



[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-9)

EDN WLUNEY

УДК 551.46

© Ю. Ю. Юровский\*, О. Б. Кудинов, 2025

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, Капитанская ул., д. 2

\*y.yurovsky@mhi-ras.ru

## Влияние алгоритмов оценки ориентации волноизмерительных буйев на восстанавливаемые параметры волн по данным сравнительного натурного эксперимента

Статья поступила в редакцию 31.03.2025, после доработки 02.09.2025, принята в печать 03.09.2025

### Аннотация

Микроэлектромеханические инерциальные датчики со встроенными алгоритмами оценки ориентации широко применяются в современных волноизмерительных буйах. Однако детали этих алгоритмов обычно скрыты от пользователя, что делает дальнейший анализ измерений характеристик волнения и их точность не совсем прозрачными. В данной работе представлены результаты натурного эксперимента с прототипом волноизмерительного буйа, в котором измерения трёхосевых акселерометра, гироскопа и магнитометра записывались в максимально «сыром» виде на карту памяти. Последующая обработка проводилась с использованием различных алгоритмов оценки ориентации, имеющих открытую и легко доступную программную реализацию. В исследовании рассматривались как прямые методы оценки по измерениям силы тяжести и магнитного поля, так и более сложные подходы, включая комплементарный фильтр и его вариации (фильтры Махони и Маджвика), а также фильтр Калмана и его расширенную версию. Полученные разными способами оценки ориентации использовались для расчёта одномерных частотных и двумерных частотно-угловых спектров, а также для определения интегральных параметров волнения, таких как высота значительных волн, период волн, соответствующих пику спектра, и средневзвешенное направление волн. Результаты, полученные разными алгоритмами, сопоставлены с референтными измерениями, выполненными струнными волнографами. На основе этого сравнения сделаны выводы о качестве работы алгоритмов в контексте задачи измерения морских волн. Представленные результаты могут быть полезны как для постобработки исходных измерений волноизмерительных буйев (как в данном исследовании), так и для разработки встроенных алгоритмов, в случаях, когда передача всего объёма исходных данных не представляется возможной.

**Ключевые слова:** волноизмерительный буй, волнограф, алгоритм оценки ориентации, ветровые волны, натурный эксперимент

© Yu. Yu. Yurovsky\*, O. B. Kudinov, 2025

Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

\*y.yurovsky@mhi-ras.ru

## Impact of Buoy Attitude Estimation Algorithms on Wave Parameter Retrieval: A Comparative Field Experiment

Received 31.03.2025, Revised 02.09.2025, Accepted 03.09.2025

### Abstract

Microelectromechanical inertial sensors with embedded attitude determination algorithms have become standard in modern wave measurement buoys, though their proprietary nature often limits transparency in evaluating wave parameter accuracy. This paper presents the results of a field experiment with a prototype wave measuring buoy, in which raw triaxial accelerometer, gyroscope, and magnetometer data were recorded onto a memory card with minimal preprocessing. Subsequent post-processing was

---

Ссылка для цитирования: Юровский Ю.Ю., Кудинов О.Б. Влияние алгоритмов оценки ориентации волноизмерительных буйев на восстанавливаемые параметры волн по данным сравнительного натурного эксперимента // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 3. С. 114–128. EDN WLUNEY. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-9)  
For citation: Yurovsky Yu.Yu., Kudinov O.B. Impact of Buoy Attitude Estimation Algorithms on Wave Parameter Retrieval: A Comparative Field Experiment. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(3):114–128.  
[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-9](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-9)

performed using various attitude estimation algorithms with open-source and easily accessible software implementations. The study examined both direct methods based on gravity and magnetic field measurements and more complex approaches, including the complementary filter and its variations (Mahony and Madgwick filters), as well as the Kalman filter and its extended version. The resulting attitude estimates enabled computation of both spectral wave characteristics and bulk parameters including significant wave height, peak period and mean direction. Comparative analysis against reference resistive wave gauge measurements revealed algorithm-dependent performance in the context of sea wave measurement. These findings offer practical insights for scenarios requiring either post-processing of raw buoy data or development of optimized embedded systems where full raw data transmission is not feasible.

**Keywords:** wave buoy, wave gauge, attitude heading reference system, wind waves, field study

## 1. Введение

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) широко применяются в буйах, предназначенных для измерения параметров поверхностного волнения (см., например, [1]). Благодаря отсутствию подвижных частей такие системы обладают значительно меньшим весом, габаритами и, соответственно, на порядки более низкой стоимостью по сравнению с механически стабилизированными аналогами. Основными компонентами БИНС являются датчики, измеряющие ускорения (акселерометры), скорости вращения (гироскопы) и магнитное поле (магнитометры). В дальнейшем эти три типа датчиков условно обозначены общим термином «инерциальные датчики».

Следует отметить, что в последнее время в составе волноизмерительных буйев все чаще используются датчики скорости, основанные на измерениях доплеровского сдвига частоты сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2]. Однако применение только инерциальных датчиков остается актуальным благодаря их преимуществам перед ГНСС-датчиками: в среднем более низкой стоимости (~10 раз для ГНСС-датчиков с доплеровским каналом), высокой помехозащищенности, меньшему энергопотреблению и отсутствию необходимости в выносной антенне. Эти особенности открывают широкие перспективы для использования инерциальных датчиков в задачах создания флотов (роев) простых, миниатюрных и недорогих измерителей, предназначенных для проведения специализированных экспериментальных исследований поверхностных волн в натуральных условиях (см., например, [3]).

Отсутствие механически стабилизированной платформы в БИНС является одновременно и их недостатком, поскольку для расчета параметров поверхностных волн возникает необходимость привязки измерений к географической (неподвижной) системе координат, то есть оценки мгновенной ориентации корпуса буйа [4]. На первый взгляд, такая оценка может быть получена путем интегрирования показаний гироскопических измерений с заданными начальными условиями. Однако на практике измерения волн без корректировки начальных условий должны продолжаться в течение нескольких суток, месяцев или даже лет, в то время как дрейф гироскопов (и его непостоянство под влиянием внешних факторов) делает такую прямую оценку ориентации невозможной. Поэтому для определения текущей ориентации приходится усваивать (комплексировать) другие измерения, такие как данные о геомагнитном поле (данные магнитометра) и векторе силы тяжести (данные акселерометра). Однако и эти измерения подвержены ошибкам. Например, магнитное поле может быть искажено присутствием магнитных материалов, а измерения вектора силы тяжести — влиянием собственных ускорений датчика. Если ошибки, связанные с первым фактором, можно минимизировать, используя немагнитные материалы, то ошибки, вызванные вторым фактором, могут быть критичными, поскольку буй непрерывно движется с ускорением, повторяя орбитальные движения волн. Тем не менее, задача оценки ориентации подвижной системы отсчета на основе ассимиляции различных измерений широко распространена в различных приложениях [5]. Поскольку решение этой задачи неоднозначно, на сегодняшний день предложено множество алгоритмов различной степени сложности, точности и скорости счета ([6–16], подробнее рассмотрены ниже).

Такие алгоритмы часто реализуются непосредственно в контроллере, управляющем датчиком (например, [17]). На выходе пользователь получает готовую оценку ориентации, например, в виде углов Эйлера (крен, тангаж, азимут) и ускорений в неподвижной системе отсчета. Такие БИНС получили широкое распространение в промышленности, беспилотных системах и робототехнике. Не стали исключением и волноизмерительные буйи. Доступность такого рода систем позволила при относительно небольших затратах создавать буйи для изучения процессов на границе океан-атмосфера [18], исследования трансформации волн в прибрежной зоне [19], взаимодействия волн со льдом [1], калибровки спутников [20].

Однако алгоритмы оценки ориентации, как правило, являются проприетарными и не раскрываются производителями. Сами датчики со встроенными алгоритмами обычно разрабатываются для широкого

круга задач, что вызывает определенные вопросы касательно их оптимальности для измерения поверхностного волнения. Например, условно «медленные» движения (с малым влиянием переносных ускорений) лучше воспроизводятся комбинацией измерений акселерометра и магнитометра, а условно «быстрые» (с сильными переносными ускорениями) более точно можно восстановить с привлечением измерений гироскопа [10]. К какому типу движений в данном контексте следует относить поверхностные волны — остаётся неясным. Следует отметить, что существуют коммерческие решения, специально разработанные для волноизмерительных буйев (например, SVS-603HR [21], MOTUS [22], DVS19-2 [23]), но даже в этих случаях алгоритмы обработки данных обычно не раскрываются. В результате исследователь, с одной стороны, избавлен от необходимости глубоко разбираться в нюансах алгоритмов инерциальной навигации, но, с другой стороны, вынужден использовать измеритель как «черный ящик», что, по нашему мнению, является скорее недостатком, чем достоинством.

Цель данной работы — продемонстрировать как выбор того или иного способа обработки инерциальных данных влияет на результаты измерения различных параметров волнения. В рамках одной статьи невозможно детально рассмотреть все тонкости численной реализации, пожалуй, даже одного алгоритма, не говоря уже о нескольких. Поэтому в представленном сравнительном анализе использованы только легкодоступные алгоритмы с открытым исходным кодом и детальным описанием. В качестве исходных данных используются результаты натурных измерений, проведенных с помощью прототипа волноизмерительного буя, в котором на минимально возможном удалении было установлено два датчика разных моделей, что также позволило оценить, насколько принципиален выбор модели датчика для получения исходных инерциальных измерений (без учета влияния алгоритма обработки).

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Натурные данные

В работе использованы данные натурного эксперимента, проведенного на Черноморском гидрофизическом подспутниковом полигоне МГИ в 2024 г. вблизи Стационарной океанографической платформы (44.393047°с.ш., 33.984596°в.д.). В ходе эксперимента осуществлялись непрерывные измерения с помощью нескольких прототипов волноизмерительных буйев. В данной статье представлены данные одного из буйев, установленного на якоре на расстоянии около 200 м от платформы на глубине приблизительно 27 м.

Буй функционирует по принципу логгера, то есть собирает данные инерциальных измерений и записывает их на карту памяти без предварительной обработки. Частота записи составляет 25 Гц, объем карты памяти — 32 ГБ, а питание обеспечивается шестью литий-ионными аккумуляторами общей емкостью 50 Вт·ч. Прототип также оснащен часами реального времени, что позволяет синхронизировать измерения с мировым временем. В рамках данного прототипа для методических целей были использованы два инерциальных датчика «потребительского» класса, но разных моделей: MPU-9250 [24] и BNO-055 [17]. Оба датчика обеспечивают измерение трех компонент собственных ускорений (вектора силы тяжести), угловых скоростей и магнитного поля. Кроме того, BNO-055 имеет встроенный алгоритм обработки данных, выходные параметры которого (углы Эйлера) также записывались на карту памяти и впоследствии сравнивались с результатами обработки другими алгоритмами на этапе анализа данных. Наличие двух датчиков разных производителей позволяет получить грубую оценку разброса их параметров, а также оценить роль собственных некоррелированных шумов.

Электронные компоненты размещены в герметичном цилиндрическом корпусе диаметром 10 см и высотой 30 см, который установлен в поплавок из вспененного полистирола, выполненный в форме диска диаметром 40 см и высотой 10 см. Инерциальные датчики расположены сонаправленно на вертикальной оси симметрии корпуса по разные стороны от материнской платы таким образом, чтобы расстояние между ними было минимальным (фактически они разнесены по горизонтали на расстояние не более 4 мм). Оба датчика находятся в одной горизонтальной плоскости, совпадающей с плоскостью ватерлинии, то есть максимально близко к точке, вокруг которой происходят собственные колебания корпуса. Для минимизации влияния резких толчков, возникающих при взаимодействии корпуса буя с крутыми и обрушивающимися волнами [25], в состав якорной линии был включен эластичный амортизатор (отрезок латексного жгута в нейлоновой оплетке длиной 7 м и диаметром 6 мм).

В качестве эталонных измерений использовались данные, полученные с помощью решетки струнных резистивных волнографов, которые позволяют измерять двумерные частотно-угловые спектры [26]. Комплекс метеорологических наблюдений проводился на базе метеостанции Davis Vantage Pro, включающей

чашечный анемометр, флюгерный датчик направления ветра, а также датчики температуры и влажности воздуха, установленные на мачте платформы на высоте 21 м над уровнем моря. Полученные данные впоследствии использовались для пересчета скорости ветра на стандартную высоту 10 м с использованием алгоритма COARE3.0 [27].

Всего было собрано около одной недели (165 ч) непрерывных измерений (рис. 1). В течение этого периода скорость ветра варьировалась от 0 до 15 м/с при переменном направлении, преимущественно восточном или западном, в течение 1–3 сут. В результате волны в районе наблюдений имели различное направление, высоту и степень развития. Максимальная высота значительных волн достигала ~1 м, а частота спектрального пика в период максимального развития составляла ~0,2 Гц, что характерно для данной акватории. Практически на протяжении всего периода наблюдений присутствовала зыбь, приходящая с юго-востока, с периодом ~10 с и разной степенью интенсивности. Таким образом, волнение на анализируемом временном интервале можно охарактеризовать как достаточно разнообразное, что, на наш взгляд, положительно сказывается на репрезентативности представленного анализа.

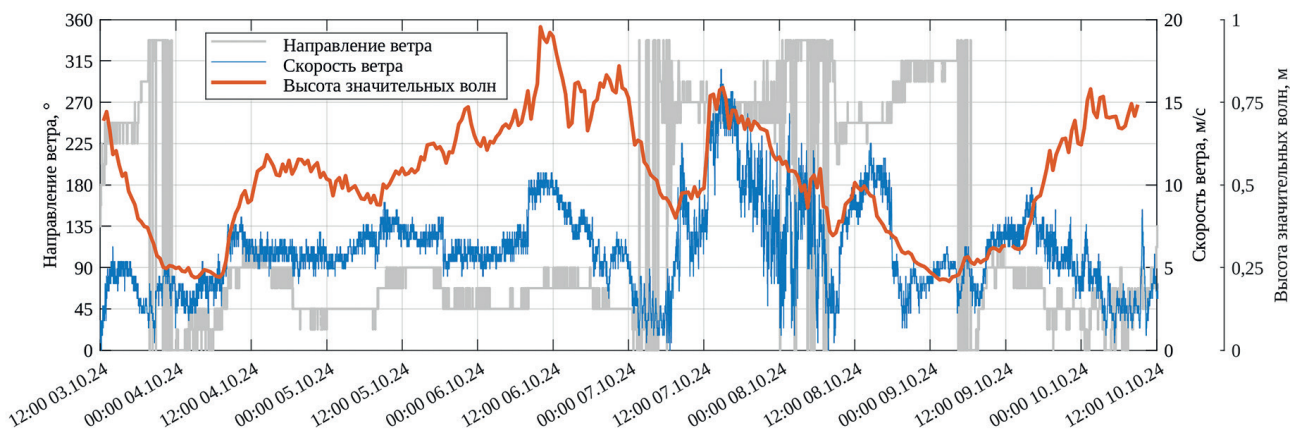


Рис. 1. Направление ветра, скорость ветра и высота значительных волн во время эксперимента

Fig. 1. Wind direction, wind speed, and significant wave height during the experiment

## 2.2. Алгоритмы оценки ориентации

Оценка ориентации корпуса буйа заключается в поиске преобразования поворота от подвижной системы координат (связанной с корпусом) к неподвижной (географической). Используемые в работе алгоритмы условно можно разделить на две группы.

К первой группе относятся алгоритмы, использующие в качестве входных данных только измерения опорных векторов — векторов силы тяжести (измерения акселерометра) и магнитного поля (измерения магнитометра):

- TRIG/TRIM, TRI-axial Attitude Determination — метод ТРИАД. Один из самых ранних и простых методов оценки ориентации по наблюдениям двух неколлинеарных опорных векторов [6]. В случае постоянства векторов в подвижной и неподвижной системах отсчёта метод даёт точное решение в виде матрицы поворота, составленной из комбинации векторных триад. Поскольку реальные измерения всегда подвержены ошибкам, найденное преобразование поворота совмещает только один (приоритетный) вектор в зависимости от порядка опорных векторов, в котором составлены триады. В наших обозначениях TRIG и TRIM указывают на приоритет вектора силы тяжести и магнитного поля, соответственно.

- DAVQ, Davenport's Q-method — метод Давенпорта. Метод состоит в поиске собственных значений и собственных векторов специально построенной матрицы (матрицы Давенпорта) [7]. Оптимальный кватернион ориентации соответствует собственному вектору, связанному с максимальным собственным значением этой матрицы.

- FLAE, Fast Linear Attitude Estimator — быстрая линейная оценка ориентации. Метод сводит задачу оценки ориентации к линейным уравнениям на основе кватернионов и использования псевдообратных матриц [8], что позволяет оценить ориентацию с помощью решения на основе собственных значений, обеспечивая более высокую скорость вычислений по сравнению с DAVQ.



Ко второй группе относятся алгоритмы, использующие помимо измерений силы тяжести и магнитного поля также измерения скорости вращения подвижной системы отсчёта (показания гироскопа):

- ROLQ, Recursive Optimal Linear estimator of Quaternion — рекурсивный оптимальный метод оценки кватерниона. Метод использует оптимальную оценку кватерниона методом наименьших квадратов с рекурсивным учётом измерений скорости вращения для подавления помех, связанных с возможным искажением магнитного поля и вектора силы тяжести за счёт инерциальных сил [9].

- COMF, Complementary Filter — комплементарный фильтр. Данный фильтр оценивает ориентацию по измерениям гироскопа и корректирует ее с учетом измерений силы тяжести и магнитного поля с заданным весом [10].

- МАНО, Mahony Filter — фильтр Махони. Является разновидностью комплементарного фильтра, разработанной специально для применения с инерциальными датчиками потребительского класса и, соответственно, с улучшенной устойчивостью к помехам в измерительных каналах [11]. Оценка ориентации корректируется на каждом шаге путём введения управляющей (поправочной) угловой скорости.

- MADG, Madgwick Filter — фильтр Маджвика. Подобно фильтру Махони, предназначен для работы с датчиками, измерения которых подвержены искажениям [12]. Вместо поправки к скорости вращения используется оптимальная поправка к кватерниону ориентации, полученная методом градиентного спуска.

- KALM, Kalman Filter — фильтр Калмана. Один из наиболее распространённых фильтров, использующийся в самых разных отраслях науки и техники для предсказания состояния динамических систем с учётом статистики ошибок зашумленных и/или неполных измерений [13].

- EKAFF, Extended Kalman Filter — расширенный фильтр Калмана. В отличие от обычного линейного фильтра Калмана в данном методе учитывается нелинейность модели, описывающей предсказание состояния динамической системы и, соответственно, отличие законов распределения предсказываемых величин от нормального [14].

В работе использованы численные реализации данных алгоритмов, имеющие открытый исходный код и реализованные в виде готовых модулей в среде MATLAB [15] (для COMF и KALM) и Python [16] (для всех остальных). Фильтры, перечисленные во второй группе, за исключением метода ROLQ, имеют настроечные параметры. Для комплементарных фильтров это вес показаний поправочных оценок, сделанных по показаниям магнитометра и гироскопа. Для фильтра Калмана это дисперсии шумов каналов измерений (их значения близки к значениям для используемых датчиков). В данной работе использованы значения «по умолчанию», установленные в исходных кодах. Во избежание возможной путаницы в определениях направляющих осей работоспособность алгоритмов была предварительно проверена на простых модельных данных и лабораторных опытах (повороты вокруг осей датчика в привязке к географическим осям и ускоренные движения вдоль них).

Помимо этого, использованы результаты работы встроенного алгоритма датчика BNO-055 (обозначен как BSCH). Кроме того, рассмотрены данные без вертикальной коррекции (обозначены как NONE) в предположении, что вертикальные ускорения в подвижной и неподвижной системах координат совпадают (применимо только для высот и периодов волн, поскольку оценка направления волн в этом случае не определяется).

### 2.3. Оценка параметров волн

Направленный спектр волн оценивался по измерениям вертикальных ускорений и углов наклона корпуса с использованием классического метода Лонге-Хиггинса [28], в рамках которого спектр возвышений волн представлялся виде усечённого ряда Фурье:

$$S(f, \theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^2 (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) = S_z(f) D(f, \theta), \quad (1)$$

где  $f$  — частота,  $S_z(f)$  — одномерный частотный спектр возвышений,  $D(f, \theta)$  — функция углового распределения спектральной энергии по азимутальному углу  $\theta$  (в наших обозначениях  $\theta = 0$  соответствует волнам, распространявшимся с севера на юг), индекс  $n$  указывает на порядок коэффициентов в разложении Фурье.

Как показано в [28], измерения ускорений и наклонов содержатся только в членах порядка  $n \leq 2$ . Соответствующие коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$ , являющиеся функциями частоты  $f$ , вычислялись по ко- и кросс-спектрам вертикальных ускорений и углов наклона корпуса (см. детальное описание данного метода в разделе 3.2 в [29]).

Аналогичный метод применялся для обработки данных струнного волнографа, с тем отличием, что наклоны поверхности определялись по нормали к плоскости, аппроксимирующей мгновенные показания возвышений.

Высота значительных волн определялась через нулевой момент спектра возвышений:

$$H_s = 4 \cdot \left[ \int_{f_1} S_z(f) df \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где спектр возвышений  $S_z$  восстанавливался из спектра вертикальных ускорений  $S_a$  как  $S_z = \omega^{-4} S_a$ , где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота. Из-за особенности при  $\omega \rightarrow 0$  интегрирование в (2) начиналось не с нуля, а с частоты  $f_1$ , соответствующей первому локальному минимуму спектра возвышений [3].

Период волн, соответствующий спектральному пику, оценивался через первый момент спектра возвышений с использованием метода [30], делающего обычную оценку по частоте пика менее зависимой от спектрального разрешения,

$$T_p = \left[ \frac{\int_{f_1} f S_z(f)^4 df}{\int_{f_1} S_z(f)^4 df} \right]^{-1}. \quad (3)$$

Направление волн рассчитывалось как средне-взвешенное по спектру значение [31]:

$$\Theta = \frac{\int_{f_1} \theta_1 S_z(f) df}{\int_{f_1} S_z(f) df}, \quad (4)$$

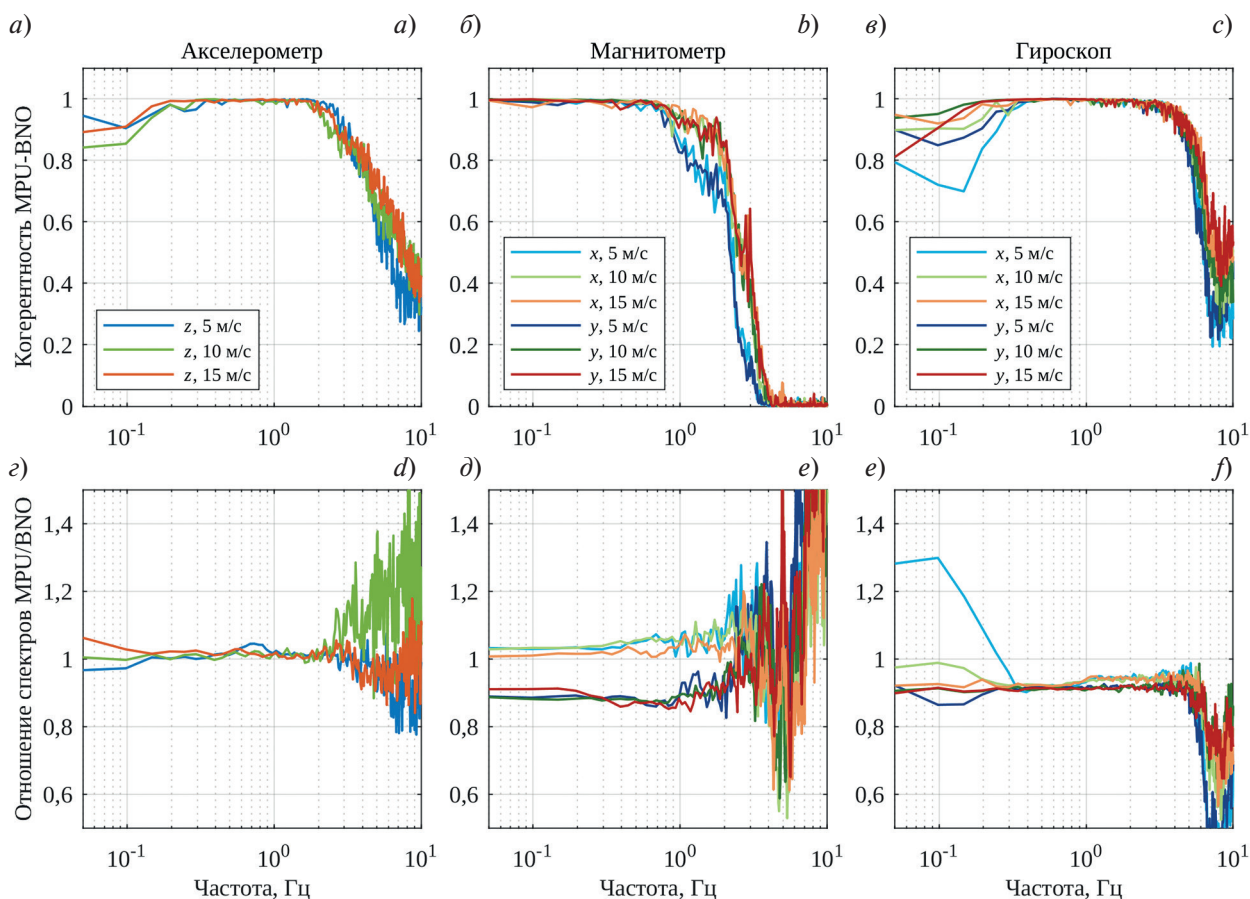
где  $\theta_1 = \arctan(b_1/a_1)$  — распределение среднего направления волн по частоте [29].

### 3. Результаты

Наличие двух близко расположенных датчиков в одном буйе позволяет наглядно продемонстрировать порядок ошибок, связанных со случайным разбросом заводских калибровочных коэффициентов или, как в нашем случае, с различиями между моделями датчиков разных производителей. Для этого на рис. 2 показаны когерентность и отношения спектров между наиболее важными измерениями, используемыми для оценки параметров волн, а именно: вертикальные ускорения, по которым оценивается одномерный спектр и, соответственно, высота и период волн (слева); горизонтальные компоненты вектора магнитного поля (посередине) и скорости вращения вокруг горизонтальных осей (справа), которые, в свою очередь, играют ключевую роль в восстановлении уклонов волн, спектральной функции углового распределения и в оценке направлений волн. Показаны три наиболее типичные ситуации при скорости ветра  $\sim 5$  м/с, 10 м/с и 15 м/с (обозначены разными цветами).

Во всех случаях наблюдается предельно высокая степень когерентности ( $\sim 0,99$ ) сигналов в диапазоне частот от спектрального пика (условно 0,15...0,2 Гц) до частоты пропускания (для используемого корпуса она составляет порядка 1 Гц). Это указывает на то, что измерения обоих датчиков содержат преимущественно сигнал, обусловленный движением волн, а собственный шум вносит незначительный вклад. Примечательно, что и на частотах ниже частоты пика когерентность остается достаточно высокой (0,8...0,9), что также свидетельствует о том, что сигнал на этих частотах — артефакт, известный как низкочастотный шум, — обусловлен в основном движением буйа, а не инструментальным шумом датчиков. Несколько более низкая когерентность на частотах ниже частоты пика наблюдается при слабом ветре для скорости вращения вокруг оси  $x$  (преобладающие волны для показанного случая вызывали вращение вокруг оси  $y$ ). Однако даже в этом случае её значение составляет не менее 0,7.

Отношение мощности спектральных компонент вертикальных ускорений для двух датчиков (рис. 2, *а*) близко к единице и находится в диапазоне 0,95...1,05. Измерения магнитного поля и скоростей вращения (рис. 2, *б*, *в*) отличаются несколько сильнее: для них это отношение составляет 0,90...1,05 (за исключением случая слабого ветра, описанного выше). Отношения амплитуд, соответствующие таким разбросам, составляют  $\sim 2,5\%$  и  $\sim 5\%$ , соответственно, что вполне укладывается в рамки погрешностей, заявленных для масштабных коэффициентов представленных датчиков (единицы процентов). Отметим также, что в случае магнитного поля, для которого наблюдаются наибольшие разбросы, абсолютное значение не играет существенной роли для оценки уклонов, а важно лишь направление вектора. Ниже, если не идет речь о сравнении двух датчиков, будут использованы измерения датчика MPU-9250.



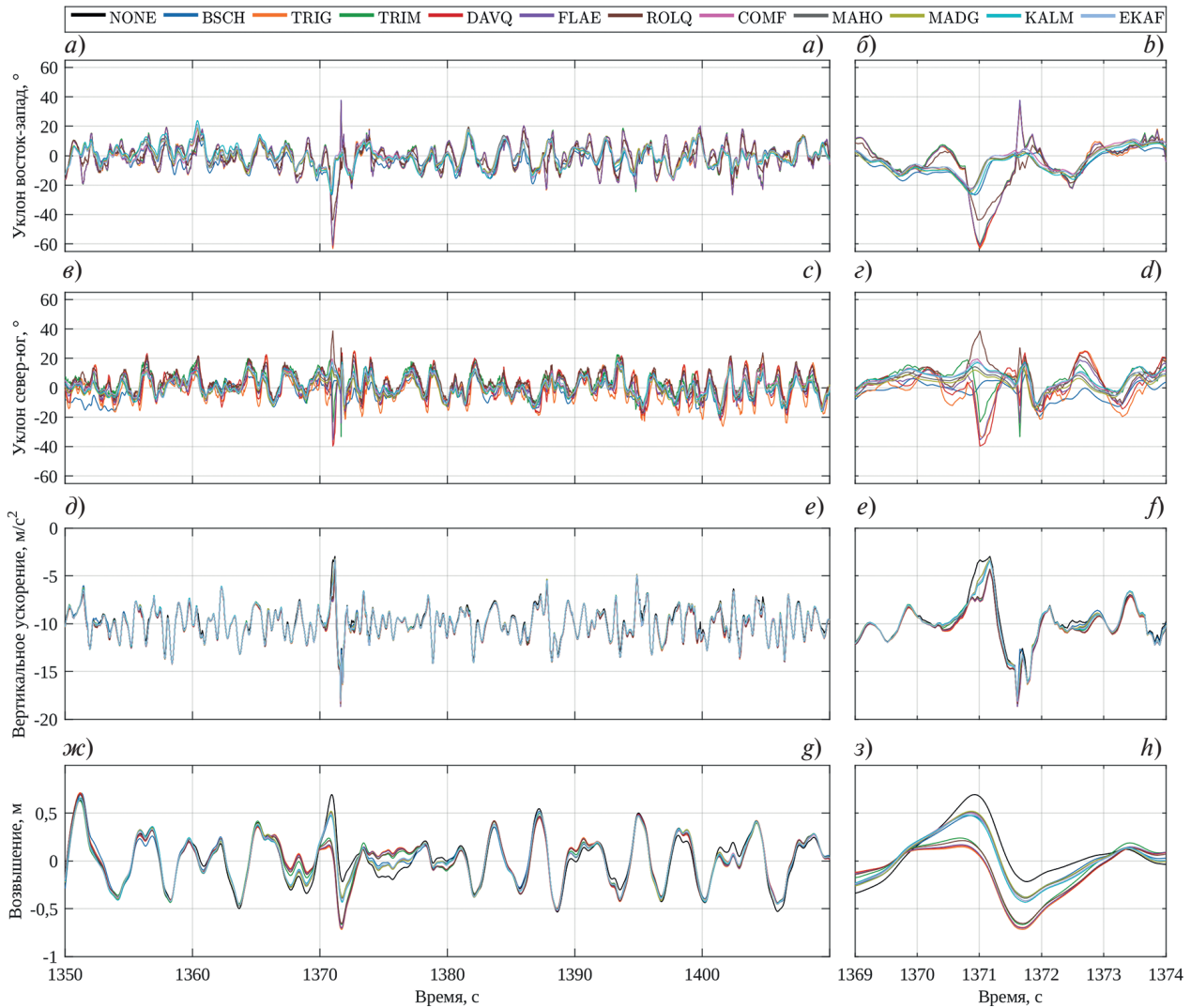
**Рис. 2.** Когерентность (сверху) и отношение спектров (снизу) между исходными измерениями вертикальной компоненты акселерометра (слева) и горизонтальных компонент магнитометра (посередине) и гироскопа (справа) по датчикам MPU-9250 и BNO-055. Цветом показана скорость ветра: оттенки синего — 5 м/с (данные за 07:00–08:00 04.10.2024), оттенки зелёного — 10 м/с (10:00–11:00 06.10.2024), оттенки красного — 15 м/с (15:00–16:00 07.10.2024)

**Fig. 2.** Coherence (top) and spectral ratio (bottom) between raw measurements of the vertical accelerometer component (left), horizontal magnetometer components (middle), and gyroscope components (right) for MPU-9250 and BNO-055 sensors. Wind speed is color-coded: blue shades — 5 m/s (data from 07:00–08:00 on 04.10.2024), green shades — 10 m/s (10:00–11:00 on 06.10.2024), red shades — 15 m/s (15:00–16:00 on 07.10.2024)

На рис. 3 показан пример обработки исходных данных различными алгоритмами оценки ориентации, включая углы наклона корпуса, восстановленные вертикальные ускорения и возвышения морской поверхности при ветре 10 м/с. Возвышения получены интегрированием ускорений с предварительной фильтрацией низкочастотных составляющих фильтром с постоянной времени, соответствующей частоте  $f_1$ .

Наибольшие различия между алгоритмами наблюдаются для оценок углов наклона корпуса. Хотя в целом оценки схожи, средний разброс составляет 5...10°. Исключение составляют редкие события (предположительно, моменты обрушения волн, поскольку им соответствуют выбросы во всех сигналах), где различия достигают 20...40°, а оценки могут становиться противофазными. Соответствующие расхождения в возвышениях достигают 0,5 м, что составляет около половины значимой высоты волн. Таким образом, выбор алгоритма критически важен при анализе индивидуальных волн, например аномально больших волн и так называемых волн-убийц.

Для регулярного (не обрушивающегося) волнения различия между алгоритмами менее существенны, поскольку углы наклона вносят лишь поправку к ускорениям и возвышениям. Однако принципиальные различия наблюдаются в низкочастотной области, что важно для корректного выбора нижнего предела интегрирования  $f_1$  в (2). На рис. 3 показан пример спектров возвышений (в логарифмическом и линейном масштабе), который демонстрирует, что в рабочей области выше частоты пика различия минимальны, тогда как на низких частотах разница в уровнях спектра достигает порядка величины.



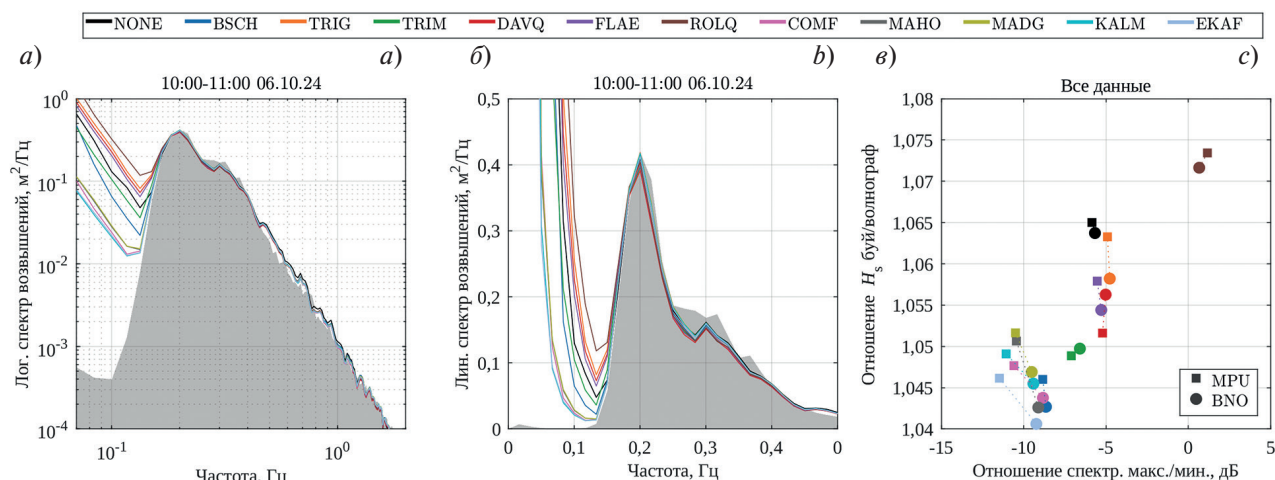
**Рис. 3.** Пример восстановления параметров движения буя при ветре 10 м/с по датчику MPU-9250: (а, б) — уклон корпуса в направлении запад-восток; (в, д) — уклон в направлении север-юг; (е, е) — вертикальные ускорения; (ж, з) — возвышения морской поверхности. Левые панели показывают одноминутный фрагмент записи, правые — детализированный участок с выбросом, зарегистрированным на 1370 с

**Fig. 3.** Example of buoy motion reconstruction at 10 m/s wind speed from MPU-9250 sensor data: (a, b) hull tilt in west-east direction; (c, d) tilt in north-south direction; (e, f) vertical accelerations; (g, h) sea surface elevations. Left panels display a one-minute recording segment, right panels show a detailed section with a spike recorded at 1370 s

Более общая оценка качества алгоритмов дана на диаграмме (рис. 4, в), показывающей отношение оцененных и референтных значительных высот волн в зависимости от уровня низкочастотных помех. Наилучшие результаты демонстрируют алгоритмы KALM, EKAF, COMF, MAHO, MADG и BSCH (группа в левом нижнем углу). Алгоритмы прямой оценки (TRIG, TRIM, DAVQ, FLAE) имеют в ~3 раза более высокий уровень шума, при этом TRIM показывает точность, сопоставимую с KALM, MAHO, MADG. Рекурсивный фильтр ROLQ не улучшает оценки и имеет среднее отношение сигнал шум близкое к 1 за счет сильных выбросов.

Несмотря на выявленные различия, следует отметить, что оценка значительной высоты волн всеми алгоритмами демонстрирует хорошее соответствие с референтными данными (отклонения не превышают 4...7,5 % для всех алгоритмов). Выделение оптимального алгоритма по данному критерию едва ли возможно, поскольку погрешность эталонных измерений струнного волнографа имеет схожую величину (точность калибровочных коэффициентов струнного волнографа). Сравнение результатов, полученных от разных датчиков (визуализированное расстоянием между точками на диаграмме), показывает, что влияние выбора датчика на точность оценок существенно меньше, чем влияние выбора алгоритма обработки.





**Рис. 4.** Типичный спектр возвышений морской поверхности при скорости ветра 10 м/с: *a* — спектральная плотность в логарифмическом масштабе; *b* — то же в линейном масштабе. Цветные кривые соответствуют оценкам по измерениям датчика MPU-9250 с помощью различных алгоритмов, серая заливка — референтные измерения волнографа. На панели *в* представлена зависимость средней относительной ошибки оценки высоты значительных волн от уровня низкочастотного шума, нормированного на максимальное значение спектра для датчика MPU-9250 и BNO-055

**Fig. 4.** Typical sea surface elevation spectrum at 10 m/s wind speed: *a* — spectral density in logarithmic scale; *b* — the same in linear scale. Colored curves represent estimates from MPU-9250 sensor measurements using different algorithms, while gray shading indicates reference wave gauge measurements. Panel *c* shows the dependence of the mean relative error in significant wave height estimation on the level of low-frequency noise (normalized to the spectrum's maximum value) for both MPU-9250 and BNO-055 sensors

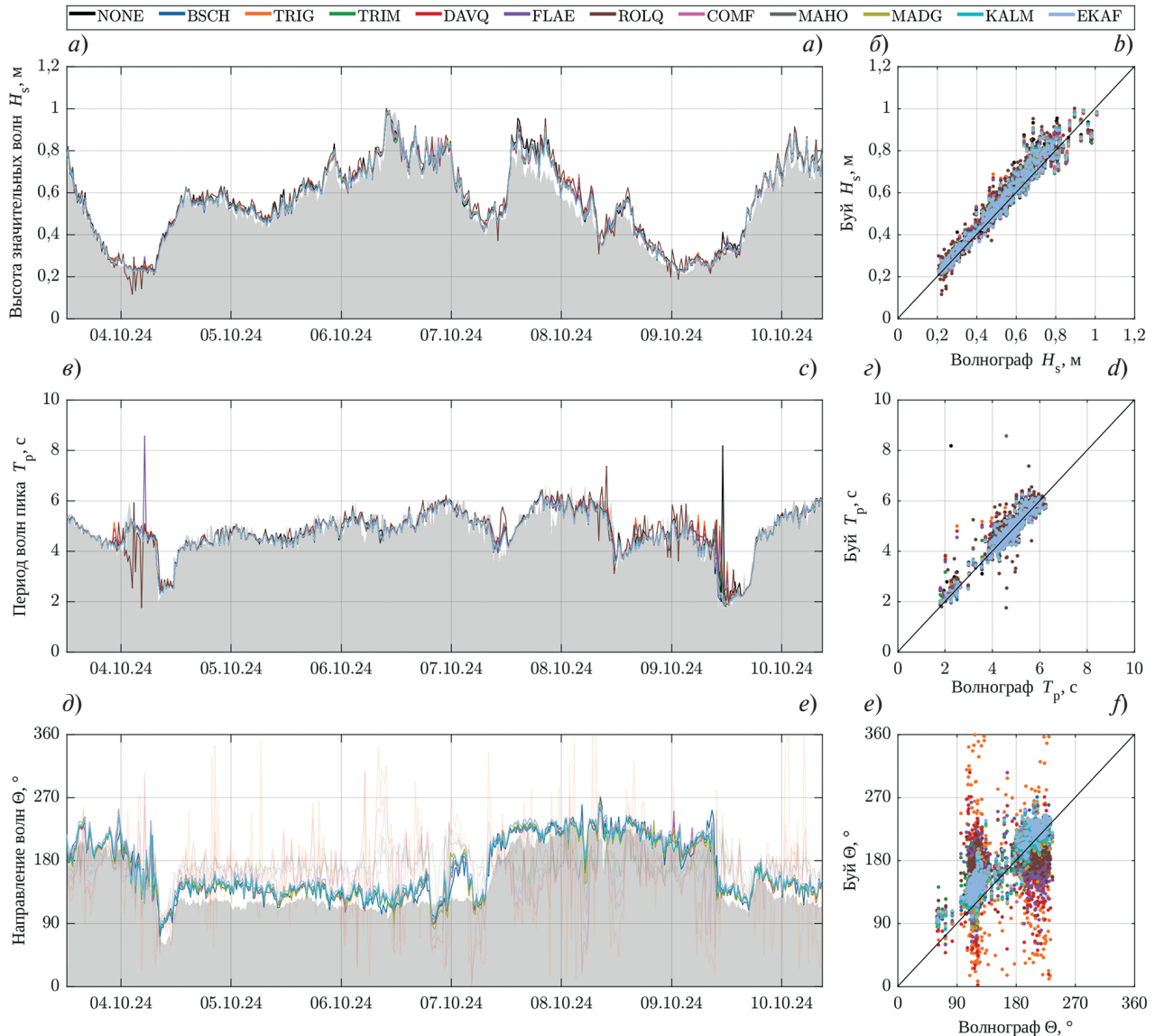
Более наглядно результаты оценки интегральных параметров волнения представлены на рис. 5. На графиках показаны временные ряды значительной высоты волн  $H_s$ , периода волн, соответствующих спектральному пику,  $T_p$  и средневзвешенного направления волн  $\Theta$  в сравнении с референтными волнографическими измерениями (слева), а также соответствующие диаграммы рассеяния (справа).

Наилучшее соответствие наблюдается для параметра  $H_s$ , причем результаты практически не зависят от выбранного алгоритма обработки (рис. 5, *a*, *б*). Небольшая систематическая переоценка отмечается лишь для временного интервала 7–9 октября, когда на акватории наблюдалось сильное течение. Однако детальный анализ этого эффекта выходит за рамки данного исследования.

Существенно большие различия между алгоритмами наблюдаются для оценок периода волн  $T_p$  (рис. 5, *в*, *г*). Временные ряды демонстрируют выраженные выбросы, наиболее заметные около полуночи 4 октября и полудня 9 октября. Источником этих артефактов являются ошибки в оценке частоты  $f_1$  и влияние низкочастотного шума. В случае завышенных оценок истинный спектральный пик маскируется низкочастотными помехами, тогда как при заниженных оценках вместо основного пика определяется максимум зыби, неправдоподобно усиленный низкочастотными помехами. Наибольшее количество таких ошибок характерно для алгоритма ROLQ, который демонстрирует максимальный уровень низкочастотных помех.

Наиболее сложная ситуация наблюдается при оценке средневзвешенного направления волнения  $\Theta$  (рис. 5, *д*, *е*). Фильтры Калмана (KALM, EKAF), комплементарные фильтры (COMF, MAHO, MADG), а также встроенный алгоритм BSCH дают устойчивые оценки, близкие к референтным значениям. В то же время алгоритмы прямой оценки (TRIG, TRIM, DAVQ, FLAE, ROLQ) демонстрируют чрезмерно зашумленные результаты, что говорит об их малой эффективности при определении характеристик направленности волнения.

Более детальные количественные метрики для данного сравнительного анализа представлены на рис. 6 в виде диаграмм, одновременно отображающих коэффициент корреляции (КК) и среднеквадратичную ошибку (СКО) между рядами  $H_s$ ,  $T_p$  и  $\Theta$ , полученными по измерениям обоих датчиков и по референтным измерениям волнографа.



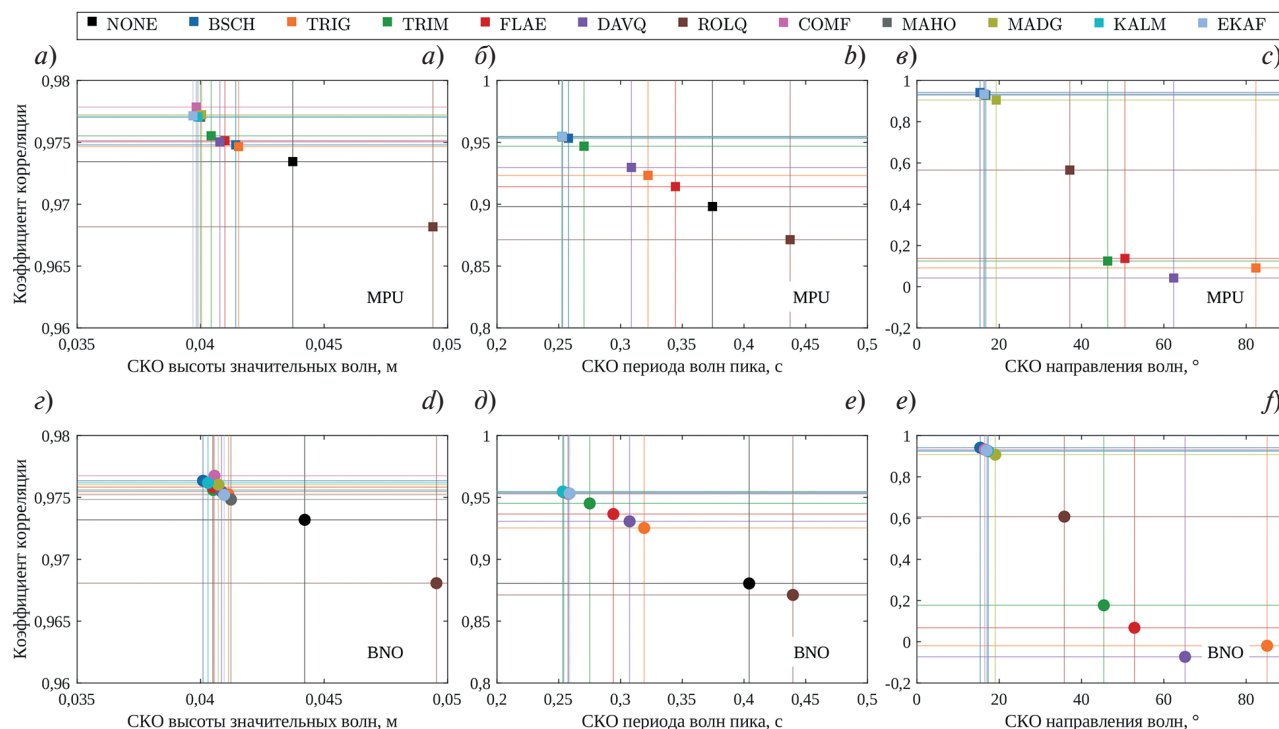
**Рис. 5.** Временные ряды высоты значительных волн (а), периода (в), соответствующих спектральному пику, и средне-взвешенного направления волн (д) по измерениям датчика MPU-9250 с использованием различных алгоритмов оценки (показаны цветами) в сравнении с референтными волнографическими измерениями (серая заливка). Панели б, г, е справа показывают соответствующие диаграммы рассеяния оценок относительно референтных данных

**Fig. 5.** Time series of significant wave height (a), peak wave period (c), and mean-weighted wave direction (e) from MPU-9250 sensor measurements using different color-coded estimation algorithms compared with reference wave gauge measurements (gray shading). The right panels (b, d, f) show corresponding scatter plots of estimates versus reference data

При анализе высот значительных волн (рис. 6, а, г) все алгоритмы, кроме ROLQ, демонстрируют незначительное, но устойчивое улучшение оценок по сравнению с некорректированным вариантом. КК независимо от выбора алгоритма или датчика составляет не менее 0,97, а СКО обычно находится в диапазоне 4,5...5,5 см.

Для периодов (рис. 6, б, д) наблюдается схожая картина. Алгоритмы KALM, EKAF, COMF, MAHO, MADG и BSCH дают практически идентичные оценки, сливающиеся на диаграммах в единую точку с коэффициентом корреляции ~0,95 и СКО ~0,25...0,35 с. Несколько менее точные результаты показывают алгоритмы TRIG, TRIM, DAVQ и FLAE, однако они также обеспечивают улучшение по сравнению с отсутствием вертикальной коррекции.

В случае направлений волн (рис. 6, в, е) алгоритмы KALM, EKAF, COMF, MAHO, MADG и BSCH демонстрируют хорошую точность (КК~0,90...0,94, СКО~20°). Алгоритм ROLQ показывает более низкие результаты (КК~0,6, СКО~40°), а прямые методы оценки TRIG, TRIM, DAVQ и FLAE не обеспечивают статистически значимых результатов (КК~0)



**Рис. 6.** Статистические показатели точности оценок параметров волнения: высоты значительных волн (а, д), периода волн, соответствующих спектральному пику (б, е), и средневзвешенного направления (в, з), представленные в координатах «коэффициент корреляции — среднеквадратичная ошибка». Верхний ряд соответствует измерениям датчика MPU-9250, нижний — датчика BNO-055

**Fig. 6.** Statistical indicators of wave parameter estimation accuracy: significant wave height (а, d), spectral peak wave period (б, е), and mean-weighted direction (в, з), presented in “correlation coefficient — root mean square error”. The top row corresponds to measurements from the MPU-9250 sensor, while the bottom row shows results from the BNO-055 sensor

#### 4. Обсуждение

Отдельно стоит отметить, что выявленные закономерности не в полной мере могут быть справедливы для других буев. В частности, для миниатюрных буев, предназначенных для изучения коротковолновой части спектра, применение фильтра Калмана (KALM) может давать более зашумленные низкочастотные спектры по сравнению с ТРИАД-методом с приоритетом магнитного поля (TRIM) [32]. Как показано в работе [3], низкочастотные помехи в выходном сигнале фильтра Калмана могут быть вызваны импульсными помехами на его входе, возникающими в результате обрушения волн. Малые и легкие буи значительно более чувствительны к таким событиям, чем крупные и тяжелые. Кроме того, мелкомасштабные обрушения всегда более вероятны, чем крупномасштабные [33], что может снижать эффективность алгоритмов на основе фильтра Калмана в условиях сильных помех от обрушений. Тем не менее, фильтры, показавшие наилучшие результаты в нашем исследовании (KALM, EKAF, COMF, MAHO, MADG), обладают возможностями настройки. В данной работе использовались параметры алгоритмов «по умолчанию», но их дальнейшая оптимизация и адаптация к особенностям малых буев требует дальнейшего исследования, которое выходит за рамки настоящей работы.

В свете неопределенности, которая может быть вызвана выбором метода оценки ориентации, перспективным представляется перенос «на берег» этого этапа обработки данных подобно тому, как было реализовано в нашем эксперименте. Такой подход обеспечивает сохранение максимального объема информации и повышает прозрачность последующей обработки данных. Развитие каналов связи, увеличение вычислительных мощностей и объемов хранилищ данных только способствует реализации этой концепции. Например, для датчика с частотой опроса 5 Гц (9 каналов по 2 байта на отсчет) требуется ~3 Гб памяти для хранения данных одного года наблюдений. Суточный объем передачи данных при этом не превышает 8 Мб, что вполне реализуемо с использованием современных мобильных сетей связи, как продемонстрировано в [3]. Дополнительные энергозатраты на передачу данных в определенной степени могут быть компенсированы

отказом от довольно затратных в вычислительном плане алгоритмов оценки ориентации и, как следствие, от любой другой предобработки. Такая схема работы представляется оправданной для прибрежных исследований, где доступны сети мобильной связи. Для спутниковых каналов связи в открытом океане данный подход пока не столь эффективен из-за высокой стоимости передачи данных, но может стать перспективным в будущем.

## 5. Заключение

В данной работе продемонстрировано, как выбор алгоритма оценки ориентации волноизмерительного буя влияет на восстанавливаемые параметры поверхностных волн: одномерные частотные спектры и идентификацию в них спектрального максимума, а также интегральные параметры волнения — высоту значительных волн, период волн, соответствующих спектральному пику, и средневзвешенное направление волн.

Для анализа использованы готовые, легкодоступные программные реализации алгоритмов оценки ориентации, в частности методы, основанные на прямой оценке по векторам силы тяжести и магнитного поля (ТРИАД-метод, метод Давенпорта, быстрая линейная оценка ориентации), комплементарный фильтр и его разновидности (рекурсивная оптимальная оценка кватерниона, фильтр Махони, фильтр Маджвика), фильтр Калмана и его так называемая расширенная версия. Перечисленные алгоритмы тестировались на данных натурного эксперимента с использованием прототипа буя, в котором измерения акселерометра, гироскопа и магнитометра регистрировались в исходном виде для дальнейшей обработки «на берегу». В качестве референтных использовались измерения резистивных волнографов со стационарной океанографической платформы.

Буй был специально оборудован двумя близкорасположенными инерциальными датчиками одного ценового диапазона, работающими на схожих физических принципах, но выпускаемых разными производителями (комбинированный акселерометр/гироскоп/магнитометр MPU-9250 [24] и BNO-055 [17]). Сигналы этих датчиков оказались высоко когерентными и близкими по спектральному составу, что свидетельствует о слабом влиянии их внутренних характеристик (шумов и разброса калибровочных коэффициентов) на конечные восстанавливаемые параметры волн.

Показано, что выбор алгоритма обработки инерциальных данных не оказывает существенного влияния на относительную ошибку измерения спектра возвышений в области пика (и, следовательно, высоты значительных волн), но становится важным фактором при идентификации спектрального максимума и подавлении низкочастотных помех. Наибольшие ошибки наблюдаются в условиях слабого и смешанного волнения. Для определения направлений волн наиболее эффективны алгоритмы, учитывающие все данные датчика (разновидности комплементарных фильтров и фильтры Калмана), в то время как прямые оценки, основанные только на измерениях векторов силы тяжести и магнитного поля, не обеспечивают сколько-нибудь надёжных оценок направленности волн при использовании традиционного метода определения двумерного спектра.

Представленные результаты могут быть полезны как для постобработки исходных измерений волноизмерительных буйев («на берегу», как в данном исследовании), так и для разработки алгоритмов, выполняющих обработку данных непосредственно «на борту» волноизмерительного буя, когда передача всего объёма исходных данных невозможна или нецелесообразна.

## Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-27-00153.

## Funding

The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-27-00153.

## Литература

1. Rabault J., Nose T., Hope G. et al. 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 // *Geosciences*. 2022. Vol. 12, N 3. P. 110. EDN MCLHXX. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030110>
2. Collins C.O., Dickhudt P., Thomson J. et al. Performance of moored GPS wave buoys // *Coastal Engineering Journal*. 2024. P. 1–27. EDN FOVQMW. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2295105>



3. Hope G., Seldal T.I., Rabault J. et al. SFY-A Lightweight, High-Frequency, and Phase-Resolving Wave Buoy for Coastal Waters // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2025. Vol. 42, N 2. P. 133–154. EDN YFPIDV. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-23-0170.1>
4. Грязин Д.Г. Расчет и проектирование буюв для измерения морского волнения. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 134 с.
5. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2009. 278 с.
6. Black H.D. A passive system for determining the attitude of a satellite // AIAA Journal. 1964. Vol. 2, N 7. P. 1350–1351. <https://doi.org/10.2514/3.2555>
7. Davenport P.B. A vector approach to the algebra of rotations with applications. National Aeronautics and Space Administration, 1968. 25 p.
8. Wu J., Zhou Z., Fourati H., Cheng Y. A Super Fast Attitude Determination Algorithm for Consumer-Level Accelerometer and Magnetometer // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2018. Vol. 64, N 3. P. 375–381. <https://doi.org/10.1109/TCE.2018.2859625>
9. Zhou Z., Wu J., Wang J., Fourati H. Optimal, Recursive and Sub-Optimal Linear Solutions to Attitude Determination from Vector Observations for GNSS/Accelerometer/Magnetometer Orientation Measurement // Remote Sensing. 2018. Vol. 10, N 3. P. 377. EDN YGBQWL. <https://doi.org/10.3390/rs10030377>
10. Valenti R., Dryanovski I., Xiao J. Keeping a Good Attitude: A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs // Sensors. 2015. Vol. 15, N 8. P. 19302–19330. <https://doi.org/10.3390/s150819302>
11. Mahony R., Hamel T., Pflimlin J.-M. Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group // IEEE Transactions on Automatic Control. 2008. Vol. 53, N 5. P. 1203–1218. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>
12. Madgwick S.O.H., Harrison A.J.L., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm // 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2011. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975346>
13. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, N 1. P. 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
14. Hartikainen J., Solin A., Särkkä S. Optimal filtering with Kalman filters and smoothers. Department of biomedical engineering and computational sciences, Aalto University School of Science, 2011. 150 p.
15. Open Source Sensor Fusion. An open source repository of algorithms and datasets for sensor fusion and analytics (Version 4.22 of Freescale Semiconductor's sensor fusion library). URL: <https://github.com/memsindustrygroup/Open-Source-Sensor-Fusion/tree/master> (дата обращения: 28.03.2025).
16. AHRS: Attitude and Heading Reference Systems. AHRS0.4.0 documentation. URL: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 28.03.2025).
17. Bosch Sensortec. BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor. 2014. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf> (дата обращения: 28.03.2025).
18. Rainville E., Thomson J., Moulton M., Derakhti M. Measurements of nearshore ocean-surface kinematics through coherent arrays of free-drifting buoys // Earth System Science Data. 2023. Vol. 15, N 11. P. 5135–5151. EDN HBBMLX. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5135-2023>
19. Feddersen F., Amador A., Pick K. et al. The wavedrifter: a low-cost IMU-based Lagrangian drifter to observe steepening and overturning of surface gravity waves and the transition to turbulence // Coastal Engineering Journal. 2024. Vol. 66, No. 1. P. 44–57. EDN ZSVNKT. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2238949>
20. Veras Guimarães P., Arduin F., Sutherland P. et al. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave-current interaction studies // Ocean Science. 2018. Vol. 14, No. 6. P. 1449–1460. EDN GBSLNE. <https://doi.org/10.5194/os-14-1449-2018>
21. Crandle T., Cook M., Cook G., Celkis E. Advances in wave sensing using MEMS // Proceedings of OCEANS2016 MTS/IEEE, Monterey. 2016. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761148>
22. Tengberg A., Weiss G., Roach D. Directional wave, currents and environmental monitoring from navigation and hydrography buoys: An introduction to MOTUS // Proceedings of 2018 OCEANS — MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). 2018. P. 1–10. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2018.8559239>
23. Zhou F., Zhang R., Zhang S. Measurement principle and technology of miniaturized strapdown inertial wave sensor // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. 991996. EDN OIQFGM. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.991996>
24. InvenSense™, Inc. MPU-9250 product specification. Revision 1.1. 2016. URL: [www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf](http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf) (дата обращения: 28.03.2025).
25. Joosten H. Directional wave buoys and their elastic mooring // International Ocean Systems. 2006. Vol. 10, N 4. P. 18–21.
26. Bondur V.G., Dulov V.A., Murynin A.B., Yurovsky Yu. Yu. A study of sea-wave spectra in a wide wavelength range from satellite and in-situ data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52, N 9. P. 888–903. EDN YVCIWH. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090097>

27. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E. et al. Bulk Parameterization of Air-Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm // *Journal of Climate*. 2003. Vol. 16, N4. P. 571–591. <0571: BPOASF>2.0.CO;2. EDN LZCPGF. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016)
28. 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, N.A.O. Sciences, ed.*, Prentice-Hall. 1961. P. 111–132.
29. Earle M.D., Brown R., Baker D.J., McCall J.C. Nondirectional and directional wave data analysis procedures. Stennis Space Center, 1996. 43 p. (NDBC technical document 96–01). URL: [www.ndbc.noaa.gov/wavemeas.pdf](http://www.ndbc.noaa.gov/wavemeas.pdf) (дата обращения: 28.03.2025).
30. Young I.R. The determination of confidence limits associated with estimates of the spectral peak frequency // *Ocean Engineering*. 1995. Vol. 22, N 7. P. 669–686. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(95\)00002-3](https://doi.org/10.1016/0029-8018(95)00002-3)
31. Rossi G.B., Nardone G., Settanta G. et al. Improvement in the Post-Processing of Wave Buoy Data Driven by the Needs of a National Coast and Sea Monitoring Agency // *Sensors*. 2023. Vol. 23, N 12. P. 5371. EDN CIYKPI. <https://doi.org/10.3390/s23125371>
32. Yurovsky Yu. Yu., Kudinov O.B. Methods and Errors of Wave Measurements Using Conventional Inertial Motion Units // *Physical Oceanography*. 2025. Vol. 32, N 1. P. 63–83. EDN WTGOVI
33. Pivaev P., Kudryavtsev V., Korinenko A., Malinovsky V. Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, N 16. P. 3321. EDN NMQQBA. <https://doi.org/10.3390/rs13163321>

## References

1. Rabault J, Nose T, Hope G, et al. 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. *Geosciences*. 2022;12(3):110. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030110>
2. Collins CO, Dickhudt P, Thomson J, et al. Performance of moored GPS wave buoys. *Coastal Engineering Journal*. 2024;1–27. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2295105>
3. Hope G, Seldal TI, Rabault J, et al. SFY — a lightweight, high-frequency, and phase-resolving wave buoy for coastal waters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2025;42(2):133–154. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-23-0170.1>
4. Gryazin DG. Calculation and design of buoys for sea wave measurements. St. Petersburg: SPbGU ITMO; 2000. 134 p. (in Russian).
5. Matveev VV, Raspopov VYa. Fundamentals of strapdown inertial navigation systems. St. Petersburg: Concern CSRI Elektropribor JSC; 2009. 278 p. (in Russian).
6. Black HD. A passive system for determining the attitude of a satellite. *AIAA Journal*. 1964;2(7):1350–1351. <https://doi.org/10.2514/3.2555>
7. Davenport PB. A vector approach to the algebra of rotations with applications. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1968. 25 p.
8. Wu J, Zhou Z, Fourati H, Cheng Y. A super fast attitude determination algorithm for consumer-level accelerometer and magnetometer. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2018;64(3):375–381. <https://doi.org/10.1109/TCE.2018.2859625>
9. Zhou Z, Wu J, Wang J, Fourati H. Optimal, recursive and sub-optimal linear solutions to attitude determination from vector observations for GNSS/accelerometer/magnetometer orientation measurement. *Remote Sensing*. 2018;10(3):377. <https://doi.org/10.3390/rs10030377>
10. Valenti R, Dryanovski I, Xiao J. Keeping a good attitude: a quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs. *Sensors*. 2015;15(8):19302–19330. <https://doi.org/10.3390/s150819302>
11. Mahony R, Hamel T, Pflimlin J-M. Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008;53(5):1203–1218. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.923738>
12. Madgwick SOH, Harrison AJL, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In: 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics; 2011. p. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975346>
13. Kalman RE. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*. 1960;82(1):35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
14. Hartikainen J, Solin A, Särkkä S. Optimal filtering with Kalman filters and smoothers. Espoo: Department of Biomedical Engineering and Computational Science, Aalto University School of Science; 2011. 150 p.
15. Open Source Sensor Fusion. An open source repository of algorithms and datasets for sensor fusion and analytics (Version 4.22 of Freescale Semiconductor's sensor fusion library). Available from: <https://github.com/memsindustrygroup/Open-Source-Sensor-Fusion/tree/master> [accessed 28 March 2025].

16. AHRS: Attitude and Heading Reference Systems. AHRS0.4.0 documentation. Available from: <https://ahrs.readthedocs.io/en/latest/> [accessed 28 March 2025].
17. Bosch Sensortec. BNO055 intelligent 9-axis absolute orientation sensor. Reutlingen: Bosch Sensortec; 2014. Available from: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf> [accessed 28 March 2025].
18. Rainville E, Thomson J, Moulton M, Derakhti M. Measurements of nearshore ocean-surface kinematics through coherent arrays of free-drifting buoys. *Earth System Science Data*. 2023;15(11):5135–5151. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5135-2023>
19. Feddersen F, Amador A, Pick K, et al. The wavedrifter: a low-cost IMU-based Lagrangian drifter to observe steepening and overturning of surface gravity waves and the transition to turbulence. *Coastal Engineering Journal*. 2024;66(1):44–57. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2238949>
20. Veras Guimarães P, Ardhuin F, Sutherland P, et al. A surface kinematics buoy (SKIB) for wave–current interaction studies. *Ocean Science*. 2018;14(6):1449–1460. <https://doi.org/10.5194/os-14-1449-2018>
21. Crandle T, Cook M, Cook G, Celkis E. Advances in wave sensing using MEMS. In: Proceedings of OCEANS2016 MTS/IEEE Monterey; 2016. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761148>
22. Tengberg A, Weiss G, Roach D. Directional wave, currents and environmental monitoring from navigation and hydrography buoys: an introduction to MOTUS. In: Proceedings of 2018 OCEANS — MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO); 2018. p. 1–10. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2018.8559239>
23. Zhou F, Zhang R, Zhang S. Measurement principle and technology of miniaturized strapdown inertial wave sensor. *Frontiers in Marine Science*. 2022;9:991996. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.991996>
24. InvenSense Inc. MPU-9250 product specification. Revision 1.1. San Jose: InvenSense Inc; 2016. Available from: [www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf](http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf) [accessed 28 March 2025].
25. Joosten H. Directional wave buoys and their elastic mooring. *International Ocean Systems*. 2006;10(4):18–21.
26. Bondur VG, Dulov VA, Murynin AB, Yurovsky YY. A study of sea-wave spectra in a wide wavelength range from satellite and in-situ data. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016;52(9):888–903. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090097>
27. Fairall CW, Bradley EF, Hare JE, et al. Bulk parameterization of air–sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate*. 2003;16(4):571–591. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2)
28. Longuet-Higgins MS, Cartwright DE, Smith ND. Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. In: Ocean wave spectra: proceedings of a conference. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 1961. P. 111–132.
29. Earle MD, Brown R, Baker DJ, McCall JC. Nondirectional and directional wave data analysis procedures. Stennis Space Center: NDBC; 1996. 43 p. (NDBC technical document 96–01). Available from: [www.ndbc.noaa.gov/wavemeas.pdf](http://www.ndbc.noaa.gov/wavemeas.pdf) [accessed 28 March 2025].
30. Young IR. The determination of confidence limits associated with estimates of the spectral peak frequency. *Ocean Engineering*. 1995;22(7):669–686. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(95\)00002-3](https://doi.org/10.1016/0029-8018(95)00002-3)
31. Rossi GB, Nardone G, Settanta G, et al. Improvement in the post-processing of wave buoy data driven by the needs of a national coast and sea monitoring agency. *Sensors*. 2023;23(12):5371. <https://doi.org/10.3390/s23125371>
32. Yurovsky YY, Kudinov OB. Methods and errors of wave measurements using conventional inertial motion units. *Physical Oceanography*. 2025;32(1):63–83. Available from: <http://physical-oceanography.ru/static/assets/files/2025/01/20250105.pdf> [accessed 28 March 2025].
33. Pivaev P, Kudryavtsev V, Korinenko A, Malinovsky V. Field observations of breaking of dominant surface waves. *Remote Sensing*. 2021;13(16):3321. <https://doi.org/10.3390/rs13163321>

## Об авторах

ЮРОВСКИЙ Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией МГИ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-9995-3965, WoS ResearcherID: F-8907–2014, Scopus AuthorID: 24377122700, SPIN-код (РИНЦ): 8482-5777, e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru

КУДИНОВ Олег Борисович, научный сотрудник, заведующий лабораторией МГИ РАН, кандидат технических наук, IstinaResearcherID (IRID): 19314165, SPIN-код: 2248-7034, Scopus AuthorID: 57201072321, e-mail: obk91@mail.ru