

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Проведен анализ современных операционных моделей прогнозирования ветровых волн. Результаты численных экспериментов по измерению и анализу диссипации однородного волнения поверхности океана в рамках компактного уравнения Захарова показали, что основным механизмом диссипации, наряду с каскадом Колмогорова-Захарова, является образование экстремальных волн и их опрокидывание. Выявлено, что эвристические модели диссипации, используемые в прогностических операционных моделях WAM3 и WAM4 дают завышенный темп диссипации ветровых волн. Численно изучена вероятность возникновения волн-убийц в рамках компактного уравнения Захарова для волн на глубокой воде. Произведено сравнение этой вероятности с вероятностью которую предсказывает линейная модель. Показано, что нелинейные эффекты, а именно модуляционная неустойчивость, приводит к значительному увеличению вероятности появления волн-убийц. «Хвосты» функции распределения высот волн являются гауссовыми, однако дисперсия распределения на порядки больше, чем в линейной модели с таким же уровнем турбулентности.

2. Тема работы

Исследование диссипации энергии океанских волн из-за их опрокидывания. Изучение статистики океанских волн экстремальной амплитуды.

3. Состав коллектива

Качулин Дмитрий Игоревич, к.ф.-м.н., м.н.с. Лаборатории нелинейных волновых процессов ФФ НГУ, ассистент кафедры высшей математики ФФ НГУ (исполнитель, логин dikachulin)

Дьяченко Александр Иванович, д.ф.-м.н., в.н.с. Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, с.н.с. Лаборатории нелинейных волновых процессов ФФ НГУ (руководитель)

Захаров Владимир Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, заведующий Лабораторией нелинейных волновых процессов ФФ НГУ, г.н.с. Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, заведующий сектором математической физики Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (руководитель)

4. Информация о гранте

РНФ, Конкурс 2014 г. на получение грантов по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований коллективами существующих научных лабораторий (кафедр)». Грант № 14-22-00174. Руководитель – В.Е. Захаров.

5. Научное содержание работы

5.1. Постановка задачи

Первой задачей проекта являлся анализ используемых эвристических моделей диссипации ветровых волн в прогностических операционных моделях WAM3 и WAM4. Для этого, в рамках компактного уравнения Захарова, описывающего динамику слабонелинейных ветровых волн, проводились численные эксперименты по измерению и анализу диссипации однородного волнения поверхности океана с умеренной крутизной $\sim 0.06 - -0.07$. Второй задачей проекта являлось определение вероятности появления экстремальных волн (волн-убийц), в зависимости от уровня нелинейности (средней крутизны волн) и сравнения полученных результатов с вероятностью, которую предсказывает линейная модель.

5.2. Современное состояние проблемы

Нелинейность волн на поверхности глубокой воды может быть охарактеризована величиной средней крутизны поверхности $\mu = \langle \nabla \eta^2 \rangle$, где $\eta(x, t)$ – профиль поверхности. В реальном море харак-

терные значения крутизны являются умеренными $\mu \simeq 0.06 - -0.07$. Однако даже при небольшой крутизне возникает опрокидывание волн с образованием «белых барашков», из-за чего волны теряют энергию. Это явление еще не изучено до конца ни экспериментально, ни теоретически. Тем не менее в оперативных моделях прогнозирования ветровых волн широко используются эвристические формулы для скорости затухания волн. Они были введены примерно тридцать лет назад [1, 2], и с тех пор мало изменились. Для изучения диссипации волн из-за их опрокидывания достаточно модели с одним пространственным измерением. При умеренных значениях крутизны, $mi \leq 0.07$, можно использовать динамическое уравнение Захарова. Для волн, распространяющихся в одном направлении оно сводится к компактному нелинейному уравнению, удобного для численного моделирования [1, 2].

Важным вопросом относящимся к волнам экстремальной амплитуды или волнам-убийцам является вопрос вероятности их появления. При этом наиболее важным представляется возможность вычисления вероятности появления волны-убийцы в определенном временном интервале в заданной пространственной области с некоторыми известными параметрами, определяющими картину волнения. Физические механизмы возникновения волн-убийц рассмотрены в работе [5]. Они включают в себя пространственную фокусировку, дисперсионное сжатие волновых пакетов и нелинейную фокусировку. В линейных моделях океанских волн статистика амплитуд волн является гауссовой. Для нелинейных моделей наблюдается отклонение от гауссовой статистики [6, 7]. Океанские волны имеют острые и узкие гребни с более округлой впадиной. Это приводит к асимметрии между гребнями и впадинами. Асимметрия распределения плотности вероятности по амплитудам волн детально изучена в [8]. В настоящем проекте мы сосредоточились на изучении влияния дисперсионного сжатия волновых пакетов и нелинейной фокусировки на статистику волн экстремальной амплитуды.

1. G.J. Komen, S. Hasselmann, and K. Hasselmann, J. Phys. Oceanogr. 14, 1271 (1984).
2. The WAMDI group, J. Phys. Oceanogr. 18, 1775 (1988).
3. A.I. Dyachenko and V.E. Zakharov, JETP Letters, 2011, 93(12), 701.
4. A.I. Dyachenko and V.E. Zakharov, European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2012, 32, 17.
5. K. Dysthe, H. E. Krogstad, and P. Muller, Annu. Rev. Fluid Mech. 40:287 (2008).
6. M. Onorato et al., Phys. Fluids 17:078101 (2005).
7. F. Fedele and F. Arena, Phys. Fluids 17:026601 (2005).
8. F. Fedele and M. Tayfun, J. Fluid Mech. 620:221 (2009).

5.3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы. Полученные результаты

Для изучения диссипации энергии при развитом волнении были проведены численные эксперименты динамики поверхности описываемой нелинейным компактным уравнением Захарова [1, 2]. Для учета потерь энергии при опрокидывании волн в правую часть компактного уравнения Захарова было добавлено слагаемое $-\Gamma_d(k)b_k$, где

$$\Gamma_d(k) = \begin{cases} \alpha k^4 & \text{если амплитуда 100 старших гармоник } b_k \text{ превышала в } 10^4 \text{ раз} \\ & \text{величину ошибки округления} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициент $\alpha = 0.9/\tau k_{max}^4$. Был разработан численный алгоритм решения уравнения на основе псевдоспектрального метода Фурье с интегрированием по времени методом Рунге-Кутты 4 порядка точности. Расчеты проводились в размерном виде, в периодической области размера $L = 10$ км. Начальные условия подбирались таким образом, чтобы спектр волнения соответствовал известному спектру JONSWAP. Были проведены численные эксперименты по изучению релаксации развитого морского волнения с разными скоростями ветра (на высоте 10 метров над уровнем моря) $U_{10} = 9, 12$ и 20 м/с.

Обнаружено большое различие между численными результатами, полученными в рамках компактного уравнения Захарова и предсказанием модели WAM3 (см. Рисунок 1, слева). И при численных экспериментах в рамках компактного уравнения Захарова и рамках модели начальные условия были одинаковыми. Однако через примерно сотню тысяч характерных периодов волн спектры

сильно отличаются. Операционная модель предсказывает гораздо большую диссипацию энергии. За это время энергия волн в модели WAM3 уменьшилась примерно на 20%. Сравнение спектральных функций диссипации из модели WAM3 с полученной нами в численных экспериментах приведено на Рисунке 1 справа.

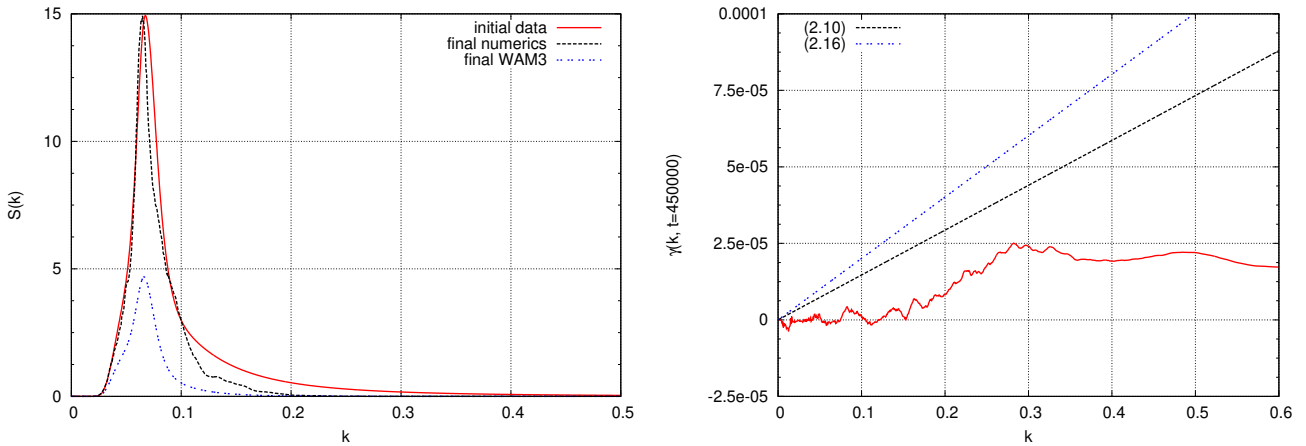


Рис. 1: Слева: спектральная плотность $S(k)$. Красной кривой показан спектр JONSWAP используемый в качестве начального условия в численных экспериментах (скорость ветра на высоте 10 метров $U_{10} = 12/$). Черными точками показан конечный спектр ветровых волн, полученный нами в результате численных экспериментов после примерно сотни тысяч характерных периодов волны в рамках компактного уравнения Захарова. Синими точками показан спектр, предсказанный моделью WAM3 в конечный момент времени. Справа: графики функций диссипаций в модели WAM3 (синяя и черная прямые) и усредненная функция диссипации энергии, полученная нами в численных экспериментах (красная сплошная кривая).

В результате проведенного исследования мы показали, что эвристические формулы для скорости диссипации энергии морских волн из-за формирований «белых барашков» сильно преувеличивают роль этого эффекта. Кроме того, нами было показано, что в области максимума спектра ветровых волн диссипация энергии практически отсутствует, а основное затухание сосредоточено в области больших волновых чисел. Это означает, что появление «белых барашков» приводит, в первую очередь, к исчезновению «хвостов» спектров и сглаживанию волнового поля. Аналогичная картина слабой диссипации энергии наблюдалась в [3]. Поскольку «функции диссипации» играют ключевую роль в широко используемых операционных моделях, неизбежный вывод заключается в том, что эти модели требуют фундаментального пересмотра.

Были проведены численные эксперименты по изучению статистики волн экстремальной амплитуды в рамках модели компактного уравнения Захарова. Накопление статистики волн различной амплитуды проводилось в "стационарном турбулентном состоянии системы". Для этого в правую часть нелинейного уравнения Захарова были добавлены слагаемые, отвечающие за накачку энергии и за диссипацию вследствие опрокидывания волн (подробности см. в [1,2]). Были определены функции распределения вероятностей возвышений волн в «цифровом бассейне» при различных уровнях турбулентности (характеризуемых крутизной волн). Проведено сравнение найденных в нелинейных задачах функций распределения вероятностей для волн аномальной амплитуды со статистикой волн в линейной модели для одинаковых значений крутизны волн.

Линейная модель, как и ожидалось, демонстрирует точное распределение Рэлея поверхностных волн, в то время как плотности распределения вероятности амплитуд волн в нелинейном уравнении имеют хвосты, аналогичные распределению Рэлея, но с большим значением дисперсии σ . Выявлено существенное увеличение вероятности регистрации волн-убийц при учете нелинейных процессов – модуляционной неустойчивости ветровых волн (см. Рисунок 2).

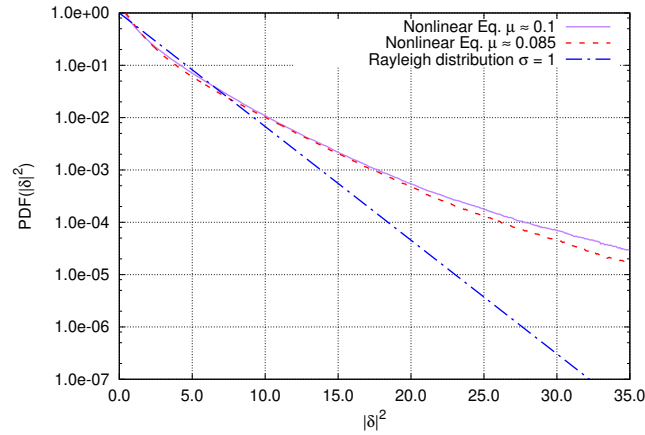


Рис. 2: Сравнение функций плотности распределения вероятностей (обезразмеренных) амплитуд волн, полученных в рамках компактного уравнения Захарова для двух значений средней крутизны волн $\mu \approx 0.1$ (фиолетовая сплошная кривая) и $\mu \approx 0.085$ (пунктирная красная кривая) с распределением Рэлея.

1. A.I. Dyachenko and V.E. Zakharov, JETP Letters, 2011, 93(12), 701.
2. A.I. Dyachenko and V.E. Zakharov, European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2012, 32, 17.
3. V. E. Zakharov, A. O. Korotkevich, and A. O. Prokofiev, AIP Conf. Proc. 1168, 1229 (2009).

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Для изучения диссипации энергии океанских волн, а также исследования статистики появления волн экстремальной амплитуды необходимо было проводить большое количество численных экспериментов при различных начальных условиях задачи. Проведение подобных расчетов на обычной рабочей станции требовало большого количества времени. Поэтому использование кластера оказало определяющее влияние для достижения целей работы.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. A.I. Dyachenko, D.I. Kachulin, V.E. Zakharov, Statistics of freak waves in numerical tank, Lobachevskii J. Math., 38(5), 888-892 (2017)
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1995080217050080>
 doi:10.1134/S1995080217050080
 (WoS, Scopus, РИНЦ)
2. A.I. Dyachenko, D.I. Kachulin, V.E. Zakharov, Probability Distribution Functions of Freak Waves: Nonlinear Versus Linear Model, Stud. Appl. Math., 137(2), 189-198 (2016)
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/sapm.12116abstract;jsessionid=80A00DBBE6C2970E3DA438850E>
 doi:10.1111/sapm.12116
 (WoS, Scopus, РИНЦ)
 IF 2.015
3. A.I. Dyachenko, D.I. Kachulin, V.E. Zakharov, Evolution of one-dimensional wind-driven sea spectra, Письма в ЖЭТФ, 102 (8), 577-581 (2015) [JETP Letters, 102(8), 513-517 (2015)]
http://www.jetpletters.ac.ru/ps/2092/article_31461.shtml
 doi:10.7868/S0370274X15200060
 (WoS, Scopus, РИНЦ)
 IF 1.235