БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО ОКЕАНОЛОГИЯ "Ф. НАНСЕН"

гл. ас. Наталия Каменова Андреева

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕЛИНЕЙНОСТТА НА ВЕТРОВОТО ВЪЛНЕНИЕ В БРЕГОВАТА ЗОНА

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен "Доктор" Област на висше образование: шифър 4. "Природни науки, математика и информатика" Професионално направление: шифър 4.4. "Науки за земята" Научна специалност: шифър 01.08.07 "Океанология" Секция "Динамика на бреговата зона"

Научен ръководител:

дтн Живелина И. Чернева

/Висш технически институт, гр. Лисабон, Португалия/

Варна

2013

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширен семинар на секция "Динамика на бреговата зона" към Института по океанология "Ф. Нансен" на Българска Академия на Науките, състоял се на 21 май 2013 г.

Авторката е подготвила дисертацията като редовен докторант и главен асистент в секция "Динамика на бреговата зона" към Института по океанология "Ф. Нансен" -БАН с научен ръководител дтн Живелина И. Чернева от Висшия технически институт, гр. Лисабон, Португалия.

Представеният дисертационнен труд в обем от 215 страници текст, съдържа 6 глави, 50 фигури, 4 таблици и 2 приложения. Списъкът на цитираната литература включва 231 заглавия, от които 29 на кирилица и 202 на латиница.

Защитата на дисертационният труд ще се състои на 23.10.2013 г. от 10.00 ч. в заседателната зала на Института по океанология "Ф. Нансен"-БАН на бул. "Първи май" № 40 на открито заседание на петчленно Научно жури в състав:

- 1. проф. дтн инж. Пенко Николов Градинаров ТУ-Варна
- 2. проф. д-р инж. Румен Здравков Кишев ИМСТЦХА-БАН
- 3. доц. д-р инж. Дорина Христова Драганчева ИМСТЦХА-БАН
- 4. дтн Живелина Иванова Чернева ВТИ, г. Лисабон, Португалия
- 5. проф дфн Димитър Иванов Трухчев ИО-БАН

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на Института по океанология "Ф. Нансен"-БАН, гр. Варна, бул. "Първи май" № 40.

Заглавие на дисертацията: "Експериментални методи за изследване на нелинейността на ветровото вълнение в бреговата зона"

Автор: гл. ас. Наталия Каменова Андреева гр. Варна – 9003, бул. "Първи май" № 40, п.к. 152, Институт по океанология "Ф. Нансен" – БАН Секция "Динамика на бреговата зона" Тел.: (052) 370 493 E-mail: <u>n.andreeva@io-bas.bg</u>

въведение

Актуалност на темата

Ветровите вълни представляват изключително важна динамична характеристика на бреговата зона, като внясят в нея голяма част от енергията, получена от вятъра и така влияят на всички протичащи там динамични процеси. Те се явяват основна движеща сила за крайбрежната динамика на теченията, транспорта на наноси и влияят на морфолитодинамиката на бреговете. От тази гледна точка познаването на вълните и силите, които генерират е изключително важно при планирането и изпълнението на дейности като конструиране, строителство и поддръжка на брегоукрепителни съоръжения, пристанища, канали, добива и транспорта на нефт и газ, и рекреационните дейности свързани с морския туризъм. Всичко това изисква обезпечаване на безопасността и устойчивостта на съоръженията и плажовете към въздействието на вълните.

При разпространението на вълните в бреговата зона вълновото движение се трансформира под влиянието на линейни, нелинейни и дисипативни процеси. Нелинейната трансформация на нерегулярните вълни е свързана с генерацията на нелинейни кратни хармоники в резултат на близко-резонанси взаимодействия между вълновите компоненти. Ръстът на нелинейни висши хармоники води до асиметрия на вълновите скорости, което определя посоката на разпространение на наносите, а периодичния обмен на енергия между основната и висшите хармоники влияе и на амплитудно-честотния състав на индивидуалните вълни. И въпреки очевидния успех постигнат през последните години в областта на численното и аналитично моделиране на трансформацията на вълните, характерът и закономерностите на изменение на амплитудно-честотната структура на индивидуалните вълни все още не са напълно изяснени.

В същото време за решаване на много инженерни задачи, свързани с усвояването на бреговата зона, все още широко приложение намират емпирични методики за пресмятане на вълновите параметри или концепцията на линейната теория и теорията на вълните на плитка вода, които не отчитат гореспоменатите нелинейни свойства на вълните. Това възпрепятства правдоподобното описание на вълновото поле и не позволява да се установят точните механизми на транспорт на наносите, деформациите на дънния релеф и морфоложките изменения на брега. Съществуващата на днешно време класификация на морфоложките типове брегове по степен на вълново въздействие има описателно-географска насоченост, защото характеристиките на вълните са без ясни указания за диапазона на изменение на физичните им параметри за даден тип бряг. Ето защо за решаването на инженерни и практико-приложни задачи свързани с управлението на крайбрежните зони е необходима класификация, която да отчита възможните изменения на параметрите на индивидуалните вълни под влияние на нелинейната им трансформация, и даваща възможност да се оцени на какви брегове и за какви вълни влиянието на нелинейността би било определящо, а в какви случаи измененията на нелинейните вълни могат да бъдат пренебрегнати.

Цел и задачи на предлаганата работа

<u>Цел</u> на настоящия дисертационен труд е изследване на нелинейността на ветровото вълнение в бреговата зона на Черно море, а по-точно нелинейните взаимодействия от втори порядък и тяхното развитие в условията на намаляваща дълбочина в бреговата зона.

За осъществяване на формулираната цел са поставени следните задачи:

 Да се приложат нови методи за установяване наличието на нелинейни взаимодействия от втори порядък за ветрови вълни по данни за колебания на *морската повърхност, регистрирани в бреговата зона.* Изпълнението да задачата да се постигне чрез приложение на биспектрален анализ, като се използват традиционни и параметрични методи за оценка. Да се направи сравнителен анализ между двата подхода, за да се установят преимуществата и недостатъците им, и да се определи най-подходящият метод за оценка на квадратичните нелинейности в бреговата зона.

- Да се изследва амплитудно-честотната структура на индивидуалните нерегулярни вълни в бреговата зона в резултат на влиянието на близкорезонансни взаимодействия от втори порядък. За решаването на тази задача първоначално да се изследва изменчивостта във времето и пространството на амплитудно-честотната структура на регулярни вълни, генерирани лабораторни условия. За установяване дали получените зависимости са в сила и за реални нерегулярни ветрови вълни да се извърши верификация с данни, регистрирани в естествени условия в Черно море. Това включва анализ на развитие функциите пространственото на на честотния спектър И кохерентността между обвивките на първата и втората хармоники. За изследване на връзките от по-висок порядък (пренос на енергия между хармониките) да се приложи биспектрален анализ.
- Да се направи класификация на бреговите зони по степен на очаквани прояви на нелинейност на ветровите вълни в зависимост от вълнови параметри, отчитащи нелинейността на вълните на "входа" на бреговата зона и на параметри, характеризиращи дънния релеф. В тази връзка, по записи на колебанията на свободната морска повърхност, да се установят характерни сценарии на трансформация на вълните в бреговата зона. Да се изследват възможни сценарии на изменение на амплитудите на първите и вторите хармоники в резултат на периодичен обмен на енергия между тях. Да се проведе числено моделиране на трансформацията на спектъра на нерегулярни вълни за различни наклони на дъното, за да се установи това влияние върху развитието на амплитудата на втората хармонична. На базата на параметри, като стръмност и относителна височина на вълната, среден наклон на дъното, относителна дълбочина, и числата на Ursell и Iribarren, да се определят критерии, както за реализация на дефинираните сценарии за трансформация, така и за класификация на бреговите зони.

Преглед на дисертацията

Дисертационният труд се състои от шест глави, въведение и заключения.

Дисертацията започва с преглед на историческото развитие на вълновите теории от средата на XIX век, включващи физиката на нелинейните взаимодействия от втори порядък и показва съвременното ниво на разбиране на динамиката на този нелинеен процес в бреговата зона.

В Глава 2 са представени данните използвани в настоящото изследване, като са описани условията на провеждане на натурните и лабораторните експерименти, както и методите на обработка на данните преди използването им за целите на дисертационния труд.

Глава 3 представя стохастичните и спектрални методи от висок порядък за оценка на ветровото вълнение като нелинеен стационарен процес. Изяснени са преумуществата на кумулантното описание на случайните процеси и защо са предпочитани при дефинирането на биспектралните функции, необходими за изследване на нелинейността от втори порядък на ветровото вълнение. Представени са и методите за оценка на биспектъра (традиционни и параметрични), и са изтъкнати предимствата и недостатъците на двата подхода. В Глава 4 по експериментални данни е изследвана еволюцията на квадратичните нелинейни взаимодействия в бреговата зона чрез биспектрален анализ. Биспектралните функции са оценени по традиционни и параметрични методи, като е проверена приложимостта на последните за условията на бреговата зона. Направен е сравнителен анализ между двата подхода. В допълнение са представени някои вълнови характеристики, отчитащи квадратичните нелинейности на вълните и е проследено тяхното изменение за различни дълбочини.

Глава 5 изследва изменчивостта на амплитудно-честотния състав на индивидуалните нерегулярни вълни в бреговата зона под влияние на близкорезонансни взаимодействия от втори порядък. За целта е изследвана пространственовремевата изменчивост на амплитудно-честотната структура на вълни, генерирани в лабораторни условия, и получените закономерности за проверени за нерегулярни ветрови вълни, регистрирани в бреговата зона.

В Глава 6 по експериментални записи са установени характерни сценарии на трансформация на вълните в бреговата зона на изследвания участък. Сценариите проследяват изменението на амплитудите на първата и втората хармоники с намаляване на дълбочината. Чрез числено моделиране е изследвано влиянието на различни наклони на дъното върху еволюцията на амплитудата на втората хармонична. По параметри, отчитащи нелинейността на вълните на "входа" в бреговата зона, и характеризиращи дънния релеф са потърсени критерии за реализация на сценариите на трансформация, и е предложена класификация на бреговите зони по степен на очаквани прояви на нелинейност на вълни.

В заключение са обобщени основните резултати от проведените изследвания, представени са претенциите за приноси на дисертацията и са дадени насоки за бъдещи изследвания в областта.

Представяне на резултатите от дисертационния труд

По темата на дисертацията са публикувани 8 научни статии.

Материали от дисертацията са докладвани на следните научни форуми: международна научна конференция "Scientific and Policy Challenges Towards an Effective Management of the Marine Environment", 12-18 октомври 2003 г., КК "Албена", България; международна научна конференция "Marine Science and Technologies - Black Sea'2004", 7-9 октомври 2004 г., гр. Варна, България; международен научен конгрес "International Maritime Association of the Mediterranean - IMAM' 2007", 2-6 септември 2007 г., гр. Варна, България; международна научна конференция "Offshore Mechanics and Arctic Engineering - ОМАЕ'2008", 15-20 юни 2008 г., гр. Есторил, Португалия; международна научна работна среща "Waves in shallow environment – WISE'2008", 1-4 юни 2008. гр. Хелсинки, Финландия; международна научна конференция "Литодинамика донной и контактной зоны океанов", 14-17 септември 2009 г., гр. Москва, Русия; международен научна конференция "Морские берега: эволюция, экология, экономика", 1-6 октомври 2012 г., гр. Туапсе, Русия; международна научна работна среща "Waves in shallow environment – WISE'2013", 21-24 април, гр. Колидж парк, САЩ. Резултатите от работата са обсъждани на семинари в секция "Динамика на бреговата зона" към ИО-БАН и лабораторията "Шелф и морски брегове В.П. Зенкович" към Института по океанология "П.П. Ширшов" – РАН.

Благодарности

Авторката изказва благодарности на научния си ръководител дтн Живелина И. Чернева от Висшия технически институт, гр. Лисабон, Португалия за вниманието към дисертационната работа и организационното съдействие.

Специални благодарности авторката изказва на к.ф.-м.н. Яна В. Сапрыкина и д.ф.м.н. Сергей Ю. Кузнецов от Института по океанология "П.П. Ширшов"- РАН, гр. Москва, Русия за безрезервната подкрепа и помощ, приятелството, щедростта и ценните съвети; за любезно предоставените данни от численото моделиране на трансформацията на спектъра на нерегулярни вълни и данните от лабораторния експеримент в хидроканала на Института по водно строителство към Полската Академия на Науките (ИВС – ПАН) в г.Гданск.

Авторката благодари на Ръководството на Института по океанология "Ф. Нансен" – БАН за постоянния интерес към работата. Не на последно място изказвам благодарности за Ръководството и своите колеги от секция "Динамика на бреговата зона" за моралната подкрепа и загрижеността в последните етапи на завършване на дисертацията.

Искрено съм благодарна на баща си за неоценимата помощ, съвети и морална подкрепа през годините, предществащи завършването на дисертационния ми труд.

ОСНОВНО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Глава 1. Исторически преглед и съвременно състояние

В главата е направен преглед на историческото развитие на вълновите теории, включващи физиката на нелинейните взаимодействия от втори порядък и показва съвременното ниво на разбиране на този нелинеен процес в бреговата зона на базата на теоретични, моделни, лабораторни и експериментални изследвания.

В първи порядък вълните могат да се разглеждат като суперпозиция от свободни и статистически независими спектрални компоненти. В по-висок порядък обаче, между вълните са налице взаимодействия, при които се осъществява пренос на енергия между компонентите (*Phillips*, 1960; *Hasselmann*, 1962). Най-ниският порядък, за който съществуват нелинейни взаимодействия е втори, и те могат да се случат между три вълни, чийто честоти f_i и вълнови вектори \vec{k}_i (*i*-та вълнова компонента) удовлетворяват условията за резонанс:

$$\pm f_1 \pm f_2 - f_3 = 0 \tag{1.1}$$

$$\pm \vec{k}_1 \pm \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = \delta_k \tag{1.2}$$

където δ_k е мярка за отклонение от резонанса и определя интензивността на обмен на енергия между вълни (Freilich & Guza, 1984). В бреговата зона са възможни два вида нелинейни взаимодействия от втори порядък. Ако $\delta_k = 0$, трите компоненти удовлетворяват линейното дисперсионно съотношение, тогава взаимодействията се наричат *резонанси* (*Phillips*, 1960). При тях има пълен резонанс, вълните не се изменят, движат се синфазно и обменът на енергия е максимален. Такива взаимодействия са възможни на много плитка вода при относителна дълбочина $kh < \pi/10$ (*h* - дълбочина), където в сила е теорията за разпространение на дълги вълни. В зоната на трансформация на вълнението, резултантните компоненти f_3 "почти" удовлетворяват линейното дисперсионно съотношение, и когато $\delta_k << 1$ фазовите зависимости между взаимодействащите вълни се изменят на разстояние от една дължина на вълната, позволявайки значителен пренос на енергия на разстояния няколко дължини на вълната. Тези взаимодействия се наричат близко-резонанси (Bretherton, 1964) и тяхна основна черта е обмен на енергия не само от основната към кратните й висши и нисши хармоники, образувани е резултат на сумарните и разностни взаимодействия ($f_1 \pm f_2$, $\vec{k_1} \pm \vec{k_2}$ при $f_1 \ge f_2$), но и обратно. Този процес е периодичен в пространството и

времето (*Madsen & Sorensen*, 1993), като периодът се определя от δ_k и е причина за колебания на амплитудите на хармониките и периодично изменение на хоризонаталната и вертикалната симетрия на вълните в бреговата зона.

В допълнение в главата е направен обзор на спектралните техники от висок порядък, в частност функцията на биспектъра, която се използва за идентифициране и оценка на квадратичните нелинейности на ветровото вълнение и е направен исторически преглед на приложението й за изследване на вълните в бреговата зона.

Глава 2. Описание на експерименталните данни

В главата са представени лабораторните и експериментални данни използвани в настоящото изследване. Натурните данни за вълнението са получени на научноизследователската база "Шкорпиловци" по време на два международни експеримента: "Вълна -1990" и "Шкорпиловци - 2007", а лабораторните данни са регистрирани в хидроканала на Института по водно строителство към Полската Академия на Науките през 2005г. Подробно са описани условията за провеждане на експериментите, показани са схеми на разположение на вълнографите, дадена е кратка характеристика на вълновите записи – дължина на сериите, количество и честота на отчитане.

Глава 3. Методи за оценка на вълнението като нелинеен и стационарен процес

При изследване на нелинейния характер на ветровото вълнение, то вече не може да се разглежда като суперпозиция от безкраен брой независими спектрални компоненти и да се апроксимира с нормално разпределение в рамките на една своя реализация. Това означава, че математическото очакване, дисперсията и информацията съдържаща се в честотния спектър не са достатъчни за пълното описание на ветровите вълни като нелинеен стационарен процес. За тази цел се привличат моменти (кумуланти) и спектрален анализ от по-висок порядък. Този подход позволява да се оцени отклонението на случайния процес от Гаусовия и степента му на нелинейност.

3.1. Моментно и кумулантно описание на случайните величини и процеси

3.1.5. Случаен процес

Случайния процес може да бъде представен като съвкупност от случайни величини X зависещи от времето t като: X = X(t). Ако се фиксират n времеви момента t_1, t_2, \dots, t_n , то съвкупността $\{X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)\} = \tilde{X}(t)$ представлява съвкупност от n на брой случайни величини, различните вероятностни характеристики на които зависят от избраните стойности за t_1, t_2, \dots, t_n .

Ако, при $n \to \infty$, се намери безкрайната последователност от плътности на вероятностите:

$$f(x,t), f(x_1,t_1;x_2,t_2), \cdots, f(x_1,t_1;\cdots;x_n,t_n), \dots$$
(3.52)

тя ще дава най-пълна представа за случайния процес $\widetilde{X}(t)$.

Аналогично, при $n \to \infty$, може да се намери безкрайната последователност от характеристични функции:

$$G_{\widetilde{X}(t)}(u,t), G_{\widetilde{X}(t)}(u_1t_1; u_2, t_2), \cdots, G_{\widetilde{X}(t)}(u_1, t_1; \cdots; u_n, t_n), \dots,$$
(3.54)

която също описва изцяло случайния процес $\widetilde{X}(t)$.

Моментните функции на случайния процес $\widetilde{X}(t)$ се въвеждат в следната форма:

$$\alpha_{s;\tilde{X}(t)}(t_{p_1}, t_{p_2}, \cdots, t_{p_s}) \equiv E[X(t_{p_1})X(t_{p_2})\cdots X(t_{p_s})],$$
(3.56)

където $k_1 + k_2 + \ldots + k_n = s$ е порядъкът на моментната функция.

Съгласно Стратонович (1961), характеристичната функция има вида:

$$G_{\widetilde{X}(t)}(u_1, t_1; \cdots; u_n, t_n) = 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(i)^s}{s!} \sum_{p_1, p_2, \cdots, p_s=1}^n \alpha_{s; \widetilde{X}(t)}(t_{p_1}, t_{p_2}, \cdots, t_{p_n}) u_{p_1} u_{p_2} \cdots u_{p_s} .$$
(3.58)

Тогава моментните функции добиват вида:

$$\alpha_{s;\tilde{X}(t)}\left(t_{p_{1}},t_{p_{2}},\cdots,t_{p_{s}}\right) \equiv (-i)^{s} \left[\frac{\partial^{s}G(u_{1},t_{1};\cdots;u_{n},t_{n})}{\partial u_{p_{1}}\partial u_{p_{2}}\cdots\partial u_{p_{s}}}\right]_{u_{i}=0}$$
(3.59)

Аналогично, могат да се въведат и кумулантните функции на случайния процес, при условие, че $s = k_1 + k_2 + \dots + k_n$:

$$c_{k_{1},\cdots,k_{n};\widetilde{X}(t)} \equiv c_{s;\widetilde{X}(t)}(t_{1}^{[k_{1}]}, t_{2}^{[k_{2}]}, \cdots, t_{n}^{[k_{n}]}).$$
(3.62)

Характеристичната функция се изразява чрез кумулантните функции като:

$$G_{\widetilde{X}(t)}(u_1, t_1; \cdots; u_n, t_n) = \exp\{\sum_{s=1}^{\infty} \frac{(i)^s}{s!} \sum_{p_1, p_2, \cdots, p_s=1}^n c_{s; \widetilde{X}(t)}(t_{p_1}, t_{p_2}, \cdots, t_{p_n}) u_{p_1} u_{p_2} \cdots u_{p_s}\}.(3.63)$$

Тогава

$$c_{s;\widetilde{X}(t)}(t_{p_1},t_{p_2},\cdots,t_{p_s}) \equiv (-i)^s \left[\frac{\partial^s \ln G(u_1,t_1;\cdots;u_n,t_n)}{\partial u_{p_1}\partial u_{p_2}\cdots\partial u_{p_s}} \right]_{u_j=0}$$
(3.64)

При еднакви аргументи $t_1 = t_2 = \cdots = t_s = t$ на моментните и кумулантните функции безкрайните последователности от моменти $\alpha_{1;\tilde{X}(t)}(t_1), \cdots, \alpha_{s;\tilde{X}(t)}(t_1, t_2, \cdots, t_s)$ и кумуланти $c_{1;\tilde{X}(t)}(t_1), \cdots, c_{s;\tilde{X}(t)}(t_1, t_2, \cdots, t_s)$ от *s*-ти порядък, при определени условия за сходимост, напълно и еднозначно описват случайния процес.

3.1.6. Гаусов случаен процес

Гаусов случаен процес е процес, на който кумулантните функции с порядък равен или по-голям от 3 са тъждествено равни на нула, т.е.:

$$c_{3;\tilde{X}(t)}(t_1, t_2, t_3) \equiv c_{3;\tilde{X}(t)}(t_1, t_2, t_3, t_4) \equiv \dots \equiv c_{s;\tilde{X}(t)}(t_1, \dots, t_s)$$
(3.69)

По този начин, гаусовият процес еднозначно е определен от средната си стойност $m_{\tilde{X}(t)}(t)$ и ковариационната си функция $B_{\tilde{X}(t)}[t_1, t_2]$.

Ако $m_{\widetilde{X}(t)}(t) = 0$, то тогава нечетните му моментни функции също са равни на нула:

$$\alpha_{2s+1}(t_1, t_2, \cdots, t_{2s+1}) \equiv 0, \tag{3.70}$$

докато четните му функции се задават по следния начин:

$$\alpha_{2s}(t_1, \dots, t_{2s}) = (2s-1)!! \{B_{\tilde{X}(t)}[t_1, t_2] \dots [t_{2s-1}, t_{2s}]\}_s$$
(3.71)

По такъв начин, за определянето на един Гаусов процес са нужни две кумулантни функции или безкрайно множество четни моментни функции. Тази особенност прави кумулантното представяне предпочитано пред моментното.

3.1.7. Стационарен случаен процес

Даден случаен процес $\tilde{x}(t)$ се нарича *стационарен*, ако неговата плътност на вероятността $f(x_1, t_1; x_2, t_2; \dots; x_n, t_n)$ не се изменя при смяна на последователността t_1, t_2, \dots, t_n с последователността $t_1 + \upsilon, t_2 + \upsilon, \dots, t_n + \upsilon$ за всяко произволно времево отместване υ . Така, плътността на вероятността на стационарния случаен процес зависи само от разликите между моментите от време $t_2 - t_1, t_3 - t_1, \dots, t_n - t_1 \equiv t_k - t_1 \equiv \tau_k$. Такъв вид стационарност е прието още да се нарича силна стационарност (*Яглом*, 1952). Ако кумулантните и моментните функции на стационарния процес зависят само от разликите $\tau_k \equiv t_k - t_1$, то тези функции от *s*-ти порядък са *s*-1 на брой, и в общия случай всичките са различни (*Малахов*, 1978).

Условието за силна стационарност е твърде тежко, затова се използва условието за слаба стационарност при което, ако при анализа на $\tilde{x}(t)$ се разглеждат кумулантните функции до втори порядък, се изисква средната стойност и дисперсията да не зависят от времето, а ковариационната функция да зависи само от разлика $t_2 - t_1$, без оглед къде по оста на времето е избран моментът за начално отчитане t_1 , т.е.: $m_x = const$, $D_x = B_x[0] = const$, а $B_x[t_1, t_2] \equiv B_x[t_2 - t_1]$. Практическата важност на понятието за слаба стационарност произхожда от това, че за гаусови стационарни случайни процеси, двата вида стационарност съвпадат, защото кумулантните му функции от порядък ≥ 3 са тъждествено равни на нула (*Малахов*, 1978).

По този начин, кумулант от *s*-ти порядък на процеса $\tilde{x}(t)$, с $m_x = 0$, означен с $c_{s;x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{s-1})$, се дефинира като съвместен кумулант от *s*-ти порядък на случайните величини $x(t), x(t + \tau_1), \dots, x(t + \tau_{s-1})$, т.е.:

$$c_{s:x}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}) = c_{s:x}(x(t), x(t+\tau_1), \cdots, x(t+\tau_{s-1})), \qquad (3.74)$$

За $\tilde{x}(t)$ кумулантът от *s* - ти порядък е функция само на *s* - 1 разлики $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{s-1}$. Пространството $\tau_1 - \tau_2 - \dots - \tau_{s-1}$ представлява дефиниционна област за $c_{s;x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{s-1})$.

От (3.74) следва, че кумулантът от първи порядък е средната стойност на процеса, вторият кумулант е автокорелационната функция, а за третия имаме:

$$c_{2,x}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)]$$
(3.77)

$$c_{3,x}(\tau_1,\tau_2) = E[x(t)x(t+\tau_1)x(t+\tau_2)]$$
(3.78)

Вижда се, че за $\tilde{x}(t)$ моментите и кумулантите от трети порядък съвпадат и описват статистическа връзка от втори порядък между величините на $\tilde{x}(t)$, поради факта, че всеки кумулант от *s* - ти порядък описва статистическа зависимост от *s* - 1 порядък между случайните величини $x(t), x(t + \tau_1), \dots, x(t + \tau_{s-1}) - Стратонович (1961).$

3.2 Основни аспекти на спектралния анализ от висок порядък

3.2.2. Кумулантни спектри

Ако се приеме, че съвместният кумулант $c_{s,x}(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{s-1})$ дефиниран в (3.74) съществува и е абсолютно сумируем, то тогава полиспектър от *s* - ти порядък се дефинира като (*s* – 1) - мерна дискретна трансформация на *Fourier* на кумуланта от *s* - ти порядък, т.е.:

$$C_{s;x}(\omega_{1}, \omega_{2}, \dots, \omega_{s-1}) = \sum_{\tau_{1}=-\infty}^{+\infty} \dots \sum_{\tau_{s-1}=-\infty}^{+\infty} c_{s;x}(\tau_{1}, \tau_{2}, \dots, \tau_{s-1}) \times \exp(-i(\omega_{1}\tau_{1} + \dots + \omega_{s-1}\tau_{s-1}))$$
(3.98)

Пространството $\omega_1 - \omega_2 - \dots - \omega_{s-1}$ представлява дефиниционна област за $C_{s;x}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{s-1})$. При s = 2 с помощта на (3.98) се дефинира честотния спектър:

$$C_{2,x}(\omega_1) = \sum_{\tau_1 = -\infty}^{+\infty} c_{2,x}(\tau_1) \exp(-i(\omega_1 \tau_1)).$$
(3.99)

За s = 3 функцията $C_{3;x}(\omega_1, \omega_2)$ се нарича биспектър:

$$C_{3;x}(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1 = -\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2 = -\infty}^{+\infty} c_{3;x}(\tau_1, \tau_2) \exp(-i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)).$$
(3.100)

За биспектъра са в сила следните съотношения на симетрия (Mendel, 1991):

$$C_{3;x}(\omega_{1},\omega_{2}) = C_{3;x}(\omega_{2},\omega_{1})$$

= $C_{3;x}(\omega_{1},-\omega_{1}-\omega_{2}) = C_{3;x}(-\omega_{1}-\omega_{2},\omega_{1})$
= $C_{3;x}(\omega_{2},-\omega_{1}-\omega_{2}) = C_{3;x}(-\omega_{1}-\omega_{2},\omega_{2})$, (3.102)

които по силата на теоремата на *Weiner-Khintchine*, важат и за кумуланта от трети порядък.

Функцията на биспектъра се използва за анализ на нелинейните взаимодействия от втори порядък и предизвиканите от тях фазови зависимости, известни като *квадратично фазово обединяване*. Такова обединяване възниква само между хармонично свързани компоненти, като три честоти се приемат за хармонично свързани, ако едната от тях е сума (или разлика) от другите две: $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$ и е нужно да се установи дали същото е в сила и за фазите: $\varphi_3 = \varphi_1 \pm \varphi_2$. В (*Raghuveer*, 1990) се доказва, че само фазово обединените компоненти имат принос към моментите (кумулантите) от трети порядък на процеса. От своя страна, честотния спектър подтиска фазовите връзки и не може да даде допълнителна информация за тях.

Количествена оценка на квадратичното фазово обединяване дава бикохерентната функция (Raghuveer, 1990):

$$b_{3;x}(\omega_1,\omega_2) = \frac{\left|C_{3;x}(\omega_1,\omega_2)\right|}{\left\{C_{2;x}(\omega_1)C_{2;x}(\omega_2)C_{2;x}(\omega_1+\omega_2)\right\}^{1/2}},$$
(3.104)

където $0 \le b_{3;x}(\omega_1, \omega_2) \le 1$.

За количествено определяне на фазовите разлики между взаимодействащите компоненти се използва бифазата (Kim & Powers, 1979):

$$\beta_{3;x}(\omega_1,\omega_2) = \operatorname{arctg}\left[\frac{\operatorname{Im}[C_{3;x}(\omega_1,\omega_2)]}{\operatorname{Re}[C_{3;x}(\omega_1,\omega_2)]}\right].$$
(3.106)

3.3. Методи за оценка на спектри от висок порядък

Методите за оценка на спектри от висок порядък, по подобие на спектралните си аналози се делят на непараметрични и параметрични полиспектрални методи.

3.3.1. Традиционни методи за оценка на биспектрите

Традиционните методи за оценяване на биспектрите се основават на използуването транформацията на *Fourier* и аналогично на спектралните методи за оценка, се делят на: а) директни и б) индиректни.

Доказано е, че биспектралните оценки пресметнати по тези методи са асимптотично неотместени и състоятелни (*Brillinger*, 1965), имат разпределения, които клонят към комплексните гаусови разпределения (*Van Ness*, 1966). Традиционните методи се характеризират с висока дисперсия и ниска разделителна способност, но поради приложението на алгоритъма на бързото преобразувание на *Fourier* те са лесни за употреба и при достатъчно дълги записи от данни дават добри оценки.

3.3.2. Параметрични методи за оценка на биспектрите

Параметричните методи от своя страна се базират на приложението на модели параметрите, на които се определят по данни от измерванията. Впоследствие тези модели се използват за оценка на полиспектъра. За параметричните методи се предполага, че са по-точни при възстановяването на информацията за фазите и имат повисока разделителна способност от традиционните методи (*Raghuveer & Nikias*, 1984).

3.3.2.1. Кумуланти и кумулантни полиспектри

В теорията на системите и обработката на сигнали широко се използва моделът на линейна и инвариатна относно времето система с един вход и един изход (Халачев & Стоянов, 1980). В този модел входния сигнал v(k), k = 0,1,... е стационарен бял шум с нулево средно и дисперсия σ_v^2 , като процесът може да бъде гаусов или негаусов. Честотна характеристика на системата е предавателната й функция $H(\omega)$, а n(k) е адитивен шум, който е гаусов и може да бъде бял или цветен и има неизвестна ковариационна функция. Процесът на изхода на системата x(k) и адитивният шум n(k) са статистически независими. На тази основа, резултантният сигнал може да бъде моделиран като y(k) = x(k) + n(k), каквито са и реалните сигнали.

В (*Brillinger & Rosenblatt*, 1967b) се посочва, че такава система е каузална и експоненциално стабилна, а входният сигнал v(k) се счита за стационарен негаусов бял шум с нулева средна стойност. Тогава кумулантите от *s*-ти порядък на входния процес v(k), се дават като:

$$c_{s;v}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}) = \kappa_{s;v} \,\delta(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}), \qquad (3.129)$$

където величините $\kappa_{s;v}$ са кумуланти с нулева стъпка ($\tau_1 = \cdots = \tau_{s-1} = 0$), а $\delta(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1})$ е (s-1) -мерна делта функция на *Kronecker*.

Rosenblatt (1985) доказва, че кумулантите не са чувствителни към адитивния шум, без значение дали той е бял или цветен. Така за $s \ge 3$:

$$c_{s;y}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}) = c_{s;x}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}).$$
(3.135)

Тогава, съгласно (3.135), кумулантът от *s* -ти порядък на процеса x(k), за $s \ge 3$, е:

$$c_{s,x}(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{s-1}) = \kappa_{s,y} \sum_{j=0}^{\infty} h(j) h(j + \tau_1) \cdots h(j + \tau_{s-1}).$$
(3.136)

където h(k) е преходна функция на системата.

При s = 3, третият кумулант има вида:

$$c_{3,x}(\tau_1,\tau_2) = \kappa_{3,v} \sum_{j=0}^{\infty} h(j) h(j+\tau_1) h(j+\tau_2).$$
(3.137)

Полиспектърът, може да бъде представен като (Brillinger & Rosenblatt, 1967 b):

$$C_{s,x}(\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_{s-1}) = \kappa_{s,y} H(\omega_1) H(\omega_2) \cdots H(\omega_{s-1}) H\left(-\sum_{j=1}^{s-1} \omega_j\right).$$
(3.138)

И отново за *s* = 3 уравнение (3.138) дава биспектралната функция:

$$C_{3,x}(\omega_1,\omega_2) = \kappa_{3,y} H(\omega_1) H(\omega_2) H^*(\omega_1 + \omega_2)$$
(3.139)

3.3.2.2. Параметрични модели

Използването на параметрични модели е един от най-популярните подходи при изследването и интерпретацията на експериментални данни. За редицата от данни се предполага, че е получена в резултат на пропускане на негаусов бял шум през линейна система (филтър), която може да бъде описана чрез параметрични модели, които се основават на следните процеси: АвтоРегресия (АР), Пълзяща Средна стойност (ПС) и АвтоРегресия – Пълзяща Средна стойност (АРПС) – (Дженкинс & Bammc, 1972).

3.3.2.3. Определяне на порядъка на негаусови АРПС модели

В настоящия раздел са разгледани два метода за определяне порядъка на AP и ПС модели, които се явяват части от APПС система, използвайки оценки на кумуланти от трети порядък. За определяне на порядъка p на AP(p) модела е използван, т. нар. нестатистически тест предложен от Giannakis & Mendel (1990). А за намирането на порядъка q на дадена на ПС(q) система е използван т. нар. статистически тест (Giannakis & Mendel, 1990).

3.3.2.4. Методи за определяне на параметрите на негаусови АР, ПС и АРПС модели

За определяне на параметрите на AP система е използван методът на рекурсия от трети порядък (Raghuveer & Nikias, 1984). За намиране на параметрите на $\Pi C(q)$ е приложен методът на Giannakis-Mendel (Giannakis & Mendel, 1989), а за намиране на параметрите на AP $\Pi C(p,q)$ модела - алгоритъм на q-сеченията (Swami & Mendel, 1990).

Глава 4. Статистически и биспектрален анализ на вълните в бреговата зона

4.2.2. Биспектър, бикохерентност и бифаза на вълнението в бреговата зона

4.2.2.1 Оценки на биспектъра и бикохерентността по традиционни методи

В този подраздел са представени оценките на биспектралната функция построени по директния и индиректния методи, последвани от сравнителен анализ между двата подхода. Резултатите показват, че оценките пресметнати по конвенционалните методи не се отличават съществено при достатъчно дълъг ред от измервания.

На Фиг. 4.9 са представени оценки на биспектрите пресметнати за четири точки с различни дълбочини. Развитието на спектралната функция показва, че с намаляване на дълбочината се наблюдава поява на нови спектрални върхове на честоти два и дори три пъти спектралния максимум f_p , както и на честоти преди пика на спектъра (Фиг. 4.9 б-

д). Наличието на тези пикове предполага съществуване на нелинейни взаимодействия от втори порядък от типа $f_p \pm f_p$, които биха довели до генериране на вълни именно на тези честоти. Това може да подтвърди чрез биспектрален анализ.

Обща особеност на биспектрите на Фиг. 4.9 на всички дълбочини е наличието на главен максимум на честоти $f_1 = f_2 = f_p$. Физически появата на такъв пик се обяснява с нелинейни взаимодействия на спектрални компоненти с честоти близки до пиковата, което поражда генерирането на втори хармоники, движещи се с фазовата скорост на основните вълни. Присъствието им води до деформация на профила на основните съставляващи – гребените се заострят, а долините стават по-плитки и полегати – вълни на *Stokes*.



Фиг. 4.9. Оценки на биспектрите получени по директен метод за различни дълбочини по данни от експеримента "Вълна – 1990", 30.11.1990г., 22h: a) h = 3.8 m, б) 3.2 m, в) 1.3 m, г) 1.6)

На дълбочина h = 3.8 m (Фиг. 4.9 а) всички биспектри имат пик на двойката честоти (f_p, f_p) . В честотния спектър на честота $2f_p$ енергията все още е малка, което се подтвърждава и от биспектъра. С намаляване на дълбочината взаимодействия се наблюдават около честотния максимум и кратните му хармоники. Тези двойки честоти са $f_1 = f_p$ и $f_2 = 2f_p$ и те генерират принудена вълна в честоти $f_1 + f_2 = 3f_p$ и $f_2 - f_1 = f_p$. Малък биспектрален пик на $(f_p, 3f_p)$ се появява на дълбочина 1.3 m и стойността му плавно нараства с приближаване на вълните към брега (Фиг. 4.9 в, д). На h = 1.6 m величината на този пик на раства до 1/5 от стойността на биспектралния максимум. Наличието на пик на тази честотна двойка означава, че взаимодействат две вълни от първи порядък с честоти f_p и $2f_p$. Вълната с честота $2f_p$ не е принудена, тъй

като биспектъра представлява статистическо описание на взаимодействията само на свободните вълни (Чернева, 1986). Взаимодействията на честоти $f_1 = f_p$ и $f_2 = 3f_p$ генерират принудени вълни на честоти $f_3 = f_1 + f_2 = 4f_p$ и $f_3 = f_2 - f_1 = 2f_p$. Връх на тези честоти се появява в честотния спектър едва на дълбочини 1.3 m и 1.6 m, но стойността му е малка (Фиг. 4.9 в, д). Малък пик в биспектъра на $(f_p, 2f_p)$ първоначално се появява на h = 3.2 m (Фиг. 4.9 б) и расте, като на h = 1.6 m достига стойности почти $\frac{1}{2}$ от биспектралния максимум, което свидетелства за увеличаване на силата на нелинейните взаимодействия.

В допълнение, при движението на вълните към брега биспектрални върхове се появяват и по протежение на главния диагонал, които се дължат на взаимодействия на честотни двойки с равни честоти кратни на спектралния максимум: $f_1 = f_2 = 2f_p$ и $f_1 = f_2 = 3f_p$, като последното взаимодействие е значително по-слабо. Това означава, че принудените вълни са на честоти $4f_p$ и $6f_p$ и отново близки до нулата (Фиг. 4.9 в, д). Пиковете на честоти ($\approx 0, f_p$) и ($\approx 0, 2f_p$) е възможно да възникнат при взаимодействия на еднакви свободни вълни и свободни вълни около спектралния максимум, взаимодействащи с компоненти на честоти кратни на f_p .

Следователно, принудени вълни в честотния спектър има на честоти f_3 близки до нулата, и $f_3 = f_p$, $2f_p$, $3f_p$, $4f_p$ и $6f_p$, като на честоти $\approx 0, f_p$ и $2f_p$ те могат да са резултат от взаимодействията, както на равни свободни вълни, така и на свободни вълни около максимума на честотния спектър с кратни на него. Този именно характер на нелинейните взаимодействия е отразен в клетъчната структура на биспектъра на малка дълбочина (Фиг. 4.9 в, г) – *Cherneva et al.* (2004).

Анализът на развитието на бикохерентната функция изцяло подтвърждава изводите от анализа на биспектъра, и дава представа за степента на квадратично фазово обединяване на взаимодействащите вълнови компоненти.

4.2.2.2 Оценки на биспектъра по параметрични методи

В настоящия раздел са представени оценките на биспектрите получени на основата на AP(p) и $AP\Pi C(p, q)$ системи. Резултатите от оценките на AP и $AP\Pi C$ биспектрите с намаляване на дълбочината много добре повтарят основните черти на биспектралните оценки построени по традиционните методи. Параметричните оценки са по-изгладени и с по-тесни пикове на максимума и кратните на него, в сравнение с конвенционалните методи (*Andreeva & Cherneva*, 2007 a, b).

4.2.2.3. Сравнение между традиционни и параметрични биспектри

В този подраздел е представено сравнение между всички описани методи за оценяване на биспектралните функции. Резултатите са показани на Фиг. 4.15, като е представено сравнение само за две дълбочини. Всеки панел съдържа оценка на спектралната функция, оценка на биспектъра по директния метод и оценки на параметричните биспектрите, като порядъците p и q на AP(p) и APПС(p,q) моделите са посочени над съответния биспектър. Самото сравнение между методите за оценяване е визуализирано чрез разрезите по главния диагонал и по линията на $C_{APПC}(f_1, f_p)$, като с плътна черна линия са отбелявани разрезите по директния метод, с пунктир в червено разрезите на AP биспектрите, а с прекъсната линия в синьо тези на APПС биспектрите.

Сравнението по разрезите между традиционните и параметричните методи показва, че като цяло АР и АРПС биспектрите дават по-сгладени оценки на максимума и



Фиг. 4.15. Сравнение между оценките на биспектрите получени по директния метод, чрез AP(p) модел и чрез $AP\Pi C(p,q)$ модел по данни от експеримента "Вълна – 1990", 30.11.1990г. в 22.00ч.: а) h = 1.3 m, б) h = 1.6 m

кратните на него. АР биспектрите оценяват по-добре пиковете близки до нулата т.е. $\approx (0, f_p)$, докато АРПС биспектрите улавят много добре пиковете във фазовото обединените честотни двойки от вида $\approx (0, 2f_p)$ и $\approx (0, 3f_p)$ (Фиг. 4.15 а, б) – Andreeva & Cherneva (2007b). По-тесните и по-високи пикове на параметричните биспектрални максимуми и кратните на него подтвърждават твърдението, че параметричните методи (АР и АРПС) по-добре улавят фазовото обединяване, докато традиционните методи са по-надеждни при определянето на стойността на модула на биспектралната функция (Raghuveer & Nikias, 1985).

С това успешно е демонстрирана приложимостта на параметричния подход за оценка на биспектрите на ветровите вълни на плитка вода.

4.2.2.4. Изменение на бифазата на вълнението

Нелинейните взаимодействия от втори порядък, освен чрез биспектри, могат да се изследват и чрез бифазата. Изменението на бифазата на вълнението с приближаване към линията на уреза по данни от експеримента "Вълна-1990" е представено на Фиг. 4.17. Фигурата показва еволюцията на седем избрани честотни двойки, които са комбинации от честотата на спектралния максимум и техните хармонични.

На разстояния 1050 m, 450 m и 225 m от брега стойностите на бифазите са неравномерно разпределени в интервала $[-\pi,\pi]$ за всички честотни двойки. От 205 m до 105 m с намаляване на дълбочината, интервалът на изменение на бифазите се стеснява и започва да клони към константа, а стойностите на бифазите за честотните



Фиг. 4.17. Бифаза на ветровото вълнение в зависимост от разстоянието до брега по данни от експеримента "Вълна – 1990", запис от 02.12.1990г., 23.00ч.

двойки (f_p, f_p) и $(f_p, 2f_p)$ са близки до нулата. Това отговаря на вълни от вида на Stokes (Elgar & Guza, 1985b). С намаляване на дълбочината бифазите на представените двойки честоти плавно се стремят към класическата стойност от $-\pi/2$. Това подтвърждава резултатите на Elgar & Guza (1985b) регистрирани около Санта Барбара, Калифорния. Според авторите бифазата се изменя до $-\pi/2$ поради асиметрията на вълните в бреговата зона, което от своя страна се дължи на преобладаването на процесите на нелинейност над дисперсията на много плитка вода (Flick et al., 1981).

Глава 5. Модел на нелинейните взаимодействия от втори порядък с бреговата зона

Изследването е насочено към изясняване на пространствено-времевите закономерности на изменение на амплитудно-честотната структура на индивидуалните нерегулярни вълни под влияние на близко-резонансни взаимодействия от втори порядък. И дали е възможно да се съдаде физичен модел, базиран на обобщение на вълновата теория на *Stokes*, който да описва изменчивостта на параметрите на индивидуалните вълни по време на тяхната трансформация в бреговата зона. Разгледани са вълновите хармоники само от първи и втори порядък, тези от по-висок порядък се пренебрегват.

5.1. Амплитудно-честотна структура на вълните в бреговата зона

По аналогия с теорията на *Stokes* колебанията на морската повърхност x(t) могат да бъдат представени като сума от кратни хармоники с амплитуди бавно изменящи се във времето, т.е.: $x(t) = a_1(t)\cos(\omega t) + a_2(t)\cos(2\omega t + \varphi)$, където $a_1(t)$ и $a_2(t)$ са амплитудите на първата и втората хармонична, съответно. Всъщност, мигновенните амплитуди $a_1(t)$ и $a_2(t)$ са обвивки на вълните от съответните честотни диапазони. Честотните диапазони на хармониките се определят чрез локализиране на спектралните минимуми и максимуми. Обвивките на първата и втората хармонична се изчисляват като:

$$e_{1,2}(t) = \sqrt{\{LF[x(t)]\}^2 + \{H[LF[x(t)]]\}^2}, \qquad (5.2)$$

където H[.] е преобразуване на *Hilbert*, LF[.] е линеен оператор на *Fourier* филтрация по съответните честотни диапазони, а x(t) са ординатите на морската повърхност.

Такова представяне позволява да се опише пространствено-времевата изменчивост на индивидуалните ветрови вълни като се вземе предвид отместването по фазата φ между хармониките от първи и втори порядък и техните обвивки.

В допълнение за изследването са използвани пространственото развитие на вълновите спектри и функцията на кохерентност между обвивките $e_{1,2}(t)$, функцията на бикохерентност и бифазата.

5.2. Бихроматични вълни

Първоначално, са изследвани измененията на амплитудно-честотната структура на индивидуални регулярни вълни, с опростен групов строеж, при тяхната трансформация над хоризонтално дъно. Използани са данни за бихроматични вълни генерирани в лабораторни условия в хидроканала на ИВС – ПАН през 2005г.

Разгледан е пример, при който бихроматични вълни, състоящи се от две синусоиди с честоти 0.5 Hz и 0.52 Hz, се разпространяват без разрушаване на постоянна дълбочина от 0.3 m. На Фиг. 5.1 е представено пространственото развитие на спектрите на бихроматичните вълни по време на тяхната трансформация в хидроканала.



Фиг. 5.1. Пространствено развитие на спектрите на бихроматични вълни относно разстоянието от вълнопродуктора

От фигурата се вижда, че при развитието на спектъра има пренос на енергия между първата и втората хармонична. В пространството този пренос е периодичен и води до изменения на амплитудите на хармониките. Така, на разстояние 4 m от вълнопродуктора вълните имат добре оформени първа хармонична с диапазон 0.5 – 0.52 Hz и втора хармонична с диапазон 1 – 1.04 Hz. На разстояние 7 m амплитудите на първата хармонична са високи, докато амплитудите на втората хармонична са ниски в резултат на обратния пренос на енергия по време на разностните нелинейни взаимодействия. На разстояние 10 m амплитудите на първата хармонична започват да намаляват, а амплитудите на втората хармонична се увеличават при сумарните нелинейни взаимодействия.

Периодичността на обмен на енергия води и до разширяване на честотните диапазони на първата и втората хармонични (Фиг. 5.1). Ако на 4 m от вълнопродуктора честотните диапазони на първата и втората хармонични са 0.5 – 0.52 Hz и 1 – 1.04 Hz, съответно, то на 47 m те вече са 0.4 – 0.65 Hz и 0.85 – 1.15 Hz, съответно. Проведеният

анализ показва, че спектърът на първата хармонична се разширява при обратния пренос на енергия от хармонични с по-висок порядък към първата хармонична, което води до образуването на нови принудени вълни в резултат на разностните нелинейни взаимодействия. От друга страна, спектърът на втората хармонична се разширява, както при сумарните нелинейни взаимодействия с обертоните на първата хармонична, така и чрез разностни взаимодействия с хармониките от по-висок порядък. Такова разширяване на спектъра (поява на нови честоти), освен че води до неговото изменение, също така променя и формата на обвивките $e_{1,2}(t)$ на вълните. По тази причина, техните обвивки не се колебаят синхронно във времето. На Фиг. 5.3 е предствено изменението на бихроматичните вълни и обвивките $e_{1,2}(t)$ на различни разстояние от вълнопродуктора, като с тънка черна линия са означени вълновите ординати, с плътна черна линия – обвивката на първата хармонична e_1 , а с пунктир в червено – обвивката на втората хармонична e_2 .



Фиг. 5.3. Времено-пространствено изменение на бихроматичните вълни, обвивката на първата хармонична (e_1) и обвивката на втората хармонична (e_2) на различни разстояния от вълнопродуктора: а) 7 m, б) 19 m и в) 47 m

От фигурата се вижда, че в началния стадий на трансформация на вълните, когато разширяването на честотните диапазони все още е незначително, обвивките на първата и втората хармонични се менят синхронно (Фиг. 5.3 а). На това разстояние от вълнопродуктора индивидуалните вълни имат почти идентични амплитудно-честотни структури и амлитудите на втората хармонична са пропорционални на амплитудите на първата. При последващата трансформация на вълните постепенно обвивките започват да се менят асинхронно. Асинхронното колебание на обвивките показва, че вече няма пропорционалност между амплитудите на отделните вълнови хармонични. На Фиг. 5.3 б се вижда, че вълни с голяма първа хармонична и малка втора хармонична се редуват с вълни с голяма първа хармонична и голяма втора хармонична. В крайната фаза на трансформацията амплитудно-честотната структура на индивидуалните вълни започва да се изменя хаотично (Фиг. 5.3 в).



Фиг. 5.4. Пространствено развитие на функцията на кохерентност между обвивките на първата и втората хармонична при трансформацията на бихроматичните вълни

Синхронът в изменението на обвивките на първата и втората хармонична е оценен и чрез функцията на кохерентност между тях (Фиг. 5.4). Вижда се, че функцията се мени периодично и при трансформацията на вълните, съпроводена с разширяване на спектъра, намалява от 0.9 до 0.4, т.е. отношението между амплитудите на първата и втората хармонична ($a_1(t)/a_2(t)$) се мени във времето и пространството.

Изследвана е зависимостта на $a_2(t)$ от $a_1(t)$ за различни разстояния от вълнопродуктора (Фиг. 5.5).



Фиг. 5.5. Зависимост между амплитудите на обвивките e_1 и e_2 на първата и втората хармонична на бихроматичните вълни на различни разстояния от вълнопродуктора: а) 10 m, б) 19 m и в) 44 m

Вижда се, че в началния стадий на трансформация на вълните, когато стойностите на функцията на кохерентност са високи, отношението $a_2(t)/a_1(t)$ се изменя незначително. На този етап амплитудите на втората хармонична са пропорционални на амплитудите на първата и зависимостта между тях носи квадратичен характер, както е според теорията на *Stokes* (Фиг. 5.5 а). При по-нататъшната трансформация, съпроводена с разширяване на честотния спектър на вълните, стойностите на

кохерентостта започват да намаляват и зависимостта $a_2(t)/a_1(t)$ не може да бъде апроксимирана с квадратична или каквато и да е друга полиномиална функция. Това означава, че отношението $a_2(t)/a_1(t)$ във всяка индивидуална вълна се мени хаотично (Фиг. 5.5 б, в). От това следва, че описание на индивидуалните вълни базирано на теорията на *Stokes* може да бъде направено само на началните стадии на трансформация на вълните на разстояния, където стойностите на функцията на кохерентност между обвивките e_1 и e_2 са високи и техните спектри са подобни (*Saprykina et al.*, 2009).

5.3. Нерегулярни вълни

В настоящия раздел е проведено изследване с цел установяване дали закономерностите получени за бихроматичните вълни са в сила и за реални нерегулярни вълни, разпространяващи се в бреговата зона. За това са използвани записи на морското вълнение регистрирани по време на експеримента "Шкорпиловци – 2007". Отново са построени функции на пространствено развитие на спектрите и функциите на кохерентност между обвивките на първата и втората хармонична на вълнението, а също така и хронограми на вълните и обвивките на първата и втората хармонични. Получените резултати подтвърждават изводите за бихроматичните вълни.

За установяване дали отсъствието на кохерентност между обвивките на основната и втората хармоники означава, че вълновото движение е станало напълно хаотично и са изчезнали не само линейните, но и нелинейните връзки между хармониките е проведен биспектрален анализ, посредством функцията на бикохерентност. Оценки на бикохерентността за две избрани дълбочини са визуализирани на Фиг. 5.9.



Фиг. 5.9. Оценки на бикохерентната функция на вълнението в зависимост от разстоянието до брега по данни от експеримент "Шкорпиловци–2007" от 28.09.2007г. в 15.20 h: a) l = 201 m, h = 4.0 m, б) l = 136 m, h = 3.6 m;

Резултатите показват, че връзки от втори порядък между първата и втората хармонична съществуват на всеки етап от трансформацията на вълните в бреговата зона, което се проявява под формата на пикове на бикохерентната функция на честоти равни и кратни на пиковата честота на спектъра f_p . Стойностите на бикохерентността са сравнително високи (от около 0.7 до 0.3), което подтвърждава факта, че вълните в честотните диапазони на първата и втората хармонични са принудени вълни образувани от сумарните и разностните нелинейни взаимодействия.

Сравнително високите стойности на бикохерентността дават възможност да се оцени относителното отместване на фазите (бифазата) между първата и втората хармонична на вълните. На Фиг. 5.10 а е показано изменението на бифазата на честотната двойка (f_p, f_p) относно разстоянието до брега, а на Фиг. 5.10 б изменението на нормираните амплитуди на първата и втората хармонични, определени като средни стойности на обвивките на съответстващите диапазони за същите разстояния. От Фиг. 5.10 а се вижда, че от 201 m до 123 m бифазата на честотната двойка (f_p, f_p) е отрицателна и има стойности близки до нулата, което означава, че нелинейността на вълните е от типа на *Stokes*. Това също означава, че на началния



Фиг. 5.10. Изменение на бифазата на честотната двойка (f_p, f_p) (а) и осреднените по време стойности на амплитудите a_1 и a_2 на първата и втората хармоничнана вълнението (б) в зависимост от разстоянието до брега по данни от експеримент "Шкорпиловци–2007", серия записи 28.09.2007г. от 15.20 h

стадий на трансформация на вълните, когато енергийния пренос от първата към втората хармонична се дължи на сумарните нелинейни взаимодействия, вторите хармоники (както и техните обвивки) са отместени малко напред спрямо първите. Това се дължи на процесите на нелинейност, пораждащи вторите хармонични, които са отместени спрямо първите на $-\pi/2$, противодействайки на дисперсионните процеси, които от своя страна отместват вторите хармоники назад относно посоката на разпространение на първите (*Saprykina et al.*, 2009). Това отместване между хармониките се колебае в пространството, оставайки малко, тъй като дисперсията донякъде уравновесява действието на нелинейността поради относително голямата дълбочина. От 110 m до 58 m, когато започва обратният пренос на енергия, стойностите на бифазата започват да се стремят към $\pi/4$, тъй като в този случай нелинейността и дисперсията започват да действат в едно направление (*Saprykina & Kuznetsov*, 2005а). На следващия етап от трансформацията на вълните, когато сумарните нелинейни взаимодействия започват отново да преобладават (от 84 m до брега) бифазата се приближава към класическата стойност от $-\pi/2$, поради доминирането на процесите на нелинейност на относително плитка вода (*Flick et al.*, 1981). Това съответства на силно асиметрични пилообразни вълни, които започват или вече са започнали да се разрушават, когато тяхната трансформация се определя само от нелинейните процеси.

Така, по протежение на цялата брегова зона вълните остават нелинейно свързани по между си, а техните бифази се изменят квазипериодично с приближаване към брега. Това изменение е с период равен на характерното време на нелинейните взаимодействия, което се явява основна причина за разликите в амплитудно-честотния състав на индивидуалните вълни (*Saprykina et al.*, 2009).

Глава 6. Еволюция на нелинейните вълни при трансформацията им в бреговата зона

6.1. Някои параметри на вълнението в бреговата зона

За целите на настоящото изследване е избран подходът на статистическо описание на вълнението, като еизползвана концепцията за характерна височина и дължина на вълните. За характерна височина (H_0) е избрана значителната височина на вълната H_s , дефинирана чрез спектъра, а за характерна дължина на вълната (L_0) е приета дължината на вълната L_p , отговаряща на честотата на спектралния максимум f_p .

В настоящото изследване за "вход" на бреговата зона се приема точка, намираща се на разстояние 223 m от кота нула с дълбочина 4.5 m. За определяне на степента на нелинейност на вълните на "входа" на бреговата зона са използвани безразмерният параметър – *стръмност на вълната* (H_0/L_0) и *относителна височина на вълната* (H_0/h), където h е дълбочината. За параметър, характеризиращ дънния релеф - *среден наклон на дъното* α . За параметър, свързващ изменението на α и стръмността на вълната (H_0/L_0), която се трансформира в бреговата зона е числото на *Iribarren* (*Iribarren & Nogales*, 1949): $Ir = tg \alpha / \sqrt{H_0/L_0}$, а като параметър, показващ съотношението между нелинейността и дисперсията на вълните при тяхното движение към брега - числото на *Ursell* (*McCormick*, 2009): $Ur = 1/2(HL^2/h^3)$.

6.2. Характерни сценарии на трансформация на вълните в бреговата зона и критерии за тяхната реализация

За анализ на изменението на амплитудите на първите и вторите нелинейни хармоники, при разпространението им към брега от всички записи получени по време на експеримента "Шкорпиловци – 2007" са избрани 23 съвкупности. За тях спектрите са достатъчно тесни, за да се определят честотните диапазони на първите и вторите хармонични, а вълните се разпространяват перпендикулярно. Установено е, че за подбраните записи честотните диапазони на първата и втората хармонична варират в границите: 0.1 - 0.2 Hz за първата хармонична и 0.2 - 0.4 Hz за втората. Пространствената еволюция на енергията на честотните диапазони на амплитудите на основната и втората хармоники е представена в процентно съотношение на изменението на съответния честотен диапазон, при условие, че пълната енергия на спектъра на всички честоти е 100%.

Анализът на вълновите записи показва, че в изследвания участък на бреговата зона съществува периодичен обмен на енергия между нелинейните хармоники и на тази база са определени четири характерни сценария на еволюция на втората хармонична (*Canpыкuнa u dp.*, 2013):

<u>Сценарий 1</u>: на "входа" в бреговата зона вторите хармонични не са големи, а амплитудите им нарастват едва с приближаване към брега. В този случай се а) б)



Фиг. 6.1. Характерни сценарии на еволюция на амплитудите a_1 и a_2 на първата и втората хармонични на вълнението с приближаване към брега по данни от експеримента "Шкорпиловци-2007"; а) сценарий 1, б) сценарий 2, в) сценарий 3, г) сценарий 4

наблюдават 1.5-2 цикъла на обмен на енергия между първата и втората хармонична (Фиг. 6.1 а);

<u>Сценарий 2:</u> наблюдава един добре изразен цикъл на обмен на енергия между хармоничните, при което амплитудата на втората хармоника нараства максимално (Фиг. 6.1 б);

<u>Сценарий 3:</u> амплитудата на втората хармонична слабо се колебае и няма изявен максимум по протежение на бреговата зона. Тук се наблюдават до 3 слаби цикъла на обмен на енергия (Фиг. 6.1 в);

<u>Сценарий 4:</u> на "входа" в бреговата зона вторите хармонични имат достатъчно големи амплитуди, които с приближаване към брега намаляват, което е съпроводено с около 0.5 цикъла на обмен на енергия (Фиг. 6.1 г).

Проведеният биспектрален анализ подтвърждава, че пиковете в спектъра, намиращи се на честотата на втората хармонична са резултат от близко-резонансни нелинейни взаимодействия и се дължат на присъствието на втори хармоники на основното вълново движение.

Потърсени е зависимост на числата на Ursell (Ur) и на Iribarren (Ir) от параметрите на нелинейност на вълните (H_0/h и H_0/L_0 , съответно) на "входа" в бреговата за определените сценарии. Резултатите показват, че Ur = 10, Ir = 0.15 и $H_0/L_0 = 0.022$, могат да служат за примерни граници, разделящи сценариите за трансформация на вълните по степен на проява на нелинейно-дисперсионните им свойства на два класа: а) ако Ur > 10, $H_0/L_0 > 0.022$, а Ir < 0.15 - силна проява, когато амплитудата на втората хармонична има добре изразен максимум във бреговата зона (сценарии 2 и 4) и б) ако Ur < 10, $H_0/L_0 < 0.022$, а Ir > 0.15 -слаба проява, когато амплитудата на втората хармонична се изменя незначително или се увеличава едва с приближаване към брега (сценарии 1 и 3). Проведеният анализ показва, че числата на *Ursell* и *Iribarren*, пресметнати за средните наклони на дъното и параметрите на "входа" в бреговата зона, в съвкупност с параметрите на нелинейност на вълните отново на "входа" в бреговата зона могат да се използват за оценка на възможните сценарии на трансформация на вълните и за типизация на бреговите зони по очаквани прояви на нелинейност на вълните.

Следва да се отбележи, че критерият получен по числото на *Iribarren* е валиден само за бреговата зона на НИБ "Шкорпиловци", където $\alpha = 0.022$. Как този критерий би се изменил, ако се промени наклонът не е известно.

Проведеният допълнителен анализ не даде отговор и на въпроса относно относителната големина на *a*₂ и кои фактори биха повлияли на нейното поведение в бреговата зона. С тази цел е проведено математическо моделиране.

6.3. Влияние на наклона на дъното върху развитието на амплитудата на втората хармонична

Проведено е моделиране на трансформацията на спектъра на нерегулярни вълни над дъно с различен наклон. В качеството на вход са избрани вълни с *JONSWAP* спектър, пиков период на спектъра $T_p = 7$ sec и $H_s = 0.5$, 1 и 2 m. Моделирането е проведено чрез числено решение на уравнения от типа на *Boussinesq* с подобрени дисперсионни характеристики (*Madsen & Sorensen*, 1992), като е отчетено и разрушаването на вълните (*Kirby & Kaihatu*, 1996). При моделирането е използван дънен профил от следния тип: от 15 m до 5 m дълбочина – равно дъно с наклон 0.05, а от 5 m до 2 m дълбочина, за различните симулации са задавани $\alpha = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08$ и 0.1.

На Фиг. 6.6 представя намерената при моделирането зависимост на амплитудите на първата и втората хармонични от дълбочината при трансформация на вълните над различни наклони. Резултатите показват, че амплитудата на втората хармонична се определя от дължината на пробега на вълните над едни и същи дълбочини. Ето защо, вълни движещи се над полегати брегове и имащи голям пробег, могат да развият достатъчно голяма в амплитудно отношение втора хармонична. В разглеждания случай $(H_s = 1 \text{ m})$, енергията на втората хармонична може да достигне до 40% от тази на основната хармоника. Освен това, за $\alpha > 0.06$ втората хармонична расте незначително и не достига дори 10% от основната (Фиг. 6.6). Това е свързано с факта, че на стръмни брегове процесът на разрушаване на вълните започва по-рано и изцяло контролира нарастването на втората хармонична (Кузнеиов & Сапрыкина, 2004). Така, амплитудата на втората хармонична зависи от наклона на дъното и може да се твърди, че при трансформация на вълни над стръмни брегове ($\alpha > 0.06$) амплитудата й ще остава малка. Резултатите също показват, че при трансформация на вълните над полегати брегове ($\alpha < 0.04$), може да се прогнозира увеличаване на амплитудите на втората хармонична до техните максимални стойности, а за $\alpha < 0.03$ повече от един цикъл на периодичен обмен на енергия между първата и втората хармонична. За вълни, трансформиращи се над стръмни брегове с $\alpha > 0.04$ амплитудата на втората хармоника почти не нараства и добре изразен обмен на енергия между хармониките не се наблюдава.

По резултатите от моделирането за характерните сценарии е потърсена зависимост на числото на *Iribarren* от стръмността на вълните (H_0/L_0) на "входа" в бреговата зона за различни наклони на дъното (Фиг. 6.7). От фигурата се вижда, че с увеличаване на наклона се увеличава и стръмността на вълните, които при това положение ще имат един добре изразен цикъл на обмен на енергия, отговарящ на сценарий 2 или случаите, за които още на "входа" в бреговата зона съществуват големи втори хармонични.



Фиг. 6.6. Еволюция на енергията на a_1 и a_2 при трансформация на моделираните вълни, разпространяващи се над дъно с различни наклони: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.08 и 0.1; входни параметри на вълнението: $H_s = 1$ т, $T_p = 7$ sec, $\gamma = 6$; черна линия изменение на a_1 , пунктирна червена линия – изменението на a_2



Фиг. 6.7. Зависимост на числото на Iribarren (Ir) (пунктирни криви) от стръмността на вълната (H_0/L_0) за различни наклони на дъното (0.01, 0.02, 0.04, 0.06 и 0.08) за четирите сценария за трансформация на вълните: \times – сценарий 1, \bigcirc - сценарий 2, \square сценарий 3, \diamondsuit - сценарий 4; пунктир в розово – Ir = 7* H_0/L_0 ; символите извън пунктирните криви отбелязват положението на експерименталните данни, а тези върху кривите – симулираните данни

С увеличаване на наклона на дъното вълните по-често ще се трансформират по сценарии 1 и 3, т.е. вторите хармоники ще остават малки или ще нарастват само в близост до брега.

На базата на приблизителна оценка на наличните моделни и експериментални данни са получени гранични стойности за стръмността на вълната и числото на *Iribarren*, при които вълните ще се трансформират по различни начини. Ако $Ir > 7*H_0/L_0$, то ще се реализират сценарии 1 и 3, докато ако $Ir < 7*H_0/L_0$ – сценариите 2 и 4 (*Canpыкинa u* dp., 2013).

Допълнително е проведено моделиране на трансформацията на вълни с различни начални височини над различни наклони на дъното и е потърсена зависимост на големината на амплитудата на втората хармонична от числото на *Iribarren* на "входа" в бреговата зона (h = 5 m). Получените резултати са представени на Фиг. 6.8.



Фиг. 6.8. Зависимост на амплитудата на втората хармонична от числото на Iribarren (Ir) за вълни с JONSWAP спектър и входни параметри на вълнението: $H_s = 0.5, 1, 2 m, T_p = 7 \text{ sec}, \gamma = 6$

От фигурата се вижда, че колкото е по-голяма началната височина на вълната, толкова е по-голяма амплитудата на втората хармонична. За всички случаи обаче, ако Ir > 0.27 амплитудата на втората хармоника практически не расте и остава относително малка: 27 % от енергията на вълнението за $H_s = 2$ m до 9 % за $H_s = 0.5$ m. За числа на *Iribarren* по-малки от 0.27 амплитудата на втората хармонична може да достига големи относителни стойности.

По този начин, числото на *Iribarren* на "входа" в бреговата зона може да се използва като критерий за това какви относителни амплитуди на втората хармонична могат да се очакват вътре в бреговата зона (*Canpыкинa и др.*, 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЯ, ПРИНОСИ И БЪДЕЩИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Основни изводи

Получените резултати от изследването на нелинейностите от втори порядък на ветровото вълнение в бреговата зона позволяват да се направят следните по-важни изводи:

1. Извършено е изследване на развитието на квадратичните нелинейности на вълните в бреговата зона. Демонстирани са възможностите на биспектралния анализ за идентифициране на нелинейните взаимодействия от втори порядък. Анализът на биспектралната функция показва, както наличие на главен максимум на честоти $f_1 = f_2 = f_p$ на всички дълбочини, така и развитие на клетъчна структура на биспектъра, кратна на пиковата честота на спектъра с намаляване на дълбочината. Изследването подтвърждава, че се открояват два вида взаимодействия на свободните вълни. При единия вид си взаимодействат вълни с равни честоти $f_1 = f_2 = n f_n$, където *п* е цяло число, а при втория, едната вълна има честотата на спектралния максимум f_n , докато другата е с честота nf_n . Анализът на бикохерентните функции изцяло подтвърждава изводите направени от биспектралния анализ, като освен това показва, че квадратичната фазова кохерентност на честотите около пика достига стойности близки до единица с намаляване на дълбочината, а за честотите кратни на спектралния максимум за най-плитководните локации се приближава до 0.7. Това свидетелства за засилване на нелинейността от втори порядък с приближаване към брега и за образуване на нови честотни компоненти;

2. При построяването на биспектъра на нелинейните вълни са приложени традиционни и параметрични методи за оценка. Направеното сравнение между двата традиционни подхода показва, че като цяло значителни разлики при оценяването по двата метода не се наблюдават при достатъчно дълги редици от измервания. Изследванията с параметричните методи за оценка на биспектрите на плитка вода показват, че методите за оценка на порядъка на модела на пълзаща средна стойност (ПС) дават сравнително добри резултати. Направено е предположението порядъкът на АР модела да се приеме равен или с единица по-висок от порядъка на ПС модела. Сравнението между конвенционалните и параметричните методи показва, че параметричните биспектри съвпадат сравнително добре с традиционните, като това сходство е най-добре изразено за биспектралните максимуми. В допълнение е установено, че АР биспектрите оценяват по-добре пиковете близки до нулата т.е. $\approx (0, f_p)$, докато АРПС биспектрите улавят много добре пиковете във фазово обединените честотни двойки от вида $\approx (0, 2f_p)$ и $\approx (0, 3f_p)$;

3. Особенностите на обмен на енергия между първата и втората хармоники, дължащ се на близко-резонансни взаимодействия, и пространствено-времевата изменчивост на амплитудно-честотната структура на индивидуалните вълни са изследвани по лабораторни и експериментални данни. Установените зависимости показват, че при трансформацията на вълните от дълбока до плитка вода амплитудночестотната структура на индивидуалните вълни се изменя квази-периодично, както в пространството, така и във времето. Това се дължи на нелинейния пренос на енергия между хармониките;

4. Изследванията на бифазата, подтвърждават, че за широк интервал от честотни двойки стойността й с намаляване на дълбочината се стреми към $-\pi/2$. От друга страна е установено, че фазовото отместване се изменя квази-периодично с приближаване към брега и силно зависи, както от основната посока на пренос на енергия между първата и втората хармонични;

5. Установените закономерности относно обмена на енергия между първата и втората хармоники показват, че създаването на качествен физичен модел в бреговата зона е възможно само на началния стадий на трансформация на вълните на относително големи дълбочини;

6. Извършените изследвания на изменението на нелинейните вълни при тяхната трансформация позволяват да се направи класификация на бреговите зони по степен на очаквани прояви на нелинейност на вълните (периодичен обмен на енергия между първата и втората хармоники) в зависимост от средния наклон на дъното и числата на Ursell и Iribarren;

7. За експерименталните данни получени по време на "Шкорпиловци–2007" стойността на параметъра Ur = 10, на "входа" в бреговата зона (4.5 m) при наклон на дъното 0.022, може да се използва като критерий за разграничаване по кой от характерните сценарии ще се трансформират вълните;

8. По експерименталните и моделни данни са получени гранични стойности за стръмността на вълните H_0/L_0 на "входа" в бреговата зона и числата на *Iribarren*, които могат да се използват като критерии за реализация на определените сценарии за трансформация. Ако $Ir > 7 * H_0/L_0$: 1) могат да се наблюдават 2 или повече цикъла на обмен на енергия, а амплитудите на вторите хармоники се увеличават едва с приближаване към брега или 2) амплитудите на вторите хармонични остават малки по протежение на цялата брегова зона. А ако $Ir < 7 * H_0/L_0$, тогава: 1) амплитудите на вторите хармоничи остават малки по протежение на цялата брегова зона. А ако $Ir < 7 * H_0/L_0$, тогава: 1) амплитудите на вторите хармоники се увеличават едва с приближаване към брега или 2) амплитудите на вторите хармонични остават малки по протежение на цялата брегова зона. А ако $Ir < 7 * H_0/L_0$, тогава: 1) амплитудите на вторите хармоники са големи още на "входа" в бреговата зона или 2) нарасват максимално в бреговата зона за сметка на обмена на енергия, при което се наблюдава един пълен или половин цикъл на обмен на енергия.

9. Резултатите от численото моделиране на трансформацията на спектъра на нерегулярни вълни за различни наклони на дъното показват, че хармоники от втори порядък в големи относителни амплитуди и периодичност на обмен на енергия между основната и втората хармонична са характерни за полегати брегове с наклони на дъното по-малки от 0.03. В допълнение, е установено, че числото на *Iribarren*, на "входа" в бреговата зона, може да се използва като критерий за очакваните относителни амплитуди на вторите хармонични вътре в бреговата зона, т.е. ако Ir < 0.27, то относителната амплитуда на втората хармонична ще бъде голяма.

Приноси

1. За първи път е приложено параметрично моделиране на биспектралните функции за изследване на нелинейните взаимодействия от втори порядък на ветровото вълнение на плитка вода. Изследванията показват, че методите за оценка на порядъка на модела на пълзаща средна стойност (ПС) дават сравнително добри резултати. Проведеният анализ свидетелства, че АР биспектрите имат по-добра разделителна способност да отчитат пиковете близки до нулата т.е. $\approx (0, f_p)$, докато АРПС биспектрите идентифицират много добре пиковете за честотни двойки от вида $\approx (0, 2f_p)$ и $\approx (0, 3f_p)$;

2. За първи път е проведен анализ на изменчивостта на амплитудно-честотната структура на индивидуалните нерегулярни вълни при трансформацията им в бреговата зона при близко-резонансни нелинейни взаимодействия и свързаният с това обмен на енергия между първата и втората хармоники. Изследванията показват, че амплитудночестотната структура на индивидуалните вълни се изменя периодично, както в пространството, така и във времето. Установено е, че фазовото отместване между първата и втората хармоники с намаляване на дълбочината също има периодичен характер. Този характер на изменение строго зависи от посоката на пренос енергия между основната и втората харамоники;

3. За първи път е предложен качествен физичен модел, който описва изменчивостта на параметрите на индивидуалните вълни при разпространението им в бреговата зона под влияние на близко-резонансни нелинейни взаимодействия от втори

порядък. Установено е, че моделът е приложим само на началния стадий на трансформация на вълните на относително големи дълбочини. По експериментални данни са определени характерни сценарии на трансформация на вълните, които описват изменението на амплитудите на първата и втората хармоника на вълнението при разпространението му към брега.

4. Предложена е класификация на участъци на бреговата зона по степен на очаквани прояви на нелинейност на вълните. Параметрите, по които е направена класификацията са среден наклон на дъното и числата на Ursell и Iribarren. Предложени са критерии за реализация на характерните сценарии на трансформация на вълните в бреговата зона.

5. Получените резултати от изследванията, проверени по голям брой натурни данни, могат да послужат като основа за разработване на критерии за уязвимост на бреговата зона в зависимост от нейната нелинейна динамика;

Бъдещи изследвания

1. Продължаване на изследванията - експериментални и теоретични за усъвършенстване на предложения физичен модел на нелинейните взаимодействия в бреговата зона. Включване в модела на влиянието на наклона на дъното, вълнови режим, отчитане на компенсанционните и други течения в бреговата зона, инфрагравитационни вълни и разрушаване на вълните.

2. Сравнение на получените резултати с изследвания направени от други автори в други естествени условия.

3. Изследване на еволюцията на фазовото отместване между нелинейните хармоники в бреговата зона и влиянието му върху транспорта на наносите.

ЛИТЕРАТУРА

(само цитираната в автореферата)

1. Дженкинс, Г., Д. Ваттс, 1972. Спектральный анализ и его приложения, Пер. с англ., Издательство "Мир", Москва, вып. 2, с. 287.

2. **Кузнецов, С., Я. Сапрыкина, 2004.** Частотная зависимость диссипации энергии при обрушении нерегулярных волн. *Водные ресурсы*, т. 31, № 4, с.422-430.

3. **Малахов, А., 1978.** Кумулянтый анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований, "Сов. радио", Москва, с.374.

4. Сапрыкина, Я., С. Кузнецов, Н. Андреева, М. Штремель, 2013. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря, *Океанология*, Москва, том 53, № 4, с. 1–11;

5. **Стратонович, Р., 1961.** Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике, "Сов. радио", Москва.

6. **Халачев, В., Г. Стоянов, 1980.** Теория на сигналите, ДИ "Техника", София, с. 355.

7. **Чернева, Ж., 1986.** Изследване на някои спектрални и статистически характеристики на ветровото вълнение в бреговата зона, Дисертация за присъждане на научна степен к.т.н., София, с. 153.

8. Andreeva, N., Z. Cherneva, 2007a. Autoregressive (AR) bispectra of wind waves in the coastal zone. In: Comptes rendus de l'Academie bulgarie des Sciences, vol. 60, № 10, pp. 1093-1100, ISSN 1310-1331.

9. Andreeva, N., Z. Cherneva, 2007b. Parametric bispectra of wind waves in the coastal zone. Proc. 12th Int. Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2007), Ed. C. Guedes Soares, P. Kolev, vol. 2: Exploration of ocean and coastal resources, September 2-6th, Varna, Bulgaria, , pp. 667-675, ISBN 0415455235;

10. Bretherton, F., 1964. Resonant interactions between waves, J. Fluid. Mech., vol. 20, pp. 457-480.

11. Brillinger D., 1965. An introduction to polyspectra, Ann. Math. Statist., vol. 36, pp. 1351-1974.

12. Brillinger D., M. Rosenblatt, 1967b. Computation and interpretation of k-th order spectra. In: Spectral analysis of time series, B. Harris, Ed. New York, NY: Wiley, pp. 189-232.

13. Cherneva, Z., N. Andreeva, P. Petrova, 2004. Bispectral analysis of wind wave in the Black Sea coastal zone, Proc. 7th Int. Conf. on Marine Science and Technologies "Black Sea'2004", October 7-9th, Varna, Bulgaria, pp. 304-309.

14. Elgar, S., R. Guza, 1985b. Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. J. Fluid Mech., vol. 161, pp. 425-448;

15. Flick, R., R. Guza, D. Inman, 1981. Elevation and velocity measurements of laboratory shoaling waves. J. Geophys. Res., vol. 86, No. 5, pp. 4149–4160;

16. Freilich, M., R. Guza, 1984. Nonlinear effects on shoaling surface gravity waves. Phil. Trans R. Soc. London A, vol. 311, pp. 1-41.

17. **Giannakis, G., J. Mendel, 1989.** Identification of non-minimum phase systems using higher-order statistics, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 37, pp. 360-377.

18. **Hasselman, K., 1962.** On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part I. General theory, J. Fluid Mech., vol. 12, No. 4, pp. 481-500.

19. Iribarren, R., C. Nogales, 1949. Protection des ports, *Proc. 17th Int. Naval Congress*, Lisbon, Section II, Communication, vol. 4, pp. 31-80.

20. Kim, Y., E. Powers, 1979. Digital bispectral analysis and its application to nonlinear wave interaction, IEEE Trans. Plasma Science, vol. 1, pp. 120-131.

21. Kirby, J., J. Kaihatu, 1996. Structure of frequency domain models for random wave breaking, *Proc. 25th Conf. on Coastal Eng.*, Orlando, USA, Ch. 89, pp. 1144-1155;

22. Madsen, P., O. Sorensen, 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly-varying bathymetry. *Coastal Eng.*, vol. 18, pp. 183–204;

23. Madsen, P., O. Sorensen, 1993. Bound waves and triad interactions in shallow water, J. Ocean Eng., vol. 20, No. 4, pp. 359-388.

24. Marple, S., Jr., 1987. Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

25. McCormick, M., 2009. Ocean engineer mechanics with applications, *Cambridge University Press*, UK, p. 580;

26. Nikias, C., M. Raghuveer, 1987. Bispectrum estimation: A digital signal-processing framework, Proc. of the IEEE, vol.75, pp. 869-981.

27. **Phillips, O., 1960.** On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude. Part I. The elementary interactions. J. Fluid Mech., vol. 9, No. 2, pp. 193-217.

28. **Raghuveer, M. 1990.** Time-domain approaches to quadratic phase coupling estimation. IEEE Transactions on automatic control, vol. 36, No. 1, pp. 48-56.

29. **Raghuveer, M., C. Nikias, 1984.** A parametric approach to bispectrum estimation. In: Proc. ICASSP'84, pp. 38.1.1-38.1.4.

30. **Raghuveer, M., C. Nikias, 1985.** Bispectrum estimation: a parametric approach. IEEE Transactions on acoustic, speech and signal processing, vol. ASSP-33, No. 5, pp.1213-1230.

31. **Saprykina, Y., S. Kuznetsov, 2005a.** Transformation of irregular waves and wave groups due to breaking and non-linear processes, Proc. 29th Int. Conf. on Coastal Eng., Lisbon, Portugal, Jane McKee Smith (Ed.), World Scientific, pp. 282-294.

32. Saprykina, Y., S. Kuznetsov, Zh. Cherneva, N. Andreeva, 2009. Spatio-temporal variability of amplitude-phase structure of surge waves in the coastal zone of the sea, Oceanology, Moscow, vol. 49, No 2, pp. 182-192.

33. Swami, A., J. Mendel, 1990. ARMA parameter estimation using only output cumulants, IEEE Transactions on acoustic, speech and signal processing, vol. 38, No. 7, July, pp. 1257-1265.

34. Van Ness, J., 1966. Asymptotic normality of bispectral estimates, Ann. Math. Statist., vol. 37, pp. 1257-1272.

35. Welch, P., 1967. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. AU-15, pp.70-73.

<u>ПРИЛОЖЕНИЕ 1</u>

Списък на научните статии на автора във връзка с дисертацията за придобиване на образователна и научна степен "Доктор"

I. Статии публикувани в списания с импакт фактор

- 1. Cherneva, Z., P. Petrova, N. Andreeva, C. Guedes Soares, 2005. Probability distributions of peaks, troughs and heights of wind waves measured in the Black Sea coastal zone. *Coastal Eng.* vol. 52, pp. 599-615, ISSN: 0378-3839;
- 2. Andreeva, N., Z. Cherneva, 2007a. Autoregressive (AR) bispectra of wind waves in the coastal zone. In: *Comptes rendus de l'Academie bulgarie des Sciences*, vol. 60, No. 10, pp. 1093-1100, ISSN 1310-1331;
- 3. Saprykina, Y., S. Kuznetsov, Zh. Cherneva, N. Andreeva, 2009. Spatiotemporal variability of amplitude-phase structure of surge waves in the coastal zone of the sea, *Oceanology*, Moscow, vol. 49, No 2, pp. 182-192, ISSN PRINT: 0001-4370;
- 4. Сапрыкина, Я., С. Кузнецов, Н. Андреева, М. Штремель, 2013. Сценарии нелинейной трансформации волн в береговой зоне моря, *Океанология*, Москва, том 53, № 4, с. 1–11;

II. Статии публикувани като части от монографии

1. Andreeva, N., Z. Cherneva, 2007b. Parametric bispectra of wind waves in the coastal zone. In: *Proc. 12th Int. Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2007)*, Ed. C. Guedes Soares, P. Kolev, vol. 2: Exploration of ocean and coastal resources, September 2-6th, Varna, Bulgaria, pp. 667-675, ISBN 0415455235;

Ш. Публикувани доклади от международни научни конференции

- 1. Cherneva, Z., N. Andreeva, P. Petrova, 2004. Bispectral analysis of wind wave in the Black Sea coastal zone, In: *Proc. of the 7th Int. Conf. on Marine Science and Technologies "Black Sea*'2004", October 7-9th, Varna, Bulgaria, pp. 304-309.
- Saprykina, Y., N. Andreeva, S. Kuznetsov, Zh. Cherneva, C. Guedes Soares, 2008. A physical model of wind waves in the coastal zone, In: *Proc. of ASME 27th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering "OMAE'2008"*, Rep. OMAE-57163, June 15-20th, Estoril, Portugal.

III. Статии публикувани в наши списания

1. Чернева, Ж., Н. Андреева, П. Петрова, 2005. Биспектрален анализ на ветровото вълнение в бреговата зона на Черно море, В: *Трудове на ИО-БАН*, Варна, кн. 5, стр. 65-79, ISSN 00324-0878.

<u>ПРИЛОЖЕНИЕ 2</u>:

Цитирания на научните статии на автора във връзка с дисертацията за придобиване на образователна и научна степен "Доктор"

I. Cherneva, Z., .P. Petrova, N. Andreeva, C. Guedes-Soares, 2005. Probability distributions of peaks, troughs and heights of wind waves measured in the Black sea coastal zone. *Coast. Eng.*, vol. 52, No 7, pp. 599-615.

1. Wang, Y., Y. Xia, 2013. Calculating nonlinear wave crest exceedance probabilities using a Transformed Rayleigh method, *Coastal Eng.*, vol. 78, pp. 1 – 12;

2. Didenkulova, I., A. Rodin, 2012. Statistics of shallow water rogue waves in Baltic Sea conditions: The case of Tallinn Bay, Ocean: Past, Present and Future - 2012 IEEE/OES *Baltic International Symposium, BALTIC 2012*, art. no. 6249221;

3. Trulsen, K., H. Zeng, O. Gramstad, 2012. Laboratory evidence of freak waves provoked by non-uniform bathymetry, *Physics of Fluids*, vol. 24, No 9, art. no. 097101;

4. Delgado, A.L., A.J. Vitale, G.M.E. Perillo, M.C. Piccolo, 2012. Preliminary analysis of waves in the coastal zone of Monte Hermoso and Pehuén Co, Argentina, *J. Coastal Res.*, vol. 28, No 4, pp. 843-852;

5. Didenkulova, I., 2011. Shapes of freak waves in the coastal zone of the Baltic Sea (Tallinn Bay), *Boreal Environment Research 16 (SUPPL. A)*, pp. 138-148;

6. Didenkulova, I., C. Anderson, 2010. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea, *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, No 9, pp. 2021-2029;

7. Castillo, E., C. Castillo, R. Mínguez, 2009. Use of extreme value theory in engineering design, Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications, *Proc. Joint ESREL and SRA-Europe Conference 3*, pp. 2473-2488;

8. Tayfun, M.A., F. Fedele, 2008. Envelope and phase statistics of large waves, *Proc. Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE 2*, pp. 99-112

9. Tayfun, M.A., 2008. Distributions of envelope and phase in wind waves, J. Phys. Oceanogr., vol. 38, No 12, pp. 2784-2800;

10. Suzuki, T., S. Shin, N. Mori, D.T. Cox, 2008. Statistical modeling of pressure gradients on a barred beach, *Coastal Eng. Journal*, vol. 50, No 2, pp. 123-142.

11. Tayfun, M.A., F. Fedele, 2007. Wave-height distributions and nonlinear effects, Ocean Eng., vol. 34, No 11-12, pp. 1631-1649.

12. Tayfun, A., F. Fedele, 2007. Wave height distributions and nonlinear effects, *Ocean Eng.*, vol. 34, No 11-12, pp. 1631-1644

II. Saprykina, Y., S. Kuznetsov, Zh. Cherneva, N. Andreeva, 2009. Spatiotemporal variability of amplitude-phase structure of surge waves in the coastal zone of the sea, *Oceanology*, Moscow, vol. 49, No 2, pp. 182-192

1. **Леонтиев, И., 2012.** Профиль песчаного берега: некоторые свойства морфологии и сезонная изменчивость, *Геоморфология*, № 4. с. 22-32

EXPERIMENTAL METHODS FOR INVESTIGATION OF WIND WAVE NON-LINEARITY IN THE COASTAL ZONE

(Summary)

The present thesis examines wind wave non-linearity in the coastal zone of the Black sea in terms of non-linear triad wave-wave interactions and their evolution due to water depth decrease. It consists of six chapters, 50 figures and 4 tables.

The thesis begins with an overview of the wave theories since the middle of the 19th century, which involve the physics of triad wave-wave interactions and outlines the contemporary level of understanding of this non-linear process in the coastal zone on the basis of theoretical, experimental, laboratory and numerical modeling studies.

The second chapter presents the field and laboratory data used in the thesis. The following chapter introduces the concept of bispectrum, which is used for detection and analysis of wind wave second-order non-linearity. Furthermore, conventional and parametric methods for bispectrum estimation are given in details clarifying advantages and drawbacks of the both approaches.

In chapter four the abilities of the bispectrum to detect wind wave second-order nonlinearities are demonstrated on the basis of wave data registered in conditions of depth varying from 18 m to 1.6 m. The results show presence of strong triad non-linear wave-wave interactions along the entire coastal zone, as their strength increase while waves approach the shore. In addition, bispectrum estimates are calculated by both conventional and parametric methods. The comparison between both approaches shows no significant difference in their estimates, but proves the superior abilities of parametric methods to resolve closely spaced peaks in bispectrum domain, as well as their the applicability for analysis of wind waves in shallow water.

Chapter five examines the spatial and temporal variability of amplitude-frequency structure of wind waves and nature of the energy transfer between the first and the second harmonics of the wave motion due to near-resonant triad wave-wave interactions. The study is carried out using both field and laboratory data. The results shows that during the wave transformation from deep to shallow water the amplitude-frequency structure of the individual waves varies quasi-periodically both in space and time, which is due to the non-linear energy transfer between wave harmonics. In addition, it is established that the phase shift (bi-phase) also varies quasi-periodically, as waves approach the shore, and strongly depends on the main direction of energy transfer between the first and the second harmonics. The determined energy transfer peculiarities between the first and the second harmonics state that creation of a qualitative physical model of the triad wave-wave interactions is possible only at the initial stages of wave transformation at relatively deep water.

In chapter six using field wave data four characteristic scenarios of wave transformation are determined. The scenarios reflect the variability of first and second harmonic amplitudes with depth decrease. Additionally, the influence of different bottom slopes on the evolution of the second harmonic is studied by means of numerical modeling. Furthermore, parameters, which take into account the wave non-linearity at the coastal zone "entrance" and categorize the bottom relief, are used to: a) determine criteria for wave transformation scenarios realization and b) to propose a classification of coastal zones due to degree of expected manifestations of wind wave non-linearity.