

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В РАЙОНЕ о. САХАЛИН¹

К. И. Кузнецов, И. С. Костенко, А. В. Юдин, В. С. Зарочинцев

Приведены данные обширного эксперимента по регистрации поверхностного волнения на шельфе о. Сахалин в районе м. Острый. Описаны проблемы регистрации anomalно больших волн с помощью датчиков придонного давления и способы решения этих проблем. Проведен общий анализ записей на встречаемость anomalно больших волн.

Ключевые слова: автономный регистратор волнения, anomalно большие волны, волнограммы, вычислительные эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в связи с развитием средств океанотехники по добыче нефти и газа в шельфовой зоне океанов и морей большую важность приобретает информация об экстремальных значениях ветра и волн. Это связано с тем, что буровые установки и нефтяные платформы должны эксплуатироваться при любых погодных условиях. Занижение расчетных значений элементов волн уменьшает безопасность сооружений, а завышение удорожает стоимость их строительства. Практика показывает, что максимальные значения высот волн, оцениваемых как возможные один раз в 50 или 100 лет, отмечались уже в первые 10–20 лет эксплуатации сооружения. Это может быть связано с недостаточной достоверностью расчета высоты волн. Кроме того, в большинстве инженерных расчетов не уделяется должного внимания такому явлению, как anomalно большие волны.

Под anomalно большими волнами (волнами-убийцами) понимаются волны большой амплитуды, неожиданно появляющиеся на морской поверхности как бы из ниоткуда и так же быстро исчезающие. Долгое время они являлись предметом морского фольклора. За последние 30–50 лет волны-убийцы перешли из разряда фольклора в реальность, и их существование после получения инструментальных данных можно считать доказанным. Такие волны представляют опасность для судов и морских сооружений: конструкция судна, встретившегося с такой волной, может не выдержать давления обрушившейся на него воды (до 980 кПа; 9,7 атм.), и судно затонет за считанные минуты. В инженерных приложениях часто под волной-убийцей понимается большой гребень, который сопровождается неглубокой, но протяженной впадиной, находящейся впереди или позади огромной волны [4, 8].

¹ Работа выполнена в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы, а также при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216-а, 11-05-92002-ННС_а), МК-4378.2011.5, СП-1763.2013.5.

Основным источником данных о волнении моря в районе побережья о. Сахалин являются данные попутных судовых наблюдений, а также визуальные наблюдения ветрового волнения, получаемые на береговых гидрометеорологических станциях. В настоящее время по этому региону доступны данные о значимых высотах волн, получаемых с помощью специальных спутников. Открытое хранилище AVISO содержит ежедневные отчеты о значимой высоте волны, рассчитанной по спутниковым снимкам, с разрешением 90 км. Однако они не дают полной информации о природе возникновения данного явления. Измерений, полученных с применением высокочастотных волнографов до последнего времени было крайне мало [2], поэтому не представлялось возможным с достаточной точностью оценить основные статистические характеристики волнения, не говоря уже об изучении такого явления, как anomalно большие волны или волны-убийцы.

Волны-убийцы как процесс исследован относительно мало, не до конца понятны многие аспекты этого процесса, причины и условия их образования, частота встречаемости подобных волн в различных частях океана и др. [1, 9, 13]. В данной работе рассматриваются вопросы регистрации датчиком придонного давления высокочастотного поверхностного волнения, а также частота появления anomalных волн в открытом море. Анализ проводится на примере данных, полученных в результате инструментальных наблюдений волнения на шельфе о. Сахалин в районе м. Острый с 14.07.2006 по 04.08.2006 г. (рис. 1).

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

В качестве основного средства инструментального измерения волнения использовался автономный регистратор волнения (АРВ-К12), схематично показанный на рис. 2. Данный прибор является уникальным оборудованием, разрабатываемым с 2006 г. ООО СКТБ “ЭлПА” (г. Углич) совместно с сотрудниками кафедры “Прикладная математика” Нижегородского государственного технического университета. Прибор выполнен в кор-

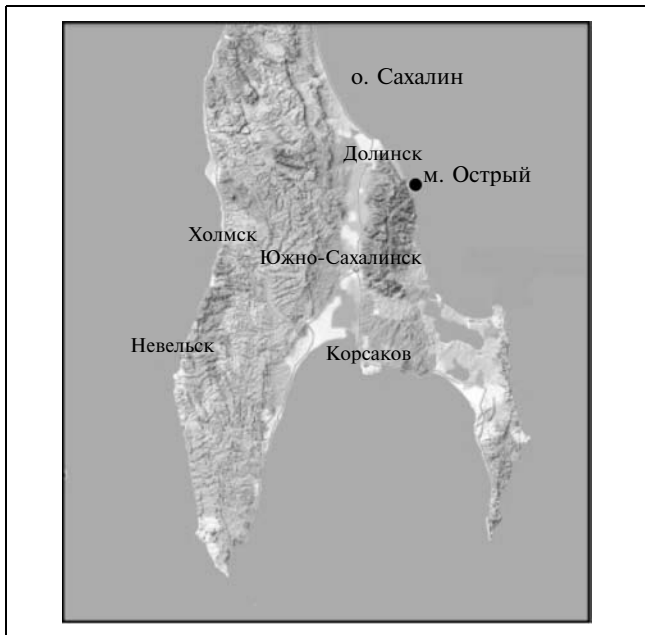


Рис. 1. Местоположение района проведения инструментальных наблюдений волнения моря на мысе Острый, о. Сахалин, 2006 г.

пусе из нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму. Датчик устанавливается на якорь. В конструкции прибора не предусмотрено каких-либо автоматизированных средств подъема датчика на поверхность после проведения эксперимента. Для подъема используется трос необходимой длины, прикрепленный к якорю и прибору с таким расчетом, что поплавков, находящийся на другом его конце, после погружения датчика останется на поверхности вне зависимости от штормового нагона или уровня прилива.

В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы, так как пьезорезонансные элементы имеют малую температурную зависимость и высокую точность. Сигнал с автогенератора, к которому подключены первичные преобразователи, подается на вход регистратора. Регистратор реализован на базе микроконтроллера MSP430 фирмы Texas Instruments (рис. 3).

Съем частоты с автогенератора производится посредством счетчика-таймера микроконтроллера. Данные на регистраторе сохраняются в полупроводниковой энергонезависимой памяти. Значения частоты автогенератора записываются в энергонезависимую память вместе с показаниями системных часов, которые синхронизируются на всех датчиках непосредственно перед постановкой. Полный объем памяти на регистраторе составляет 64 Мб, которого достаточно для непрерывной регистрации событий в течение 6 мес. В конструкции регистратора применены элементы питания Delta (12 В). Емкость батарей питания такова, что при текущем энергопотреблении регистратора возможно наращивание как емкости памяти, так и расширение функциональности путем добавления первичных преобразователей других физических величин.

Основные технические характеристики регистратора

Общий ток потребления, мА, не более	12
Относительная погрешность, %	0,06
Разрешающая способность, мм вод. столба	0,3
Частота дискретизации, с	1..60
Диапазон рабочих температур, °С	-6..40
Интервал рабочих давлений, мм вод. столба	0,5..100
Масса, кг:	
на воздухе	35
в воде	25
Время автономной работы (при максимальной частоте дискретизации), сут.	180

Для передачи данных с датчиков на персональный компьютер используется последовательный интерфейс

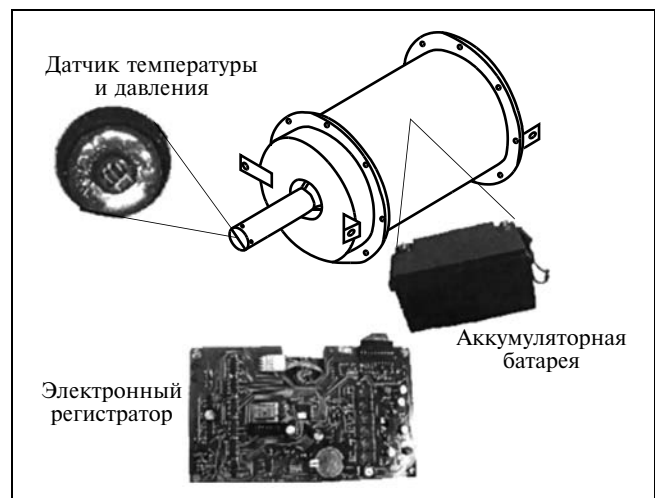


Рис. 2. Конструкция автономного регистратора придонного давления

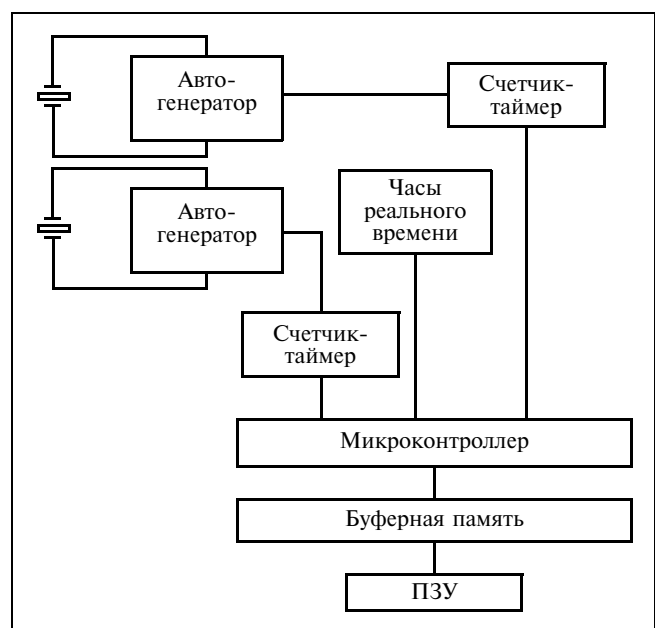


Рис. 3. Структурная схема регистратора

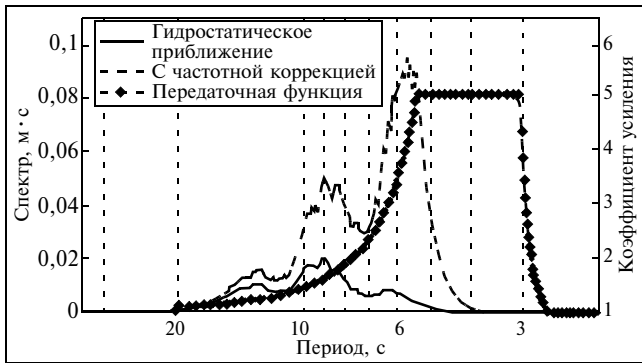


Рис. 4. Пример передачной функции для глубины 16 м и усредненные спектры рассчитанного уровня моря по формуле (1) и в гидростатическом приближении

RS-232. Девиации частоты автогенератора подвергаются первичной обработке (преобразованию в значения температуры и давления воды) [6].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ ПО ДАННЫМ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ДНЕ

Датчик придонного давления регистрирует колебания давления, которые в общем случае не совпадают с колебаниями уровня моря. Как известно, поверхностные волны затухают с глубиной, поэтому, если использовать гидростатические соотношения, то донный датчик давления будет занижать амплитуду волн. Эта проблема специально изучалась в работе [3], в которой показано, что в рамках линейной потенциальной теории легко получить выражение для спектрального коэффициента ослабления поверхностных волн:

$$R(\omega) = \text{ch}(kd)/\text{ch}(kD), \quad (1)$$

где D — глубина моря, d — высота постановки датчиков над дном (в наших измерениях $d = 0,3$ м), k — волновое число, связанное с частотой волны ω дисперсионным соотношением $\omega(k) = \sqrt{gk \text{th}(kD)}$, где g — ускорение силы тяжести.

Разрешить дисперсионное соотношение относительно волнового числа невозможно, поэтому удобнее использовать следующее приближенное решение:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{ghG(\alpha)} + \frac{\omega^4}{g^2}, \quad (2)$$

где $G = 1 + 0,6522\alpha + 0,4622\alpha^2 + 0,0864\alpha^4 + 0,0675\alpha^5$; $\alpha = \omega^2 D/g$.

Относительная погрешность используемого датчика составляет 0,06 %, т. е. при ослаблении сигнала более чем в 0,0006 раза шум датчика начинает маскировать реальный сигнал. Это обстоятельство следует учитывать при коррекции сигнала, чтобы не усилить шум прибора, который существенно более высокочастотный, чем ветровое волнение. Для этого вводится ограничение коррекции снизу и сверху, а также ограничение по величине передачной функции. На рис. 4 представлены амплитудные спектры ветрового волнения и используемая передачная функция, рассчитанная для этой записи. Для того чтобы не усилить инструментальный шум приборов, значения передачной функции были ограничены величиной 5, а передачная функция приравнивается к 1 для гармоник частотой выше 0,33 Гц.

Имеется и другая проблема регистрации волнения в диапазоне ветровых волн. Поскольку запись проводится с применением цифровой аппаратуры, то аналоговый физический процесс (колебания уровня моря) дискретизируется. При этом согласно теореме Котельникова функция с ограниченным спектром полностью определяется своими значениями, отсчитанными через интервалы $\Delta t = 1/2F$, где F ширина спектра функции. Таким образом, если надо записать в цифровом виде непрерывный процесс $f(t)$ — колебания уровня моря с ограниченным спектром (верхняя частота процесса f_B), то достаточно измерять его с частотой $2f_B$ (частота Найквиста). В нашем случае регистрации одного раза в секунду достаточно для дискретизации и описания волнения периодом более 2 с [6].

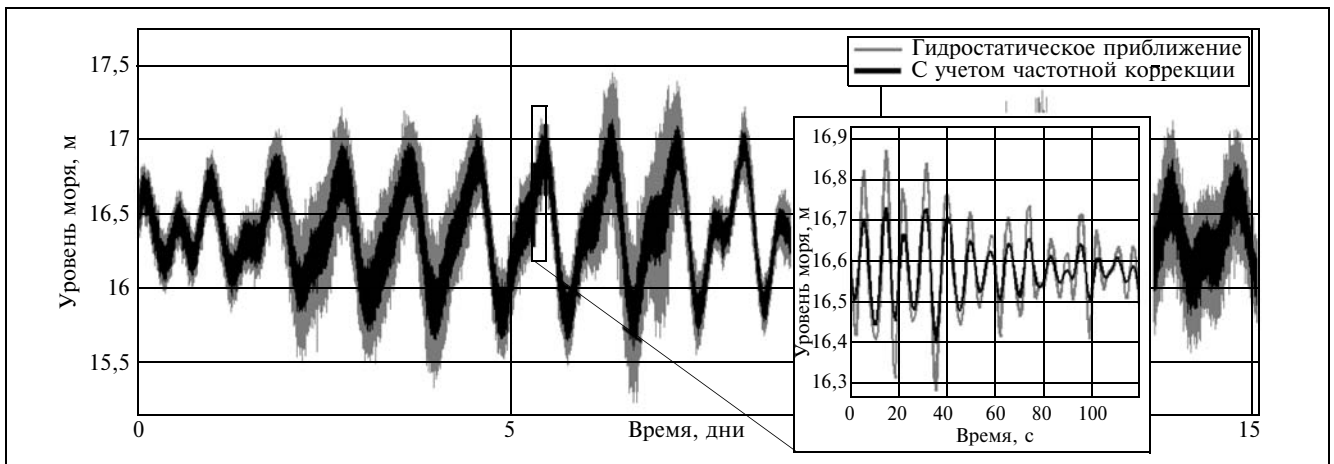


Рис. 5. Отличие формы рассчитанных колебаний уровня моря при использовании гидростатической формулы (серая линия) и с помощью частотной коррекции (черная линия)

В результате введенной частотной коррекции поправка в определении смещения уровня воды оказалась существенной. Например, для датчика, расположенного в районе мыса Острый на глубине 16 м, высота волны увеличилась примерно вдвое в сравнении с гидростатическим значением (рис. 5). Видно, что реальное поверхностное волнение будет существенно отличаться от измеренных флуктуаций давления датчиком придонного давления, установленного на глубине более 15 м, и волн с периодами от 1 до 11 с, т. е. ветровых волн и зыби. Отметим также, что период и фаза колебаний уровня моря, как видно из рис. 5, не меняются при использовании частотной коррекции, а меняется только амплитуда волн.

В соответствии с описанной методикой процедуру предварительной коррекции прошли все анализируемые в работе записи. Был разработан программный комплекс, состоящий из набора вычислительных программ, реализованных в C++, и скриптов на языке Matlab для отображения и анализа результатов вычислений, особенно вычислений высот и периодов волн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ВОЛН

Основным свойством и признаком anomalно большой волны или волны-убийцы является ее внезапное появление, большая высота и крутизна [7]. На практике чаще всего пользуются амплитудным критерием выделения anomalно высоких волн:

$$H/H_s > 2, \quad (4)$$

где H — высота отдельной волны, H_s — значительная высота волн.

В данной работе высота волны рассчитывалась как расстояние от подошвы волны до гребня (т. е. вторичные экстремумы в записи, не пересекающие среднюю

волновую линию, не учитываются). Для анализа использованы записи, полученные в результате работы двенадцати датчиков вблизи мыса Острый продолжительностью по 18 дней. Каждая запись содержит около 200 тыс. волн. Для учета нестационарности процесса, как это принято в океанологии, запись разбивалась на квазистационарные участки продолжительностью по 20 мин, по которым рассчитывался средний уровень и значительная высота волны (средняя высота 1/3 самых высоких волн). На рис. 6 показан пример временной изменчивости высот волн и значительной высоты волны в течение 2 ч 27 июля 2006 г. на одном из датчиков вблизи м. Острый.

Как видно из рис. 6, оказывается достаточно много индивидуальных волн, пересекающих уровень значительной высоты волн, в том числе более чем в два раза. Имеющиеся записи были проанализированы на наличие anomalно больших волн, отвечающих критерию (4). В результате выяснилось, что средняя встречаемость anomalно больших волн колебалась от 2 до 2,5 раз в сутки, причем более 40 % из них высотой более метра. На рис. 7 представлены примеры anomalно высоких волн с высотой около 1,6 м и превышением значительной высоты волны в 2,12 и 2,02 раза соответственно.

АНАЛИЗ ВСТРЕЧАЕМОСТИ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ ВОЛН

В натуральных экспериментах по обнаружению волн-убийц анализируются волнограммы — временные записи возвышения свободной поверхности в фиксированной точке. С помощью вычислительных экспериментов показано, что по волнограмме возможно обнаружение лишь небольшой части волн-убийц, возникающих в данном районе.

В вычислительных экспериментах получаем профиль свободной поверхности $\eta = \eta(x, y)$ в фиксирован-

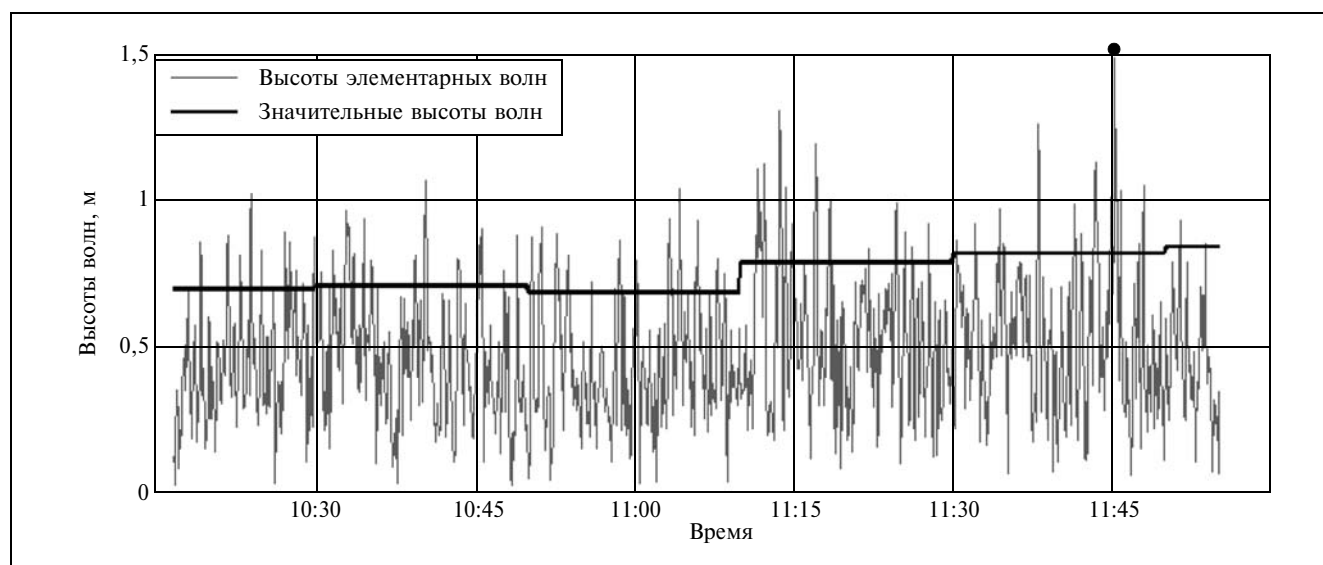


Рис. 6. График изменчивости высот волн и значительной высоты волны (по данным, полученным 27 июля 2006 г. в районе мыса Острый)

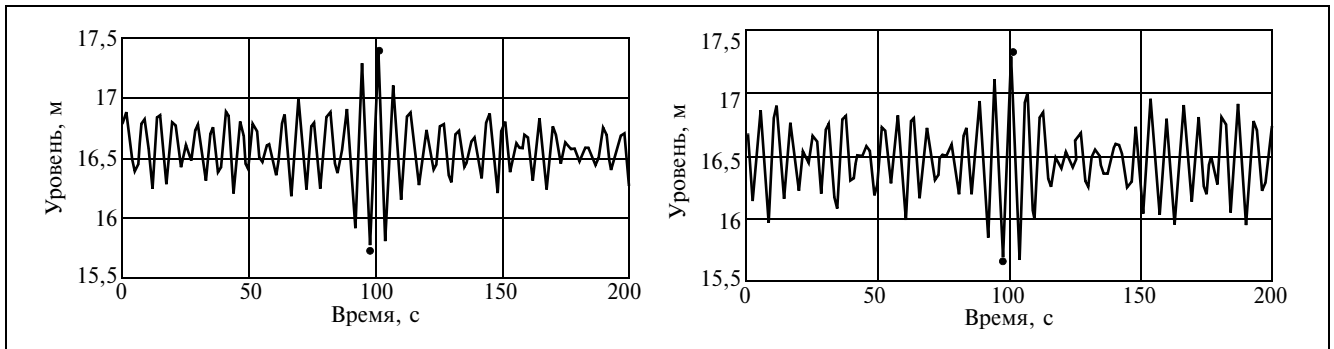


Рис. 7. Примеры anomalно больших волн, зарегистрированных во время эксперимента в районе мыса Острый

ный момент времени. По этой функции на основании амплитудного критерия производится регистрация экстремальных волн. По профилю свободной поверхности можно построить волнограмму — функцию, получаемую в натуральных экспериментах с помощью донного датчика:

$$A_s(t) = y(x_0, t), \quad t \in [0, T].$$

Здесь точка x_0 соответствует месту, в котором установлен виртуальный датчик регистрации возвышения поверхности [5, 11].

Методика моделирования натуральных экспериментов

Для сравнения возможностей натуральных и вычислительных экспериментов по обнаружению экстремальных волн используется следующая методика.

1. Проводится большая серия вычислительных экспериментов с различными параметрами начальных волн.
2. В результате вычислительных экспериментов обнаруживаются anomalно большие волны.
3. По полным записям результатов строятся волнограммы — функции $A_s(t)$.
4. По функциям $A_s(t)$ обнаруживаются волны-убийцы согласно правилам обработки натуральных данных.
5. Вычисляется процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки данных вычислительных экспериментов и волнограмм [10].

Были проведены вычислительные эксперименты, результаты которых анализировались на наличие волн-убийц. Всего было проведено 1056 элементарных экспериментов. Квадрат средней крутизны волн принимал значения $\mu^2 = 2,06 \cdot 10^{-3}$, $\mu^2 = 3,08 \cdot 10^{-3}$, $\mu^2 = 4,10 \cdot 10^{-3}$, дисперсия $D \in \{0,07; 3; 5; 7; 9; 11; 13; 15; 17; 19; 21\}$. Для каждого фиксированного значения квадрата средней крутизны и дисперсии было проведено по 32 однотипных численных опыта.

По полным записям результатов вычислительных экспериментов были получены волнограммы. Регистрация волн-убийц по волнограмме производилась согласно правилам обработки натуральных данных.

Для каждого значения квадрата средней крутизны и дисперсии на рис. 8 представлен процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки

вычислительных экспериментов и волнограмм. Значения по оси абсцисс соответствуют 11 значениям спектральной ширины, а значения по оси ординат — проценту совпадений обнаружения волны-убийцы в результате обработки волнограмм и вычислительных экспериментов.

Видно, что по волнограммам обнаруживается от 2 до 6 % волн-убийц, полученных в вычислительных экспериментах. В реальных натуральных экспериментах датчики работают с определенной частотой, которая, как правило, гораздо ниже, чем в смоделированных натуральных экспериментах [10, 12]. Для наиболее близкого соответствия данных, полученных в результате вычислительных экспериментов, данным, полученным в результате натуральных экспериментов, выполнено прореживание волнограмм, полученных в результате вычислений. Прореженная волнограмма должна содержать каждую десятую точку исходной волнограммы. В таблице приведены результаты сравнения обнаружения волн-убийц в вычислительных экспериментах и по прореженным волнограммам (использовались волнограммы с десятикратным прореживанием).

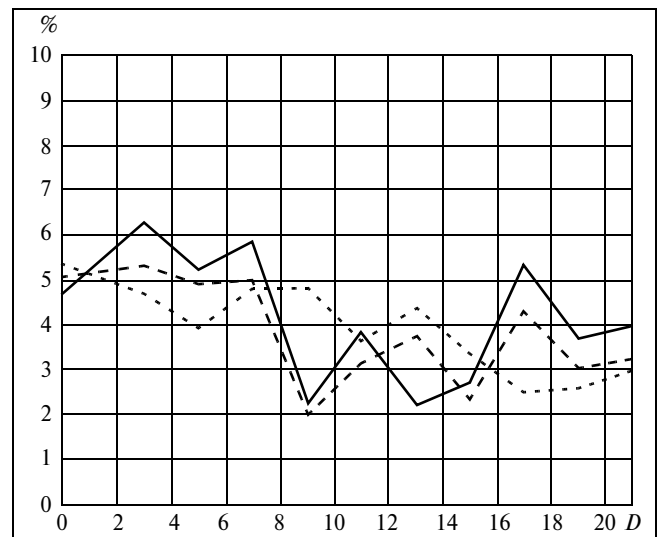


Рис. 8. Процент совпадения обнаружения волны-убийцы в результате обработки волнограмм и вычислительных экспериментов

**Процент совпадения обнаружения волны-убийцы
в результате обработки вычислительных экспериментов и прореженных волнограмм**

μ^2	Совпадение обнаружения наблюдаемых и вычисленных больших волн, %, для дисперсии D :										
	0,07	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$2,06 \cdot 10^{-3}$	0,35	1,36	1,00	0,65	0,37	0,67	0	0	1,07	1,41	1,57
$3,08 \cdot 10^{-3}$	0,10	0,39	0,33	1,23	0,33	0,60	0,30	0,21	0,42	0	0,81
$4,10 \cdot 10^{-3}$	0,19	1,18	0,45	0,65	0,28	0,75	0,93	0	0,48	0	0

Выяснено, что вероятность обнаружения волн-убийц по прореженным волнограммам редко превышает 1 %. Полученные результаты говорят о недостаточной эффективности изучения волн-убийц с помощью волнограмм.

ВЫВОДЫ

Приведенные данные эксперимента по регистрации поверхностного волнения на шельфе о. Сахалин в районе мыса Острый в 2006 г. свидетельствуют о наличии волн-убийц в прибрежных российских водах.

Описаны проблемы регистрации anomalно больших волн с помощью датчиков придонного давления и способы решения этих проблем. В частности, затронута проблема частоты дискретизации, достаточной для регистрации anomalно больших волн, проблема сильного затухания волн высокой частоты с глубиной и метод восстановления пульсаций придонного давления в возвышение поверхности.

Проведен общий анализ записей на встречаемость anomalно больших волн. Проведенное сравнение с результатами численного моделирования указывает на то, что при регистрации волнения с дискретностью 1 с обнаруживается только от 2 до 6 % вычисленных волн-убийц.

Согласно полученным инструментальным данным в районе о. Сахалин anomalно большие волны регистрируются примерно два раза в сутки. Однако, используя верификацию этих экспериментов с помощью математического моделирования, можно заключить, что такие волны возникают намного чаще — примерно раз в 1,5—2 ч. Поэтому для более детального изучения частоты возникновения волн-убийц, а также для изучения их особенностей требуется площадное размещение системы датчиков вдоль изучаемого побережья с дискретностью записи более 1 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дивинский Б. В., Левин Б. В., Лопатухин Л. И. и др. Anomalно высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование // ДАН. — 2004. — Т. 395, № 5. — С. 690—695.
2. Зайцев А. И., Малашенко А. Е., Пелиновский Е. Н. Anomalно большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2011. — Т. 4, № 4. — С. 35—42.
3. Заславский М. М., Красицкий В. П. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн // Океанология. — 2001. — Т. 41, № 2. — С. 195—200.
4. Захаров В. Е., Шамин Р. В. О вероятности возникновения волн-убийц // Письма в ЖЭТФ. — 2010. — Т. 91. — Вып. 2. — С. 68—71.
5. Захаров В. Е., Шамин Р. В. Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах // Письма в ЖЭТФ. — 2012. — Т. 96. — Вып. 1. — С. 68—71.
6. Иволгин В. И., Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., Кузнецов К. И. Регистрация ветрового волнения донным датчиком гидростатического давления // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. — 2011. — Т. 16. — Вып. 5. — С. 1272—1276.
7. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. — Н. Новгород: НГТУ, 2004.
8. Куркин А. А., Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В. Физика волн-убийц в океане // Нелинейные волны — 2004. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005. — С. 37—51.
9. Соомере Т., Куркина О. Е. Статистика экстремального волнения в юго-западной части Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2011. Т. 4, № 4. — С. 43—57.
10. Шамин Р. В. Вычислительные эксперименты в моделировании поверхностных волн в океане. — М.: Наука, 2008. — 133 с.
11. Шамин Р. В. Динамика идеальной жидкости со свободной поверхностью в конформных переменных // Современная математика. Фундаментальные направления. — 2008. — Т. 28. — С. 3—144.
12. Шамин Р. В. Поверхностные волны на воде минимальной гладкости // Современная математика. Фундаментальные направления. — 2010. — Т. 35. — С. 126—140.
13. Kharif Ch., et al. Rogue Waves in the Ocean // Springer. — 2009. — 216 p.

Константин Игоревич Кузнецов — аспирант, мл. научн. сотрудник КБ средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН);

☎ (4242) 55-03-27

E-mail: konstantin.kouznetsov@gmail.com

Ирина Сергеевна Костенко — аспирант, мл. научн. сотрудник СКБ САМИ ДВО РАН;

☎ (4242) 55-03-27

E-mail: Irenka_k@rambler.ru

Александр Викторович Юдин — аспирант, мл. научн. сотрудник Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН);

☎ (4242) 79-61-54

E-mail: yudinorel@gmail.com

Виталий Сергеевич Зарочинцев — аспирант, мл. научн. сотрудник ИМГиГ ДВО РАН.

☎ (4242) 79-61-54

E-mail: zarochintsev@imgg.ru

□