
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.465

А.И. Зайцев^{1,2,3}, А.Е. Малашенко¹, И.С. Костенко¹, Е.Н. Пелиновский^{2,3,4},
К.И. Кузнецов^{1,5}

РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛН-УБИЙЦ В ЗАЛИВЕ АНИВА ОХОТСКОГО МОРЯ

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований,
Южно-Сахалинск¹,
Институт прикладной физики РАН²,
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева³,
Высшая школа экономики⁴,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск⁵

Цель: Целью данной работы является изучение характеристик аномально высоких волн, зарегистрированных в заливе Анива Охотского моря.

План/методология/подход: Последние три года Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова Сахалин (залив Анива) с помощью автономных донных регистраторов гидростатического давления АРВ-К12. Анализ записей волн выполнен методами, развитыми в океанографии: каждый 20-минутный сегмент рассматривают как постоянный вероятностный процесс и выполняют вычисления его статистических особенностей. Отдельные волны с амплитудами в два раза превышения значимой высоты идентифицированы как неправильные аномальные (убийцы) волны. Проанализированы их формы и вероятность возникновения.

Полученные результаты: За время наблюдений (с июня по сентябрь 2009 г.) у южных берегов острова Сахалин (залив Анива), зарегистрировано 394 аномально больших волны, удовлетворяющих критерию волн-убийц (высота волны в два и более раз превышает значительную высоту волны), из них 6 случаев, когда превышение достигает 2,5. Вероятность возникновения аномально больших волн хорошо соответствует распределению Пуассона.

Исследовательские результаты/применение: Данное исследование обеспечивает начало для дальнейшего изучения особенностей волн в различных областях Охотского моря, оно необходимо для судоходства и нефтегазового освоения на шельфе.

Новизна/важность: Это первые данные, показывающие существование волн-убийц в Охотском море. Их параметры в среднем схожи с особенностями аномальных волн в Мировом Океане. Региональные особенности аномальных волн должны быть проанализированы с использованием систему распределенных датчиков в Охотском море.

Ключевые слова: инструментальные данные, аномальные волны (волны-убийцы), Охотское море.

Введение

В последнее время накопилось много свидетельств появления необычных волн, называемых в литературе волнами-убийцами, на поверхности моря как в открытой части, так и вблизи берега. Некоторые натурные данные как визуальные, так и инструментальные, приведены в книгах, каталогах и статьях [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Данных о наблюдениях волн-убийц в морях, окружающих Россию, весьма немного. Отметим здесь наблюдения аномально больших волн в Черном [10, 11, 12] и Балтийском морях [13, 14]. Что же касается восточного

побережья России, то в литературе приводится только одна фотография необычной волны, наблюдаемой М.В. Соколовским вблизи восточного побережья Камчатки в 25 км от мыса Ольги в июне 2006 г. [1]. Является ли эта волна волной-убийцей (то есть редко наблюдающейся) однозначно сказать нельзя, и авторы, например, каталога [7] считают, что такие волны в данном месте появляются достаточно часто.

Наблюдения волн – убийц вблизи побережья Сахалина практически полностью отсутствуют. По сообщению Андрея Серафимова (частично оно есть на форуме <http://www.raspadok.ru/forum>), он наблюдал аномальную волну 2 августа 2010 г. вблизи западного побережья Сахалина в районе мыса Воздвижения во время каякерского похода вдоль участка западного побережья Сахалина от п. Бошняково до г. Александровска-Сахалинского. Приведем в сокращенном виде его описание: «Волнения моря в тот день практически не было, и белая вода была только в зоне прибоя. Я проходил примерно в 500 м от скалистого участка берега с неприятным предчувствием, так как берег напротив этого места был непричальным, пляжа там не было, прибой бил в скальную стену и большие валуны. В случае оверкиля будет трудно дрейфовать к берегу в связи со сложной зоной прибоя. И, самое главное, будучи на расстоянии более километра до этого места напротив скал, я пару раз замечал мелькание чего-то светлого, но вглядываясь, не фиксировал ни характерно повторяющихся белых барашков ломающихся волн, как это обычно бывает над мелью, ни чего-то подобного, что указывало бы на необходимость обогнуть это место. День был солнечным, расстояние до берега значительным и я решил, что это были отблески солнца. За всё время подхода со зрительным мониторингом этого места никаких угроз не проявилось.

Когда я уже окончательно уверовал, что зря беспокоился, в нескольких метрах от меня внезапно выросла боковая волна, поднялась надо мной и прихлопнула меня сверху. Мощным ударом сверху меня притопило, прижало, оглушило, но, не перевернуло, чему я удивился. Волна была короткой и по ширине, и по длине, и по ходу (по меньшей мере в своей высокой стадии). То, что меня не перевернуло, вероятно, связано с тем, что волна не пошла дальше меня в том виде, в котором она развлекалась со мной. Иначе бы она потащила бы меня боком и, заворачиваясь дальше, обязательно бы перевернула. Но волна быстро выросла, завернулась, сломалась, обрушилась и рассосалась.

Высота волны в тот момент мне показалась очень большой, но по описанию ребят с соседней двойки выходит, что она была выше меня, сидячего в каяке, примерно на вытянутую руку. Пока я приходил в себя, ко мне подошла двойка и с неё категорически заявили, что мой инцидент с волной выглядел со стороны крайне эффектно. Еще сказали, что через пару мгновений после того, как меня накрыло, в том же месте возникла еще одна такая же волна. Вторую я не видел и не слышал, наверное, был еще оглушен первой.

Двойка предусмотрительно обогнула подальше «злое» место. Парни сказали, в том месте даже цвет воды отличается. За все время, пока мы стояли напротив «злого» места, связывались по рации с идущими за нами (еще 5 каяков), предупреждали их, ничего даже близко похожего не повторялось, и мы пошли дальше. Впрочем, никто с растянуто идущих следом каяков также ничего похожего с описанным мной на своем пути не заметил. В последующие дни похода с нами происходило еще много интересного, были и ветры, и волны, и оверкили, но ничего из природных явлений настолько же внезапного и неотвратимого, как прихлопнувшая меня волна, уже не встречалось». И далее: «Я уверен, что подобная встреченной мной волна далеко не первая на Сахалине. По моим ощущениям, её возникновение связано с местом или каким-то незамеченным мной подводным фактором, а может столкновением со скальным отражением предыдущих волн. Но то, что она радикально "выделялась" в том месте и в то время – это конечно факт». Как следует из этого описания, волна-убийца имела вид «двух сестер» и проявилась только однажды за все время наблюдений.

Настоящая работа содержит первые результаты инструментальных наблюдений аномально больших волн вблизи мыса Анива (о. Сахалин).

Измерения

Начиная с 2009 г., Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова Сахалин (залив Анива). В 2009 г. измерения проводились на мысах залива (мыс Анива и мыс Терпенья) и в глубине залива на западном и восточном побережье (п. Новиково и п. Кириллово). В данной работе мы обсудим только данные, полученные в районе мыса Анива (рис. 1).



Рис. 1. Местоположение прибора в заливе Анива

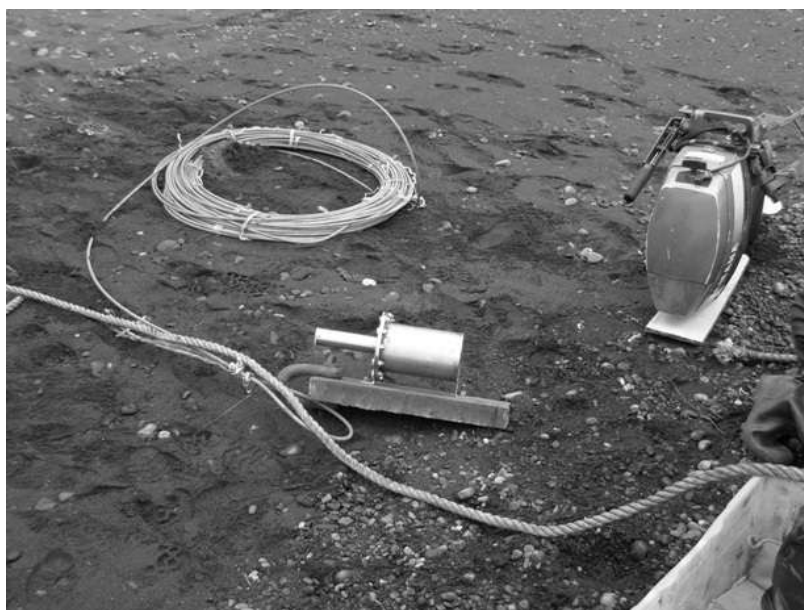


Рис. 2. Внешний вид прибора АРВ-К12

Измерения проводились с помощью автономных донных регистраторов гидростатического давления АРВ-К12, произведённых в КБ г. Углич. Прибор выполнен в корпусе из

нержавеющей стали и имеет цилиндрическую форму (рис. 2). В качестве первичных преобразователей физических величин используются кварцевые резонаторы. Такой выбор не случаен: пьезорезонаторные элементы имеют малую температурную зависимость и высокую точность. Диапазон измерения давления (глубина погружения) до 100 м, точность по давлению 0,06%, диапазон рабочих температур от -4 до 40 °С. Автономность приборов составляет 6 месяцев, рабочая глубина до 100 м. Дискретность измерений 1 с. Глубина постановки прибора на мысу Анива 12 м. Из-за малой глубины ветровые волны здесь являются мелководными, и их измерение может производиться с помощью датчиков давления с использованием гидростатических формул пересчета. Эти приборы уже использовались для регистрации Симуширского цунами 2006 г. и Невельского цунами 2007 г. [15, 16], а также для регистрации длинных волн на Курильских островах [17].

Для обработки использованы данные с прибора, полученные с мая по сентябрь 2009 г. Естественно, что данные весьма неоднородны. Это определяется метеорологическими условиями в данном районе (силой и направлением ветра, полем атмосферного давления). На волны весьма влияет оживленное судоходство. В настоящее время пока нам доступны только данные о колебаниях уровня моря с установленной станции, и сейчас трудно говорить о связи характеристик морской поверхности с волнообразующими факторами. Поэтому принята следующая методика выделения аномальных волн. Вся запись (почти полугодовая) делилась на отрезки по 20 мин, и предполагалось, что колебание уровня моря внутри 20-минутного интервала является стационарным случайным процессом. Число таких интервалов достигает 10000, обеспечивая достаточно представительную статистику.

Колебания уровня моря для каждого 20-ти минутного интервала характеризовались среднеквадратичным отклонением, вычисляемым по стандартной формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \langle z \rangle)^2}, \quad (1)$$

где N – количество измерений в интервале (около 1 200); z_i – значения уровня моря, отсчитываемое от дна по гидростатической формуле для давления; $\langle z \rangle$ – среднее значение уровня моря в 20-минутном интервале.

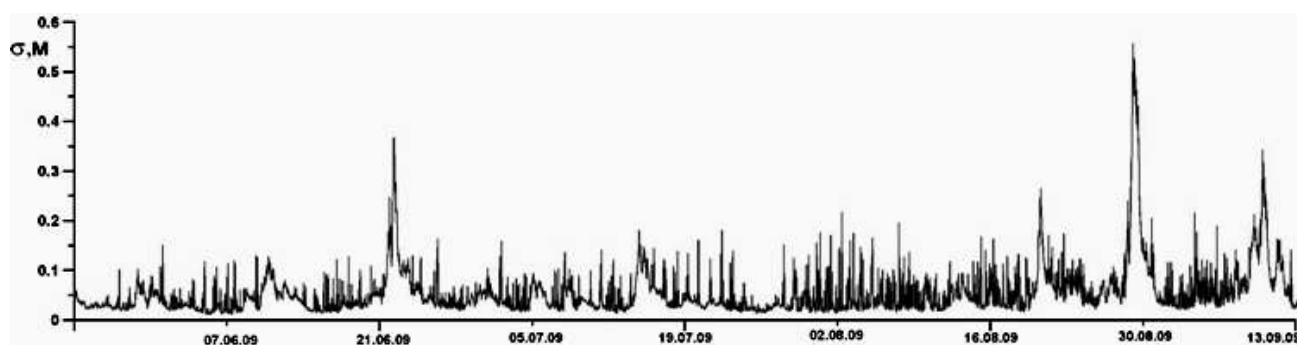


Рис. 3. Временная изменчивость вариаций колебаний уровня моря за период наблюдений

Временная изменчивость среднеквадратичного отклонения морской поверхности показана на рис. 3. Видно, что большую часть времени волнение относительно слабое (характерные высоты волн 5–10 см), однако были и большие волны (средняя высота 40 и 50 см) во время штормов в июне и августе 2009 г.

Статистический характер волнового процесса иллюстрируется вычисленными коэффициентами асимметрии и эксцесса (рис. 4):

$$Sk = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N [z_i - \langle z \rangle]^3, \quad Ku = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N [z_i - \langle z \rangle]^4, \quad (2)$$

которые обнаруживают сильную изменчивость в течение шести месяцев, однако средние значения этих коэффициентов ($\langle Sk \rangle = -0,04$, $\langle Ku \rangle = 2,8$) достаточно мало отличаются от «гауссовых» значений ($Sk = 0$ и $Ku = 3$), так что в целом ветровое волнение является почти гауссовым процессом. Все же отрицательные значения коэффициента асимметрии означают, что впадины в записи несколько более представительны, чем гребни, а меньшее значение коэффициента эксцесса (по сравнению с гауссовым) свидетельствует о меньшей вероятности появления аномально больших волн.

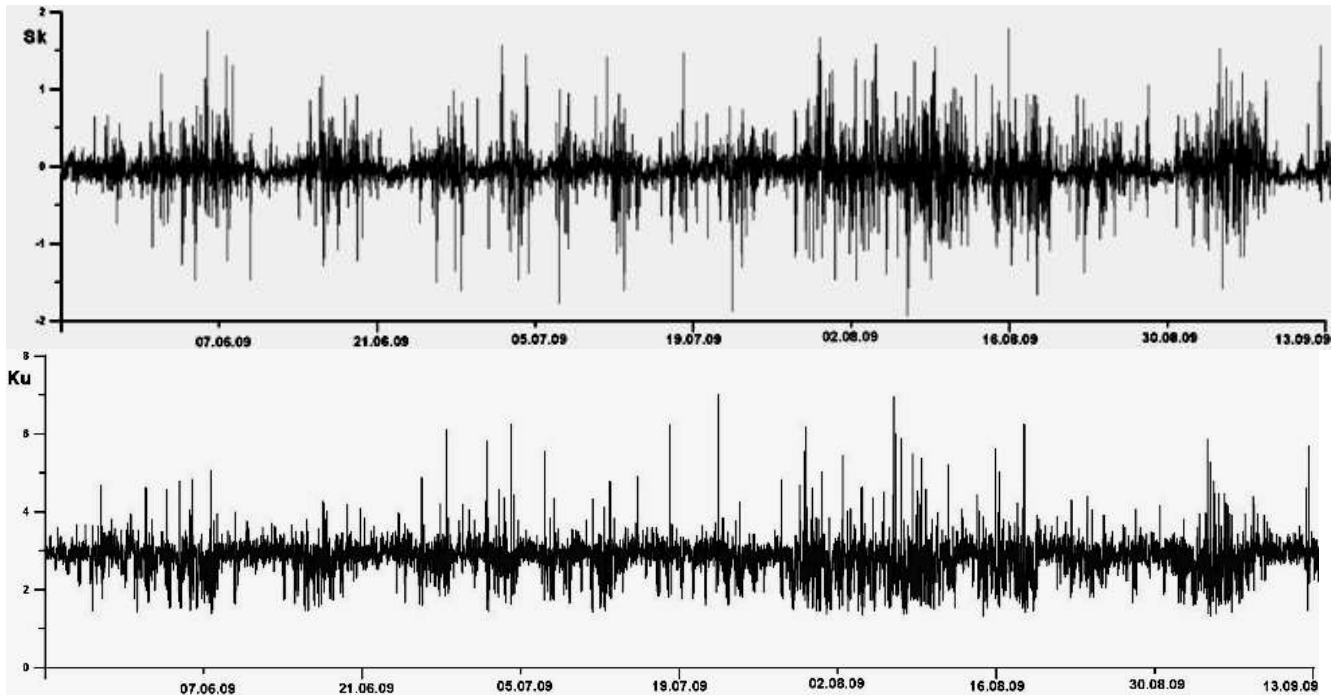


Рис. 4. Изменчивость коэффициентов асимметрии (Sk) и эксцесса (Ku) в период наблюдений

Как известно, значительная высота волн в случае гауссового волнения однозначно связана со среднеквадратичным отклонением. Для выделения аномальных волн по амплитудному критерию удобнее определить значительную амплитуду волнения

$$A_s = 2\sigma, \quad (3)$$

тогда аномальной волной («волной - убийцей») будет называться любая волна с амплитудой

$$A_{fr} > 2A_s = 4\sigma. \quad (4)$$

Примеры 20-минутных записей колебания уровня моря, содержащих аномальную волну, приведены на рис. 5. Даты их наблюдений сведены в табл. 1. За истекший период (шесть месяцев) наблюдалось шесть аномальных волн с превышением их амплитуды над сигмой, равной 5 или 2,5 над значительной амплитудой.

Таблица 1

Параметры аномальных волн с пятикратным превышением над средним уровнем

Дата	Время (Гринвич)	Смещение, м	σ , м
22.06.09	19:24:36	-0.95	0.19
01.07.09	03:53:21	-0.27	0.05
24.07.09	12:55:03	0.09	0.02
14.08.09	16:40:22	-0.24	0.05
08.09.09	20:15:11	0.37	0.07
09.09.09	02:14:26	-0.72	0.14

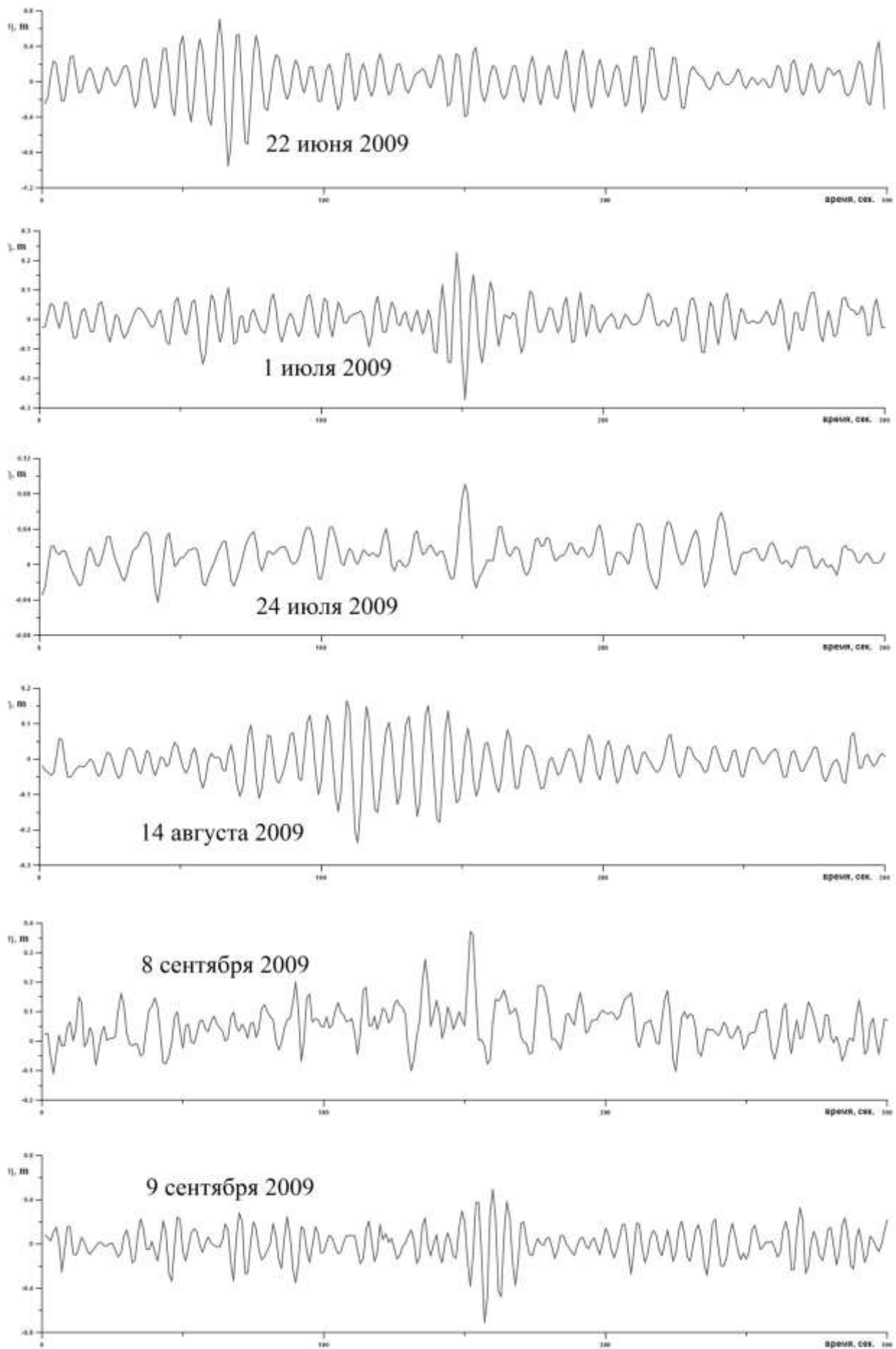


Рис. 5. Сегменты записей аномальных волн

Формы аномальных волн с превышением 2,5 над значительной амплитудой показаны на рис. 6. Ясно видно, что в двух событиях волна-убийца имела вид одиночного гребня, а в других случаях, в сущности, в виде знакопеременной волны или даже цуга волн.

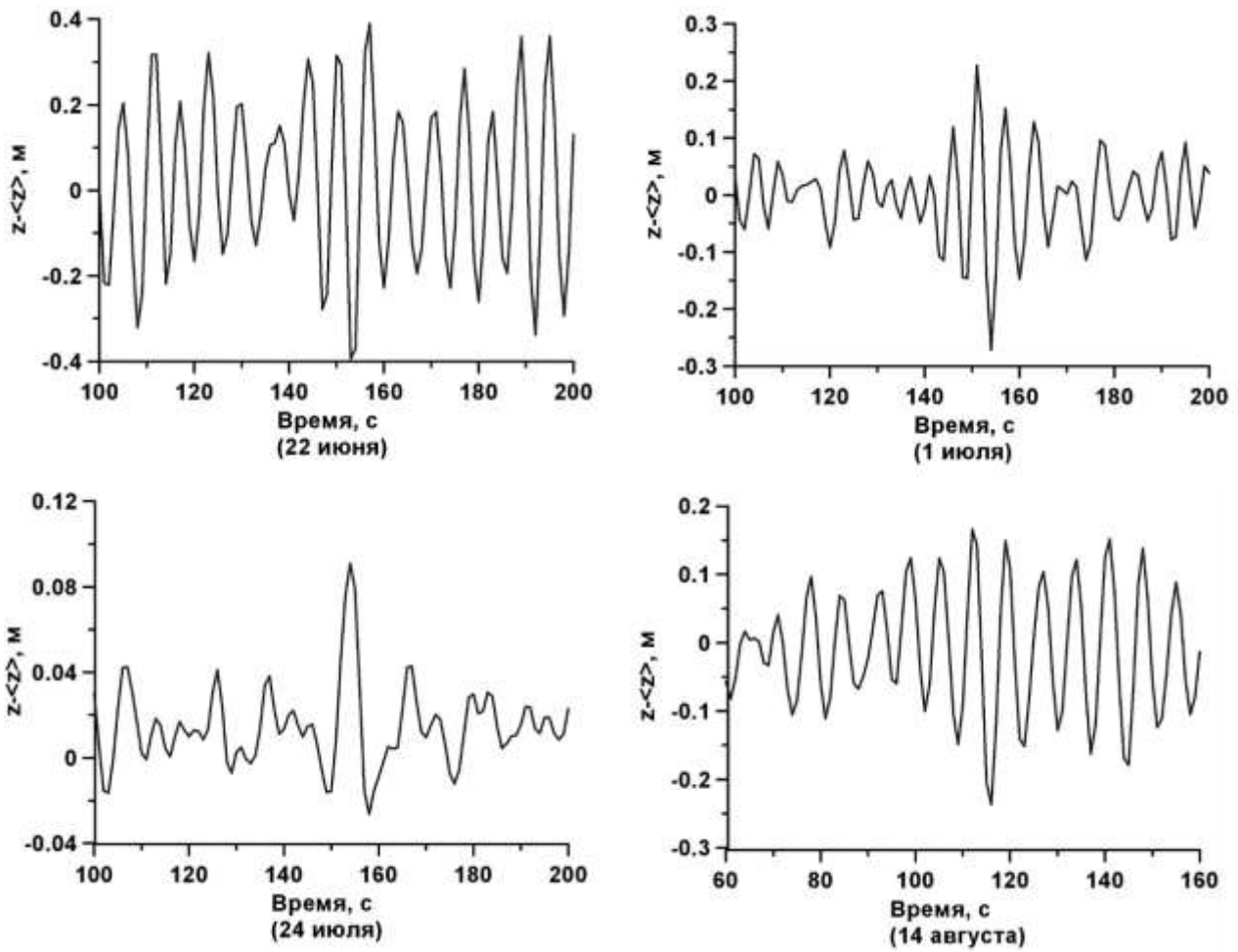


Рис. 6. Формы аномальных волн с превышением 2,5 над значительной амплитудой

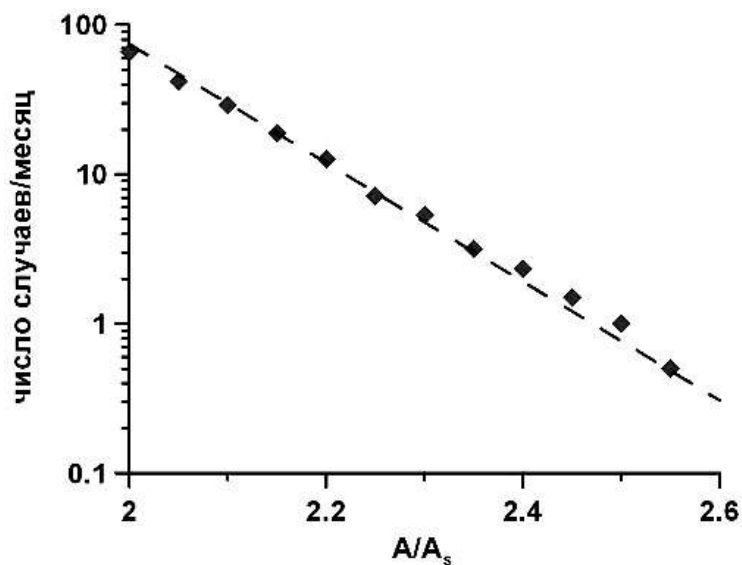


Рис. 7. Частота наблюдения волн-убийц в южной части Охотского моря

За шесть месяцев наблюдалось 394 аномальные волны, амплитуда которых удовлетворяет пороговому критерию волн-убийц ($2A_s$). Рассчитанная частота превышения аномальных колебаний уровня моря (число случаев с амплитудой больше данного значения ко времени) показана на рис. 7. Как и следовало ожидать из теории экстремальной статистики [18], она хорошо описывается Пуассоновской кривой

$$\ln(N/T) = 226 - 9(A/A_s), \quad (5)$$

где N число случаев наблюдения волн с превышением A/A_s в течение времени T . Итак, волны – убийцы с двойным превышением появляются в южной части Охотского моря в среднем дважды в день, а с превышением 2,5 – один раз в месяц. Отметим, что согласно теории, основанной на представлении ветрового волнения узкополосным гауссовым случайным процессом [1, 2], волны-убийцы в среднем встречаются раз в 10 часов в заданном месте (с превышением в два раза), так что наши оценки оказываются близкими теоретическим.

Заключение

Приведены первые данные наблюдения аномально больших волн у оконечности мыса Анива на южном побережье острова Сахалин. Они получены из анализа долговременных записей уровня моря за июнь – сентябрь 2009 г., полученных с помощью донной станции (глубина постановки 12 м). За время наблюдений зарегистрировано 394 аномально больших волны, высота которых в два и более раз превышает значительную высоту волны. Из них шесть случаев, когда превышение достигает 2,5. В этих шести событиях два раза волна-убийца имела вид одиночного гребня, а в других случаях в виде знакопеременной волны или цуга волн. Частота наблюдения аномальных волн, в зависимости от их амплитуды, описывается пуассоновским распределением, как это и следует из теории экстремальной статистики. Волны-убийцы в среднем встречается в этом районе дважды в день, что близко к оценке, следующей из теории для узкополосного «гауссова» моря.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (11-05-00216, 11-05-92002, 09-05-00971, 11-05-90740-моб_ст), ДВО(11-III-Д-07-010, 11-III-В-01И-002), гос. контракта № 02.740.11.0732 и МК-4378.2011.5.

Библиографический список

1. **Kharif, Ch.** Rogue Waves in the Ocean / Ch. Kharif [et al.] // Springer, 2009. – 216 p.
2. **Куркин, А.А.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский. – Нижний Новгород, ННГУ, 2004. – 157 с.
3. **Didenkulova, I.I.** Freak Waves in 2005 / I.I. Didenkulova [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006. Vol. 6. P. 1007–1015.
4. **Kharif, C.** Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon / C. Kharif [et al.] // European J Mechanics. B – Fluid. 2003. Vol. 22. N. 6. P. 603–634.
5. **Kharif, Ch.** Freak wave phenomenon: physical mechanisms and modeling. Chapter 3. Waves in Geophysical Fluids / Ch. Kharif [et al.]; Eds. Grue J. and Trulsen K. // CISM Courses and Lectures. 2006. N. 489. P. 107–172.
6. **Nikolkina, I.** Rogue waves in 2006–2010 / I. Nikolkina [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011.
7. **Nikolkina, I.** Catalogue of rogue waves reported in media in 2006–2010 / I. Nikolkina [et al.] // Natural Hazards. 2011.
8. **Slunyaev, A.** Rogue waters / A. Slunyaev [et al.] // Contemporary Physics. 2011.
9. **Куркин, А.А.** Физика волн-убийц в океане / А.А. Куркин [и др.] // |Нелинейные волны-2004. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 37–51.
10. **Доценко, С.Ф.** Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря / С.Ф. Доценко [и др.] // Доклады НАН Украины. 2009. № 9. С. 113–117.
11. **Доценко, С.Ф.** Связь образования волн-убийц и метеорологических условий в северо-

- западной части Черного моря / С.Ф. Доценко [и др.] // Доклады НАН Украины. 2010. № 12. С. 105–109.
12. **Дивинский, Б.В.** Аномально высокая волна в Черном море: наблюдения и моделирование / Б.В. Дивинский [и др.] // ДАН, 2004. Т. 395. № 5. С. 690–695.
 13. **Didenkulova, I.** Shapes of freak waves in the coastal zone of the Baltic Sea (Tallinn Bay) // *Boreal Environ Res* 16(suppl A). 2011. P. 138–148.
 14. **Didenkulova, I.** Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea / I. Didenkulova [et al.] // *Nat Hazard Earth Syst Sci.* 2010. 10: 2021–2029.
 15. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев и [др.] // Доклады Академии Наук, 2008. Т. 421. №2. С. 1–4.
 16. **Ковалёв, П.Д.** Регистрация Симуширского и Невельского цунами в порту города Холмска / Ковалёв П.Д. [и др.] // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. №5. С. 36–43.
 17. **Левин, Б.В.** Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесённой сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии Наук 2009. Т. 427. № 2. С. 1–6.
 18. **Лидбеттер, М.** Экстремумы случайных последовательностей и процессов / М. Лидбеттер, Х. Ротсен, Г. Линдгрэн. – М.: Мир, 1989. – 391 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2012*

A. Zaitsev^{1,2,3}, A. Malashenko¹, I. Kostenko¹, E. Pelinovsky^{2,3,4}, K. Kuznetsov⁵

FREAK WAVES REGISTRATION IN THE ANIVA BAY, OKHOTSK SEA

Special Design Bureau for Automation of Marine Research,
Yuzhno-Sakhalinsk¹
Institute of Applied Physics²,
Nizhny Novgorod State Technical University R.Y. Alexeev³,
Higher School of Economics⁴,
Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk⁵

Purpose: The goal of this paper is the study the characteristics of abnormal sea waves recorded in the Aniva Bay, Okhotsk Sea.

Design/methodology/approach: Within last three years continuous measurements of sea level changes in the Aniva Bay are carried out by Special Research Bureau of Automation of Marine Researches of the Russian Academy of Sciences using the ground gauge of hydrostatic pressure ARV-K12 converted into the water level displacement. The analysis of wave records is performed by methods developed in the ocean engineering: each 20-min segments are considered as the stationary random process and their statistical characteristics are calculated. Individual waves with amplitudes twice more then significant wave amplitude are identified as abnormal (freak) waves. Their shapes and occurrence probability are analyzed.

Findings: Totally 394 abnormal waves satisfied to criterion of the freak waves are recorded for period from June to September of 2009 near Aniva cape (southern coast of Sakhalin island). In the six events wave amplitude exceeds the significant wave amplitude in 2.5 times. Probability of occurrence of abnormal waves is well fitted by the Poisson distribution.

Research limitations/implications: The present study provides a starting point for further research of the abnormal wave characteristics in various areas of the Okhotsk Sea required for ship navigation and offshore platform design.

Originality/value: This is the first data proven the existing of the freak waves in the Okhotsk Sea. Their characteristics are similar on average to the characteristics of abnormal waves in the World Ocean. The regional features of the freak waves have to be analyzed using the system of the distributed sensors in the Okhotsk Sea.

Key words: measurement data, abnormal (freak) waves, Okhotsk Sea.