

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ШТОРМОВЫХ ВОЛН В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ МОРЯ

Сапрыкина Я¹., Кузнецов С.1, Чернева Ж²., Андреева Н².

¹ Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН

² Институт океанологии им.Ф.Нансена БАН

e-mail: saprykina@ocean.ru, kuznetsov@ocean.ru, cherneva@io-bas.bg, n.andreeva@io-bas.bg

Введение. Многие проблемы динамики береговой зоны требуют точного описания поля волн. Обычно для инженерных расчетов используются осредненные по времени параметры волн. Однако, как показали исследования последних лет, например, процессы взвешивания и транспорта наносов и экстремальные волновые нагрузки на береговые сооружения определяются индивидуальными волнами и никогда не могут быть корректно оценены на основе осредненных волновых параметров.

В природе практически все ветровые и штормовые волны нерегулярны, т.е. параметры индивидуальных волн, например, такие как высота и период (спектральный или амплитудно-частотный состав), изменяются от одной волны к другой при трансформации волн в береговой зоне, и может значительно отличаться от их осредненного по времени спектра.

Цель данной работы - выяснить, как изменяется в пространстве и времени амплитудно-частотный состав индивидуальных нерегулярных волн, каковы закономерности и физические механизмы этих изменений и возможна ли простая качественная модель для описания изменчивости параметров индивидуальных волн при их трансформации в береговой зоне.

Методы исследования. Для описания изменений амплитудно-частотного состава индивидуальных волн в береговой зоне на некотором расстоянии от берега, по аналогии с теорией волн Стокса, возвышения свободной поверхности (волны) можно представить в виде суммы первой и второй кратных нелинейных гармоник с медленно меняющимися во времени мгновенными амплитудами a_1 и a_2 и круговой частотой ω :

$$w(t) = a_1(t) \cos(\omega t) + a_2(t) \cos(2\omega t + \phi). \quad (1)$$

В действительности мгновенные амплитуды a_1 и a_2 являются огибающими волн соответствующих частотных диапазонов. Такое представление позволяет описать временную и пространственную изменчивость индивидуальных волн, исследуя изменения сдвига фаз ϕ между первыми и вторыми гармониками и изменения амплитуд их огибающих. Огибающие волн частотного диапазона первых и вторых гармоник вычислялись по формуле

$$e_{1,2}(t) = \sqrt{\{L[w(t)]\}^2 + \{H[L[w(t)]]\}^2}, \quad (2)$$

где $H[.]$ - преобразование Гильберта, $L[.]$ - оператор линейной фильтрации необходимых частотных диапазонов и $w(t)$ - измеренные в эксперименте возвышения свободной поверхности.

Изменения амплитудно-частотного состава индивидуальных нерегулярных волн при их распространении к берегу оценивались путем анализа эволюции спектра волн, спектров огибающих и функции когерентности между огибающими первых и вторых гармоник. Для оценки нелинейных связей между гармониками, возникающими за счет трехволновых нелинейных взаимодействий, был применен биспектральный анализ.

Бихроматические волны: лабораторный эксперимент. Исследуем изменения огибающих первых и вторых гармоник ($a_1(t)$ и $a_2(t)$) на простом примере трансформации волн с групповой структурой - бихроматических волн на постоянной глубине над ровным дном ($kh \approx 1$), без обрушения. Для анализа будем использовать данные лабораторного эксперимента, проведенного в гидрологическом лотке Института водного строительства Польской академии наук (г. Гданьск, 2005) в ноябре 2005 г. Длина лотка – 64 м, ширина - 0.8 м. Волны (возвышения свободной поверхности) измерялись синхронно в пятнадцати точках лотка, начиная с расстояния 4 м от волнопродуктора, через каждые 3 м до расстояния 47 м. Для регистрации волнения использовались струнные датчики: 8 емкостных и 7 - сопротивления. Длительность измеренных серий возвышений свободной поверхности составляла 4 мин, частота опроса датчиков – 200 Гц.

Из анализа эволюции спектра волн хорошо видно, что по мере трансформации волн происходит периодический обмен энергией между первыми и вторыми гармониками, что проявляется в периодическом изменении их амплитуд. В результате этих периодических нелинейных взаимодействий происходит постепенное расширение частотного диапазона как первых, так и вторых гармоник.

После каждого полного цикла околорезонансных нелинейных взаимодействий в спектре волн появляются новые частоты. Спектр частотного диапазона первых гармоник расширяется из-за обратной передачи энергии от более высоких, чем вторая, гармоник. Частотный диапазон вторых гармоник расширяется как за счет суммарных нелинейных взаимодействий с вновь появившимися гармониками частотного диапазона первых гармоник, так и за счет разностных нелинейных взаимодействий с более высокими по частоте, чем вторые, гармониками.

Такое расширение спектра волн в свою очередь ведет к пространственному изменению вида огибающих как первых, так и вторых гармоник, и, соответственно, к изменению их спектра. Поэтому, в разных точках пространства огибающие изменяются во времени несинхронно. Однако на начальной стадии трансформации волн, когда расширение частотных диапазонов первых и вторых гармоник и спектра волн еще мало, огибающие изменяются почти синхронно. На этих расстояниях от берега индивидуальные волны имеют практически одинаковую амплитудно-частотную структуру, когда амплитуды вторых гармоник пропорциональны амплитудам первых.

При дальнейшей трансформации волн синхронность изменения огибающих частотных диапазонов первых и вторых гармоник постепенно нарушается за счет появления временного сдвига между максимумами их огибающих и периодических изменений спектров огибающих, происходящих за счет прямой и обратной передачи энергии между первыми и вторыми гармониками (Кузнецов, Сапрыкина, 2002). Несинхронные изменения огибающих свидетельствуют о нарушении пропорциональности между амплитудами первых и вторых гармоник в индивидуальных волнах: волны с большими амплитудами первых гармоник и маленькими амплитудами вторых чередуются с волнами, имеющими большие амплитуды и первых и вторых гармоник. При дальнейшей трансформации волн, амплитудно-частотная структура индивидуальных волн начинает меняться хаотически.

На начальной стадии трансформации волн, когда амплитуды вторых гармоник пропорциональны амплитудам первых, эта зависимость имеет квадратичный характер, как в теории волн Стокса. При последующей трансформации волн и расширении их спектра значения функции когерентности уменьшаются, зависимость между амплитудами вторых и первых гармоник с течением времени становится хаотической и амплитудно-частотная структура одной индивидуальной волны сильно отличается от другой волны.

Нерегулярные волны: натурный эксперимент. Для анализа мы использовали данные международного натурального эксперимента, проведенного на Черном море в Болгарии (п. Шкорпиловцы) в 2007 г. Для регистрации волнения использовались 15 струнных волнографов: 7 емкостных датчиков и 8 датчиков сопротивления. Измерения во всех 15 точках производились синхронно с частотой опроса датчиков 5 Гц. Длина измеренных серий составляла 1 ч.

Измеренные возвышения свободной поверхности были исследованы вышеописанными методами, и проведенный анализ подтвердил результаты, полученные для регулярных волн в лабораторном эксперименте.

При приближении волн к берегу, как и в случае бихроматических волн, в результате нелинейных взаимодействий образуются вторые гармоники, и существует периодический обмен энергией между первыми и вторыми гармониками, отражающийся в периодическом изменении их амплитуд.

Значения функции когерентности между огибающими частотного диапазона первых и вторых гармоник на начальной стадии трансформации относительно высоки – около 0.7. Это означает, что огибающие частотного диапазона первых и вторых гармоник меняются достаточно синхронно, а амплитуды вторых и первых гармоник в индивидуальных волнах пропорциональны. Так же, как и в лабораторных волнах, обратная передача энергии уменьшает значения функции когерентности между огибающими волн частотного диапазона первых и вторых гармоник и нарушает синхронность их изменения во времени.

Означает ли отсутствие когерентности между огибающими, что волновое движение стало полностью хаотичным и исчезли не только линейные, но и нелинейные связи между гармониками волнового движения? Для ответа на этот вопрос был проведен биспектральный анализ, позволяющий установить связи второго порядка. Оказалось, что связи второго порядка между первыми и вторыми гармониками существуют на всех стадиях трансформации волн. Высокие значения функции бикогерентности (порядка 0.6) свидетельствуют о том, что на протяжении всей береговой зоны первые и вторые гармоники волн являются связанными волнами, возникающими в результате трехволновых взаимодействий (Cherneva, Guedes Soares, 2005). Оценим относительный сдвиг фаз (бифазу) между первыми и вторыми гармониками в волнах, φ в формуле (1). Оказалось, что бифаза квазипериодически меняется по мере приближения волн к берегу с периодом, равным характерному времени нелинейных взаимодействий, что является основной причиной, приводящей к различиям амплитудно-частотного состава индивидуальных волн.

Выводы. На основе анализа экспериментальных данных были исследованы пространственно-временные изменения амплитудно-частотного состава индивидуальных волн. Обнаружено, что в результате нелинейных околорезонансных трехволновых взаимодействий амплитудно-частотная структура индивидуальных волн меняется квазипериодически как в пространстве, так и во времени. Сдвиг фаз между первыми и вторыми гармониками строго зависит от направления передачи энергии между первыми и вторыми гармониками и соотношения между интенсивностями нелинейных и дисперсионных процессов. Поэтому построение простой качественной физической модели (параметризации), описывающей изменчивость индивидуальных волн в береговой зоне, возможно только на начальной стадии их трансформации на основе, например, обобщения теории волн Стокса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №08-05-00648, и в результате международного сотрудничества между Российской академией наук и Болгарской академией наук.

Литература

Кузнецов С.Ю., Сапрыкина Я.В. Экспериментальные исследования эволюции групп волн в береговой зоне моря // *Океанология*. 2002. Т. 42. № 3. С. 356-363.

Cherneva Z., Guedes Soares C. Bispectra and time-frequency spectra of wind waves in the coastal zone // *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*. London: Francis and Taylor; 2005. P. 1006-1014.