

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВОЛН-УБИЙЦ

Е.Н. Пелиновский<sup>1,2</sup>, д-р физ.-мат. наук, А.В. Слюняев<sup>1,2</sup>, д-р физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

## METHODS AND MODELS FOR ROGUE WAVE FORECASTING

E.N. Pelinovsky<sup>1,2</sup>, Dr. Sc., A.V. Slunyaev<sup>1,2</sup>, Dr. Sc.

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*Дан обзор исследований по проблеме морских волн-убийц. Приводятся результаты прямого численного моделирования ветрового волнения. Обсуждаются возможности прогноза волн-убийц в рамках детерминистских моделей.*

*The review of the problem of oceanic rogue waves is given. Results of the direct numerical simulation of wind waves are presented. The possibilities of rogue wave forecasting within the deterministic models are discussed.*

В теоретических исследованиях экстремальных волн в морях и океанах существуют две тенденции. Одна из них основана на использовании метеорологической информации (полей атмосферного давления и ветра) как входной в гидродинамических расчетах волн на воде с помощью уравнений энергетического баланса в спектральной форме (WAM, WaveWatch, SWAN и др.). По таким моделям рассчитываются частотно-направленные спектры, а по ним высоты и периоды волн в узлах сеточной области. В результате получают режимные характеристики волнения на различных участках морских акваторий. Затем с помощью функций распределения характеристик волнения (Рэлея или его модификаций) определяются вероятности появления экстремальных волн [1, 2]. Кроме того, экстремальные волны, возможные за большой период времени, рассчитываются в предположении наиболее сильного гипотетического шторма (сценарный подход).

Эти усредненные данные, несомненно, полезны для практики, но не всегда пригодны для предсказания экстремальных волн, в частности, т.н. «волн-убийц», которые неожиданно возникают на поверхности моря на короткое время. В частности, классические кинетические уравнения не способны описывать явления на т.н. динамическом временном масштабе (до порядка сотни периодов волн). В динамическом плане под «волнами-убийцами» обычно понимают такие, высота которых превышает значительную высоту волн в два раза и более. Распространено альтернативное определение «волн-убийц», предполагающее, что они не описываются стандартными вероятностными распределениями, включая учитывающие слабую нелинейность, проявляющуюся в Стоксовой, а не синусоидальной форме волны (т.н. second-order models).

Физические механизмы образования волн-убийц интенсивно исследуются в последнее время, и авторы принимают активное участие в этих исследованиях (см. монографии и обзоры [3-6]). На глубокой воде наиболее распространенными механизмами генерации экстремальных волн являются: 1) модуляционная неустойчивость волновых пакетов, 2) нелинейно-дисперсионная фокусировка, 3) взаимодействие с течениями, и 4) геометрическая фокусировка и нелинейное взаимодействие в скрещенных волновых полях (crossing seas). В исследованиях «волн-убийц» наибольшее внимание уделялось эффектам модуляционной неустойчивости, обусловленной доминирующими четырехволновыми взаимодействиями, которая ранее считалась несущественной для реальных морских условий. При этом формируются долгоживущие нелинейные волновые группы типа солитонов огибающей или бризеров. Для оценки степени подверженности эффектам нелинейной самомодуляции был предложен параметр *BFI* (Benjamin – Feir Index, параметр модуляционной неустойчивости) [7]. Принципиально параметр *BFI* характеризует соотношение между нелинейными эффектами, ведущими к фокусировке волновой энергии, и рассинхронизирующим эффектом дисперсии. Однако действительная

возможность применения  $BFI$  для прогноза опасных состояний моря пока остается предметом исследований.

Благодаря стремительному развитию компьютеров и появлению быстрых алгоритмов расчета уравнений гидродинамики, становится возможным прямое моделирование динамических уравнений для квазислучайных ансамблей волн (вместо упоминаемых выше уравнений энергетического баланса). Кроме отказа от предположений кинетической теории (усреднение по фазе и гипотезы замыкания, слабая нелинейность, медленность эволюции), новые методы и технологии могут быть использованы для построения «численного волнового бассейна» (Numerical Wave Tank) [8, 9], предоставляющего полную информацию о волновых процессах и делающего хлопотные инструментальные измерения ненужными (для определенного класса задач). Одновременно нужно отметить, что результаты сопоставления эволюции волновых систем в натуральных и численных экспериментах, и даже сопоставление расчетов кинетических и динамических моделей могут демонстрировать заметные расхождения [10]; эти проблемы требуют дополнительных исследований. Несомненным успехом численного и лабораторного моделирования, проводившегося разными исследовательскими группами в последние годы, можно считать демонстрацию возможности развития модуляционной неустойчивости в условиях океана. Было показано, что параметр модуляционной неустойчивости  $BFI$  хорошо соответствует разделению режимов волнения на «классический» (роль модуляционной неустойчивости незначительна, малые  $BFI$ ) и «аномальный», характеризуемый повышенной вероятностью больших волн ( $BFI > 1$ ) (см. наш обзор [11]).

В нашей группе для численного моделирования процессов формирования аномально высоких волн используются как приближенные модели типа Кортевега – де Вриза, нелинейного уравнения Шредингера и их обобщений, так и полные уравнения потенциальной гидродинамики. В частности, было выполнено численное моделирование эволюции нерегулярных однонаправленных волн на поверхности воды большой и промежуточной глубины с заданным начальным спектром в рамках потенциальных уравнений Эйлера с учетом эффектов сильной нелинейности [12-14]. Были определены характерные профили «волн-убийц» (была обнаружена специфическая асимметрия, что задний склон волны обычно выше, чем передний), определены характерные времена жизни «волн-убийц» (до десятка минут), построены функции распределения вероятности для больших ансамблей волн (рис. 1).

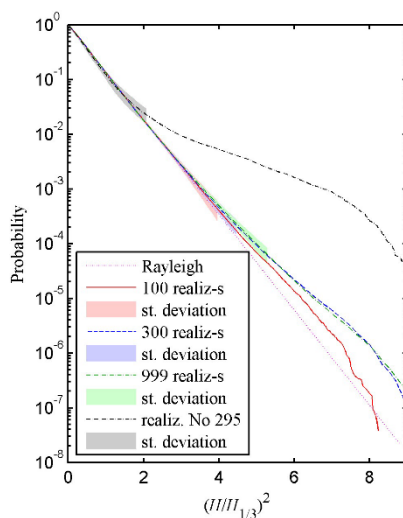


Рис. 1. Распределения вероятности превышения для высот волн  $H$ , нормированных на значительную высоту  $H_{1/3}$  для ансамблей из 100, 300 и 999 реализаций, а также для реализации № 295, демонстрирующей аномально высокую вероятность больших волн. Залиткой приведены оценки доверительно интервала на основе измерений в соседних точках. Начальные условия соответствуют спектру JONSWAP с параметрами  $H_{1/3} = 3.5$  м,  $T_p = 10$  с,  $\gamma = 3$

В последнее время нами выполнены численные расчеты нерегулярных волновых полей в рамках потенциальных уравнений Эйлера для двумерной поверхности. Для повышения скорости

вычислений ограничивается порядок схемы HOSM (High Order Spectral Method) по нелинейности – для аккуратного учета нелинейных 3- и 4-волновых взаимодействий. Подтверждено, что при достаточно узком (по углу и частотам) начальном спектре и достаточно большой интенсивности волн эволюция сопровождается переходной стадией, в течение которой вырастает эксцесс (который характеризует долю высоких волн), ср. рис. 2а и рис. 2б для широкого и относительно узкого угловых спектров волн (первые 200 с расчета относятся к подготовительной стадии и не должны приниматься в расчет). Нами впервые выделена компонента «динамического эксцесса» по данным прямого численного моделирования исходных уравнений гидродинамики (пунктирная линия на рис. 2). На рис. 2а линия динамического эксцесса слабо изменяется и лежит в области менее 3, что говорит о том, что волны могут быть хорошо представимы как случайные с Гауссовым распределением с учетом стоковских компонент связанных волн. На рис. 2б на начальной стадии динамический эксцесс выше 3 и потом спускается к значению около 3; переходная стадия в начальный момент времени лучше видна по полному эксцессу (сплошная линия и точки). Такое поведение говорит об аномально большой доле высоких волн на начальной стадии, причем этот эффект не описывается только стоковскими поправками к форме волн, а обусловлен, в т.ч., возникновением фазовых корреляций между свободными волнами.

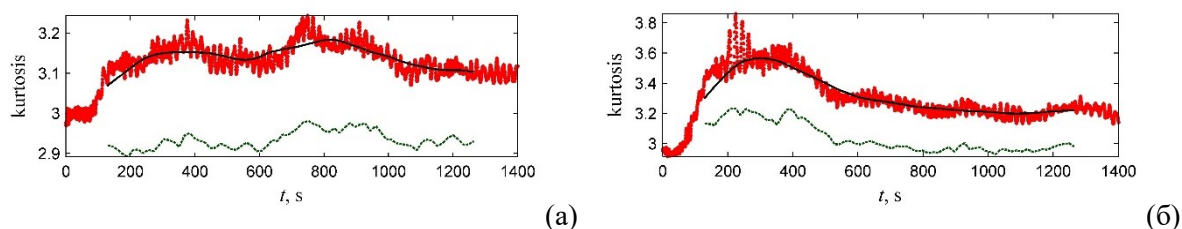


Рис. 2. Временные зависимости эксцесса по данным численного моделирования трехмерных волн с начальными спектрами JONSWAP и параметрами  $H_{1/3} = 7$  м,  $T_p = 10$  с,  $\gamma = 6$  с шириной углового спектра  $62^\circ$  (а) и  $12^\circ$  (б). Точками построены моментальные значения эксцессов (для поверхности  $50 \times 50$  волн), сплошными линиями – они же после усреднения по 256 с; пунктирной линией построены эксцессы для компонент свободных волн.

Хотя на первый взгляд «волны-убийцы» представляют собой непредсказуемые случайные выбросы в стохастическом поле морских волн, уже предложены возможные способы их предсказания (см. в обзоре [6]), и они продолжают исследоваться. Для поиска когерентных волновых групп в поле волн нами разработан метод оконного спектрального анализа с помощью аппарата обратной задачи рассеяния для нелинейного уравнения Шредингера [15, 16]. На рис. 3 приведен пример его применения для реализации № 295 нерегулярных однонаправленных волн, обсуждавшейся на рис. 1. На рис. 3а цветом построена поверхность волн в сопровождающей системе отчета. С помощью примененного метода в моментальных снимках волн обнаружена интенсивная волновая группа (отмечена символами на рис. 3а), которая видна в данном случае и на глаз. На рис. 3б символами построена оцененная с помощью метода амплитуда когерентной группы, которая слабо изменяется в течение почти 250 периодов  $T_p$ , т.о., проявляет свойства солитона огибающей. Взаимодействуя с фоновыми волнами, эта группа может демонстрировать и более высокие смещения поверхности. Простое линейное сложение локальной амплитуды солитонной группы и уровня значительного волнения  $H_{1/3}/2$  (показано заливкой на рис. 3б) не всегда объясняет наблюдаемые максимальные смещения поверхности (сплошная линия на рис. 3б), так что требуется более аккуратный анализ. Способность определять наличие таких долгоживущих групп в волновом поле может быть использована для краткосрочного прогноза «волн-убийц».

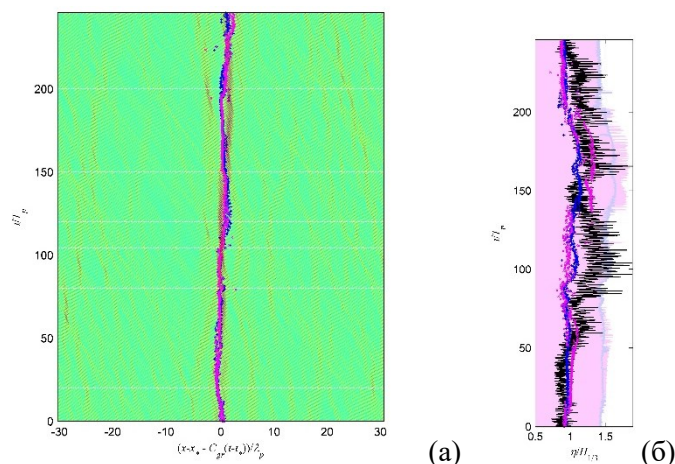


Рис. 3. (а): Поле смещений поверхности в реализации однонаправленных волн № 295 в сопровождающей системе координат и позиции солитоноподобной группы (два типа значков соответствуют двум модификациям метода анализа). (б): глобальный максимум смещения (сплошная линия) и определенные амплитуды интенсивных солитоноподобных групп (значки); заливкой построена оценка амплитуды солитона плюс половина значительной высоты волн.

### Литература

1. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Дивинский Б.В., Рожков В.А. О необычных волнах в океанах и морях // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2003. Вып. 26. С. 65-73.
2. Lopatoukhin L.J., Boukhanovsky A.V. Freak wave generation and their probability // Int. Shipbuild. Progr. 2004. Vol. 51. P. 157-171.
3. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование. Н. Новгород: ННГТУ, 2004.
4. Kharif Ch., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009.
5. Slunyaev A., Didenkulova I., Pelinovsky E. Rogue Waters // Contemp. Phys. 2011. Vol. 52. P. 571-590.
6. Слюняев А.В. Морские «волны-убийцы»: прогноз возможен? // Вестник МГУ. Серия 3. Физика и Астрономия. 2017. №3. С. 33-47.
7. Onorato M., Osborne A.R., Serio M., Bertone S. Freak waves in random oceanic sea states // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86. P. 5831-5834.
8. Ducrozet G., Bonnefoy F., Ferrant P. On the equivalence of unidirectional rogue waves detected in periodic simulations and reproduced in numerical wave tanks // Ocean Eng. 2016. Vol. 117. P. 346-358.
9. Chalikov D. Numerical modeling of surface wave development under the action of wind // Ocean Science. 2018. Vol. 14. P. 453-470.
10. Annenkov S.Y., Shrira V.I. Spectral evolution of weakly nonlinear random waves: kinetic description versus direct numerical simulations // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 844. P. 766-795.
11. Слюняев А.В., Сергеева А.В. Стохастическое моделирование однонаправленных интенсивных волн на глубокой воде в приложении к аномальным морским волнам // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 94. С. 850-858.
12. 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. Vol. 13. P. 1759-1771.
13. Slunyaev A., Sergeeva A., Didenkulova I. Rogue events in spatiotemporal numerical simulations of unidirectional waves in basins of different depth // Nat. Hazards. 2016. Vol. 84. P. 549-565.
14. Slunyaev A.V., Kokorina A.V. Soliton groups as the reason for extreme statistics of unidirectional sea waves // J. Ocean Eng. Marine Energy. 2017. Vol. 3. P. 395-408.
15. Slunyaev A. Nonlinear analysis and simulations of measured freak wave time series // Eur. J. Mech. B / Fluids. 2006. Vol. 25. P. 621-635.
16. Слюняев А.В. Анализ нелинейного спектра интенсивного морского волнения с целью прогноза экстремальных волн // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2018. Т. 61. С. 1-23.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 16-17-00041).*

*This work was supported by the Russian Science Foundation (grant 16-17-00041).*