

УДК 532.5

## ТИПИЧНЫЕ ПРОФИЛИ ВОЛН-УБИЙЦ

© 2015 г. Академик РАН В. Е. Захаров, Р. В. Шамин, А. В. Юдин

Поступило 09.12.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565215130198

## ВВЕДЕНИЕ

Аномально большие поверхностные волны, называемые волнами-убийцами, представляют собой редкое экстремальное явление на поверхности океана [1]. Физически процесс формирования аномально больших поверхностных волн является локальной концентрацией энергии в одной-двух волнах [2]. Волны-убийцы представляют большой интерес для теоретических и практических исследований.

В ряде работ (например, [3, 4]) рассматривались вопросы классификации волн-убийц. В настоящей работе представлены результаты вычислительных экспериментов по моделированию морского волнения на основе точных уравнений гидродинамики. В этих экспериментах мы неоднократно наблюдали возникновение волн-убийц. На основании результатов большого количества (более 3000) вычислительных экспериментов был составлен атлас профилей аномальных волн. Большинство из них имеют характерную геометрию, что позволило выделить типичные профили волн-убийц и построить их трехпараметрическую регрессию.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Мы численно моделировали динамику идеальной жидкости со свободной поверхностью в области

$$0 < x < 2\pi, \quad -\infty < y < \eta(x, t).$$

По переменной  $x$  предполагались  $2\pi$ -периодические условия, на дне ( $y = -\infty$ ) рассматривалось условие непротекания. Течение жидкости предполагалось потенциальным. Функция  $\eta(x, t)$  в модели описывает профиль свободной поверхности в момент времени  $t$ . Для проведения вычислительных экспериментов мы использовали динамические уравнения, полученные Дьяченко в конформных переменных [5]. Эти уравнения эквивалентны системе уравнений Эйлера и позво-

ляют корректно проводить расчеты с большой точностью [6–8]. Эти и другие варианты уравнений в конформных переменных широко использовались для исследования волн-убийц [9–11].

Постановки вычислительных экспериментов, использованные в данной работе, описаны в [12, 13]. Волну-убийцу мы регистрировали согласно стандартному амплитудному критерию – в момент времени  $t^*$  наблюдается волна-убийца, если выполнено следующее неравенство:

$$v(t^*) = \frac{H_{\max}(t^*)}{\bar{H}_s(t^*)} \geq v^* = 2.1,$$

где  $\bar{H}_s(t^*) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t^*-\Delta}^{t^*} H_s(\tau) d\tau$  – усредненная значительная высота волнения,  $H_{\max}(t)$  – максимальная высота волны в момент  $t$ . Значение  $v^* = 2.1$  выбирается экспериментально и используется во многих работах, посвященных волнам-убийцам.

## ПРОФИЛИ ВОЛН-УБИЙЦ

В результате проведенных вычислительных экспериментов получено порядка 3000 профилей волн-убийц, соответствующих различным параметрам волнения. Заметим, что получаемые в наших экспериментах профили волн-убийц сравнивали с различными типами таких волн, записанных в натуральных экспериментах в море. При этом установлено качественное и количественное совпадение реальных записей волн с моделируемыми в вычислительных экспериментах (см. [14]).

В вычислительных экспериментах наблюдали три класса волн-убийц: “стена воды”, “дыра в море” и “три сестры”. Названия этим формам экстремальных волн были даны в свое время моряками, встречавшими волны-убийцы. “Стена воды” представляет собой одиночную аномальную волну с крутым гребнем. “Дыра в море” является глубокой впадиной, возникающей между двумя соседними гребнями волн. “Три сестры” – это несколько (чаще три) идущих друг за другом аномально больших волн. Около 95% этих профилей имеют почти одинаковую геометрию и со-

Российский университет дружбы народов, Москва  
Department of Mathematics, University of Arizona, USA  
Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии наук, Москва  
E-mail: roman@shamin.ru

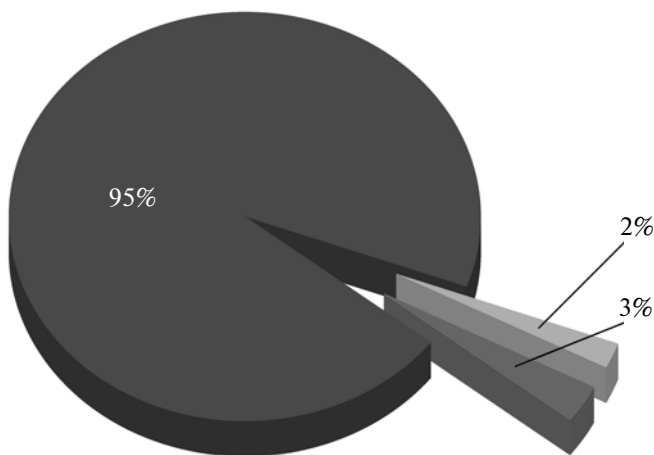


Рис. 1. Соотношение типов волн-убийц: 95% – “стена воды”; 3% – “дыра в море”; 2% – “три сестры”.

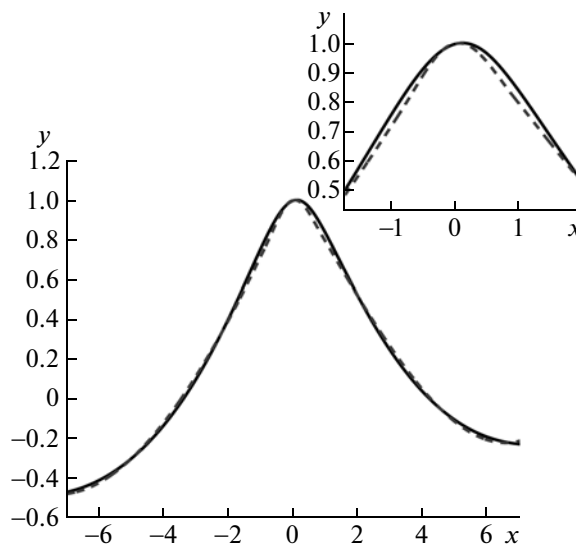


Рис. 2. Аппроксимация профиля кубическим многочленом.

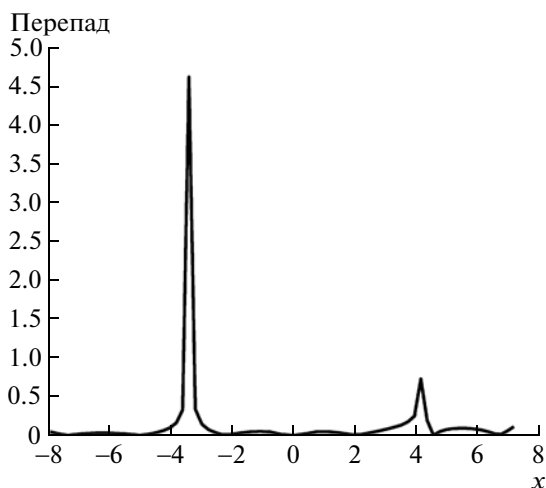


Рис. 3. Относительная погрешность аппроксимации.

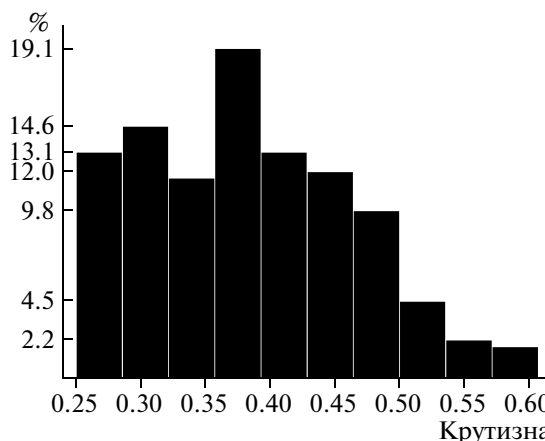


Рис. 4. Распределение максимальной крутизны волн-убийц.

ответствуют первому классу – “стене воды”. На рис. 1 приведено распределение по частоте наблюдения различных классов волн-убийц.

Рассмотрим более внимательно профиль волны-убийцы, соответствующий наиболее часто встречающемуся классу. Найдем кубическую регрессию для левой и правой стороны волны в виде

$$P_{\text{left/right}}(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0.$$

Без ограничения общности будем считать, что вершина имеет координаты (0, 1), следовательно,  $a_0 = 1$ . Для типичного профиля имеем следующие числовые значения:

$$P_{\text{left}} = -0.0012x^3 + 0.0127x^2 + 0.3676x + 1,$$

$$P_{\text{right}} = 0.0028x^3 + 0.0063x^2 + 0.2756x + 1.$$

На рис. 2 приведен график профиля и предложенной регрессии, а на рис. 3 показана относитель-

ная точность нашей аппроксимации. Предложенная регрессия кубическими многочленами оказалась эффективной и для других профилей волн-убийц, которые наблюдались в описанных нами экспериментах.

После построения аппроксимации аналитическими функциями можно анализировать различные геометрические характеристики экстремальных волн. В частности, около 95% профилей волн-убийц имеют максимальную крутизну  $k$  в пределах  $k \in [0.25, 0.6]$ , при этом среднее значение крутизны ( $\langle k \rangle = 0.38$ ).

Оставшиеся 5% волн-убийц имели крутизну меньше 0.25.

На рис. 4 приведена диаграмма распределения максимальной крутизны волн-убийц.

Заметим, что наблюдаемые экстремальные волны со схожей формой могут иметь широкий

диапазон максимальной крутизны — от умеренной до сильно нелинейной. Это говорит о том, что не все волны, называемые волнами-убийцами, представляют реальную опасность.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена количественная классификация различных типов волн-убийц по большому массиву результатов вычислительных экспериментов. Показано, что в подавляющем большинстве случаев такие волны имеют схожую геометрию профилей, что позволяет осуществить регрессию формы поверхности аномально больших поверхностных волн с помощью кубических многочленов.

Представленные в работе результаты могут быть использованы для построения типичных профилей волн-убийц и создания инженерных методик для оценки опасности таких волн для кораблей и морских сооружений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (договор № 11.G34.31.0035 от 25 ноября 2010 г., между Минобрнауки России, НГУ и ведущим ученым).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A.* Rogue Waves in the Ocean. В.: Springer, 2009. 216 p.
2. *Захаров В.Е., Шамин Р.В., Юдин А.В.* Энергетический портрет волн-убийц // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. В. 9. С. 597–600.
3. *Sergeeva A., Slunyaev A.* Rogue Waves, Rogue Events and Extreme Wave Kinematics in Spatio-Temporal Fields of Simulated Sea States // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2013. V. 13. P. 1759–1771.
4. *Nikolkina I., Didenkulova I.* Catalogue of Rogue Waves Reported in Media in 2006–2010 // Natural Hazards. 2012. V. 61. № 3. P. 989–1006.
5. *Дьяченко А.И.* О динамике идеальной жидкости со свободной поверхностью // ДАН. 2001. Т. 376. № 1. С. 27–29.
6. *Шамин Р.В.* О существовании гладких решений уравнений Дьяченко, описывающих неустановившиеся течения идеальной жидкости со свободной поверхностью // ДАН. 2006. Т. 406. № 5. С. 112–113.
7. *Шамин Р.В.* Об оценке времени существования решений уравнения, описывающего поверхностные волны // ДАН. 2008. Т. 418. № 5. С. 603–604.
8. *Zhakharov V.E., Dyachenko A.I., Shamin R.V.* How Probability for Freak Wave Formation Can Be Found // Europ. Phys. J. Spec. Topics. 2010. V. 185. № 1. P. 113–124. DOI: 10.1140/epjst/e2010-01242-y.
9. *Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Vasilyev O.A.* New Method for Numerical Simulation of a Nonstationary Potential Flow of Incompressible Fluid with a Free Surface // Europ. J. Mech. B. Fluids. 2002. V. 21. P. 283–291.
10. *Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Prokofiev A.O.* Freak Waves as Nonlinear Stage of Stokes wave Modulation Instability // Europ. J. Mech. B. Fluids. 2006. V. 25. P. 677–692.
11. *Chalikov D.* Freak Waves: Their Occurrence and Probability // Phys. Fluids. 2009. V. 21. Iss. 7.
12. *Захаров В.Е., Шамин Р.В.* О вероятности возникновения волн-убийц // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. В. 2. С. 68–71.
13. *Захаров В.Е., Шамин Р.В.* Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. В. 1. С. 68–71.
14. *Шамин Р.В.* Моделирование аномально больших поверхностных волн в океане. Дис. д-ра физ.-матем. наук. М., 2011.