

УДК 531.749; 531.719; 627.723

## ВОЛНОМЕРНЫЙ БУЙ “ШТОРМ” С ИНЕРЦИАЛЬНЫМ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МОДУЛЕМ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ

© 2017 г. Д. Г. Грязин<sup>1,2</sup>, Л. П. Старосельцев<sup>1,2</sup>, О. О. Белова<sup>1</sup>, К. А. Глеб<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: gdg@mt.ifmo.ru

Поступила в редакцию 22.07.15 г.

После доработки 18.11.15 г.

Статья посвящена результатам разработки волномерного буя для измерения статистических характеристик волнения, а также характеристик двумерного пространственного спектра трехмерного волнения. Прибор предназначен для проведения продолжительных, например сезонных измерений. Указанные измерения могут способствовать решению задач прогнозирования волнения и предупреждения аварийных ситуаций от воздействия волн на морские платформы, гидротехнические сооружения и другие морские объекты. Измерительный модуль прибора включает триады микромеханических гироскопов, акселерометров и трехкомпонентный магнитометр. Предложено описание прибора, результаты лабораторных исследований его характеристик, стендовых и натурных испытаний. Отмечается, что для оценки метрологических характеристик были проведены сравнительные испытания волномерного буя “Шторм” с эталонным струнным волнографом, установленным на морской платформе. Показано, что характеристики и возможности разработанного волномерного буя позволяют вытеснить с отечественного рынка приборы зарубежных производителей.

DOI: 10.7868/S0030157417040165

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость определения параметров ветровых волн вызвана, в первую очередь, безопасностью использования морской техники, рассчитанной на работу в условиях заданных волновых возмущений. Известные методы прогнозирования волнения, основанные на наблюдениях за ветром и учитывающие особенности акватории, не всегда позволяют выполнить точный прогноз [5, 1]. В связи с необходимостью предупреждений аварийных ситуаций возрастает роль прогнозирования интенсивности волнения на основе инструментальных измерений. Отметим, что в некоторых случаях, для разрушения гидротехнических сооружений и плавучих объектов достаточно воздействия одной волны, несущей значительную энергию. В мировой практике, в случае прогнозирования интенсивности волнения более допустимого, принято убирать буровой став на морских платформах и судах разведки, закрывать внутренние рейды морских портов. Проводят мероприятия по предотвращению аварийных ситуаций и на нефтяных и газовых добывающих платформах, плантациях марикультур. Особую важность информация о волнении имеет для судоходства.

Статистика показывает, что половину эксплуатационного времени суда проводят в условиях плавания на волнении, снижающем скорость хода на 10–15%, а при высоте волны 5–7 м суда теряют 50% скорости. Кроме того, по информации регистра Ллойда 30% всех аварий мирового флота впрямую связаны с воздействием волнения [6]. В связи с этим гидрометеорологические службы многих стран стали составлять и транслировать мореплавателям как фактические, так и прогнозистические карты волнения.

Последние два десятилетия в нашей стране задачи инструментального измерения параметров морского волнения решаются с помощью импортных волнографов. Достаточно сказать, что подобные приборы установлены вблизи морского канала порта Санкт-Петербург, в Новороссийске, в Геленджикской бухте, они использовались рядом с причальными сооружениями портопункта о. Валаам и в других местах. Чаще всего интенсивность волнения определяется визуально, при этом погрешность оценки зависит от опыта наблюдателя и может достигать 30%.

Спектральная и статистическая теории описания морского волнения окончательно сформи-

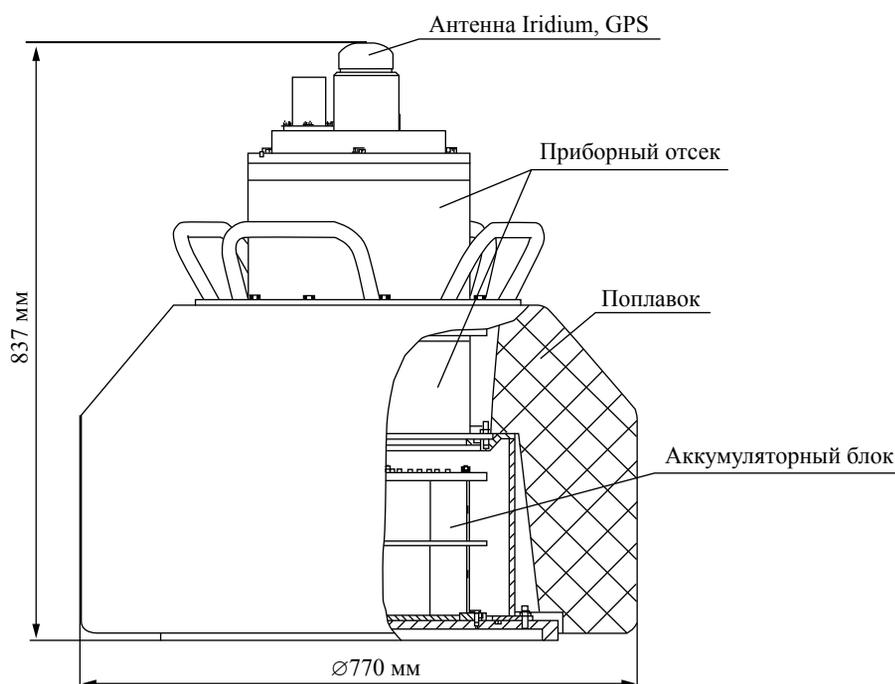


Рис. 1. Компоновка ВБ “Шторм”.

ровались к семидесятым годам прошлого столетия [7,8], что позволило перейти к проектированию волномерных буёв (ВБ), измеряющих как статистические, так и исчерпывающие для анализа — спектральные характеристики трехмерного волнения. Для измерения последних необходима информация не только об ординатах возвышений, но и об углах волнового склона, измеренных относительно магнитного меридиана. За прошедшие годы было создано множество волнографов, использующих различные принципы действия [3], однако мировым лидером по разработке и производству волномерных буёв является голландская фирма Datawell (<http://datawell.nl>), захватившая две трети мирового рынка этих приборов и выпускающая вот уже сорок лет ВБ Waverider различных модификаций. Измерение вертикальных перемещений этих буёв производится с помощью двойного интегрирования сигнала вертикального акселерометра, установленного на короткопериодном демпфированном маятнике. Направление распространения волн определяется по алгоритму, включающему измерения углов волнового склона, относительно магнитного меридиана. В последние годы на рынке появилась модель ВБ Datawell Waverider DWR G, использующего для работы GPS технологии.

Активное развитие микромеханических инерциальных датчиков позволило перейти к созданию ВБ, использующего для решения задачи ориентации микромеханический модуль. Применение микромеханических инерциальных модулей

в ВБ является чрезвычайно перспективным. Указанные преобразователи позволяют уменьшить энергопотребление, габариты, массу ВБ, при этом суммарная погрешность измерения параметров волнения не увеличивается за счет постобработки результатов измерений, выполняемой непосредственно после записи реализаций.

Учитывая значительный опыт ЦНИИ “Электроприбор” в создании микромеханических гироскопов и инерциальных модулей на их основе [4], а также заинтересованность Минпромторга в создании отечественного серийного ВБ, в течение 2013–2014 гг. предприятием была проведена разработка ВБ “Шторм”.

#### СТРУКТУРА ПРИБОРА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЕГО СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

Конструкция прибора состоит из поплавковой части, обеспечивающей плавучесть буя, приборного блока и блока аккумуляторных батарей. В верхней части приборного блока установлены антенны приёмопередатчика Iridium, GPS антенна и проблесковый маяк (рис. 1). Поплавковая часть представляет собой рубашку из полиэтилена высокого давления, внутренняя полость которой заполнена вспененным полиэтиленом. При сборке прибора поплавок одевается на приборный блок сверху и закрепляется на нём.

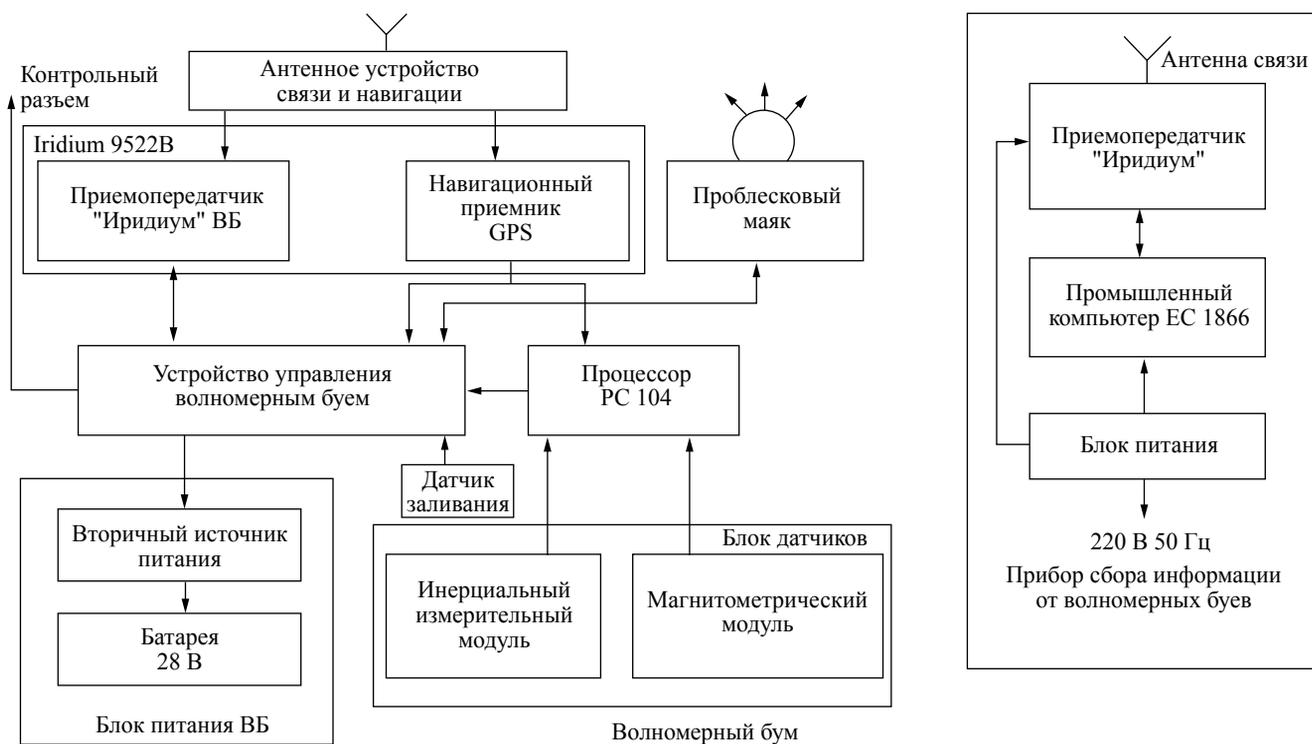


Рис. 2. Структура комплекта ВБ “Шторм”.

Комплект аппаратуры “Шторм” включает в себя ВБ и бортовой управляющий прибор, размещаемый на судне или береговой станции наблюдения и предназначенный для управления режимами функционирования буя, накопления и обработки измерительной информации. Структурная схема изделия представлена на рис. 2.

В приборном блоке расположены инерциальный измерительный модуль, трехкомпонентный феррозондовый магнитометр типа МА-8, процессор, устройство управления ВБ, задающее программу функционирования буя, передатчик спутниковой системы “Иридиум” для передачи измерительной информации и получения команд от прибора сбора информации, навигационный приемник спутниковой системы GPS, позволяющий получить координаты ВБ и передать их на бортовой управляющий прибор, проблесковый маяк, совмещенное антенное устройство “Иридиум” и GPS. В нижней части приборного блока расположена аккумуляторная батарея с датчиком заливания. На верхней крышке установлен контрольный разъем для диагностики прибора.

Бортовой управляющий прибор имеет в своем составе передатчик Iridium, антенное устройство и промышленный компьютер.

Инерциальный измерительный модуль ВБ представляет собой бесплатформенную инерциальную измерительную систему, построенную на

базе микромеханических гироскопов и кремниевых акселерометров АТ1104-50. Используемые микромеханические гироскопы выпускаются серийно в ЦНИИ “Электроприбор”. Постоянное совершенствование этих датчиков, позволяет сегодня выпускать гироскопы с плотностью шума  $0.005^\circ/\text{c}/\sqrt{\text{Гц}}$  при диапазоне  $\pm 300^\circ/\text{c}$  и полосе пропускания до 100 Гц.

Конструкция модуля состоит из двух триад микромеханических гироскопов и акселерометров, оси чувствительности которых образуют правый ортогональный трехгранник, ориентированный с погрешностью не более 15 угл. мин относительно посадочных площадок, связанных с осями корпуса. В состав модуля входит микроконтроллер. Модуль прошел калибровки с целью определения моделей дрейфа, поправок на неортогональность триад и температурных моделей инерциальных датчиков.

Алгоритм работы прибора предполагает выход в режим измерений каждые час, два, четыре или восемь часов, в соответствии с установленным интервалом, задаваемым после окончания режима измерений по команде от бортового управляющего прибора. Режим измерений состоит из функционального контроля работоспособности составных частей приборного блока буя, режима записи реализации в течение 20 минут, ее обработки и передачи по радиоканалу. По результатам

обработки записанной реализации вычислительное устройство рассчитывает высоту волн 3% обеспеченности, среднюю высоту волн, средний период волн, балльность волнения, параметры двумерного спектра волнения. Указанная информация формируется в посылку, которая передается через канал Iridium на бортовой управляющий прибор, подключенный к интернету. Кроме того, сформированная посылка может храниться на удаленном сервере, адрес которого прописан в программе.

### СТЕНДОВЫЕ И НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Комплекс испытаний ВБ “Шторм” включал в себя испытания на предприятии-изготовителе и натурные испытания прибора. Указанным испытаниям предшествовали исследования гидродинамических характеристик качки буйа.

Особенностью измерения волнения ВБ является то, что первичным преобразователем прибора является непосредственно буй, отслеживающий профиль волны. Инерциальный модуль в данном случае является промежуточным измерительным преобразователем, вырабатывающим параметры угловых и вертикальных колебаний буйа. В связи с этим проектирование буйковой части ВБ сопровождалось исследованиями гидродинамических характеристик прибора. Исследования, проводившиеся в опытовом мореходном бассейне Крыловского научного центра, позволили определить гидродинамические коэффициенты, выполнить расчёт качки и выработать рекомендации к компоновке прибора. После изготовления ВБ “Шторм” в том же бассейне были выполнены

оценки частотных характеристик буйа по его угловым и вертикальным колебаниям, представленные на рис. 3 и 4. На этих рисунках по осям ординат показаны отношения измеренных значений к задаваемым параметрам волны.

Необходимо отметить, что представленные графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) имеют обобщённый характер. Особенностью гидродинамических исследований является то, что сопротивление при колебаниях квадратично зависит от скорости колебаний. В связи с этим в рамках линейной постановки задачи, исследования АЧХ качки буйа в бассейне должны проводиться на волнах одинаковой крутизны (отношения высоты волны к её длине), при которых средняя скорость движения буйа по склону волны одинакова для разных частот волн. Однако колебания ВБ происходят на нерегулярном волнении в условиях воздействия волн разной крутизны. В связи с этим в опытовом бассейне для снятия АЧХ использовалось волнение с заданным натурным спектром. Таким образом, при одной частоте (длине) волны и ее разных высотах ординаты АЧХ будут лишь близки друг другу. Из рис. 3 и 4 видно, что частоты волн, в которых вертикальная качка буйа может вносить существенную погрешность в измерения волнения, составляет свыше 3 рад/с, что соответствует волнению в 1 балл [2] по шкале ГУГМС-53. Высоты волн 3% обеспеченности при такой балльности не превышают 0.25 м. Влиянием АЧХ буйа на измерение ординат волн и углов волнового склона при таком волнении можно пренебречь. АЧХ угловых колебаний оказывает более существенное влияние на результаты измерений, т.к. период собственных колебаний ВБ

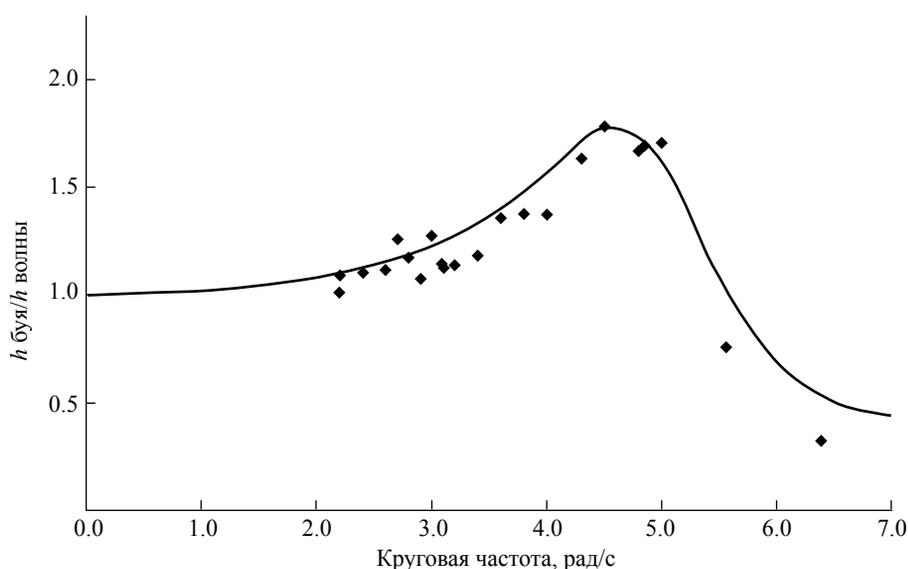


Рис. 3. АЧХ вертикальной качки ВБ “Шторм”.

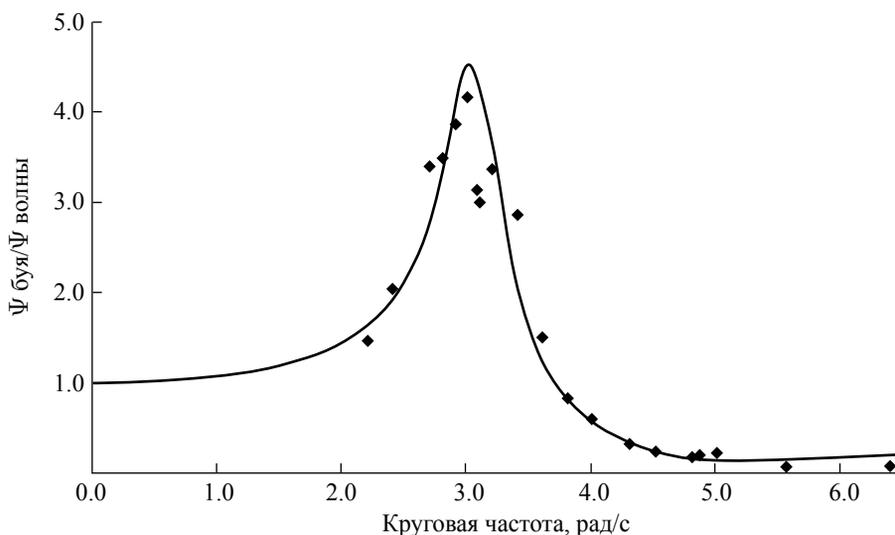


Рис. 4. АЧХ угловой качки ВБ “Шторм”

соответствует 2.04 с. Наименьшее влияние качки буя на измерения приходится на диапазон от 0 до 2 рад/с, что соответствует волнению более 3 баллов. С целью корректировки влияния АЧХ угловых колебаний на результаты измерений волнения до 3 баллов, эта характеристика введена в алгоритм расчета спектральных характеристик.

Предварительные испытания инерциального модуля ВБ “Шторм” проводились на стендах ЦНИИ “Электроприбор” и были направлены на оценку соответствия разработанного прибора требованиям технического задания. В числе прочих при проведении испытаний оценивались погрешности выработки курса на неподвижном основании, значения погрешности выработки углов качки на стенде качки, значения погрешности выработки средней высоты волны на стенде вертикальных перемещений. Исследования

погрешности выработки угла курса проводились на немагнитном поворотном стенде с использованием буссоли. Среднеквадратическая погрешность выработки курса составила 0.8°. Оценка погрешности выработки углов качки выполнялась на стенде “Кречет 1500”, при этом максимальная качка относительно продольной и поперечной осей ВБ составила ±30° с периодом 9 с, что соответствует волнению 6 баллов. Максимальная погрешность выработки углов качки, относительно продольной и поперечной оси соответственно, составила 0.4 и 0.15°. Оценка погрешности выработки ординат вертикальных перемещений производилась на стенде “Нормаль СЗ” с амплитудой и периодами перемещения от 2 м – 13.9 с, до 0.2 м – 13.9 с. Относительная погрешность выработки вертикальных перемещений при этом

Таблица 1. Результаты измерения параметров волнения с помощью волнографов разных типов

№ п/п	Струнный волнограф			ВБ “Шторм”				ВБ Waverider			
	$H_{ср}$ , м	$T_{ср}$ , с	$H_{3\%}$ , м	$H_{ср}$ , м	$T_{ср}$ , с	$H_{3\%}$ , м	Генеральное направление волн, °	$H_{ср}$ , м	$T_{ср}$ , с	$H_{3\%}$ , м	Генеральное направление волн, °
1	0.25	2.68	0.53	0.3	3.4	0.63	146.0	0.28	4.04	0.59	103.0
2	0.19	2.62	0.4	0.2	3.3	0.4	118.9	0.17	3.64	0.36	100.0
3	0.1	1.6	0.21	0.11	3.13	0.23	92.9	0.1	3.42	0.21	118.0
4	0.21	3.17	0.45	0.29	4.06	0.66	144.0	0.26	4.21	0.54	138.0
5	0.19	2.28	0.42	0.28	3.01	0.62	278.5	0.25	4.35	0.51	252.0
6	0.26	3.84	0.58	0.28	4.13	0.54	128.9	0.23	3.81	0.49	134.0
7	0.24	3.36	0.49	0.3	4.39	0.53	362.6	0.23	3.74	0.49	193.0
8	0.17	3.35	0.37	0.2	4.11	0.43	377.1	0.19	4.6	0.4	107.0
9	0.15	2.0	0.3	0.17	2.19	0.3	93.5	0.14	2.35	0.29	103.0
10	0.1	1.52	0.2	0.12	1.69	0.22	105.1	0.07	2.37	0.15	104.0

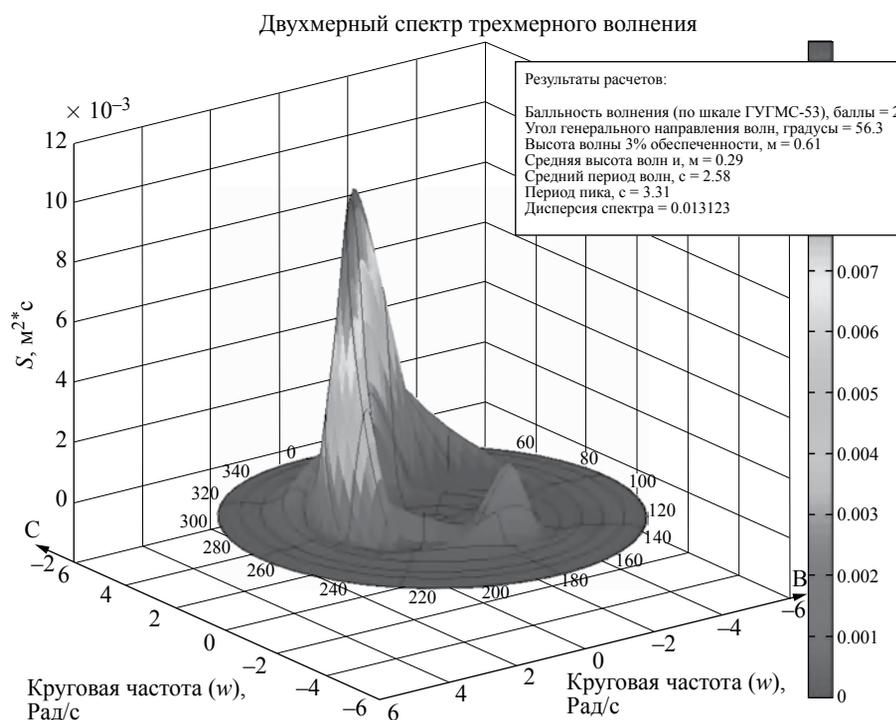


Рис. 5. Пример двухмерного спектра трехмерного волнения, полученного ВБ “Шторм”

составила не более 5% на длинных волнах и не более 8% на коротких.

Методика натуральных испытаний ВБ “Шторм” предполагала сличение результатов его измерений с результатами измерений других волнографов. Для сличения были использованы струнный волнограф, закреплённый на неподвижном основании, и ВБ Waverider последней модификации “Datawell Waverider DWR G”. Испытания проводились на морской платформе в экспериментальном отделении Морского гидрофизического института РАН, пос. Кацивели, республика Крым. Место проведения испытаний было выбрано в связи с тем, что подобная морская исследовательская платформа является уникальным сооружением не только на территории России, но и в мире (<http://www.mhi.nas.ua>). Платформа установлена в 700 м от берега на стальных фермах, стоящих на дне акватории с глубиной 35 м. Фермы морской платформы пронизываемы волнами и позволяют закрепить на них струнный волнограф, являющийся образцовым прибором. За время проведения испытаний было получено свыше 80 волнограмм на волнении от 1 до 5 баллов, построены двухмерные спектры, один из которых представлен на рис. 5, рассчитаны такие статистические характеристики волн, как средняя высота волн  $H_{cp}$ , высота волн 3% обеспеченности  $H_{3\%}$ , средний период волн  $T_{cp}$ , определены генеральные направления распространения волн.

Результаты анализа 10 режимов измерений на волнении 2 балла, при котором погрешности ВБ “Шторм” наибольшие, представлены в табл. 1.

Наибольшая величина этой погрешности обусловлена тем, что на малом волнении измеряются незначительные по величине угловые скорости и линейные ускорения.

Из табл. 1 видно, что погрешность измерения средних высот волн составила не более 9 см, а оценки среднего периода волнения, полученные с помощью струнного волнографа, менее аналогичных значений, рассчитанных по реализациям ВБ “Шторм”. Указанные результаты обусловлены более широким диапазоном измерений струнного прибора и сглаживанием высокочастотных волн ВБ. Статистические характеристики двух ВБ близки, как и измеренное ими генеральное направление распространения волн. Однако в связи с малой интенсивностью волнения этот параметр также имеет значительную погрешность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенностью ВБ “Шторм” является то, что он предназначен для измерений характеристик волнения, позволяющих построить двухмерный пространственный спектр трехмерного волнения. Результаты стендовых и натуральных испытаний прибора позволяют сделать вывод о том, что



Рис. 6. Волномерный буй “Шторм”

ВБ “Шторм” является надежным средством измерений и имеет характеристики, представленные в табл. 2. Внешний вид прибора представлен на рис. 6.

Результаты предварительных и натурных испытаний показали, что погрешность измерения спектральных и статистических характеристик волнения на волнении более трех баллов не превышает 5%. Следует отметить, что точность примененных датчиков является избыточной в связи с возможностью постобработки записанной реализации непосредственно после окончания режима измерений. Алгоритм работы прибора учитывает то, что волнение за период измерений 15–20 мин является стационарным центрированным случайным процессом. Кроме того, в серийных изделиях и в дальнейших модификациях целесообразно понизить требования к выработке направления распространения волн, которое достаточно измерять с точностью до нескольких градусов. Использование более грубых датчиков позволит уменьшить стоимость серийных образцов приборов. Отметим, что стоимость серийных образцов ВБ “Шторм”, очевидно, будет в половину меньше стоимости ВБ “Datawell Waverider DWR G”. Прибор предполагается оснащать якорной системой, которая позволит выполнять установку буя, как на мелководье, так и на акваториях со значительными глубинами. Использование

Таблица 2. Технические характеристики ВБ “Шторм”

Измерение ординат возвышений	Диапазон	15 м
	Погрешность	±5% (диапазон 15 м, длина волны 300 м)
		±8% (диапазон 1.5 м, длина волны 30 м)
Измерение направления	Ошибка курса	не более 1°
Измерение углов качки	Диапазон	±50°
	Погрешность	±0.8°
Общие характеристики	Рабочая температура (в воде)	от –1 °С до +50 °С
	Канал передачи измерительной информации	Iridium
	Диаметр буя	0.77 м
	Масса буя	90 кг

современных отечественных аккумуляторных батарей обеспечит автономную работу прибора не менее чем на шесть месяцев, а программное обеспечение позволит управлять работой прибора с любого компьютера, расположенного в любой географической точке, подключённого к бортовому управляющему прибору и сети интернет. Указанные особенности позволяют надеяться на то, что ВБ “Шторм” полностью вытеснят с отечественного рынка буи “Datawell Waverider”.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-00010).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузаров З.К., Нестеров Е.С. Сравнительная оценка успешности прогнозов волнения по отечественным волновым моделям AARI-PD2 и PAVM // Тр. Гидрометцентра России. 2009. Вып. 343. С. 4–22.
2. Бородай И.К., Нецветов Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 288 с.
3. Грязин Д.Г., Бердюгин А.В. Современные тенденции развития приборов для измерения морского волнения. ГУНИО МО Записки по гидрографии № 267, С. 45–57.

4. *Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Грязин Д.Г. и др.* Инерциальные модули на микромеханических датчиках. Разработка и результаты испытаний // Гироскопия и навигация 2008 № 3 (62). 2008. С. 3–12
5. РД 31.33.08-86. Руководство по расчёту спектральных характеристик волнения для целей проектирования и эксплуатации морских портов. М.: Союзморниипроект, 1986. 25с.
6. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Росгидромет, 2013. 337 с.
7. *Свешников А.А.* Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. 449 с.
8. *Longuet–Higgins M.S., Cartwright D.E., Smith N.D.* Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of sloating buoy // Prentice – Hall Ocean wave spectra. 1963. P. 111–136.

## **Wave Buoy “Storm” With the Micromechanical Inertial Measuring Unit. Development and Tests Results**

**D. G. Gryazin, L. P. Staroselcev, O. O. Belova, K. A. Gleb**

The article is devoted to the results of the development of a wave buoy to measure the statistical characteristics of waves and the characteristics of a two-dimensional spatial spectrum of three-dimensional waves. The device is designed to carry out long-term, for example seasonal measurements. These measurements can contribute to solving problems of forecasting waves and preventing emergencies from the impact of waves on offshore platforms, hydraulic structures and other marine objects. The measuring unit includes triads of micromechanical gyroscopes, accelerometers and a three-component magnetometer. The device description, results of laboratory researches of its characteristics, bench and full-scale tests are offered. It is noted that in order to assess the metrological characteristics, comparative tests of the wave buoy “Storm” were conducted with a standard string wave measuring device installed on the offshore platform. It is shown that the characteristics and capabilities of the developed wave buoy allow to oust foreign devices from the domestic market.