

УДК 532.591

А.А.Кищенко¹

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО УРОВНЕМЕРА

Исследована возможность применения в морских прибрежных измерениях ветрового волнения результатов наблюдений гидростатического мареографа, обработка которых проводится на основе спектральной технологии, созданной для условий открытого моря. Работа основана на сопоставлении результатов длительных натуральных синхронных наблюдений ветрового волнения, проведенных с помощью установленных на различных глубинах гидростатических мареографов и данных речного контактного волнографа. Автором работы предложен и апробирован вариант улучшения используемой спектральной технологии обработки наблюдений гидростатического мареографа, учитывающий специфику прибрежных волновых процессов на поверхности моря. Отклонения значений параметров волнения относительно показаний поверхностного волнографа составили не более 10%.

Наблюдение морского ветрового волнения в прибрежной зоне с помощью гидростатического мареографа, установленного с помощью свайного основания на глубине, превышающей амплитуду волн на поверхности моря, является наименее затратным и наиболее простым в практической реализации способом постановки таких наблюдений. Улучшение технологии обработки таких наблюдений представляет несомненный научный и практический интерес.

Спектральная технология обработки сигналов гидростатического мареографа [1] основывается на теории ветрового волнения [2, 3], созданной для условий открытого моря, в которой волнение на поверхности моря представляется в виде затухающего с глубиной гармонического колебания. Эта технология успешно используется ведущими океанографическими фирмами «Sea-bird Electronics», «InterOcean systems» и включает следующие действия:

- из обрабатываемой последовательности исключают постоянную составляющую (средняя глубина уровнемера);
- последовательность раскладывают на гармонические составляющие преобразованием Фурье;
- определяют максимальную и минимальную частоты, которые используются в расчетах;
- вносят поправку к коэффициентам преобразования Фурье в зависимости от глубины и частоты;
- производят обратное преобразование Фурье;
- рассчитывают параметры волнения по восстановленной волнограмме на поверхности моря.

Для реализации этой технологии было разработано программное обеспечение с использованием преобразования Фурье [2, 3] и характеристик затухания, приведенных в [1]. Расчет параметров волнения (средняя высота волн, средний период) осуществлялся согласно рекомендациям [4].

¹ Государственное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения (Обнинск)
© Кищенко А.А., 2009

В работе использовались результаты синхронных измерений, выполненных гидростатическим мареографом ГМУ-2М и речным контактным волнографом (оба прибора разработаны ГУ НПО «Тайфун»).

Измерители гидрологические ГМУ-2 (№ 21088-04 в Государственном реестре средств измерений) предназначены для измерений гидростатического давления (уровня) и температуры воды в прибрежной зоне морей.

Измерители имеют модификацию ГМУ-2М для измерений медленно изменяющихся давлений с частотой не более 1 Гц и амплитудой не более 0.1 МПа (режим волнографа).

Диапазон измерений гидростатического давления (Р), гПа.....от 50 до 2500;
погрешность – 0,2 %.

Диапазон измерений температуры, °С.....от - 5 до + 40;
погрешность – 0,05 °С.

Испытания проводились в районе г.Геленджик (Южное отделение ИО РАН) в период с марта по декабрь 2007 г. Были выполнены две серии наблюдений на горизонтах 2 и 3 м. В результате волнового нагона (осенний шторм 2007 года) средний уровень воды в измеряемой точке поднимался более чем на 1 м, в этот момент были получены данные для уровня 4 м. В каждой серии наблюдений снималось более 200 массивов измерений. Каждый массив включает результаты 10-минутных измерений, проводимых с частотой 4 Гц. Из всех полученных массивов отбирались наиболее показательные – с наибольшей амплитудой волны. Измерения, произведенные в периоды «штиля», не рассматривались. После этого отобранные массивы синхронизировались относительно контактного волнографа по фазе.

Всего на горизонтах 2 и 3 м было отобрано по 49 массивов данных, а на горизонте 4 м – 3 массива. Каждый массив включает результаты 10-минутных измерений уровня с частотой 4 Гц.

Полученные массивы наблюдений были обработаны в соответствии с приведенным выше алгоритмом и рассчитаны параметры ветрового волнения. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики отклонений параметров волнения по данным уровнемера относительно данных контактного волнографа

Глубина установки ГМУ-2М, м	Средняя высота волн, %		Средний период волн, %	
	среднее значение отклонения	дисперсия	среднее значение отклонения	дисперсия
2	-27,2	5,3	1,8	9,2
3	-31,3	6,0	4,8	9,7
4	-12,8	1,0	0,6	2,3

Полученные результаты не обеспечивает требуемых характеристик по погрешности расчета параметров волнения (не более 10% [5, 6]), что, вероятно, вызвано особенностями динамики ветрового волнения в прибрежной зоне конкретного географического места.

На основе анализа полученных результатов было произведено уточнение алгоритма расчета параметров волнения. Для этого было доработано программное обеспечение таким образом, чтобы после каждого внесенного изменения происходила автоматическая обработка всех массивов данных, а полученные отклонения от показаний контактного волнографа складывались в единую оценку отклонения всех массивов. Таким образом, подбирая коэффициенты затухания (КЗ), производился поиск минимальной оценки отклонения всех массивов. Одновременно производился анализ выборочных волнограмм, сильно выделяющихся из основного ряда для уточнения алгоритма:

Исследование алгоритма расчета параметров...

- определение максимальной частоты, участвующей в расчетах для каждой волнограммы в отдельности;
- корректировка алгоритма интерполяции, таблиц КЗ;
- определение максимального коэффициента усиления;
- корректировка фазы для каждой составляющей.

Результаты вычислений статистических характеристик по уточненному алгоритму приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики, вычисленные по уточненному алгоритму

Глубина установки ГМУ-2М, м	Средняя высота волн, %		Средний период волн, %	
	Среднее значение отклонения	Среднее отклонение от среднего значения	Среднее значение отклонения	Среднее отклонение от среднего значения
2	-3,2	7,0	-0,8	7,5
3	-8,6	8,0	2,0	7,3
4	-15,6	0,2	-1,4	3,2

На рис. 1-3 приведены три сравнительные волнограммы контактного волнографа (сплошная линия) и уровнемера ГМУ-2М (точки). По горизонтальной оси - отсчеты (интервал 0.25 с), по вертикальной оси – сантиметры. Первая волнограмма отображает исходные данные контактного волнографа и гидростатического уровнемера без каких-либо обработок. На второй волнограмме сравнивается исходная волнограмма контактного уровнемера с волнограммой гидростатического уровнемера, обработанной по алгоритму и с коэффициентами усиления, предложенными фирмой «Sea-bird Electronics» в [1]. На третьей волнограмме сравниваются показания контактного уровнемера и показания гидростатического уровнемера, обработанные по доработанному алгоритму и с измененными коэффициентами усиления гармонических составляющих.

На рис. 1 (первая волнограмма) уже на глубине 2 м проявляется эффект фильтрации коротких волн (чем меньше период волны, тем сильнее затухание). На второй волнограмме после обработки стандартным алгоритмом, описанным в [1], затухание коротких волн было компенсировано, но это компенсация недостаточна (происходит занижение среднего уровня волнения – см.табл. 1). На третьей волнограмме восстановленная по доработанному алгоритму волнограмма ГМУ-2 практически полностью повторяет волнограмму контактного волнографа, за исключением очень коротких волн, затухание которых на горизонте 2 м слишком большое.

На рис. 2, волнограмма без обработки, можно заметить, что с увеличением глубины погружения прибора всего на 1 м резко увеличивается эффект фильтрации коротких волн. Так же, на волнограммах можно заметить небольшой (порядка 1–2 отсчетов, это около 0.5 с) фазовый сдвиг, это обусловлено не совсем точным позиционированием волнограмм в программе расчетов, что на точность расчетов не влияет.

На второй волнограмме, которая отображает восстановленную волнограмму по стандартному алгоритму, можно видеть, что недостаток компенсации затухания коротких волн, по сравнению с горизонтом 2 м, проявил себя еще значительнее.

На третьей волнограмме, можно отметить, что увеличение глубины не внесло значительных ухудшений на качество восстановления волнограммы. Обработанная по доработанному алгоритму волнограмма гидростатического уровнемера, на горизонте 3 м, практически полностью повторяет волнограмму контактного волнографа.

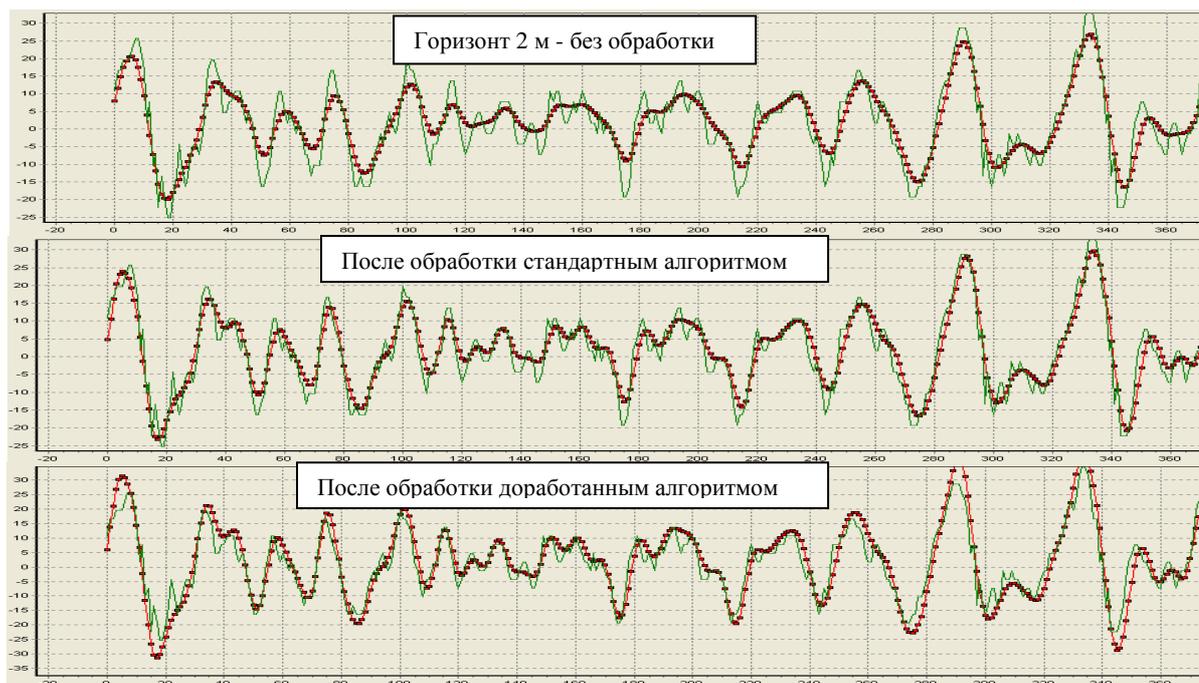


Рис. 1. Горизонт 2 м (волнограммы контактного волнографа (сплошная линия) и уровнемера ГМУ-2М (точки). По горизонтальной оси - отсчеты (интервал 0.25 с), по вертикальной оси – сантиметры)

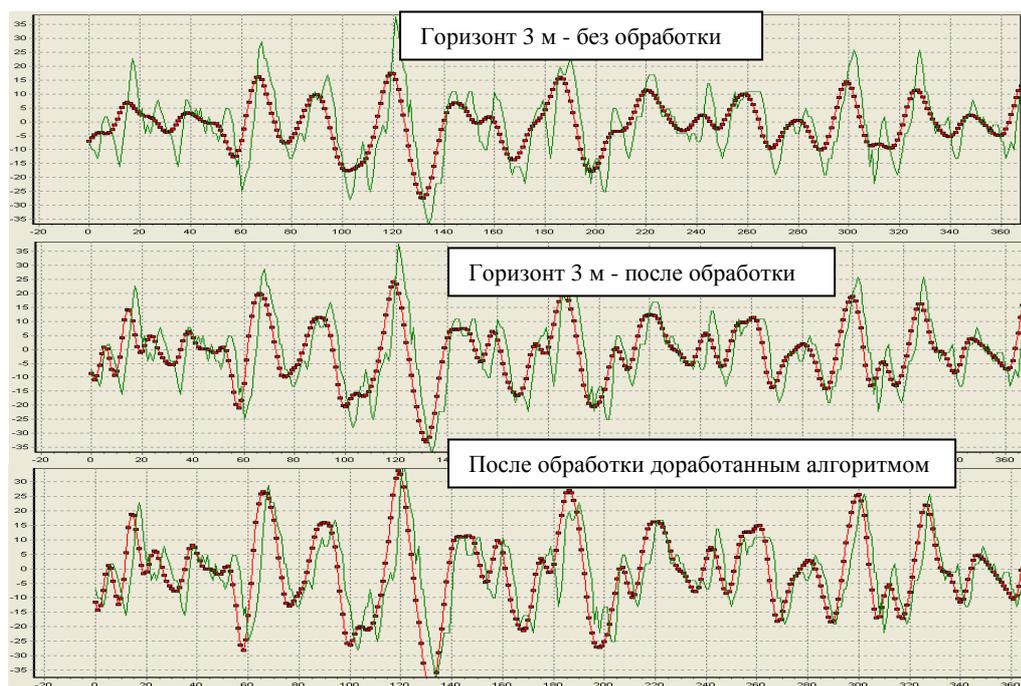


Рис. 2. Горизонт 3 м (волнограммы контактного волнографа (сплошная линия) и уровнемера ГМУ-2М (точки). По горизонтальной оси - отсчеты (интервал 0.25 с), по вертикальной оси – сантиметры)

На рис. 3 видно, что контактный волнограф зафиксировал довольно большое волнение, размах некоторых волн превышает 2 м. Также стоит обратить внимание, что на задней стороне волны (помечено стрелкой) появились зазубрины, что, вероятнее всего, связано со стеканием воды на речном контактном волнографе. Из-за ограниченной ско-

Исследование алгоритма расчета параметров...

рости стекания воды на контактном волнографе, на волнограмме можно наблюдать, что сбегаящая часть волны имеет определенный уклон, крутизна которого постоянна, за счет чего появляются динамические искажения (рис. 4).

На второй волнограмме можно отметить, что стандартный алгоритм проявил себя как обычно: в тех места, где происходят резкие всплески (т.е. на более коротких волнах) компенсация недостаточная.

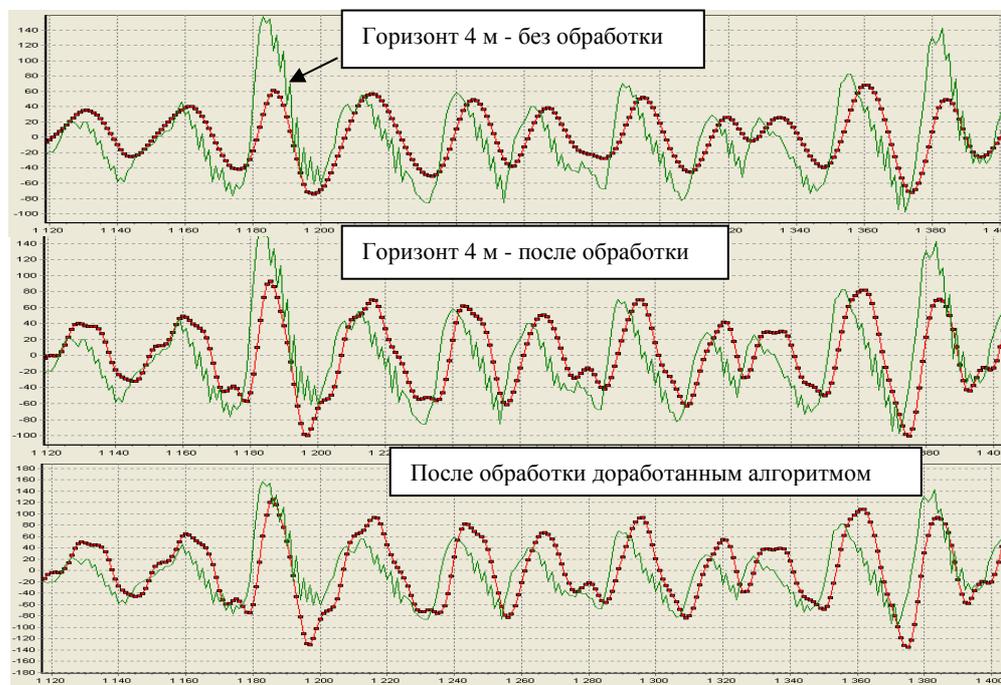


Рис. 3. Горизонт 4 м - (волнограммы контактного волнографа (сплошная линия) и уровнемера ГМУ-2М (точки). По горизонтальной оси - отсчеты (интервал 0.25 с), по вертикальной оси – сантиметры)

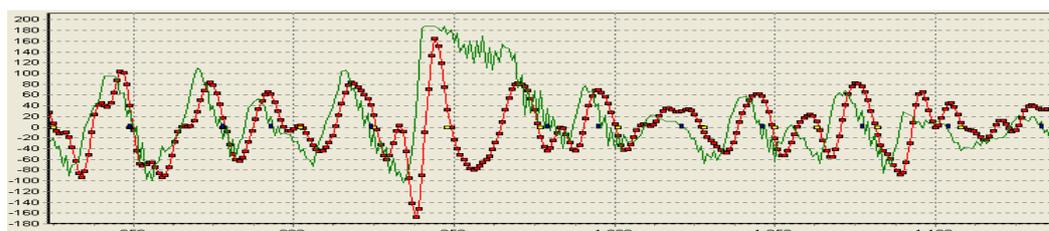


Рис. 4. Волнограммы (условный горизонт 4 м) контактного волнографа (сплошная линия) и уровнемера ГМУ-2М (точки). По горизонтальной оси - отсчеты (интервал 0.25 с), по вертикальной оси – сантиметры

На рис. 4 видно, что при амплитуде волны больше 1,5 м и периоде меньше 5 с измерения контактным волнографом не всегда корректны из-за динамических искажений.

Рассмотрим подробнее алгоритм обработки исходной волнограммы гидростатического уровнемера для получения волнограммы на поверхности моря.

Основную роль в расчетах играют КЗ, именно они влияют на конечный вид восстановленной волнограммы. Зная среднюю глубину уровнемера на каждой обрабатываемой волнограмме, рассчитываются КЗ для каждой гармонической составляющей. Зная КЗ, получаем обратную ей величину – коэффициент усиления и соответствующим образом вносим поправки к коэффициентам преобразования Фурье.

Далее рассмотрим, как меняются КЗ в зависимости от глубины.

Фирма «Sea-bird Electronics» в [1] предоставила эмпирические формулы для расчетов КЗ, а также таблицу с вычисленными по ее формулам КЗ для разных глубин. В разработанном программном обеспечении использовалась таблица с КЗ, а для расчета промежуточных значений использовалась интерполяция второго порядка. Для того чтобы было понятнее, как КЗ влияют на восстановление волнограммы, рассмотрим следующий пример. Если в таблице используемых КЗ поставить на всех частотах для всех глубин единицы, то после расчетов восстановленная волнограмма будет идентична исходной, т.е. восстановления происходить не будет. С другой стороны, если все КЗ будут равны 1, а один какой-либо 2, то в восстановленной волнограмме, произойдет усиление той частоты, для которой КЗ равен 2, а остальные частоты останутся без изменения. Или, если все КЗ будут равны 0, а один будет равен 1, то после восстановления волнограмма будет в виде простого синусоидального сигнала с частотой, соответствующей КЗ равного 1, а амплитуда и фаза останутся такими же, как и в исходной волнограмме.

На рис. 5 приведены графики КЗ для разных горизонтов (зависимости коэффициента усиления гармонической составляющей преобразования Фурье от ее номера). По горизонтальной оси - номер составляющей, по вертикальной - коэффициент усиления для данной частоты. Для того чтобы оценить, как номер гармонических составляющих отображает период соответствующих частот, нужно 1024 (количество точек, участвующих в расчетах - 4096, умноженных на период дискретизации 0.25 с) разделить на номер гармонической составляющей. Из графиков видно, как быстро затухают коротковолновые колебания с частотой.

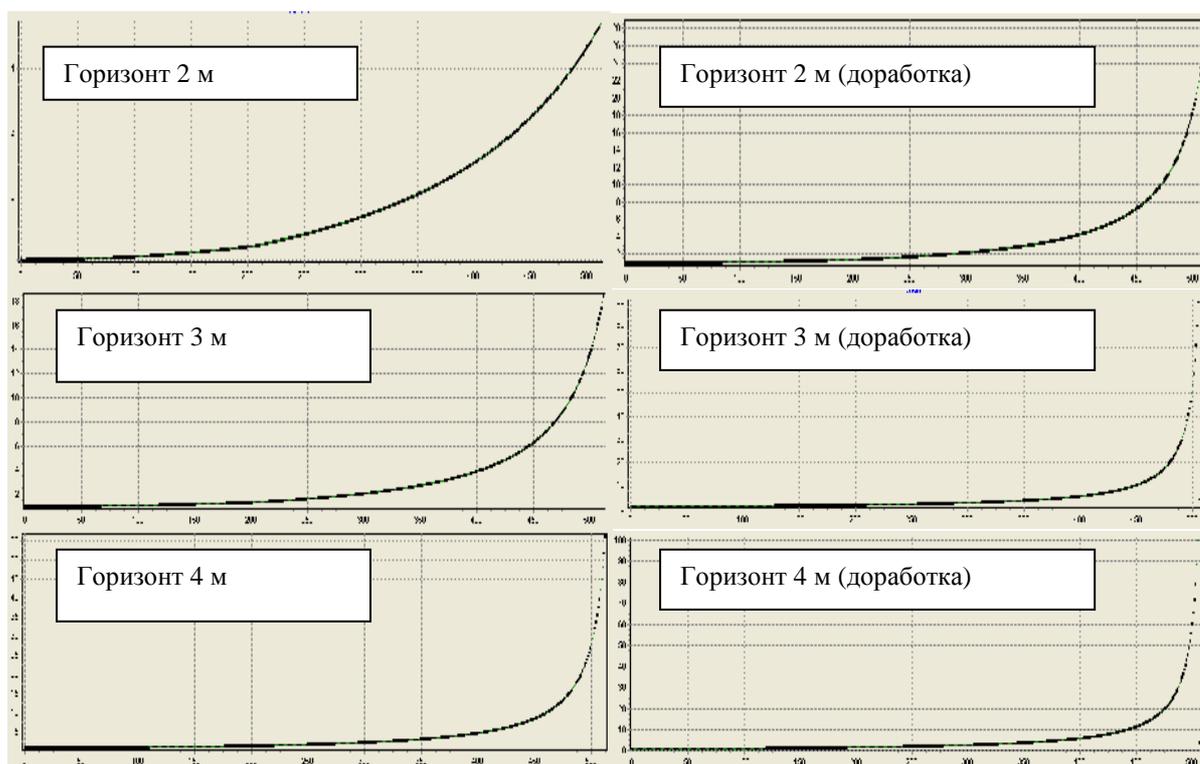


Рис. 5. Графики коэффициентов затухания (слева по данным “Sea-Bird Electronics”, справа после проведенной доработки)

Если сравнить графики КЗ, предложенных фирмой “Sea-Bird Electronics”, с графиками коэффициентов, которые были подобраны опытным путем, то можно заметить, что на последних коэффициент усиления на коротких волнах возрастает гораздо резче. Еще

можно заметить, что на горизонтах 2 и особенно 3 м волны с периодом менее 2 с затухают настолько сильно, что восстановить их становится невозможным – коэффициент больше 100.

Вероятно, что данные различия в КЗ вызваны тем, что фирма “Sea-Bird Electronics” предоставляет свои результаты расчетов КЗ для открытого моря, а данные наблюдения проводились в прибрежной зоне, в которой происходящие процессы отличны от процессов открытого моря.

Таким образом, уточненный алгоритм может быть использован как базовый для расчета параметров ветрового волнения в акватории Черного моря.

По результатам выполненных работ планируется продолжить исследования алгоритма на базе массивов данных, полученных в разных географических местах и с более широким диапазоном амплитуд и периодов волнений для определения необходимости корректировки КЗ в каждом месте постановки.

В связи с тем, что возможности контактного волнографа ограничены по динамическим характеристикам и конструктивной надежности, в 2008 г. совместно с ГОИН будут проведены работы по определению КЗ на основе массивов синхронных измерений, выполненных двумя гидростатическими уровнемерами ГМУ-2М на разных горизонтах установки.

* * *

Полученные результаты демонстрируют целесообразность использования в условиях прибрежных морских наблюдений для регистрации параметров ветрового волнения данных гидростатических мареографов, обработка которых осуществляется с помощью спектральной технологии [1].

Предложенная автором доработка этой технологии, связанная как с улучшением её алгоритма, так и с уточнением коэффициентов затухания, позволяет получать на её основе в обработке прибрежных морских наблюдений характеристики волнения, удовлетворяющие по точности требованиям ОТТ [7] Росгидромета и ВМО [6].

Литература

1. SBE 26plus SEAGAUGE. Wave and Tide Recorder. User's Manual. Sea-Bird Electronics, USA (http://www.seabird.com/pdf_documents/manuals/26plus_010.pdf).
2. Глуховский Б.Х. Исследование ветрового волнения. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 283 с.
3. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 375 с.
4. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток: М.: Радио и Связь, 1985.
5. Steven W. Smith. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, Second Edition, 1999. California Technical Publishing. P.O. Box 502407. San Diego. CA 92150 (<http://www.analog.com>).
6. Руководство по анализу и прогнозированию волнения. ВМО-№702. Второе издание, 1998.
7. Рекомендации. Наземные сетевые средства измерений гидрометеорологического назначения. Общие технические требования. СПб: Гидрометеиздат, 2000.
8. О составе, точности и пространственно-временном разрешении информации, необходимой для гидрометеорологического обеспечения народного хозяйства и службы гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1975.

Статья поступила в редакцию 28.07.2008 г.