

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ МОРСКОЙ ЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ МАРЕОГРАФОВ

Соколов В.А., Кищенко А.А.

ФГУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

adm@oceanography.ru

В работе проводится апробация двух методов наблюдений ветрового волнения в прибрежной морской зоне, использующих в качестве регистраторов волнения гидростатические мареографы (ГМ). Оба метода базируются на применимости теории волн малой амплитуды в прибрежной морской зоне и спектральной технологии обработки полученных наблюдений. Первый метод предполагает использование одного ГМ и привлечение к обработке наблюдений универсальной эмпирической информации, полученной в удалении от прибрежной зоны. Второй разработан авторами специально для условий прибрежной зоны, где вместо дополнительной эмпирической информации использует синхронные наблюдения второго ГМ, размещённого на одной вертикали с первым. Результаты сопоставления контактных измерений волнения и результатов обработки ГМ наблюдений показали, что оба метода дают хорошие результаты и могут быть рекомендованы для практических измерений ветровых волн в прибрежной морской зоне, однако предложенный авторами метод постановки и обработки ГМ наблюдений даёт лучшие показатели.

Цель работы. Цель работы заключалась в экспериментальной проверке возможности использования линейной теории волн малой амплитуды в прибрежной морской зоне для определения характеристик ветрового волнения [1-4] и оценке эффективности двух методов использования ГМ в прибрежной зоне для расчётов по их данным характеристик волнения морской поверхности. Первый метод разработан и используется ведущими западными приборостроительными фирмами «Sea-bird Electronics» и «Inter Ocean systems» [5] для определения с помощью ГМ ветрового волнения в условиях открытых морских акваторий, второй разработан авторами этой статьи специально для применения ГМ в определении характеристик волнения морской поверхности в прибрежной морской зоне.

Описание системы постановки натуральных наблюдений. В ноябре 2007 г. в прибрежной части моря на вертикально ориентированной платформе, расположенной за пределами зоны волнообрушения на конце пирса «Голубой бухты» ЮО ИОРАН (глубина моря в месте постановки составляла около семи метров и на удалении от берега около ста сорока метров), на двух фиксированных горизонтах z_1 и z_2 в были установлены вдоль одной вертикали два синхронизированных по времени ГМ. Точность регистрации ГМ пульсаций давления составляла $0.2 \% P$, где P – давление столба жидкости на горизонте наблюдений – z , определяемое соотношением $P = \rho g z$, где g – ускорение силы тяжести, ρ – плотность морской воды. В качестве измерителей волнения использовались два гидростатических мареографа ГМУ-2 выпускаемых ЦКБ ГМП (НПО «Тайфун») с капиллярным компенсатором атмосферного давления [5].

Рядом на этой же платформе на расстоянии 15 см по горизонтали размещался вертикально установленный контактный измеритель волнения – КИВ. Он представлял собой вертикально установленную пластиковую трубу, на которой с интервалом 3 см по вертикали располагались выходы электроконтактов, сделанных из нержавеющей металла. К каждому из этих контактов внутри этой трубы подводился свой проводник. Все следующие от электроконтактов 200 проводников подводились к расположенному наверху коммуникационному блоку. Рядом с электроконтактами на той же пластиковой трубе располагалась сделанная из нержавеющей металла шина. На электроконтакты и шину подавалось электрическое напряжение разной полярности. В случае, когда морская

вода замыкала очередной контакт на шину, на нём в регистрационном блоке фиксировался скачок падения электрического сопротивления. Коммуникационный блок фиксировал этот скачок, определяя, таким образом, изменяемое во времени положение морской поверхности.

Частота измерений всех приборов составляла 4 гц. Длительность ежечасных непрерывных наблюдений составляла 17 минут 4 секунды, за которые проводилось 4096 измерений. Наблюдения осуществлялись на протяжении 10 суток. Приёмная аппаратура регистрации и обработки наблюдений располагалась в лабораторном корпусе на пирсе, к которому крепились вертикально расположенная платформа с закреплёнными на ней измерительными комплексами.

Работы финансировались на средства программы ЕСИМО, научное и реальное руководство работ по постановке и реализации этих наблюдений осуществлял автор этой работы В.А. Соколов, А.А. Кищенко принимал участие в постановке и обработке наблюдений.

Описание используемых методов обработки наблюдений. Обработка пульсаций давления проводилась в приближении теории волн малой амплитуды [1-4]. В ней связь колебаний гармонической волны на поверхности моря периода - τ , высотой волны - h_τ с возбуждаемыми этой волной на горизонте - z волновыми колебаниями давления того же периода, но другой высоты - $h(z)_\tau$ описывается соотношением:

$$h_\tau = h(z)_\tau \exp\left(\beta \frac{z}{g\tau^2}\right), \quad (1)$$

где β - декремент затухания, а связь высоты волны давления $h(z)_\tau$ с колебаниями (пульсациями) измеряемого ГМ давления воды - $P(z)_\tau$ на горизонте z , определяется соотношением:

$$h(z)_\tau = \frac{P(z)_\tau}{\rho g},$$

В случае глубокого моря, когда длина ветровой волны λ меньше глубины моря H величина декремента затухания определяется соотношением $\beta = 4\pi^2$. В ситуации, когда λ равна или же превосходит H , декремент затухания β зависит от трёх характеристик: глубины моря в точке наблюдений - H , глубины расположения ГМ - z и периода волны - τ .

Спектральный метод. В первом методе, предлагаемым упомянутыми выше западными фирмами, который далее назовём «Спектральным методом» ГМ размещается в удалённом от дна поверхностном слое моря, но не глубже горизонта 20 м., где он фиксирует колебания давления - P , вызванные ветровым волнением. По полученным с помощью ГМ волнограмме пульсациям давления P рассчитывается их спектр. Далее потехнологии [5], основанной на результатах обработки массовых наблюдений за пределами береговой зоны, по заданным значениям величин H , τ и z проводится расчёт декремента затухания β для каждой спектральной гармоник. После, на основе формулы (1), осуществляется расчёт спектра волн на поверхности моря по спектру пульсаций давления P на горизонте наблюдений z . Далее, обратным преобразованием Фурье [7], восстанавливается волнограмма колебаний морской поверхности [5].

В качестве эталона, по отношению к которому определялся приоритет полученных результатов обработки наблюдений, использовались синхронные наблюдения волнения, полученные с помощью описанного выше КИВ. Для уменьшения роли имеющихся в них помех, связанных со стеканием воды с контактов КИВ и отражённых от стоек пирса брызг волн, проводилась спектральная фильтрация этих помех. Она реализовывалась

следующим образом. Делалось прямое преобразование Фурье волнограммы КИВ. Далее в полученных спектральных составляющих приравнялись нулю те компоненты спектра, период которых был менее 2.5 секунд, что соответствовало максимальному периоду времени стекания воды с контактов волнографа. Затем делалось обратное преобразование Фурье – восстановление отфильтрованной волнограммы.

Спектрально-дифференциальный метод. Отличие разработанного авторами данной работы спектрально-дифференциального метода от описанного выше спектрального метода состоит в способе определения декремента затухания гармонического колебания - β . В первом случае эта характеристика определялась по данным априорной информации, адекватность применимости которой к конкретной точке береговых наблюдений принималась в бездоказательной постулируемой форме. В предлагаемом методе расчёт β проводился без привлечения этих данных на основе совместного дифференциального анализа пульсаций давления, фиксируемого на разных горизонтах двумя расположенными на одной вертикали ГМ.

Из анализа формулы (1) следует, что в случае наличия не одного, а двух ГМ, размещённых на одной вертикали на горизонтах z_1 и z_2 , значения декремента β (после логарифмирования (1)) можно представить в виде:

$$\beta = \tau^2 g \frac{\ln h(z_1)_\tau - \ln h(z_2)_\tau}{z_2 - z_1}. \quad (2)$$

Подстановка выражения (2) в (1) преобразует последнюю формулу к виду:

$$h_\tau = h(z)_\tau \exp\left(\frac{z}{z_2 - z_1} (\ln(h(z_1)_\tau) - \ln(h(z_2)_\tau))\right) \quad (3)$$

Формула (3) справедлива для фиксированного периода τ и позволяет рассчитать амплитуду этого гармонического колебания на поверхности моря по известным значениям амплитуд этой гармоники на текущем горизонте z и значениям аналогичных амплитуд на горизонтах z_1 и z_2 . Из анализа (3) следует, что расчёты h_τ , проведённые при значениях $z = z_1, z_2$, тождественны друг другу.

Эксперименты показали, что несмотря на простоту полученной формулы (3), использование её в практических расчётах сопряжено со значительными сложностями. Последнее связано с тем, что из-за наличия в наблюдениях пульсаций давления случайных ошибок в расчётах амплитуд компонент спектра $h(z_1)_\tau$, $h(z_2)_\tau$ в определении значений β могли появляться значимые погрешности. Для подавления этих ошибок анализируемые волнограммы пульсаций давления, измеряемые ГМ, предварительно подвергались процедуре скользящего сглаживания прямоугольным фильтром с окном этого фильтра 3 секунды [7].

Полученные результаты и их анализ. При проведении изыскательских работ на морских побережьях требуется знать оценки средних значений высот и периодов волн, а так же оценки максимальных значений измеренных высот волн. Поэтому в данной работе сопоставление результатов обработки данных ГМ с принимаемыми за эталон данными обработки наблюдений КИИ осуществлялось по результатам сопоставления расчётов этих трёх характеристик.

В таблице 1 приведены выраженные в процентах характеристики:

$$\Delta Q\% = \frac{\sigma(Q)}{Q_{эм}} 100\%, \quad (6)$$

где в знаменателе - среднее значение эталонной величины $Q_{эт}$, обозначаемой как $\overline{Q_{эм}}$, а в числителе - среднеквадратичное отклонение той же характеристики, рассчитанное

относительно $\overline{Q_{эм}}$, где Q принимает значение средней высоты волны -H, среднего периода - τ и максимальной высоты волны за период наблюдений - ζ ,

Таблица 1. Рассчитанные величины средней высоты, периода и максимальной высоты по данным наблюдений ГМ.

Спектральный метод			Спектрально-дифференциальный метод			Спектральный метод - среднее по двум горизонтам			Среднее по всем вариантам расчётов					
ГМ на горизонте 2 м.		ГМ на горизонте 3 м												
$\Delta H\%$	$\Delta \tau\%$	$\Delta \zeta\%$	$\Delta H\%$	$\Delta \tau\%$	$\Delta \zeta\%$	$\Delta H\%$	$\Delta \tau\%$	$\Delta \zeta\%$	$\Delta H\%$	$\Delta \tau\%$	$\Delta \zeta\%$	$\Delta H\%$	$\Delta \tau\%$	$\Delta \zeta\%$
7,37	8,86	14,7	7,29	10,07	22,7	6,07	8,78	10,6	6,55	9,22	17,5	5,16	8,82	12,5

Выводы. Впервые в прибрежной морской зоне по данным длительных синхронных натурных наблюдений проведено сопоставление результатов обработки прямых наблюдений над волнением морской поверхности с расчётами аналогичных характеристик, полученным по результатам обработки данных ГМ. До сих пор такие сопоставления делались только по данным, полученным в условиях открытых морских акваторий [6].

Из представленных в работе результатов следует, что применении линейной теории ветровых волн в прибрежной морской зоне для обработки ГМ наблюдений вполне целесообразно, поскольку оба анализируемых метода дали вполне удовлетворительные результаты. По этой причине эти оба рассмотренных метода постановки и обработки ГМ наблюдений можно рекомендовать к практическому использованию для определения средних параметров волнения в прибрежной морской зоне.

Разработанный авторами спектрально дифференциальный метод постановки и обработки наблюдений имеет по всем трём анализируемым параметрам лучшие показатели. Кроме того, его использование не связано с привлечением к расчётам волнения дополнительной априорной информации, применимость которой к точке наблюдений не доказывается, а постулируется.

Авторы выражают благодарность сотруднику ГОИНа - И.М. Кабатченко за полезные консультации и советы, которые он давал авторам этой работы. Мы так же выражаем большую благодарность сотрудникам ЦКБ ГМП (НПО «Тайфун»), работающим под руководством Н.М. Скурихина, за активное участие в получении материалов экспедиционных наблюдений, используемых в этой работе.

Литература

1. Глуховский Б.Х. Исследование затуханий волн с глубиной на основе корреляционного анализа. Метеорология и гидрология. 1961, №11, с. 20-30.
2. Глуховский Б.Х. Исследование ветрового волнения. Л. Гидрометеиздат, 1966 г., 283 с.
3. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л. Гидрометеиздат, 1976, 375 с.
4. Bishop C.N., Donelan M.A. Measuring waves with pressure transducers // Coastal Engineering. 1987. №11. P. 309-328.
5. Сайт ЦКБ
6. [www.seabird.com;support](http://www.seabird.com/support)
7. Худсон Д. Статистика для физиков. Изд. «Мир», М, 1970 г.