/k\pi, \quad b_1 = Q_{13}/k\pi, \\ a_2 &= (C_{11} - C_{22})/k^2\pi, \quad b_2 = 2C_{23}/k^2\pi, \end{aligned} \quad (2)$$

где C_{mn} и Q_{mn} – соответственно действительная и мнимая части оценки спектра $S_{mn} = C_{mn} + iQ_{mn}$. Нижние индексы указывают на параметры, спектр которых рассчитывается: 1 – возвышения; 2 – уклоны ζ_x в направлении восток – запад; 3 – уклоны ζ_y в направлении север – юг. Волновое число рассчитано по дисперсионному соотношению $k = (2\pi f)^2/g$, где g – ускорение свободного падения.

В случае измерений буюми вместо возвышений использовались вертикальные ускорения в предположении, что буй идеально следует уклонам волн. В этом случае соотношения (2) принимают вид

$$\begin{aligned} a_0 &= C_{11}/\pi (2\pi f)^4, \quad a_1 = Q_{12}/k\pi (2\pi f)^2, \quad b_1 = Q_{13}/k\pi (2\pi f)^2, \\ a_2 &= (C_{22} - C_{33})/k^2\pi, \quad b_2 = 2C_{23}/k^2\pi, \end{aligned}$$

где 1 обозначает вертикальное ускорение. Уклоны вычисляли аналогично [14] из измеренных скоростей вращения η с учетом текущей ориентации бую относительно севера:

$$\eta_x = -(\eta_{0x} \sin(\phi) + \eta_{0y} \cos(\phi)), \quad \eta_y = -(\eta_{0x} \cos(\phi) - \eta_{0y} \sin(\phi)),$$

где η_{0x} , η_{0y} – измеренные гироскопом скорости вращения, а азимутальный угол ϕ с поправкой на текущее магнитное склонение в месте проведения эксперимента (7.3°) определялся по горизонтальным компонентам измеренного магнитного поля: $\phi = \text{Arg}(m_x + im_y)$. Неизвестные сдвиги в измерениях магнитного поля, возникающие из-за намагниченности деталей бую, определялись из условия постоянства абсолютной величины вектора напряженности геомагнитного поля M :

$$(m_{ix} - m_{0x})^2 + (m_{iy} - m_{0y})^2 + (m_{iz} - m_{0z})^2 = M^2,$$

где m_{ix} , m_{iy} , m_{iz} – измерения магнитометра в i -й момент времени.

По рассчитанным одномерным спектрам возвышений $S(f) = \pi a_0$ оценивали высоту значительных волн:

$$H_s = 4\sqrt{\int S(f)df},$$

где нижний предел интегрирования f_l определяли по признаку первого локального минимума в спектре возвышений во избежание низкочастотных помех,

присущих измерениям буйковыми датчиками [22] (для измерений струнным волнографом эта проблема не актуальна).

Частоту спектрального пика f_p и соответствующий ее период T_p определяли по признаку максимума спектра возвышений при условии $f > f_1$.

Среднее направление волн θ_p , соответствующих спектральному пику, согласно [21], равно $\theta_p = \text{Arg}(a_1 + i b_1)$.

Записи разбивали на одномоментные последовательные фрагменты, по которым рассчитывали квадраты Фурье-образов, усредняемые в дальнейшем по 30-минутным интервалам для получения оценки спектра (формула (1)).

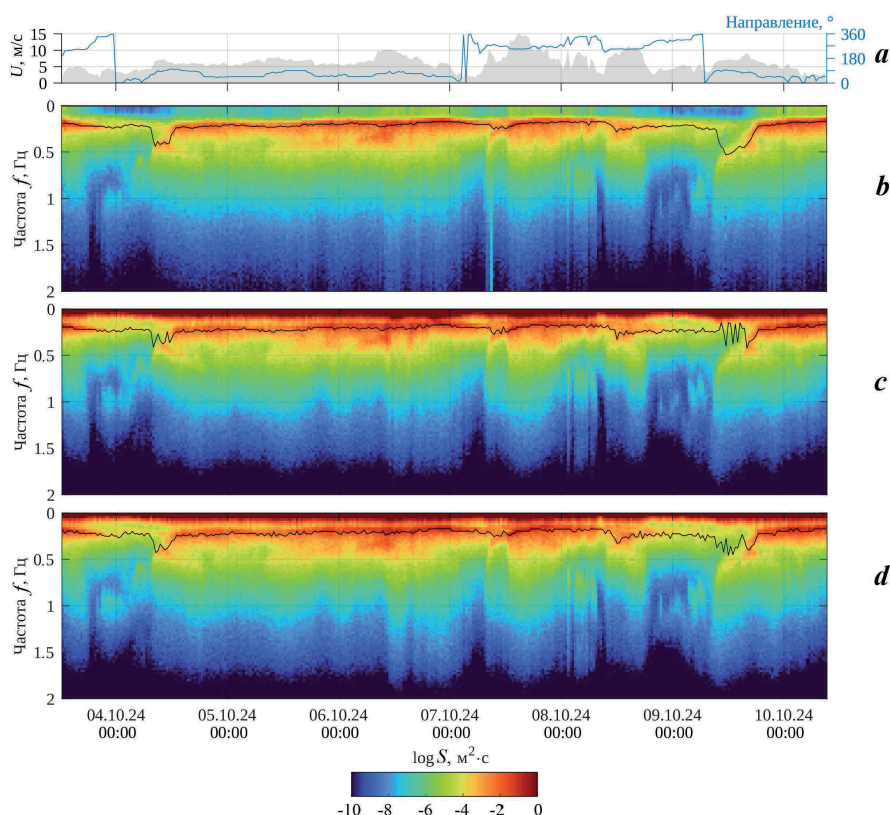
Результаты

Частотные спектры возвышений, оцененные по измерениям волнографов и буюв 1, 2, показаны на рис. 2 как функция времени для всего периода измерений (результаты для буюа 3, установленного на существенно более короткий промежуток времени, для краткости не показаны). Скорость ветра за это время (рис. 2, а) менялась в пределах от 0 до 15 м/с при восточном, западном и северном направлениях. Таким образом, за неделю эксперимента удалось провести измерения в наиболее типичных для данной акватории условиях.

Как видно из рис. 2, б, показывающего референтные спектры, наблюдались ситуации затухающего волнения и зыби (3 октября), развития ветровых волн (7 и 9 октября), присутствия нескольких пиков в спектре (4, 8, 9 октября). Такие же особенности наблюдаются и в спектрах, построенных по данным измерений буюами 1, 2. Отличия от референтных спектров заключаются в заниженной высокочастотной части $f > 1.5$ Гц и завышенной низкочастотной части $f < f_p$. Первый эффект возникает из-за слабого отклика корпуса на волны, длина которых меньше его характерного размера [23]. Этот эффект не оказывает существенного влияния на оценки значительной высоты волн из-за довольно быстрого спада спектра возвышений с частотой f^{-4} . Второй эффект может вызывать серьезные ошибки в оценках высот волн, как показано, например, в [22]. Именно поэтому оценка H_s в данной работе выполняется не по всему спектру, а начиная с частоты f_1 , в качестве которой выбрана частота первого локального минимума в спектре возвышений. Такой подход эквивалентен высокочастотной фильтрации, которая обычно применяется при обработке данных исходных измерений, получаемых с помощью буюев¹⁾. Однако для измерений струнным волнографом такая операция избыточна, поскольку спектральная плотность на низких частотах (ниже пиковой) на несколько порядков меньше, чем в области спектрального максимума.

Временные ряды высот значительных волн, рассчитанные таким образом, изображены на рис. 3, б. Отметим, что, несмотря на отсутствие дополнительной калибровки, результаты показывают хорошее соответствие между данными измерений волнографом и всеми тремя образцами буюев для всех использованных типов постановки.

Различия с данными измерений, полученными датчиком BNO055, на этом рисунке не превышают толщины линии графика и поэтому здесь не показаны. Таким образом, совпадение результатов у шести образцов датчиков двух разных моделей свидетельствует о том, что заводская калибровка датчиков этого класса обеспечивает заявленную точность (обычно в пределах нескольких процентов).

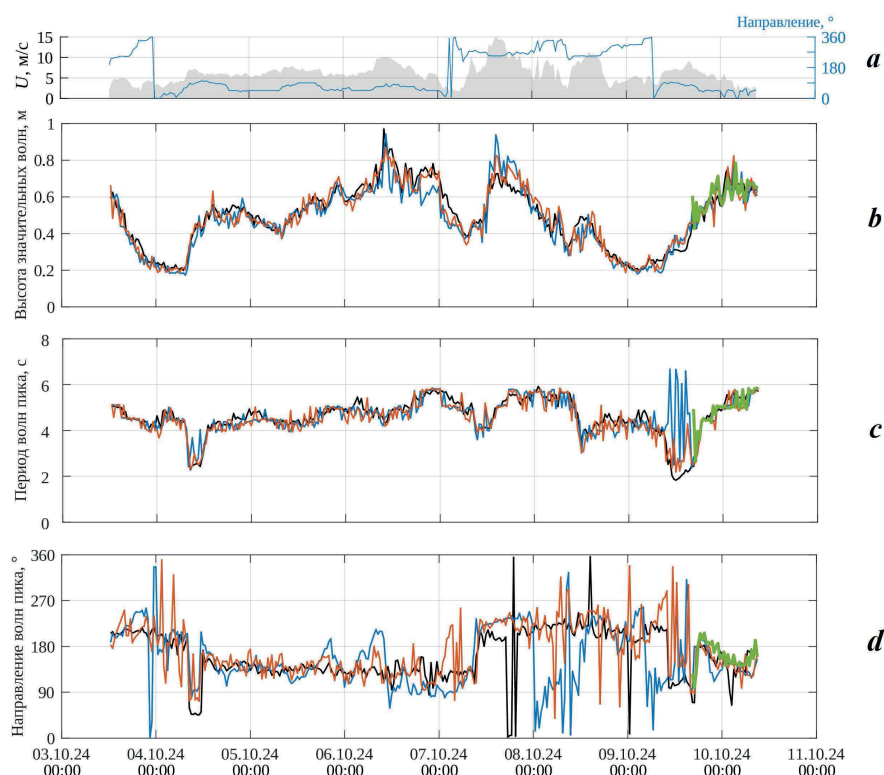


Р и с . 2 . Скорость и направление ветра (а) во время эксперимента, эволюция частотного спектра по измерениям: волнографа (b), буйа 1 без амортизатора (c), буйа 2 с амортизатором (d)

Fig . 2 . Wind speed and direction (a) during the experiment, frequency spectrum evolution from measurements of (b) wave gauge, (c) Buoy 1 without rubber cord, (d) Buoy 2 with rubber cord

Между тем значительно более существенные различия вызваны присутствием в удерживающем устройстве эластичного амортизатора, например такие различия хорошо видны на участках графиков 6 и 7 октября. Примечательно, что разность между измеренной и референтной высотами волн в этих двух случаях имеет разный знак. Связано это, предположительно, с весьма сложной картиной течений, которая наблюдалась в дни эксперимента. Часто довольно сильное течение было направлено против ветра и волн. Однако влияние течений заслуживает отдельного исследования, и этот вопрос оставлен за рамками данной работы.

Анализ рассчитанных периодов волн спектрального пика (рис. 3, с) показывает хорошее соответствие наблюдений с референтными значениями. Однако в случаях молодого волнения на фоне зыби (4 и 9 октября) наблюдались расхождения, когда близкие по амплитуде спектральные пики на разных частотах создавали эффект, аналогичный дребезгу. Примечательно, что при использовании амортизатора (буй 2, оранжевая линия) этот эффект проявлялся значительно слабее.



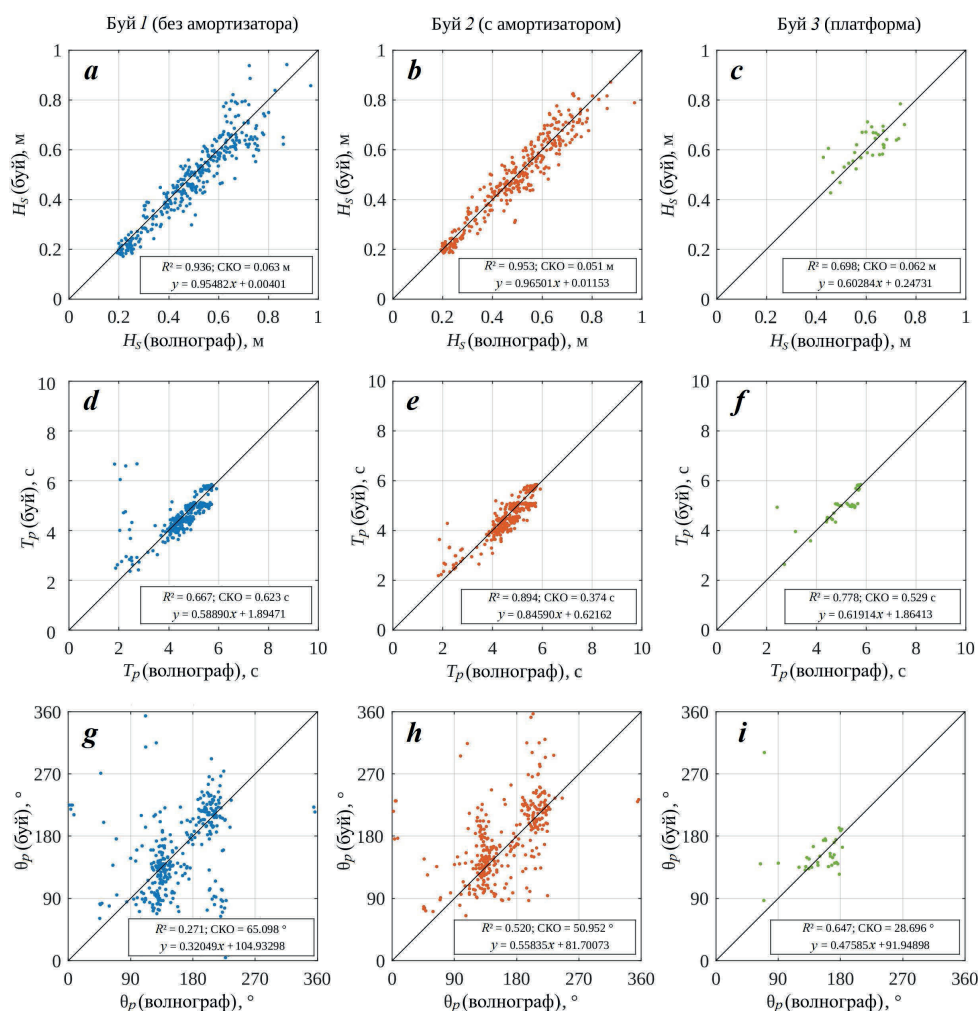
Р и с . 3 . Скорость и направление ветра (*a*) во время эксперимента, временные ряды параметров волн, оцененные по данным измерений волнографом (черная кривая) и буями 1 (синяя кривая), 2 (оранжевая кривая), 3 (зеленая кривая): *b* – высота значительных волн; *c* – период волн спектрального пика; *d* – направление волн спектрального пика

F i g . 3 . Wind speed and direction (*a*) during the experiment, time series of wave parameters estimated from measurements of wave gauge (black) and Buoys 1 (blue), 2 (orange), 3 (green): *b* – significant wave height, *c* – spectral peak wave period, *d* – spectral peak wave direction

Наибольшие расхождения с референтными измерениями наблюдаются в оценках направлений волн спектрального пика (рис. 3, *d*). Хотя средние значения определяются достаточно точно, отмечаются кратковременные выбросы, преимущественно при слабых ветрах (между 3 и 4 октября, а также после 8 октября). Отметим, что аналогичные особенности, хотя и менее выраженные, характерны для референтных измерений струнным волнографом, что связано со спецификой алгоритма расчета направленного спектра, ограниченного первыми пятью членами ряда Фурье (формула (1)). Использование амортизатора улучшает точность расчета направлений (см., например, рис. 3, *d*, синяя кривая после 8 октября). Не совсем стандартный бифилярный подвес с платформы показал неожиданно малый разброс относительно референтных значений.

Диаграммы рассеяния для трех обсуждаемых параметров волнения H_s , T_p и θ_p , показаны на рис. 4 вместе с некоторыми статистическими метриками.

Для буйев 1, 2, наиболее обеспеченных данными, можно отметить довольно высокие значения коэффициента корреляции для высот значительных волн – более 0.93 при отклонении коэффициента линейной регрессии от единицы не более чем на 5 %. Среднеквадратичная ошибка измерений составила ~ 6 см для постановок с амортизатором и 5 см без него. При этом следует иметь в виду, что измерения проводились в разнесенных в пространстве точках, поэтому немалая часть этой ошибки связана со статистическим разбросом значений H_s , который обычно составляет 10–15 %¹⁾.



Р и с . 4 . Параметры волн: высота значительных волн (a, b, c); период волн спектрального пика (d, e, f); направление волн спектрального пика (g, h, i), полученные буюм 1 без амортизатора (a, d, g), буюм 2 с амортизатором (b, e, h); буюм 3 с платформы (c, f, i) в сравнении с данными референтных измерений волнографом

F i g . 4 . Wave parameters: significant wave height (a, b, c), spectral peak wave period (d, e, f), spectral peak wave direction (g, h, i) obtained by Buoy 1 (without rubber cord) (a, d, g), Buoy 2 (with rubber cord) (b, e, h), Buoy 3 (platform deployment) (c, f, i) compared with reference wave gauge measurements

Согласованность между оцененными и референтными значениями периодов волн пика T_p ниже, как обсуждалось ранее, вследствие описанного выше эффекта дребезга. Между тем, если исключить из рассмотрения явные выбросы, коэффициент корреляции достигает значений, сопоставимых с точностью оценки высот волн.

Наибольшие расхождения с референтными данными измерений наблюдаются для направлений волн в диапазоне $50\text{--}65^\circ$ (рис. 4, *g, h, i*), что согласуется с анализом временных рядов (см. рис. 3, *d*). Впрочем, это отклонение сопоставимо с разрешающей способностью используемого метода (около 90°)¹⁾ [21].

Использование эластичного амортизатора во всех случаях улучшает качество оценки по сравнению с референтными значениями, хотя это улучшение едва ли можно назвать существенным несмотря на то, что намеренно был выбран максимально эластичный (но минимально надежный) амортизатор.

Заключение

В работе представлены результаты натурных испытаний разработанных в МГИ волноизмерительных буй-логгеров, которые имеют максимально упрощенную конструкцию и осуществляют только сбор данных исходных измерений на карту памяти.

Эксперимент проведен вблизи стационарной океанографической платформы МГИ. Три образца, имеющие одинаковую внутреннюю конструкцию, протестированы в трех разных вариантах постановки: без эластичного амортизатора, с амортизатором, на подвесе с платформы. Сравнение с референтными данными, в качестве которых использованы результаты измерений струнными волнографами, показало хорошее соответствие всех оценок, полученных с использованием всех трех вариантов постановки. Например, в наблюдавшемся диапазоне высоты значительных волн $0.2\text{--}1$ м среднеквадратичная ошибка измерений высот составила не более 5 см для варианта с амортизатором и не более 6 см – без него. Аналогичные значения для периодов волн спектрального пика – 0.37 и 0.62 с, а для направлений таких волн – 50° и 65° . Поэтому при высоких рисках потери буй-амортизатор может быть исключен из удерживающего устройства ценой незначительного ухудшения качества конечных данных.

Очевидным ограничением представленных в работе измерителей является необходимость их обслуживания в виде снятия данных и замены элементов питания. Несмотря на это, такой режим проведения измерений может быть приемлем для различных прибрежных задач или специализированных экспериментов, не требующих длительных постановок.

К преимуществам такого подхода можно отнести предельно низкую стоимость, которая на 2–3 порядка ниже стоимости традиционных необслуживаемых моделей. Это открывает широкие возможности для проведения натурных исследований волн на разрезах или сетках, в которых необходимо задействовать множество одинаковых измерителей. Кроме того, немаловажным достоинством, на наш взгляд, является то, что в распоряжении исследователя оказываются исходные данные, считываемые непосредственно с датчика без какой-либо предобработки. Это делает дальнейший анализ более прозрачным и гибким, а также позволяет варьировать алгоритм обработки в зависимости от поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov S., Saprykina Y.* Nonlinear wave transformation in coastal zone: free and bound waves // *Fluids*. 2021. Vol. 6, iss. 10. 347. <https://doi.org/10.3390/fluids6100347>
2. *Brown A. C., Paasch R. K.* The accelerations of a wave measurement buoy impacted by breaking waves in the surf zone // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 2. 214. <https://doi.org/10.3390/jmse9020214>
3. *Masson D.* A case study of wave-current interaction in a strong tidal current // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, iss 3. P. 359–372. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0359:ACSOWI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0359:ACSOWI>2.0.CO;2)
4. *Горячкин Ю. Н., Удовик В. Ф., Харитонова Л. В.* Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // *Морской гидрофизический журнал*. 2010. № 5. С. 42–51. EDN TOERXH.
5. *Saprykina Y. V., Samiksha S. V., Kuznetsov S. Yu.* Wave climate variability and occurrence of mudbanks along the southwest coast of India // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. 671379. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671379>
6. Influence of wave climate on intra and inter-annual nearshore bar dynamics for a sandy beach / N. Andreeva [et al.] // *Geosciences*. 2021. Vol. 11, iss. 5. 206. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050206>
7. *Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д.* Образование нового острова у берегов Крыма // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 323–330. EDN PGHSZT. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020033>
8. Influence of beach erosion during wave action in designed artificial sandy beach using XBeach model: profiles and shoreline / Y. Zhou [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 5. 984. <https://doi.org/10.3390/jmse11050984>
9. Ocean surface wind estimation from waves based on small GPS buoy observations in a bay and the open ocean / T. Shimura [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2022. Vol. 127, iss. 9. e2022JC018786. <https://doi.org/10.1029/2022jc018786>
10. *Дивинский Б. В., Куклев С. Б.* Эксперимент по исследованию параметров ветрового волнения на шельфе Черного моря // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 1. С. 14–19. EDN UWBPIX. <https://doi.org/10.31857/S003015742201004X>
11. Measurements of nearshore ocean-surface kinematics through coherent arrays of free-drifting buoys / E. Rainville [et al.] // *Earth System Science Data*. 2023. Vol. 15, iss. 11. P. 5135–5151. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5135-2023>
12. Nearshore wave buoy data from southeastern Australia for coastal research and management / M. A. Kinsela [et al.] // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11, iss. 1. 190. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02865-x>
13. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave-current interaction studies / P. Veras Guimarães [et al.] // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14, iss. 6. P. 1449–1460. <https://doi.org/10.5194/os-14-1449-2018>
14. *Yurovsky Y. Yu., Dulov V. A.* MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing // *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 217. 108043. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108043>
15. OpenMetBuoy-v2021: an easy-to-build, affordable, customizable, open-source instrument for oceanographic measurements of drift and waves in sea ice and the open ocean / J. Rabault [et al.] // *Geosciences*. 2022. Vol. 12, iss. 3. 110. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030110>

16. The wavedrifter: a low-cost IMU-based Lagrangian drifter to observe steepening and overturning of surface gravity waves and the transition to turbulence / F. Feddersen [et al.] // Coastal Engineering Journal. 2024. Vol. 66, iss. 1. P. 44–57. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2238949>
17. Joosten H. Directional wave buoys and their elastic mooring // International Ocean Systems. 2006. Vol. 10, iss. 4. P. 18–21.
18. Yurovsky Yu. Yu., Dulov V. A. Compact low-cost Arduino-based buoy for sea surface wave measurements // Proceedings of Progress in Electromagnetic Research Symposium – Fall (PIERS – FALL), 19–22 November 2017. Singapore : IEEE, 2017. P. 2315–2322. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293523>
19. Исследование спектров морского волнения в широком диапазоне длин волн по спутниковым и контактными данным / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 7–24. EDN VTOVJF. <https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
20. Смолов В. Е., Розвадовский А. Ф. Применение платформы Arduino для регистрации ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 467–479. EDN AKIBG. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-467-479>
21. Longuet-Higgins M. S., Cartwright D. E., Smith N. D. Observations of the Directional Spectrum of Sea Waves Using the Motions of a Floating Buoy // Ocean wave spectra : Proceedings of a Conference, Easton, Maryland, May 1–4, 1961. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1961. P. 111–132.
22. Ashton I. G. C., Johanning L. On errors in low frequency wave measurements from wave buoys // Ocean Engineering. 2015. Vol. 95. P. 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.033>
23. Stewart R. H. A discus-hulled wave measuring buoy // Ocean Engineering. 1977. Vol. 4, iss. 2. P. 101–107. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(77\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0029-8018(77)90013-0)

Поступила 09.12.2024 г.; одобрена после рецензирования 21.01.2025 г.; принята к публикации 24.06.2025 г.; опубликована 30.09.2025 г.

Об авторах:

Юровский Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, отдел дистанционных методов исследования, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 24377122700**, **ORCID ID: 0000-0002-9995-3965**, **SPIN-код: 8482-5777**, y.yurovsky@mhi-ras.ru

Кудинов Олег Борисович, научный сотрудник, заведующий лабораторией, отдел оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **IstinaResearcherID (IRID): 19314165**, **SPIN-код: 2248-7034**, obk91@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Юровский Юрий Юрьевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований, обработка, анализ и описание результатов исследования, подготовка текста статьи

Кудинов Олег Борисович – разработка и изготовление измерителей, проведение экспериментальных исследований

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.