

## Метрологическое обеспечение волномерных буйев. Задачи и решения

Д. Г. Грязин

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург, Россия  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: gdg@mt.IFMO.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2017 г. После доработки 12.12.2017 г.

Работа посвящена метрологическим аспектам измерения морского волнения волномерными буйами. Обсуждаются различные методы калибровки и методические вопросы исследования точности измерений волнения волномерными буйами. Отмечаются сложности в определении метрологических характеристик таких измерений. Указывается, что первичным преобразователем прибора является непосредственно буй. Отсутствие строгого определения высоты волны, а также значительное число методических погрешностей в измерениях волнения буйами делают задачу их метрологического обеспечения нетривиальной. Анализируется зарубежный опыт решения подобной задачи, приводится описание известных стендов калибровки, их достоинств и недостатков. Выполнен анализ составляющих погрешностей, присутствующих в измерениях волнения волномерными буйами. Предложено описание волномерного буя «Шторм», созданного в ЦНИИ «Электронприбор», а также методов и средств его калибровки. Обоснована целесообразность выполнения оценки точности измерений статистических характеристик волнения волномерными буйами в условиях морских полигонов. Указано, что методика таких испытаний апробирована при выполнении сличений результатов измерений трех волнографов на Черноморском гидрофизическом полигоне РАН. Предложен анализ результатов сличений. Полученный опыт позволяет наметить пути к обеспечению метрологической прослеживаемости при оценке точности измерений волнения волномерными буйами.

**Ключевые слова:** морское волнение, волномерный буй, измерение, метрология.

**Для цитирования:** Грязин Д. Г. Метрологическое обеспечение волномерных буйев. Задачи и решения // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 2. С. 156–164. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-156-164

## Providing waverider buoys with metrological data. Problems and solutions

D. G. Gryazin

*“Concern “CSRI “Elektropribor”, JSC, Saint-Petersburg, Russia  
ITMO University, Saint-Petersburg, Russia  
e-mail: gdg@mt.IFMO.ru*

Metrological aspects of measuring sea waves by waverider buoys are considered in the paper. Various methods of calibration and the systematic problems in studying accuracy of the sea wave measurements by the waverider buoys are discussed. The difficulties arising in determining metrological characteristics of such measurements are mentioned. It is noted that the device primary transducer is the buoy itself. Absence of accurate determination of a wave height as well as considerable amount of methodical errors in the wave measurements by the buoys make the task of their providing with metrological data nontrivial. Foreign experience in solving similar problems is analyzed; definition of the known calibration tests, their advantages and drawbacks is given. The components of the errors taking place in the wave measurements by the waverider buoys are analyzed. The waverider buoy “Shtorm” developed by CSRI “Elektropribor” as well as the methods and means of its calibration are described. Expediency of assessing accuracy of the sea wave statistical characteristics’ measurements by the waverider buoys at the sea test areas is grounded. It is shown that the method of such tests is approved by comparing the measurements performed by three wave gauges at the Black Sea hydrophysical polygon, RAS. Having been analyzed, the results of comparisons are represented. The obtained experience permits to define the means providing stability of metrological characteristics obtained by the waverider buoys.

**Keywords:** sea wave, waverider buoy, measurement, metrology.

**For citation:** Gryazin, D.G., 2018. Providing waverider buoys with metrological data. Problems and solutions. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(2), pp. 156–164. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-156-164 (in Russian).

© Грязин Д.Г., 2018

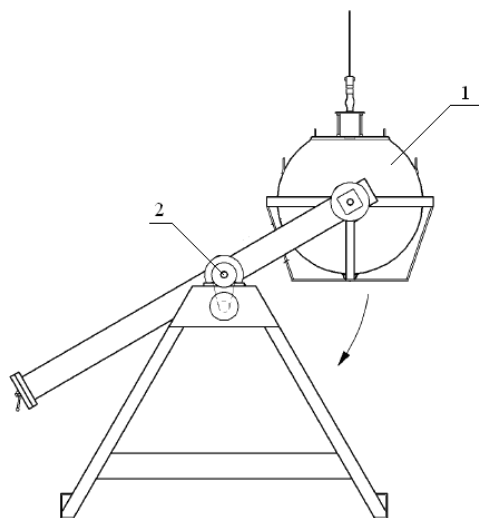
**Состояние вопроса.** Активное развитие морских технологий в мире и необходимость обеспечения работоспособности дорогостоящей техники привели к появлению в XX и XXI вв. значительного числа методов и средств измерения морского волнения. Результаты таких измерений используются для поддержки принятия решений о допустимых режимах эксплуатации техники, для прогнозирования интенсивности волнения, а в некоторых случаях – и для арбитражных измерений. Эти задачи решаются как с помощью бесконтактных методов измерений, предполагающих установку приборов на морских платформах, авиационных и морских носителях, так и с помощью стационарно установленных на якорю или дрейфующих волномерных буйев (ВБ). Следует отметить, что несмотря на то что статистические характеристики волнения вычисляются по высотам волн, само определение высоты волны так и не получило однозначной строгой формулировки. Как правило, в известных формулировках [1, 2] высота волны рассматривается как расстояние по вертикали от подошвы до вершины без учета вторичных волн. При этом не указывается, какие именно волны следует считать вторичными. Учитывая, что ВБ имеют измерительные функции и все без исключения определяют интенсивность волнения в баллах, точность измерений этого параметра становится не очевидной. Однако определение ординат волнения понимается однозначно и точность их измерений с помощью волнографов должна быть подтверждена. Для всех измерителей волнения используется предпосылка о том, что измеряемый процесс является центрированным, стационарным и эргодическим [3]. В связи с этим измерения проводятся либо в одной географической точке за конечный интервал времени, либо по площади морской поверхности в один момент времени. Все волнографы, как правило, измеряют статистические характеристики волн, но некоторые из них позволяют еще получить информацию о пространственном спектре волн. При учете, что в измерителях волнения используются косвенные методы измерений, их метрологическое обеспечение должно включать оценку суммарной погрешности, которая состоит из инструментальной и методической составляющих. Среди всех измерителей параметров морского волнения наибольшее число методических погрешностей имеют ВБ. Это связано с тем, что первичным преобразователем прибора является непосредственно буй, а измеряемый процесс волнения – одновременно и возмущающим для буя, что приводит к появлению в результатах измерений дополнительных погрешностей. К их числу относятся следующие погрешности: от линейного перемещения буя в горизонтальной плоскости под воздействием орбитального движения частиц воды в волне; от скольжения буя по склонам волны; от якорной связи [4]. Отметим, что к числу инструментальных относятся погрешности от измерения параметров движения буя, т. е. погрешности измерительного модуля и погрешности от бортовой и вертикальной качки буя, обусловленные его частотными характеристиками. Указанные погрешности вносят свой вклад в результаты измерений как статистических, так и спектральных характеристик волн.

Наиболее перспективными в настоящее время являются приборы, в которых используется инерциальный метод измерений параметров движения буя, а также приборы, использующие *GPS*-технологии. Эти приборы выпускаются серийно. Для получения статистических характеристик применяются изме-

ренные ординаты возвышений, а для построения пространственного спектра дополнительно необходимо иметь реализации измерений углов волнового склона. Следует отметить, что инерциальный метод измерений [5] реализуется путем получения информации о вертикальном перемещении и углах качки буйа, которые могут быть получены путем преобразований сигналов от гироскопов и акселерометров. В *GPS*-методе используется предположение о том, что буй вовлекается в орбитальное движение частиц воды в волне и с помощью измерений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости его движения вычисляет ординаты возвышений и углы волнового склона. Таким образом, исследование метрологических характеристик ВБ должно учитывать пространственные движения буйа на поверхности воды. Анализ доступной научно-технической информации показывает, что фирмы-изготовители ВБ пренебрегают исследованиями методических составляющих погрешности и ограничиваются лишь оценкой точности измерительного модуля буйа. В некоторых случаях, например в материалах *Datawell BV*, приводятся частотные характеристики качки буйев. Такой подход упрощает методы испытаний, позволяет нормировать наиболее выгодные для производителя характеристики приборов, а в некоторых случаях способствует подмене характеристик ВБ характеристиками измерительного модуля. Следует отметить, что серьезные производители, имеющие заслуженный авторитет, не используют такую подмену понятий, однако и не нормируют характеристики погрешности в полной мере.

**Методы оценки погрешностей измерительных модулей.** Для оценки погрешностей модулей, как правило, используется универсальное испытательное оборудование. Учитывая то, что модули измеряют вертикальные перемещения и два угла качки относительно ортогональных осей, ориентированных вдоль магнитного меридиана, для исследований используются стенды качки и перемещений, которые позволяют воспроизвести отдельно каждый из видов движения. Стенды качки представляют собой вращающиеся или колеблющиеся относительно нескольких осей платформы, которые серийно выпускаются такими известными производителями, как *Acutronic*, *IX Blue* и др. Стенды вертикальных перемещений разрабатываются и изготавливаются индивидуально, в связи с этим их число ограничено. В целях уменьшения затрат на закупку дорогостоящего оборудования изготовители часто создают специализированное испытательное оборудование. Так, например, известная голландская фирма *Datawell BV* для воспроизведения вертикальных перемещений использует стенд колебаний собственной конструкции, позволяющий воспроизводить колебания с размахом 1,8 м и периодом более 3 с (рис. 1, предложен в [6] и адаптирован для данной работы). Установка представляет собой уравновешенную с обеих сторон штангу, имеющую ось в средней части. На конце штанги устанавливается исследуемый волномерный буй 1. К оси подсоединен привод 2, что позволяет разворачивать штангу. С помощью такой установки имитируются вертикальные колебания буйа, при этом точность воспроизведения частоты и перемещения подтверждается с помощью секундомера и рулетки. Следует отметить, что этой фирмой разработана оригинальная технология калибровки ВБ, использующая в основном подручные

средства и не очень сложные стелды, однако позволяющая достичь хороших результатов и в значительной степени решить задачу калибровки бую совместно с измерительным модулем при его гармонических колебаниях.

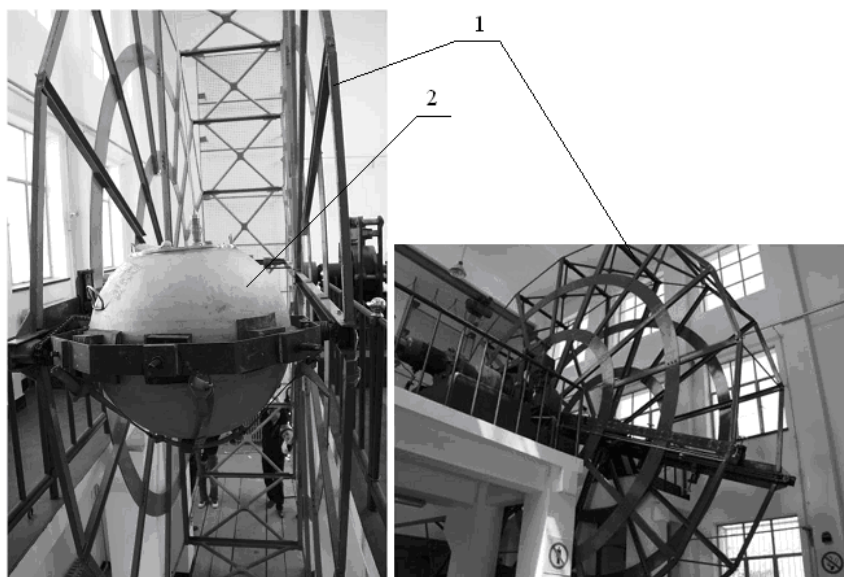


**Рис 1.** Стелд для калибровки ВБ фирмы *Datawell BV*

**Fig. 1.** Stand for WB calibration by *Datawell BV*

ваны для калибровки каналов измерения статистических характеристик ВБ, но они не пригодны для оценки точности каналов измерения параметров пространственного спектра волнения, так как не позволяют воспроизводить изменения углов волнового склона.

Стелд более сложной конструкции используется в китайском Океанологическом национальном центре стандартизации и метрологии. Стелд показан на рис. 2, который опубликован в [7] и адаптирован для настоящей работы. Установка представляет собой колесо 1, на образующую которого устанавливается волномерный буй 2. Стелд позволяет имитировать морское волнение в диапазоне высот волн 1–6 м с периодом 2–40 с. Очевидно, что такая установка имеет более совершенную конструкцию по сравнению с предыдущей, она позволяет в значительной степени имитировать орбитальные движения бую на поверхности волны. Отметим, что обе указанные установки могут быть использованы для калибровки каналов измерения статистических характеристик ВБ, но они не пригодны для оценки точности каналов измерения параметров пространственного спектра волнения, так как не позволяют воспроизводить изменения углов волнового склона.

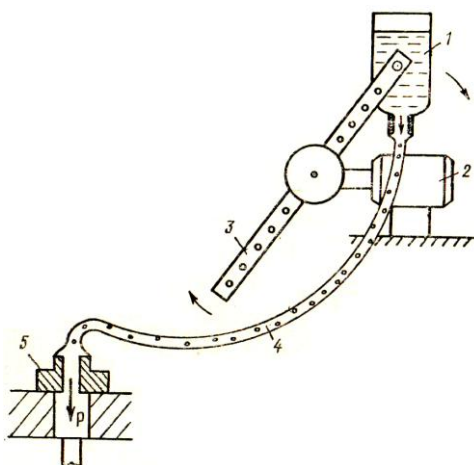


**Рис. 2.** Стелд для калибровки ВБ *National Center of Ocean Standards and Metrology, China*

**Fig. 2.** Stand for WB calibration of *National Center of Ocean Standards and Metrology, China*

Для исследования точности измерительного модуля по углам качки разработчики предлагают дополнительно использовать обычные стенды, воспроизводящие качку. При этом исследования частотных характеристик вертикальных и угловых колебаний буюв, во многом определяющих диапазон измеряемых длин волн, предлагается оценивать отдельно [6].

Следует отметить, что задачи оценки динамических погрешностей волнографов еще в 80-х годах прошлого столетия решались в Арктическом и антарктическом НИИ применительно к донным волнографам. В этих приборах гидродинамическое давление от поверхностных волн передается датчику давления, установленному на глубине менее половины длины волны. При обработке результатов измерений учитывается закон затухания волн с глубиной. Для калибровки датчиков давления таких волнографов был создан стенд, показанный на рис. 3, который предложен в [8] и адаптирован для настоящей работы.



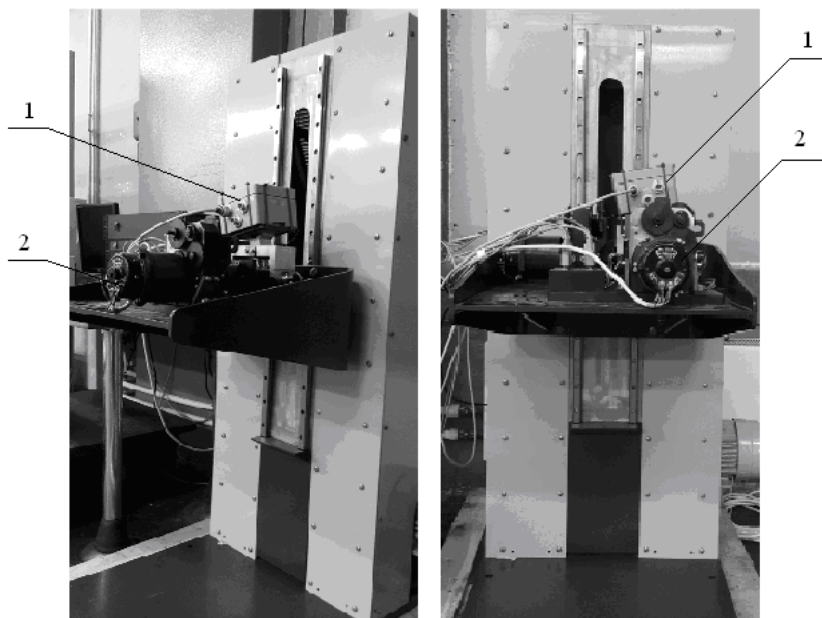
**Рис. 3.** Установка для динамических испытаний донного волнографа  
**Fig. 3.** Test machine for bottom wave recorder dynamic tests

Стенд состоит из емкости с водой 1, которая перемещается вертикально с помощью коромысла 3, приводимого во вращение двигателем 2. Давление столба воды передается от емкости 1 через гибкий шланг 4 к штуцеру датчика давления 5. Тем самым имитируется изменение давления от прохождения волны.

Анализ доступных источников информации показывает, что в настоящее время калибровка ВБ в режиме их функционирования не проводится. Калибровка измерительных модулей осуществляется по отдельным видам воздействий, что требует использования значительного количества оборудования.

**Опыт ЦНИИ «Электроприбор» по созданию волномерного бую «Шторм» и исследованию его метрологических характеристик.** В 2015 г. в ЦНИИ «Электроприбор» был разработан ВБ «Шторм», предназначенный для измерения не только статистических характеристик волнения, но и параметров его двумерного спектра [9]. Для измерения параметров движения бую в этом приборе применен микромеханический инерциальный измерительный модуль [10]. Волномерный буй имеет следующие характеристики: диапазон измерения ординат возвышений 15 м; погрешность измерения ординат возвышений  $\pm 5\%$  при высоте волны 15 м с длиной 300 м,  $\pm 8\%$  – при высоте 1,5 м с длиной волны 30 м; измерение углов качки в диапазоне  $\pm 50^\circ$  с максимальной погрешностью  $\pm 0,8^\circ$ ; рабочая температура от  $-1$  до  $+50$  °С; диаметр бую 0,77 м, масса 90 кг. Следует отметить, что микромеханические датчики получили самое широкое распространение [11] в настоящее время, а подобные модули могут использоваться для решения широкого круга задач.

Калибровка микромеханического инерциального измерительного модуля проводилась на комплексной экспериментальной установке, позволяющей воспроизводить как вертикальные, так и угловые колебания калибруемого модуля. Установка состоит из малогабаритного двухосного станда качки [12] и станда вертикальных перемещений (рис. 4). Такая компоновка станда позволяет добиться синхронизированного воспроизведения угловых и вертикальных колебаний, которые имитируют воздействие на измерительный модуль ВБ. Двухосный станд качки обеспечивает воспроизведение угловых колебаний по двум осям с амплитудами  $15^\circ$  и  $25^\circ$  по крену и дифференту соответственно, а станд вертикальных перемещений дает возможность имитировать гармоническое (регулярное) волнение высотой 0,45 м. Малые габариты станда качки позволили установить его на подвижной платформе станда вертикальных перемещений. При этом на платформе станда качки 2 закрепляется измерительный модуль 1 ВБ (рис. 4).



**Рис. 4.** Стенд для комплексных исследований характеристик измерительного модуля ВБ  
**Fig. 4.** Stand for complex studies of WB measuring module characteristics

Использование подобной установки дает возможность воспроизвести воздействие на измерительный модуль, наиболее соответствующее тому, которое имеется в ВБ при его работе. Отметим, что детально проработан метод оценки характеристик датчиков и модулей при воспроизведении колебаний в заданном спектре частот [12]. Метод может быть реализован в том числе и при помощи указанного двухосного станда качки. Это позволяет проводить испытания в условиях реального спектра морского волнения, что повышает достоверность результатов оценки погрешности измерительного модуля при его калибровке [13]. При лабораторных исследованиях точности ВБ «Шторм» проводились испытания и на стенде, воспроизводящем вертикальные перемещения до 4 м. Отдельно

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 34 № 2 2018 161

были оценены частотные характеристики непосредственно буя. Исследования этих характеристик проводились в опытовом мореходном бассейне Крыловского государственного научного центра. Затем нелинейная часть частотных характеристик качки по угловым и вертикальным колебаниям была учтена в алгоритмах обработки измерительного сигнала инерциальным модулем.

С целью подтверждения заявленных и полученных в результате стендовых испытаний характеристик ВБ «Шторм» были проведены сличения результатов натуральных измерений параметров волнения, полученных с помощью разработанного прибора и волномерного буя, использующего иной принцип работы. В качестве последних были выбраны хорошо известный ВБ *Waverider* модификации *Datawell Waverider DWR-G* [14] и струнный волнограф, разработанный в Морском гидрофизическом институте РАН. Натурные исследования проводились на морской платформе Черноморского гидрофизического полигона РАН, расположенного в пгт Кацевели (Крым). Эта платформа является уникальным сооружением не только на территории России, но и в мире. Она установлена в 480 м от берега на стальных фермах, стоящих на дне акватории глубиной 28 м. Струнный волнограф был закреплен на ферме платформы, пронизываемой волнами, а ВБ закорены на одинаковых якорных связях рядом с ней.

Следует отметить, что ВБ *Waverider DWR-G* предназначен для измерения параметров двумерного спектра волнения. Он имеет шарообразный корпус, в котором размещены приборный блок и аккумуляторная батарея. Для измерения углов волнового склона и ординат возвышений морской поверхности в приборе используется *GPS*-система, работающая на эффекте Доплера при перемещениях ВБ на взволнованной поверхности.

### Результаты сравнительных исследований трех волнографов/ The results of comparative studies of three wave recorders

Интенсивность волнения/ Wave intensity	ВБ «Шторм»/ WB "Shtorm"			ВБ <i>Waverider</i> / WB <i>Waverider</i>			Струнный волнограф/ String wave recorder		
	$h_{3\%}$ , м/ $h_{3\%}$ , m	$h_{cp}$ , м/ $h_{mean}$ , m	$T_{cp}$ , с/ $T_{mean}$ , s	$h_{3\%}$ , м/ $h_{3\%}$ , m	$h_{cp}$ , м/ $h_{mean}$ , m	$T_{cp}$ , с/ $T_{mean}$ , s	$h_{3\%}$ , м/ $h_{3\%}$ , m	$h_{cp}$ , м/ $h_{mean}$ , m	$T_{cp}$ , с/ $T_{mean}$ , s
	1 балл/ 1 point	0,20 0,22	0,10 0,12	2,86 1,65	0,21 0,15	0,10 0,07	3,42 2,37	0,21 0,20	0,10 0,10
2 балла/ 2 point	0,28 0,35	0,15 0,18	1,92 2,84	0,29 0,36	0,14 0,17	2,35 3,64	0,30 0,40	0,15 0,19	2,00 2,62
	0,48 0,48	0,25 0,25	3,52 3,68	0,49 0,49	0,23 0,23	3,74 3,81	0,49 0,58	0,24 0,26	3,36 3,84
	0,98 1,06 1,11	0,48 0,52 0,55	2,98 3,09 3,56	0,92 1,03 0,92	0,44 0,49 0,44	3,15 3,33 3,48	0,80 0,91 0,90	0,40 0,45 0,46	2,85 3,07 3,33
3 балла/ 3 point	1,17	0,59	3,56	1,17	0,56	3,70	1,05	0,53	3,47

Сравнительные исследования волнографов трех типов проводились осенью 2014 г. По результатам записей волнограмм оценивались статистические и спектральные характеристики волнения, полученные сравниваемыми приборами. В результате работ получено 85 волнограмм при волнении 1–5 баллов. В таблице приведены характеристики одного и того же волнения, полученные по реализациям трех волнографов на волнении интенсивностью до 3 баллов,

при котором величины абсолютной погрешности всех приборов наиболее значительны. Видно, что значения статистических характеристик волнения, измеренные и рассчитанные всеми тремя приборами, близки друг к другу и не выходят за границы погрешностей приборов. Измеряемый с помощью струнного прибора период волн, как правило, меньше, чем у двух ВБ, что связано с тем, что он лучше регистрирует короткие волны, а расчет среднего периода зависит от числа зарегистрированных волн. Волномерные буи не отслеживают такие короткие волны в связи с частотными характеристиками самого буя.

Отметим, что струнный волнограф может быть использован в качестве эталонного прибора для сличения показаний буев в связи с тем, что он позволяет измерить как короткие, так и длинные волны. Однако такой прибор должен быть аттестован как уровнемер. Результаты сравнительных натурных испытаний подтвердили характеристики ВБ «Шторм», полученные при стендовых испытаниях, что позволяет сделать вывод о хорошем качестве разработанных методов и средств лабораторных испытаний.

**Выводы.** В связи с отсутствием однозначного определения высоты волны нормирование точности ее измерения, как и измерения балльности волнения, представляется затруднительным. Подход к оценке точностных характеристик ВБ, использующий раздельное исследование значений двух основных инструментальных погрешностей ВБ – частотных характеристик качки буя и погрешность измерительного модуля, находит все больше сторонников [6]. Очевидно, что он рационален и воспроизводим. Однако его основным недостатком является необходимость сложения значений этих двух составляющих погрешности, законы распределения которых в общем случае неизвестны [15]. Учитывая то, что помимо этих составляющих в результатах измерений будут присутствовать методические погрешности от якорных связей, орбитального движения и другие, суммарная погрешность обязательно возрастет. Увеличение погрешности может зависеть от интенсивности волнения и при его малых значениях, такой добавкой к инструментальной погрешности можно пренебречь. Таким образом, вопрос сложения двух указанных составляющих погрешности заслуживает отдельного исследования.

Следует отметить, что использование струнного волнографа в качестве эталонного прибора является наиболее эффективным, однако этот метод требует наличия не только самого аттестованного струнного уровнемера, но и стационарной морской платформы, пронизываемой волнами. Учитывая затратность подобных экспериментальных исследований, можно выполнять сличения на морских полигонах только ВБ, измеряющих спектральные характеристики пространственного волнения, а в дальнейшем проводить сличения с ними более простых приборов. В любом случае задача сличений требует использования оборудованного морского полигона.

Заметим и то, что для выполнения лабораторных исследований приборных модулей ВБ следует разрабатывать и применять современные стенды воспроизведения колебаний. Очевидно, что такие стенды являются дорогостоящими, однако это цена за точность измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00010.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 256 с.
2. *Бородай И. К., Нецветаев Ю. А.* Качка судов на морском волнении. Л.: Судостроение, 1969. 432 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/270577/> (дата обращения: 22.11.2017).
3. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / З. К. Абузьяров [и др.] / Под ред. Е. С. Нестерова. М.: Росгидромет, 2013. 292 с.
4. *Грязин Д. Г.* Расчет и проектирование буев для измерения морского волнения. СПб. : СПбГИТМО(ТУ), 2000. 134 с.
5. *Матвеев В. В., Распопов В. Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. 280 с. URL: [http://www.studmed.ru/matveev-vvospovny-postroeniya-besplatformennyh-inercialnyh-sistem\\_ca758271bb3.html](http://www.studmed.ru/matveev-vvospovny-postroeniya-besplatformennyh-inercialnyh-sistem_ca758271bb3.html) (дата обращения: 22.11.2017).
6. *Gerritzen P. L.* The calibration of wave buoys // Calibration of Hydrographic Instrumentation. Special Publication No. 31 of the Hydrographic Society. The Society, 1993. 5p. URL: [http://www.datawell.nl/Portals/0/Documents/Publications/datawell\\_publication\\_hydrographicinstrumentation-calibrationwavebuoys\\_oct1993\\_2004-06-30.pdf](http://www.datawell.nl/Portals/0/Documents/Publications/datawell_publication_hydrographicinstrumentation-calibrationwavebuoys_oct1993_2004-06-30.pdf) (дата обращения: 21.11.2017).
7. *Jianqing Y. U.* How we calibrate the Wave Height and Period Measurements from the Gravitational Acceleration Wave Buoys in RMIC/AP [Электронный ресурс]: RMIC for the Asia-Pacific Region National Center of Ocean Standards and Metrology, China, 2014. URL: <https://www.wmo.int/pages/prog/mmop/documents/dbcp/Dbcp51-Workshop-2014/presentations/DBCP-30-STW-11-YU-Jianqing-Calib-Waves-China.pdf> (дата обращения: 15.11.2017).
8. *Ковчин И. С.* Автономные океанографические средства измерений. Л. : Гидрометеоздат, 1991. 255 с.
9. Волномерный буй «Шторм» с инерциальным микромеханическим измерительным модулем. Результаты разработки и испытаний / Д. Г. Грязин [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 4. С. 667–674. doi:10.7868/S0030157417040165
10. Применение микромеханического инерциального модуля в задаче измерения параметров морского волнения / Д. Г. Грязин [и др.] // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сб. тр. конф. СПб., 30 мая – 01 июня 2016 г. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2016. С. 62–67.
11. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 399 с. URL: [http://www.studmed.ru/raspopov-vya-mikromehchanicheskie-pribory-uchebnoe-posobie\\_8096c0766a3.html](http://www.studmed.ru/raspopov-vya-mikromehchanicheskie-pribory-uchebnoe-posobie_8096c0766a3.html) (дата обращения: 15.11.2017).
12. *Грязин Д. Г., Величко О. О.* Оценка характеристик микромеханических датчиков и модулей при их групповом исполнении. Метод и его техническая реализация // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 5(178). С. 37–44. URL: <http://www.microsystems.ru/files/full/mc201505.pdf> (дата обращения: 15.11.2017).
13. Патент №2644614 на изобретение Способ определения дисперсии погрешности измерения двухмерного спектра волнения инерциальным измерительным модулем волномерного буя и устройство для его реализации. Авторы Грязин Д. Г., Белова О. О. Опубликовано 13.02.18 бюл. № 5. URL: [http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=RUPAT&rn=4062&DocNumber=2644614&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=4062&DocNumber=2644614&TypeFile=html) (дата обращения: 15.02.2018).
14. URL: [www.datawell.nl](http://www.datawell.nl) (дата обращения: 15.11.2017).
15. *Лячнев В. В., Сирая Т. Н., Довбета Л. И.* Фундаментальные основы метрологии. СПб. : Элмор, 2007. 420 с.

*Об авторе:*

**Грязин Дмитрий Геннадиевич**, начальник отдела, главный метролог АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон» (197046, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30); профессор кафедры мехатроники, Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО) (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49), доктор технических наук, профессор, доцент, **Scopus AuthorID: 25638150600**, [gdg@mt.IFMO.ru](mailto:gdg@mt.IFMO.ru)