

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЯ МОРСКИХ ВОЛН-УБИЙЦ

Слюняев А.В.

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Н. Новгород
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток
slunyaev@ipfran.ru*

Проблема так называемых волн-убийц (rogue waves, freak waves), заключающаяся в неожиданно частом возникновении очень высоких волн на морской поверхности, является предметом активных исследований последние два десятилетия, см. недавний обзор [1]. Конструктивный взгляд на нее можно описать как пересмотр теоретических распределений вероятностей высот волн в области очень редких событий экстремальных волн и развитие моделей прогноза ветрового волнения с учетом «быстрых» (по сравнению с т.н. кинетическим масштабом, характерным для уравнений баланса спектральной энергии) нелинейных эффектов, в том числе возможности формирования связанных нелинейностью долгоживущих волновых структур. Наиболее интересными представляются результаты на стыке разных разделов науки, в частности, использование математического аппарата обратной задачи рассеяния, разработанного для описания ограниченного класса нелинейных уравнений в частных производных, а также применение прямого численного моделирования уравнений гидродинамики для максимально реалистичного воссоздания условий моря, накопления статистики волн и осуществления детерминистского оперативного прогноза.

В настоящей работе обсуждаются результаты численного моделирования нерегулярных волн на поверхности моря постоянной глубины (от большой до умеренной, $kh > 0.4$, где k – характерное волновое число и h – глубина) в рамках кода уравнений гидродинамики, позволяющего проводить относительно быстрое моделирование больших ансамблей волн и описывать сильно нелинейные эффекты [2]. Для лучшего понимания роли нелинейных взаимодействий волн в условиях сильной нелинейности и широкого спектра, когда применение упрощенных моделей сомнительно, используется декомпозиция волн в пространстве волновых векторов и частот оконного Фурье преобразования [3].

С целью оценки вероятностных свойств волн в реальных условиях с фокусом на редкие события экстремальных волн выполняется обработка

данных измерений поверхностных волн у о-ва Сахалин датчиками донного давления [4], продолжающая цикл предшествующих работ других авторов по анализу данных измерений в этой акватории. Для примера, на рис. 1 показаны частоты возникновения разных условий на плоскости параметров безразмерной глубины kh и крутизны волн $2\sigma k$, где σ – среднеквадратичное смещение, для данных измерений в 2012-2015 гг. Линиями уровня показаны разные периоды повторяемости условий от 4 часов до 1 месяца, построенные по данным всего около года непрерывных измерений. Кроме измерений в одной точке, была выполнена регистрация антенной из трех датчиков, равноудаленных на 1.5 м, что позволило оценить ширину углового спектра в месте измерений.

Отметим, что по результатам измерений на одной глубине (ок. 10 м) фактически получены данные о волнах в значительном интервале глубин kh от 0.4 до 2. Эти условия разительно отличаются по физике волн, включая диаграммы модуляционной неустойчивости. В работе [5] были построены распределения вероятностей высот волн для разных интервалов безразмерных параметров, характеризующих глубину и нелинейность волн. Наиболее сильная изменчивость распределений была обнаружена

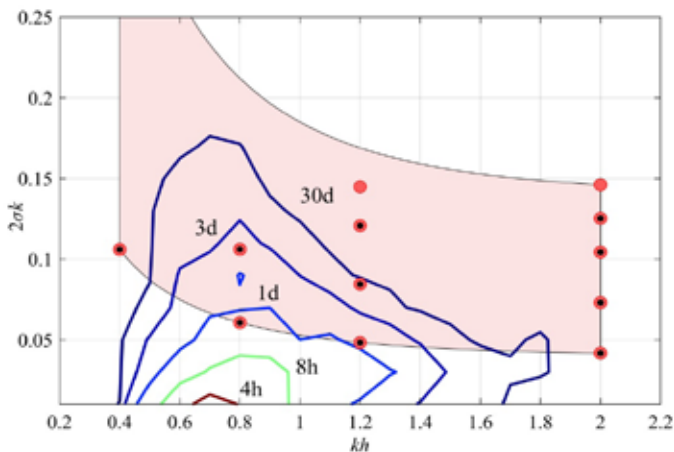


Рис. 1. Плоскость безразмерных параметров локальной глубины и крутизны волн. Линии уровня: распределение частот повторяемости волновых условий на по данным измерений у о-ва Сахалин (4 часа, 8 часов, 1 день, 3 дня, 1 месяц). Заливка: область параметров, использованных для проведения численного моделирования. Значки: условия численного моделирования, когда эффект обрушения был незначительным (мелкие кружки для ширины углового спектра 12° и крупные кружки для 62°).

для параметра «мелководной нелинейности» – отношения высоты волн к глубине. С ростом нелинейности вероятность очень высоких волн уменьшается, а вероятность волн с малой высотой (в сравнении со значительной высотой 4σ) подрастает. Такое поведение, в целом, согласуется с распределением Глуховского, что может объяснять отличное соответствие с ним большинства данных измерений, отмеченное в [4,5].

Области параметров выполненного численного моделирования нерегулярных волн на поверхности воды показаны заливкой на рис. 1. Начальные условия характеризуются частотным спектром JONSWAP с периодом в пике $T_0 = 10$ с и пиковатостью $\gamma = 6$. Расчеты выполнены для разных значений $kh = 0.4 \dots 2$ и разной интенсивности волн $H_s = 2 \dots 7$ м. Угловое распределение волн задавалось согласно модельной функции \cos^2 для характерной ширины Θ . Расчеты для конкретных значений параметров и разной характерной ширины углового спектра волн $\Theta = 12^\circ$ и $\Theta = 62^\circ$ (отражены на рис. 1 кружками разного размера). Наиболее интересные с точки зрения нелинейной динамики условия соответствуют большим крутизнам волн, и таких натуральных данных, согласно рис. 1, немного. Из-за небольшой глубины установки прибора большинство данных соответствует глубине $kh = 0.8 \dots 1$, где роль модуляционной неустойчивости ожидаемо слабая.

Исследования поддержаны грантом РФФ № 22-17-00153.

Литература

1. Слюняев А.В., Пелиновский Д.Е., Пелиновский Е.Н. Морские волны-убийцы: наблюдения, физика и математика // Успехи физических наук. 2023. Т. 193. С. 155–181.
2. Слюняев А.В., Кокорина А.В. Численное моделирование «волн-убийц» на морской поверхности в рамках потенциальных уравнений Эйлера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. С. 210–223.
3. Слюняев А.В. Вклады компонент волн на поверхности глубокой воды в распределения вероятностей аномально высоких волн по результатам прямого численного моделирования уравнений Эйлера // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023 (на рецензии).
4. Кокорина А.В., Слюняев А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., Москвитин А.А., Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Анализ данных долговременных измерений волн у о-ва Сахалин // Экологические системы и приборы. 2022. № 12. С. 45–54.
5. Слюняев А.В., Кокорина А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., Москвитин А.А., Диденкулов О.И., Пелиновский Е.Н. Зависимость вероятностных распределений высот волн от физических параметров по результатам измерений у о-ва Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023 (на рецензии).