

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

**НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО
МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ**

Васко Николаев Гълъбов

**Създаване на система за прогноза на опасни
хидродинамични явления в крайбрежната зона на
Черно море**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен
„ДОКТОР”

в област на висше образование 4. Природни науки, математика
и информатика, професионално направление

4.1. Физически науки (Физика на
океана, атмосферата и околоземното
пространство)

Научен ръководител:
доц. д-р Анна Корчева

София, 2017 г.

Дисертационният труд е с обем 129 страници. Състои се от увод, четири глави (четвъртата е заключение), списък на цитираната литература, включващ 155 заглавия, от които 8 са на кирилица и 147 са на латиница.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен научен семинар на департамент „Прогнози и Информационно обслужване”, проведен на 29.03.2017 г.

Докторанта работи като асистент в департамент Прогнози и Информационно обслужване на Националния Институт по Метеорология и Хидрология.

Състав на научното жури:

чл.кор. проф. д.н. Костадин Ганев, НИГТГ – БАН
проф. д-р Валери Спиридонов, НИМХ – БАН
доц. д-р Анна Корчева, НИМХ-БАН
доц. д-р Елисавета Пенева, Физически Факултет на СУ
доц. д-р Николай Рачев, Физически Факултет на СУ

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 18.07.2017 от 14 часа в заседателната зала на Учебния център на НИМХ- БАН, гр. София.

(Номерата на таблици, графики, уравнения и цитирана литература не следват тези в дисертацията, а са дадени в последователен ред)

СЪДЪРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА | 4 |
| Актуалност на изследването..... | 4 |
| Цел и задачи на изследването..... | 5 |
| Методи на изследване..... | 5 |
| Практическа значение на работата..... | 5 |
| Апробация на дисертацията..... | 6 |
| Съдържание и обем на дисертацията..... | 6 |
| | |
| II. ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД | |
| ГЛАВА.1 Морско вълнение: основни сведения и числено моделиране..... | 7 |
| | |
| ГЛАВА.2 Избор, адаптиране и калибриране на модел за прогнозиране висока разделителна способност за българското крайбрежие..... | 8 |
| | |
| ГЛАВА.3 Модел за прогнозиране на щормови нагони- реализация на взаимодействие с оперативен вълнови модел..... | 29 |
| | |
| ГЛАВА.4 Заключение и обобщение..... | 38 |
| | |
| Заключение..... | 40 |
| Приноси..... | 42 |
| Списък на публикациите на автора..... | 43 |
| Литература..... | 46 |

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Актуалност на изследването

Морските метеорологични прогнози са едни от основните типове прогнози изготвяни от националните метеорологични служби. Тези прогнози имат значение за осигуряването на безопасността на корабоплаването и икономическите активности в открито море а също така и за крайбрежието, където морските бури и свързаните с тях вълнение и щормово повишение на морското ниво представляват риск за инфраструктурата и човешкият живот.

Националният Институт по Метеорология и Хидрология (НИМХ-БАН) е отговорен за осигуряване с морски метеорологични прогнози за район JULIETTE от в западната част на Черно море.

Числена прогноза на вълнението в НИМХ-БАН [1] се изтопя от осемдесетте години на XX век (въведена от д-р Анна Корчева) и на щормови нагони също от осемдесетте години на XX век [2] (въведена от д-р Георги Мънгов и д-р Георги Корчев). В началото на XXI век в НИМХ-БАН е въведен в оперативната практика вълнови модел от трето поколение WAVEWATCH III [3] с пространствена разделителна способност в сферична координатна система 0.125° . Този модел е достатъчен за осигуряване на прогноза на вълнението в открито море. Същевременно обаче за по-точна прогноза на вълнението е необходима прогноза с по-висока пространствена разделителна способност и отчитане на процесите на дисипация на вълновата енергия в крайбрежната зона. Въвеждането в оперативната практика на НИМХ-БАН на числен модел с висока пространствена разделителна способност е актуална задача с висока практическа стойност.

Що се отнася до численото прогнозиране на щормови нагони, Преди началото на работата по настоящата дисертация и след напускането на д-р Мънгов работата по оперативното числено прогнозиране на щормови нагони беше замразена и задачата за числено прогнозиране със самостоятелен числен модел или свързан с вълновия модел също е актуална задача с практическо значение. Взаимодействието на моделите за прогнозиране на щормови нагони и вълнови модели е особено актуална тема в световен мащаб през последното десетилетие.

Основна причина темата да е актуална е и факта, че развитието на инфраструктурата по крайбрежието през последните десетилетия, доведе до по-голяма уязвимост при силни морски бури.

Цел и задачи на изследването

Основната цел на дисертацията е да бъде изградена система състояща се от числен модел за прогнозиране на вълнението в крайбрежната зона и числен модел за прогнозиране на щормови нагони. Да се въведе взаимодействие между тези два модела, ако има необходимост.

Задачите, които трябва да бъдат изпълнени са

-Да бъде избран вълнови числен модел, който да може да работи с висока пространствена разделителна способност в оперативен режим с оглед на ограниченията на изчислителната техника с която разполагаме.

-Избраният вълнови модел да бъде калибриран за числена прогноза в оперативен режим, като бъдат избрани: изчислителна мрежа, спектрална дискретизация, оптимална параметризация на генерацията и дисипацията на вълнова енергия, евентуално калибриране и на параметризиациите на други физически процеси.

-Да се изследва дали има необходимост от отчитане на взаимодействието на вълнението с повърхностните течения.

-Калибрирането следва да бъде проведено за ситуации отговарящи на критериите за опасни явления.

-Да бъде възстановена оперативната работа на модела за прогнозиране на щормови нагони.

Методи на изследване

Изследването е основано на числено моделиране на вълнението и щормовото повишение на морското ниво. Резултатите от численото моделиране са сравнени с измервания (дистанционни- по данни от сателитни алтиметри и in-situ по данни от Acoustic Doppler Current Profiler ADCP за вълнението и от мареографи за морското ниво). Сравненията са представени в графичен вид и в табличен вид, като са използвани стандартни статистически характеристики- систематично отклонение (bias), средноквадратична грешка (root mean square error) и индекс на разсейване (scatter index). Изследвани са обстановки, които могат да бъдат характеризирани като “опасни” що се отнася до вълнението и морското ниво.

Практическо значение на работата

В резултат на изпълнението на поставените задачи и изпълнението на основната цел на дисертацията, системата е внедрена в оперативната дейност на НИМХ-БАН със заповед на директора на

НИМХ-БАН N13 /13.01.2012 и от тогава работи успешно в оперативен режим.

Апробация на дисертацията

Част от резултатите са изложени в 8 публикации. Една от тях е в списание с импакт фактор/ импакт ранк. Три са в списанието Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology. Три публикации са доклади на международни конференции публикувани в пълен текст (едната от които индексирана в Web of Science/ Scopus) и една е публикуван доклад на национална конференция. Изнесени са три доклада на международни конференции, три на национални научни форуми и един разширен доклад на семинар на Meteo France.

Съдържание и обем на дисертацията

Дисертацията е с обем 129 страници от които 114 страници изложение, а също така приноси, списък с публикациите, литература и благодарности. Състои се от увод и четири глави, като четвъртата глава е заключение на дисертацията. Съдържа 44 фигури и 13 таблици.

Първа глава съдържа наакратко основна информация за морското вълнение и обзор на изследванията в областта на численото моделиране на вълнението в Черно море.

Във втора глава са описани процеса на избор на вълнови модел с висока разделителна способност за крайбрежната зона (SWAN [4]), прилагането му за Черно море и процеса на калибрирането му (избор на изчислителна мрежа на модела SWAN, дискретизация в спектралното пространство, избор на параметризации на генерацията и дисипацията на вълновата енергия и т.н.).

Третата глава е посветена на темата за моделирането на щормово повишение на морското ниво. Започва с представяне на основни сведения за щормовите нагони. След това продължава с описание на въведеният в оперативната практика метод на взаимодействие с модел за прогнозиране на щормови нагони.

Четвъртата глава започва с описание на приложение на въведената в оперативната практика система за реконструкции на исторически бури и продължава с обобщение и заключение на дисертацията.

Дисертацията завършва със списък на приносите, публикации по темата, литература и благодарности.

II. ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

В **увода** са разгледани целите и задачите на дисертационният труд, актуалността и практическото значение на изследването и е описана структурата на дисертацията

Глава.1 Морско вълнение: основни сведения и числено моделиране

В първа глава накратко е описана основната информация за морското вълнение, необходима за пълнотата на описанието. Първоначално е представена класификацията на видовете морски вълни в зависимост от периода им, пространственият им мащаб, причините за възникването им и причините за дисипацията на вълновата енергия. След това накратко са изложени основните статистически характеристики на ветровите вълни, информация за представянето на вълнението в спектрален вид. Следва основна информация за численото моделиране на вълнението- поколения вълнови модели и разлики между тях а също в тази част от дисертацията е въведено и основното уравнение решавано от числените вълнови модели-уравнението на баланса на вълновата енергия. По-нататък в първа глава по-детайлно са изложени параметризиациите в числените вълнови модели на процесите на генерация и дисипация на вълнова енергия, като са споменати и параметризиациите на нелинейните взаимодействия между вълни. Разгледани са детайлно параметризационните схеми на генерация и дисипация на вълновата енергия на Komen [5], Janssen [6] и Westhuysen [7]. Параметризационната схема на Komen е комбинация от параметризация на генерация на вълнова енергия базирана на модел на Philips [8] и реализирана от Snyder [9] и параметризация на дисипацията на вълнова енергия в дълбока вода по т.нар. пулсов модел на Hasselmann[10]. Параметризационната схема на Janssen се базира на теорията на Janssen [6] за генерацията на вълнова енергия, която получава явно чрез итеративна процедура динамичният коефициент на триене на морската повърхност. В тази схема параметризацията на дисипацията също е по пулсов модел на Hasselmann но с различни коефициенти. Параметризационната схема на Westhuysen се състои от параметризация на генерацията по Yan [11] и параметризация на дисипацията по Westhuysen [7], която се базира на т.нар. модел на дисипацията базиран на насищане на

спектъра на база на изследванията на Alves and Banner [12]. Главата приключва с обзор на изследванията в областта на численото моделиране на вълнението в Черно море, като е обърнато основно внимание на разработките в областта предшестващи настоящата работа.

Глава.2 Избор, адаптиране и калибриране на модел за прогнозиране на вълнение с висока разделителна способност за българското крайбрежие

Втора глава съдържа описание на избора на числен вълнови модел с висока разделителна способност за крайбрежната зона, кратко описание на избрания модел, описание на първоначалните експерименти с модела за френското средиземноморско крайбрежие, информация за приложението на модела за Черно море, описание на калибрирането на модела за дълбока вода в Черно море на база на сателитни измервания, описание на калибрирането на модела на база на информация от измерване на вълнение с ADCP в крайбрежната зона и предварителни резултати от експеримент с отчитане на влиянието на теченията върху вълнението. В НИМХ-БАН модел от трето поколение въведен в оперативната практика в началото на XX век от д-р Анна Корчева (Wavewatch III [3]). Задачата на настоящата работа е въвеждане в оперативната практика на модел от трето поколение с висока пространствена разделителна способност отчитащи всички ефекти на трансформация на вълните в крайбрежната зона. Главата започва с аргументите за избор на модела SWAN за целите на настоящата дисертация. Основни причини за избора са че:

-SWAN е модел с отворен код.

-Този модел е разработен първоначално за работа в крайбрежната зона и с висока разделителна способност.

-При висока пространствена разделителна способност SWAN изисква много по-малко изчислително време от останалите модели от трето поколение.

-Отчита всички ефекти на трансформация на вълните в крайбрежната зона.

Всички тези аргументи бяха валидни в началото на работата, описана в дисертацията. По-късно WAVEWATCH III беше доразвит и в момента е напълно конкурентен на SWAN.

Основните задачи които бяха изпълнени във връзка с въвеждането на SWAN в оперативната практика бяха:

-Избор на тип изчислителна мрежа, батиметрия, избор на вариант- изчислителен домейн за ограничен район край брега използващ гранични условия от WAVEWATCH III или самостоятелен вариант за цялото Черно море с висока разделителна способност.

-Първоначално тестване на модела за регион, в който има достатъчно измервания на параметрите на вълнението за дълги периоди с цел ориентация за работата на различните параметризационни схеми. Като такъв беше избран района на френското Средиземноморско крайбрежие. Средиземно море е полузатворено море до някъде сходно с Черно море и това оправдава първоначални тестове в такъв район.

-Калибриране на SWAN за успешна работа в дълбока вода в Черно море с фокус върху Западното черноморие и акцент върху ситуации свързани със значителни морски бури (доколкото това са особено опасни ситуации за които адекватната прогноза е ключова за осигуряване на потребителите с информация и предупреждения за опасни явления). Възможностите за сравнения на моделните резултати с измервания на височината на вълнението се ограничават до използване на сателитни измервания (информация от сателитни алтиметри). Вниманието пада върху калибрирането на процесите на генерация и дисипация. Поради липсата на информация за пълния спектър на вълнението нелинейните взаимодействия няма как да се калибрират.

-калибриране на SWAN за междинни води в близост до българското крайбрежие. Единствената информация от този тип с която разполагаме е от измерване на вълнение (на дълбочина 20м до Паша Дере) в рамките на кампания на ИО-БАН по време на най-голямата буря на последното десетилетие- 07-08 Февруари 2012. Доколкото тази буря отговаря напълно на категорията "severe storm" (дори в океански мащаби), получената информация е много ценна за калибриране в условията на бури и за съжаление единствена налична за използване за тази зона. От ключово значение е доуточняване на избора на параметризиациите на генерацията и дисипацията в дълбока вода и евентуално прекалибриране на параметризиацията на дисипацията поради триене в дъното.

Първият етап на експериментите с модела SWAN (описаните в следващата глава експерименти в Средиземно море) са осъществени със стара версия на модела (40.76) в която са открити редица грешки в кода особено при реализацията на параметризиациите на Janssen. С цел провеждане на експериментите при еднакви условия всички резултати са преизчислени с използване на версия 40.91ABC. Отделни

съществени новости във версия 41.0 и 41.10 също са тествани, но чрез експеримент с тях в рамките на стабилната версия 40.91ABC. Всичко това прави резултатите от отделните експерименти сравними доколкото версията на модела няма как да изиграе роля.

Първоначално бяха проведени експерименти с цел усвояване на модела и първоначална ориентация за работата на отделните параметризационни схеми. SWAN е адаптиран за западната част на Средиземно море, като е използвана батиметрия предоставена от METEO France. Изчислителната мрежа е сферична със стъпка по пространството 0.1° по ширина и дължина. Стъпката по времето беше установена по експериментален път за всеки набор параметризации. Това беше осъществено, като се започне от малка стъпка по времето (1 минута) и след това стъпката се увеличава. При разлики в резултатите между първият тест (с 1 минута) и текущият под 1% се пристъпва към увеличаване и нов тест. Тестването се провежда двукратно- както в условия на слаб вятър така и за ситуация на морска буря. Установи се, че при използване на параметризиациите на Komen (от сега нататък за краткост ще бъде обозначавана като КОМ) и Westhuysen (WESTH) оптималната стъпка по времето е 20 минути. Относно параметризацията на Janssen това не е така- доколкото самата тя съдържа собствена итеративна процедура (и проблеми в реализацията ѝ преди версия 40.9x) стабилизиране на резултатите е възможно едва при стъпка по времето 5 минути. Тази комбинация от параметризации води до четири пъти по-дълго изчислително време в сравнение с другите две, което е сериозна причина да бъде разглеждана като възможна за оперативно приложение само ако покаже съществени предимства пред другите две параметризации. Сравнения бяха направени с измерванията на оперативни буйове на METEO France с идентификационни номера в системата на Световната Метеорологична Организация 61001 и 61002 (с координати на 61001 наречен Cote d'Azur: 7.8° източна дължина и 43.4° северна ширина и 61002 наречен Gulf de Lion: 4.7° източна дължина и 42.1° северна ширина). Измервания от буйовете на значима височина на вълните и период T_{m-10} (поради някои особености на дизайна си тези буйове тип ODAS UKMO design измерват този период наречен още енергиен период а не среден период). Сравнени са моделираните стойности от SWAN за местоположенията на буйовете на значимата височина на вълните (SWH) и енергийният период. Входната информация за полетата на вятъра е от модела ALADIN в оперативната му версия на METEO France. Взети са само анализите на модела т.е. интервала време между

две полета на вятъра е бч. Пространствената разделителна способност на полето на вятъра е 0.1° (аналогична на избраната за вълновия модел).

Статистическите характеристики, които използваме при сравненията с измервания са:

Средна стойност на моделираните стойности:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i \quad (1)$$

Където M_i е i -тата стойност от общо N :

Средна стойност от измерванията:

$$O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \quad (2)$$

Където O_i е i -тата измерена стойност.

Систематичното отклонение (bias):

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i) \quad (3)$$

Колкото по-близка до 0 е тази величина, толкова по-малко е систематичното отклонение на модела. Ако е по-малка от 0, моделът подценява моделираните стойности, ако е по-голяма от нула ги надценява.

Средноквадратична грешка (Root Mean Square Error) или накратко RMSE:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Средноквадратичната грешка е желателно да е възможно най-близко до 0.

Параметърът индекс на разсейване (Scatter Index) SI е:

$$SI = \frac{RMSE}{O} \quad (5)$$

Тествани бяха параметризациите на Komen (KOM), Janssen (JANS), Westhuysen (WESTH). Към момента на първото провеждане на тези тестове параметризация по подразбиране в SWAN беше KOM в класическият ѝ вид от модела WAM cycle 3. Допълнително беше тествана и модификация на KOM с дисипативен член в който

параметърът за калибриране на параметризацията е $\delta=1$ (повече детайли относно този параметър и физическият му смисъл са изложени в дисертацията). Причината за тази промяна е известният факт, че класическата параметризация на Kompen на дисипацията на вълнова енергия дисипира повече в диапазона честоти по-малки от пиковата стойност в спектъра и по-малко във високочестотния диапазон при което изменя формата на спектъра и води до проблеми с прогнозата на средния период. Във варианта на дисипацията по Janssen (WAM cycle 4) $\delta=1.5$ т.е. дисипацията зависи както от първата степен на вълновото число така и от втората му степен. Ако $\delta=1$ тогава дисипацията зависи само от квадрата на вълновото число и съответно води до по-висока дисипация за високочестотните компоненти. Този подход за решаване на проблемите с КОМ е предложен за първи път от Rogers et al, 2003 [13] и е известен на жаргона на занимаващите се с моделиране на вълнение “трик на Роджърс”. Параметризацията с $\delta=1$ ще бъде отбелязвана от сега нататък като КОМ0, а тази с $\delta=1$ като КОМ1.

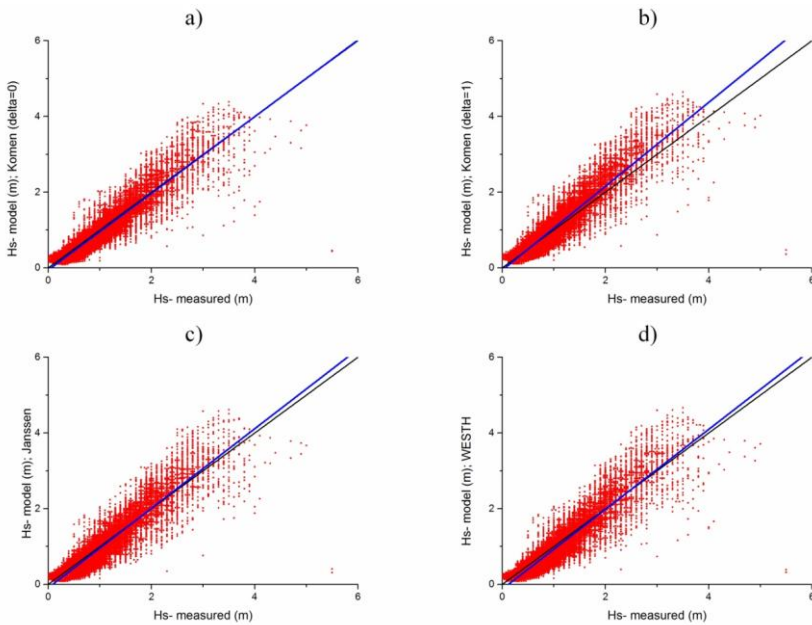
Резултатите от сравнението на моделните параметри с измерванията: значима височина на вълните (ще бъде отбелязвана като SWH или H_s) и енергийният период (T_{m-10}) за буйове 61001 и 61002 са представени в таблица 1. За буй 61001 вълни със значима височина над 4м почти не се наблюдават, затова сравнение е направено само за случаите на измерване на значима височина над 4м за 61002, където са измерени 770 такива случаи (състояние на морето 6 бала или повече по скалата на СМО).

Графиките на разсейването на SWH за буйове 61001 и 61002 са показани съответно на фиг.1 и фиг.2. Прогнозата на SWH е достатъчно успешна със систематични отклонения до 10%, с изключение на параметризацията на КОМ1, която показва тенденция за надценяване и за двата буйа, която е по-съществена за 61002. Като RMSE и SI резултатите са достатъчно сходни. От графиките на разсейването се вижда тенденцията видоизменената параметризация КОМ1 леко да завишава SWH и за двата буйа. Що се отнася до периода на вълнението за двата буйа КОМ0 е с доста съществено занижаване на периодите. Особено отклонението за 61001 е извън приемливите рамки. Що се отнася до останалите три параметризации- те като цяло са успешни за периода на вълнението като на 61001 с най-малко систематично отклонение, RMSE и SI е КОМ1 с близки резултати за WESTH, а за 61002 е WESTH, следвана от КОМ1. Отделно от проведеното сравнение за вълнение със значима височина над 4м (таблица 2) за 61001 се вижда, че с най-малко ситематично отклонение е WESTH,

най-сериозно надценява КОМ1 а КОМ0 и особено JANS. Подценяването на височината на вълните по време на бури е нежелателно, доколкото основна задача при оперативното прилагане е да се прогнозира без подценяване случаите на бурно море.

Таблица1. Сравнението на моделните параметри на вълнението с измерванията на буйове 61001 и 61002 в Средиземно море (N=16884 за 61001 и 17379 за 61002)

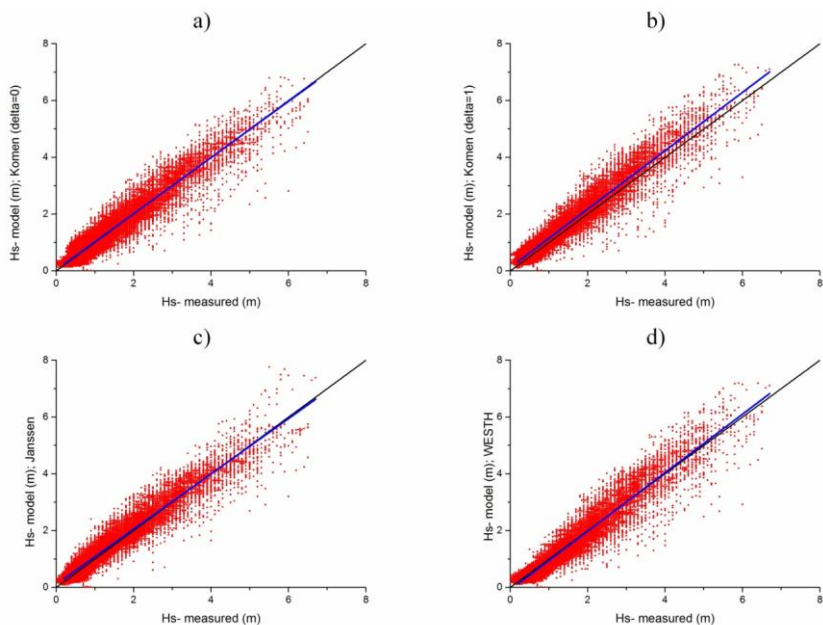
| Буй | Параметър | Параметризация | O [m] | M [m] | Bias [m] | RMSE [m] | SI |
|-------|--------------------|----------------|-------|-------|----------|----------|------|
| 61001 | SWH | KOM0 | 1.04 | 1.00 | -0.04 | 0.28 | 0.27 |
| | | KOM1 | | 1.09 | +0.05 | 0.31 | 0.30 |
| | | JANS | | 1.00 | -0.04 | 0.30 | 0.29 |
| | | WESTH | | 0.97 | -0.07 | 0.31 | 0.30 |
| | T _{m,-10} | KOM0 | 5.18 | 3.76 | -1.42 | 1.79 | 0.34 |
| | | KOM1 | | 4.87 | -0.31 | 1.20 | 0.23 |
| | | JANS | | 4.62 | -0.56 | 1.29 | 0.26 |
| | | WESTH | | 4.41 | -0.77 | 1.36 | 0.25 |
| 61002 | SWH | KOM0 | 1.53 | 1.55 | 0.02 | 0.35 | 0.23 |
| | | KOM1 | | 1.70 | 0.17 | 0.38 | 0.24 |
| | | JANS | | 1.60 | 0.07 | 0.33 | 0.21 |
| | | WESTH | | 1.50 | -0.03 | 0.35 | 0.23 |
| | T _{m,-10} | KOM0 | 5.50 | 4.46 | -1.03 | 1.86 | 0.34 |
| | | KOM1 | | 6.10 | 0.60 | 1.65 | 0.30 |
| | | JANS | | 5.91 | 0.42 | 1.85 | 0.34 |
| | | WESTH | | 5.55 | 0.05 | 1.63 | 0.30 |



Фиг.1. Графики на разсейването на SWH (отбелязана на графиките като H_s за 61001), а)KOM0, б)KOM1, в)JANS, г)WESTH

Таблица 2. Като таблица 1 но сравнението е само за SWH, само за буй 61002 и само за измервания SWH>4m (N=770)

| Параметризация | Bias [m] | RMSE [m] | SI |
|----------------|----------|----------|------|
| KOM0 | -0.14 | 0.65 | 0.14 |
| KOM1 | 0.18 | 0.67 | 0.14 |
| WESTH | 0.01 | 0.71 | 0.15 |
| JANS | -0.19 | 0.65 | 0.14 |



Фиг.2. Като фиг.1 но за буй 61002

В резултат на тези предварителни тестове предимство по отношение на моделирането на значимата височина на вълните отдаваме на WESTH и KOM1. Тези параметризации са с предимство и по отношение на прогнозата на периода. Резултатите на KOM0 по отношение на периода са неприемливи, а що се отнася до JANS- тя не показва никакви съществени предимства, които да компенсират необходимото многократно по-дълго изчислително време

SWAN е инсталиран в НИМХ-БАН през 2011г за числена прогноза на вълнение в Черно море в квазиоперативен режим. Батиметрията с разделителна способност по пространството 2 ъглови минути мин е получена от д-р Георги Корчев и д-р Георги Мънгов чрез дигитализиране на навигационни карти предоставени им от хидрографска служба на военноморския флот. Оказа се след провеждане на тестове, че модела в изчислителен домейн включващ цялото Черно море е в състояние да извършва изчисленията на прогноза за период от 72ч при пространствена разделителна способност от $1/30^\circ$ в напълно разумен срок- около 20мин при стъпка по времето 20мин и около 80мин ако се ползват параметризации на JANSSEN.

Използването при пространствена разделителна способност от една ъглова минута води до осемкратно нарастване на времето за изчисления. Такава продължителност на времето за изчисления не е приемлива за числена реализация на оперативна прогноза на вълнение поне за сега с използваната от нас изчислителна техника. По-висока пространствена разделителна способност може да доведе до много по-детайлно представяне на Варненския и Бургаския залив, ако се ползва вместване (nesting) в оперативен SWAN с по-ниска разделителна способност, но от по липса на измервания на параметри на вълнението в посочените заливи и на малки дълбочини, подобни оперативни приложения на SWAN с много висока пространствена разделителна способност няма как да бъдат калибрирани и верифицирани. Всичко това наложи решението да се използва вариант с оперативно приложение на SWAN в сферична координатна система в област покриваща цялото Черно море (от 27° до 42° източна дължина и от 40° до 47° северна ширина) с 451 изчислителни възли по географска дължина и 211 възли по географска ширина. Използването на подобна пространствена разделителна способност представлява увеличение с 3.75 пъти на разделителната способност в сравнение с оперативният в НИМХ модел WAVEWATCH III. Входната информация за модела е от регионалния атмосферен модел ALADIN [15-17] - на база на нея модела прави прогноза два пъти в денонощието- започвайки от 06 UTC и 18 UTC. Прогноза се прави за следващите 72 часа. Полетата на вятъра са налични за цялото Черно море в мрежа 0.125°x0.125° по географска дължина и ширина а времеви интервала между две последователни прогностични полета е 3 часа. SWAN е инсталиран на компютърна система с 12 процесорни ядра със споделена памет и използва протокола OpenMP за паралелна работа. Моделният изход на база на текстови файлове се визуализира оперативно със софтуера GMT (Generic Mapping Tools – <http://gmt.soest.hawaii.edu/>). Както вече беше споменато, първоначалният квазиоперативен вариант вместо параметризациите по подразбиране, беше настроен да използва параметризациите на Westhuysen за генерацията и дисипацията в дълбока вода (whitcapping). Нелинейните взаимодействия се отчитат с настройки по подразбиране на параметризациите и това не е променено и до момента. Механизмите на дисипация поради триене в дъното и разрушаване поради взаимодействие с дъното първоначално бяха включени с настройките си по подразбиране (като промяна е внесена само в параметризацията на триенето).

Доколкото от основно значение за оперативната практика е най-важно надеждното прогнозиране на опасни явления, същинската калибрация започна през зимата на 2011/2012г на база на морските бури през въпросният зимен сезон. По време на този зимен сезон една от бурите- тази от 07-08 2012г беше изключително интензивна и със сигурност една от най-значимите в последните десетилетия. Бурята предизвика щети по крайбрежието, вълнение от 6 бала по скалата на СМО (4-6м. Значима височина на вълните) близо до брега (както ще стане ясно при представяне на инструменталните измервания по време на бурята) и 7 бала в открито море (7-9м значима височина на вълните в открито море на база на сателитни измервания). Периода 20 януари-10 февруари 2012 беше изключително бурен. Същевременно беше събрана достатъчно информация от сателитни измервания на значимата височина на вълните, получени бяха по-късно инструментални измервания в близост до брега, използвани бяха и сателитни данни за скоростта на вятъра. На база на тази информация се пристъпи към калибриране на модела за оперативна работа в условията на екстремна морска буря. В следващите години след 2012 бурите в Черно море бяха по-малко в сравнение с 2012 година и значително по-малко интензивни, което оправдава фокуса главно върху случая 2012г.

След въведението, описанието на избор на модел и първоначалните експерименти в Средиземно море, глава 2 продължава с описание на калибрирането на SWAN в Черно море в дълбока вода. Основният фокус е върху периода 20 януари- 10 февруари и екстремната буря от 07-08 февруари 2012г. Направено е сравнение на прогнозите на модела SWAN в тогавашният му квазиоперативен вариант с измервания от сателитни алтиметри на спътниците Jason и Envisat, а също така скоростите на вятъра прогнозирани от модела ALADIN за Черно море бяха сравнени със скоростите на вятъра измерени от Jason и ENVISAT. Тези резултати са публикувани в Galabov et al, 2012 [14]. Сравнението на скоростите на вятъра от модела ALADIN със сателитни измервания показва, че прогнозата на вятъра за този период е много успешна (повече детайли са изложени в дисертацията). На базата на висококачествената входна информация от SWAN се очаква да е в състояние да прогнозира вълнението достатъчно точно. В Galabov et al, 2012 [14] е показано, че моделът се справя добре с прогнозата на екстремната ситуация, но беше извършено и допълнително калибриране с използване на повече измервания от различен тип. Сравненията на моделни резултати с измервания за периода бяха получени наново с използване на вече

посочената от предходните сравнения версия SWAN 40.91ABC. Използвана беше и информация от измервания на дълбочина 20м в района на местността Паша Дере с Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), който измерва значимата височина на вълните, пик-периода на вълнението и пиковата посока на разпространение на вълнението. Данните са налични за период от 214ч и са предоставени от Института по Океанология на БАН.

С цел елиминиране на влиянието на качеството на полетата на вятъра върху моделните резултати на SWAN е предприет следният подход: Симулациите на вълнението за всички последващи сравнения започват 2 дни преди първите налични измервания с които се сравнява. На всеки 12ч (в 06 и 18) се започва нова симулация, като се ползват полетата на вятъра генерирани съответно в 6 и 18ч. На всеки 12ч модела SWAN запазва начално условие за следващият си старт за 12 часов период. По този начин работим с прогнозите на ALADIN за +0ч, +3ч, +6ч, +9ч и +12ч.

На база на така описаната схема на провеждане на симулациите за период от 20 дни бяха използвани 24 сателитни алтиметрични следи. След това се пристъпи към симулации с различните параметризации, които вече бяха тествани за Средиземно море. Като първа стъпка бяха направени симулации с различен брой честоти и посоки на спектралните компоненти. Установи се оптимална дискретизация по честоти от 32 честоти от 0.05 Hz до 1 Hz (разпределянето е нерегулярно и се извършва автоматично от SWAN с оглед на изискванията на описаната вече DIA с която се описват нелинейните взаимодействия между вълнови компоненти) и 36 посоки (10° разделителна способност по посоки). Установи се, че увеличаване на посоките над 36 или на честотите не води до по-нататъшно подобрене на резултатите и въобще до съществена промяна в резултатите а и последващо увеличаване би довело до нарастване на изчислителното време. Резултатите от сравнението на моделни симулации на значима височина на вълните със сателитните измервания са получени отделно за западната част на Черно море и за източната част, като разделянето е условно през 35° източна ширина (таблица 3).

В таблица 3 наблюдаваме по-големи средноквадратични грешки и индекси на разсейване в източната част на Черно море. В западната част резултатите са определено по-добри с индекси на разсейване около и под 0.2. В западната част, която разбираемо ни интересува много повече, параметризацията КОМ1 показва определено по-добри

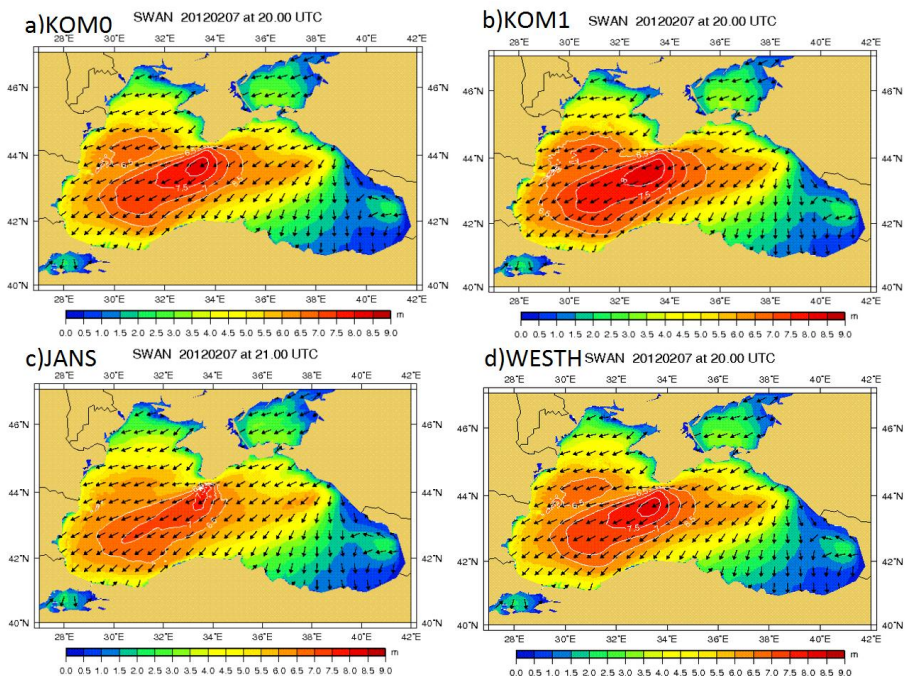
резултати от останалите три, въпреки че и техните резултати са напълно приемливи за числена прогноза на вълнение. След тази стъпка се насочихме към самите дни на екстремната буря- 07 и 08 февруари 2012г. За тези 2 дни разполагаме с четири сателитни следи с N=214 измервания. Резултатите от сравнението за дните на бурята са показани в таблица 4. Илюстрация на полетата на значимата височина на вълните от отделните симулации е показана на фиг.3.

Таблица 3. Сравнение на моделни симулации с различни параметризации с измервания на значимата височина на вълните от спътниците Jason и Envisat в периода 20.01.2012-10..02.2012

| | Параметризации На генерацията и дисипацията | O [m] | M [m] | Bias [m] | RMSE [m] | SI |
|-----------------------------------|---|-------|-------|-------------|-------------|------|
| Западно Черно море N=771 | KOM0 | 3.22 | 2.79 | -0.43 | 0.64 | 0.20 |
| | KOM1 | | 3.04 | -0.18 | 0.50 | 0.15 |
| | JANS | | 2.83 | -0.39 | 0.58 | 0.18 |
| | WESTH | | 2.81 | -0.41 | 0.62 | 0.19 |
| Източно Черно море N=598 | KOM0 | 2.57 | 2.19 | -0.38 | 0.74 | 0.27 |
| | KOM1 | | 2.42 | -0.15 | 0.87 | 0.24 |
| | JANS | | 2.24 | -0.33 | 0.68 | 0.25 |
| | WESTH | | 2.22 | -0.35 | 0.74 | 0.27 |

Таблица 4. Сравнение на моделни симулации с различни параметризации с измервания на значимата височина на вълните от спътниците за общо четири сателитни следи на 07 и 08 февруари 2012г

| параметризация | O [m] | M [m] | Bias [m] | RMSE [m] | SI [m] |
|----------------|-------|-------|----------|----------|--------|
| KOM0 | 4.73 | 4.56 | -0.17 | 0.64 | 0.13 |
| KOM1 | | 4.90 | 0.17 | 0.67 | 0.14 |
| JANS | | 4.59 | -0.14 | 0.58 | 0.12 |
| WESTH | | 4.62 | -0.11 | 0.68 | 0.14 |



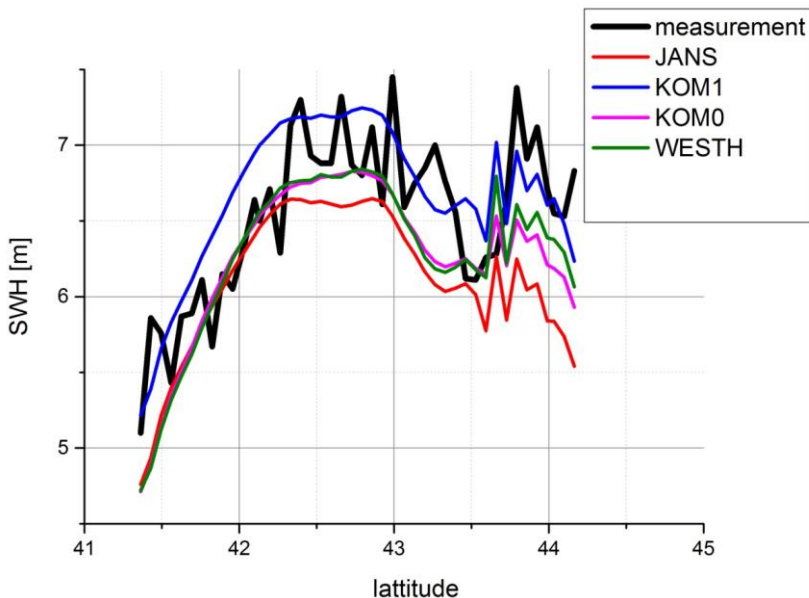
Фиг.3. Поleta на значимата височина на вълните и средните посоки за 07.02.2012 с четирите изследвани параметризации (графиките са изработени от д-р Анна Корчева)

Най-високи стойности на значимата височина на вълните са симулирани с използване на KOM1. WESTH води до резултати подобни на получените при използване на KOM1. Симулацията с KOM0 въпреки най-сериозното подценяване на значимата височина на вълните по сателитните следа също е с подобен резултат макар и с по-ниски стойности. Що се отнася до JANS тя води до видимо по-ниски стойности на значимата височина на вълните от останалите независимо от най-ниският си RMSE и SI. KOM1 единствена не води до подценяване на резултатите. За да конкретизираме още повече сравнението за максимума на бурята пристъпваме към сравнение за сателитната следа с най-високи стойности на значимата височина на вълните от 20ч на 07.02.2012. Макар и по тази следа да разполагаме

само с 51 измервания, резултатите са получени и във вид на статистически характеристики и показани в таблица 5.

Таблица 5. Като таблица 4 но само за сателитната следа от 07.02.2012г 20h.

| параметризация | O [m] | M [m] | Bias [m] | RMSE [m] | SI |
|----------------|-------|-------|----------|----------|------|
| KOM0 | 6.38 | 6.30 | -0.08 | 0.64 | 0.13 |
| KOM1 | | 6.69 | 0.30 | 0.67 | 0.14 |
| JANS | | 6.14 | -0.24 | 0.58 | 0.12 |
| WESTH | | 6.30 | -0.08 | 0.68 | 0.14 |



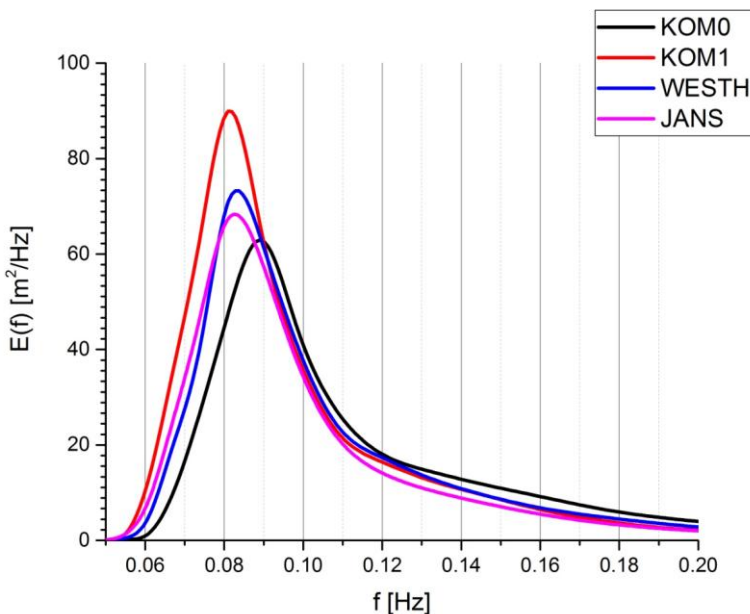
Фиг.4. Измервания на значимата височина на вълните и моделни симулации с различните параметризации за сателитната следа от 20ч на 07.02.2012 (по абсцисата е географската ширина на точката).

Доколкото тази следа се отнася точно до пика на бурята, симулирането на който е от критична важност, резултатите на JANS могат да се приемат като неудовлетворителни- тя подценява в този период повече от останалите параметризации, въпреки удовлетворителните си RMSE

и SI. KOM1 от своя страна води до надценяване на значимата височина на вълните.

На фиг.4 са показани измерванията по сателитната следа и моделните симулации на значимата височина на вълните.Вижда се подценяването от симулацията с JANS и тенденцията KOM1 да е по-близо до резултатите от измерванията с тенденция за надценяване.

В представителна точка с географска ширина 42.5° беше анализиран едномерният спектър на вълнението за четирите симулации с различна параметризация и беше изследвана ролята на механизмите на генерация, дисипация и преразпределение на енергия в спектъра. Едномерният спектър на вълнението е показан на фиг.5.



Фиг.5. Едномерен спектър на вълнението за четирите симулации за точка с географска ширина 42.5° от сателитната следа на ENVISAT в 20ч на 07.02.2012г.

Вижда се по-високият пик за KOM1, което е естествено с оглед на по-високата стойност (и много по-близка до измерването, която дава в тази точка). Формата на спектъра получена с ползване на WESTH и JANS е близка. Спектралният пик и за трите посочени параметризации е на еднаква честота. Спектралният пик за KOM0 е изместен към по-висока

честота и спектралната плътност на по-високочестотните компоненти е по-голяма. Това е илюстрация на известният проблем на тази параметризация с изместването на енергия към високочестотните компоненти. Изследвани са и отделните механизми на генерация, дисипация и преразпределение на енергията в спектъра. Установи се, че за КОМО се наблюдава завишена роля в сравнение с останалите параметризации на нелинейните взаимодействия и също за разлика от останалите и значителен дисбаланс между генерация и дисипация. Разсейването по посоки за различните честоти е значително по-високо при КОМО и това явно се дължи на дефекта ѝ свързан с нефизичният процес на прехвърляне на енергия от ниски към високи честоти. Това е крайно нежелан ефект понеже разсейването по посоки в спектъра е съществена част от интегралните критерии, които се ползват за характеризиране на състоянието на морето като рисково за плавателни съдове. Като обобщение КОМО демонстрира ярко всичките си недостатъци и на този етап по-нататъшният ѝ анализ не е необходим и въпреки, че до неотдавна беше параметризация по подразбиране в SWAN, тя явно е неподходяща за приложение в нашия оперативен модел и с оглед на лошите резултати демонстрирани от нея за Средиземно море по отношение на периода и с оглед на проявените и тук проблеми, тя не е алтернатива за оперативният ни модел и вариантите останаха три, от които единият (JANS) също не изглежда добра алтернатива с оглед на слабите си резултати в пика на бурята.

В следващата част на глава 2 е описано докалибрирането на модела за основната среда, за която се очаква да прогнозира вълнение близо до брега в междинна вода. До момента разполагаме с подобни измервания на вълнение само за период от 264 часа (измервания по веднъж на час) за района на Паша Деро (координати на прибора $43^{\circ}04'49.13''N$ $28^{\circ}01'39.63''E$, дълбочина 20м). За щастие тези измервания са осъществени точно по време на бурята, която изследвахме и в дните преди и след нея- общо 11 денонощия). Измерванията са осъществени с уред наречен Acoustic Doppler Current Profiler и са ни предоставени значимата височина на вълните, пик-периода и пиковата посока (за краткост ще ги наричаме просто период и посока). Подбрана е точка в близост до посочената, за която дълбочината на дъното за SWAN е 20м за изход от модела, с оглед на аналогична проява на същите механизми на дисипация в междинна вода. Симулациите са направени за периода от 264 часа. На тази дълбочина се очаква съществена роля на дисипацията чрез триене в дъното. Роля на механизма на разбиване чрез взаимодействие с дъното

не се очаква. Доколкото при височина на вълната над 4м, дължината ѝ е от порядъка на 80м (може да се получи като изход от модела) то тази точка е около средата на междинната зона която започва от дълбочина 40м.

Сравнението за периода от 264 часа с данните от ADCP е показано в таблица 6 за параметрите значима височина на вълните, пик-период и пикова посока (такъв подход спрямо посоката не е особено коректен, но в случая няма минаване през 0° и тя остава през цялото време между 20 и 115, така че в някаква степен и директно сравнение все пак носи информация.

Таблица 6. Сравнение на моделните резултати за Паша Дере с ADCP

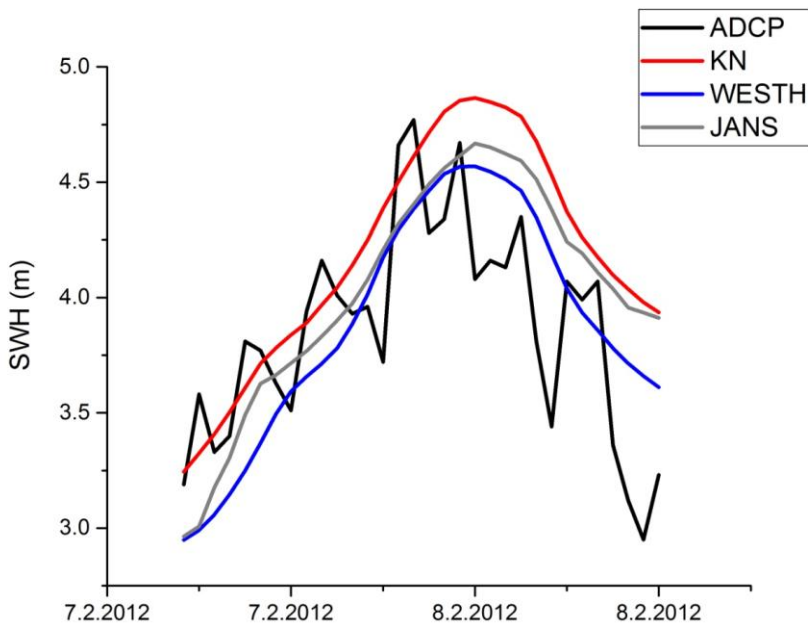
| Параметър | Параметризация | O | M | Bias | RMSE | SI |
|---------------------------------|----------------|------|------|-------|------|------|
| Значима височина на вълните [m] | KOM1 | 1.50 | 1.68 | 0.18 | 0.42 | 0.28 |
| | KOM0 | | 1.43 | -0.07 | 0.32 | 0.22 |
| | WESTH | | 1.49 | -0.01 | 0.34 | 0.23 |
| | JANS | | 1.58 | 0.08 | 0.36 | 0.24 |
| Пик период [s] | KOM1 | 7.33 | 7.74 | 0.41 | 1.14 | 0.16 |
| | KOM0 | | 6.00 | -1.33 | 1.84 | 0.25 |
| | WESTH | | 7.17 | -0.16 | 0.97 | 0.13 |
| | JANS | | 7.42 | 0.09 | 0.95 | 0.13 |
| Пикова посока [°] | KOM1 | 83 | 83 | 0 | 15 | 0.18 |
| | KOM0 | | 87 | -9 | 34 | 0.41 |
| | WESTH | | 80 | -3 | 16 | 0.20 |
| | JANS | | 77 | -6 | 18 | 0.21 |

По отношение на значимата височина като изключим тенденцията за завишаване (над 10% от O) за KOM1, резултатите са добри. По отношение на периода за KOM0 те са лоши, а тези на симулацията с WESTH и JANS превъзхождат другите две. По отношение на посоката KOM0 отново демонстрира проблеми.

Като окончателен извод от този експеримент мнението, че KOM0 не е алтернатива само се потвърди. JANS от своя страна не показва никакво превъзходство на базата на което да бъде предпочетена и с оглед на твърде дългото изчислително време с нея и тя както и KOM0 отпадна от по-нататъшно разглеждане. С оглед на факта, че в

нея $\delta=1.5$ тя споделя поне частично проблемите на КОМ0. Остават WESTH и КОМ1 като алтернативи.

На фиг.6 са показани измерванията сравнени със симулациите за бурята на 07-08 февруари. Наблюдава се завишаване в сравнение с измерванията от КОМ1, без обаче да е значително. Като цяло и КОМ1 и WESTH се представят достатъчно добре.



Фиг.6. Измервания на значимата височина на вълните с ADCP за Паша Дере и SWAN симулации с три параметризации.

Изследвана е и ролята на нелинейните взаимодействия в точката в междинна вода с която направихме сравнения с ADCP. По отношение на нелинейните взаимодействия в дълбока вода, тяхната роля за JANS е много по-голяма, голяма е и ролята на триадите и то само за JANS, въпреки че на такава дълбочина ролята им не трябва да е значителна. Нямаме обяснение за това поведение на JANS, но тя така или иначе вече беше отхвърлена като вариант за оперативно приложение.

Тъй като за тези измервания дънното триене играе съществена роля за дисипацията в периода на самата буря, остава да анализираме и неговата роля. Коефициента на дънното триене по подразбиране в SWAN е 0.067. В публикацията на Zijlema et al, 2012 [18] освен анализ на C_d се съдържа и анализ на коефициента на дънно триене. Коефициента на триене, който е най-често е използван в моделите 0.067 е получен от Bouws and Komen, 1983 [19] след анализ на екстремна буря в Северно море (Texel storm). По време на експеримента JONSWAP обаче Hasselmann et al, 1973 [20] анализират над 600 спектъра и определят стойност на коефициента 0.038. Използвайки по-съвременни варианти на параметризициите на физическите процеси, Zijlema et al [18] анализират отново бурята Texel и показват, че е по-аргументирано използването на резултата от JONSWAP. Те препоръчват използването на коефициент 0.038. За точката с налични ADCP измервания ролята на триенето е съществена само по време на бурята, доколкото тогава по отношение на дължината на вълната тази точка е в междинна вода. Проведеното изследване показва, че използване на коефициент на дънно триене 0.038 в SWAN не води до никаква сериозна промяна при ползване на параметризация WESTH и сравнение за 264ч доколкото през по-голямата част от времето триенето не играе съществена роля. Използване в KOM1 на коефициент на триене 0.038 води до рязко влошаване на резултатите и най-висока значима височина по време на бурята от 5.1m при измерена 4.77 и моделирана с коефициент на триене 0.067 значима височина 4.86. Ако се ползва WESTH няма промяна на статистиките за 264ч но има подобрене на резултатите за бурята- докато моделираната с коефициент на триене 0.067 максимална значима височина е 4.57, то моделираната с използване на коефициент на триене 0.038 максимална стойност е 4.72 или само 5 сантиметра по-ниска от измерената. Освен това се стига до макар и малко подобрене и на резултатите за сателитните следи, доколкото се подобряват резултатите в северния Черноморски шелф.

В крайна сметка като окончателен резултат от всички посочени експерименти параметризацията WESTH, макар и да е посочвана от редица автори като подходяща предимно за академични цели (поне в годините след създаването ѝ), очевидно е най-подходяща за оперативно приложение в Черно море (а и за Средиземно на база на първоначалните резултати) в комбинация с коефициент на триене 0.038 и запазване на динамичният коефициент на триене C_d на база на формулата на Wu, а не във вид на полином от втора степен предлаган

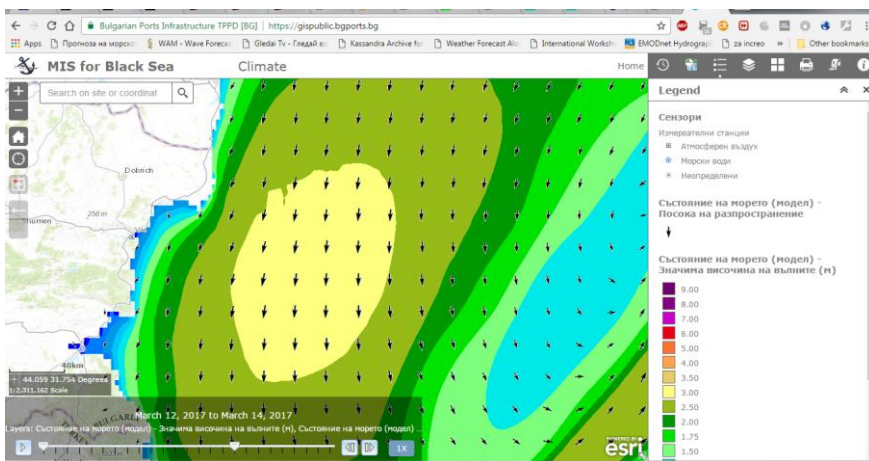
от Zijlema et al, 2012 [18]. Калибрирането е направено само на база на един 20 дневен период и една екстремна буря, но трябва да се има предвид, че всъщност и в световен мащаб това е практиката- сериозни промени в параметризации се случват с анализи предимно на едно екстремно събитие (Texel storm, Klaus и т.н.) доколкото експеримент аналог на JONSWAP не е провеждан повече. За събитието от февруари 2012 сме натрупали все пак достатъчна база от измервания и е отработена методика, която може да се прилага при всяка сериозна новост в моделирането.

Следващата част от глава 2 описва експерименти с предварителен характер относно възможността SWAN да отчита взаимодействието на вълнението с повърхностните течения на морската повърхност. Извода на база на сателитните измервания на Jason и Envisat за периода Януари-Февруари 2012г е, че се наблюдава несъществено подобрение на резултатите на симулирането на значимата височина на вълнението, без при това да се наблюдава промяна на индекса на разсейване и намаляване на систематичното отклонение от 0.19 на 0.18 в случай на използване на параметризациите на Janssen и пълна липса на подобрение при използване на параметризацията на Westhuysen. Трябва обаче да се отбележи, че са използвани течения с пространствена разделителна способност 0.08° и времева 24ч от реанализа HYCOM-NCODA (налични онлайн на www.hycom.org). Изследванията имат предварителен характер- не можем да изключим други резултати при използване на течения с висока разделителна способност по пространство и време. Тези изследвания тепърва трябва да бъдат проведени. На база на получените резултати не може да се докаже значителна практическа полза от отчитане на взаимодействието на вълнението с теченията.

Описаният модел SWAN след калибриране и преминаване през квазиоперативната практика беше внедрен в оперативната система от модели на НИМХ-БАН. Модела се стартира два пъти в денонощието от система оперативни shell скриптове, реализирани от Васко Гълъбов и Анна Корчева. Визуализацията на информацията е реализирана по аналогичен на визуализацията на Wavewatch 3 начин от Анна Корчева. Изхода на модела във вид на графично изобразяване на полетата постъпва във вътрешна интернет страница (достъпна с парола) до която има достъп от компютри в НИМХ-БАН и се ползва по този начин от синоптиците в София и филиал Варна. В дисертацията детайлно е представена визуализацията на резултатите с цел практическата им употреба. Освен за цялото Черно море се представя информация и за

крайбрежието, информация за вълнението за 72ч за 6 пункта както и данни за специфични точки за използване за нуждите на центъра координиращ спасителни операции в морето. Освен това на база на използването на информация от SWAN, Wavewatch III и информация за вятъра от модела ALADIN е реализирано включване в системата METEOALARM за предупреждения за опасни явления и включване на предупреждения за опасни явления- силни ветрове и високи вълни METEOALARM Крайбрежна зона.

Освен в страница с ограничен достъп прогнозата на вълнението от SWAN е и публично достъпна на: <https://gispublic.bgports.bg/> във вид на полета на значимата височина на вълните и средна посока на разпространение (фиг.7). Реализацията на интеграцията на числена прогнози на вълнение в GIS среда е направена от ESRI България, които ежедневно получават достъп до изход на модела SWAN в netcdf формат. Това е направено в рамките на проекта Monitoring and information system for Black Sea финансиран от Норвежки финансов механизъм.



Фиг.7. Представяне на прогнозата на вълнението в online ГИС среда в уеб страницата на ДП Пристанищна инфраструктура. Визуализацията в ГИС среда е дело на ESRI България.

Като обобщение: проведено е изследване на различни параметризационни схеми описващи процеса на генерация и дисипация

в дълбока вода на вълновата енергия. Изследвани са параметризациите на Komen, Janssen, Westhuysen както и модифицирана по метода на Rogers параметризация на Komen. Калибрирането на вълновият модел SWAN е извършено с фокус върху прогнозирането на вълнението по време на екстремни бури. Установено е предимство на параметризацията на Westhuysen за Черно море (същото е потвърдено и за Средиземно море). Калибрирана е дисипацията на вълнова енергия поради триене в дъното в междинна вода. Подбрана е оптимална стойност на коефициента на триене. В резултат на изследванията описани в глава 2 числен вълнови модел с висока пространствена разделителна способност SWAN е адаптиран за прогнозиране на вълнението в Черно море в оперативен режим. Избрани са оптимална за оперативната употреба изчислителна мрежа, дискретизация в спектралното пространство, стъпка по времето, батиметрия. Моделът е част от оперативната система числени модели на НИМХ-БАН от 2012г на база на заповед за внедряване на директора на НИМХ-БАН N13 /13.01.2012 и от тогава работи успешно в оперативен режим.

Глава.3 Модел за прогнозиране на щормови нагони- реализация на взаимодействие с оперативен вълнови модел

Главата започва с кратка информация за основните понятия свързани с щормовото повишение на морското ниво (storm surge / щормови нагони). В тази част от дисертацията не става дума за въвеждане на нов модел в практиката, а за промени в съществуващ въведен в оперативната практика от д-р. Мънгов (и нефункциониращ след неговото напускане) със съществен принос и на д-р Г.Корчев. Целта на тази част от дисертацията е да опише въведена промяна в числения модел използван за прогнозиране на щормови нагони в НИМХ-БАН, така че да се отчита влиянието на състоянието на морето от този числен модел. В НИМХ-БАН оперативно се използва модела за прогнозиране на щормови нагони на Meteo France [21,2]. Този модел е двумерен хидродинамичен модел- теченията са интегрирани по дълбочина. В Черно море интегрирането е не до дъното, а до дълбочината на слоя на смесване. При прилагане на двумерен модел за щормови нагони за Черно море основен въпрос е този за дълбочината на интегриране. Както отбелязват в статията си Mangov and Daniel [2] щормовите нагони в Черно море се разглеждат като дългопериодична вълна разпространяваща се в горния динамичен слой на морето (за повече детайли виж [2], както и дисертацията). В модела, така както е приложен за Черно море се ползва дефиниция на динамичния

коэффициент на триене (с модификация за скорост на вятъра над 25м/с) използваща формула за линейна зависимост от скоростта на вятъра (т.нар. bulk formulations) с коефициенти по Smit and Banke [22]: $C_d=(0.63+0.066W_{10})10^{-3}$ за скорост на вятъра по-малка или равна на 25м/с и $C_d=(2.2+0.033(W_{10}-25))10^{-3}$ за скорост на вятъра по-голяма от 25м/с. Коефициента на дънно триене е приет за постоянен в оригиналната работа на Mungov and Daniel [2] и стойността му е $1.5.10^{-3}$.

Основна цел на представените в главата изследвания е включване на еднопосочно взаимодействие между модела за прогнозиране на щормови нагони и вълновия модел- да се отчита влиянието на тангенциалните напрежения породени от вълнението (wave radiation stress) и влиянието на вълнението върху динамичният коефициент на триене C_d

Трета глава продължава с дискусия на подходите за отчитане на влиянието на вълнението върху C_d . В резултат на измервания в океана при силни ветрове е известно, че при скорости на вятъра над 15-20 м/с зависимостта започва съществено да се отличава от линейната, като C_d нараства слабо в този диапазон и при около 30м/с спира да нараства и дори започва да намалява при скорост на вятъра над 45м/с. Това е показано за първи път от Powell et al [23] и многократно потвърдено от следващи експерименти. Това означава, че при скорости на вятъра над 20м/с използването на традиционно използваните линейни формули за C_d ще доведе до надценяване на тангенциалните напрежения и от там възможно надценяване на повишението на морското ниво. Алтернатива на използването на линейни формули е директното използване на динамичната скорост на триене u_* определена от вълнови модел при използване на определени параметризации на генерацията на вълнова енергия от вятъра. Такива параметризация, които не използва линейни формули за C_d а определят грапавостта явно от спектъра на вълнението и съответно определя явно u_* е вече разгледаната на Janssen [6]. В тази параметризация се предполага зависимост на грапавостта на морската повърхност от т.нар. възраст на вълните.

Възрастта на вълните е параметър, който ще означаваме с β и е дефиниран като $\beta=c_p/u_*$ или алтернативно дефиниран като $\beta=c_p/W_{10}$ където c_p е фазовата скорост на пика на вълновия спектър. Тази безразмерна величина се нарича така, защото е мярка за интервала време за което вятърът въздейства активно върху вълните и води до нарастването им. Под въздействие на вятъра вълновите компоненти с висока честота на база на дисперсионното отношение в дълбока вода

са с по-ниска фазова скорост в сравнение с вълните с по-ниска честота и понеже нарастването под въздействие на вятъра зависи от разликата между скоростта на вятъра и фазовата скорост на вълните, те нарастват бързо и достигат насищане. Нискочестотните вълни са със скорост близка или надвишаваща тази на вятъра, поради което нарастват по-бавно, но при това има и трансфер на енергия от по-високочестотните вълни към по-нискочестотните поради нелинейните взаимодействия между вълните, споменати в първата част на дисертацията. Морето на етап в който вълните нарастват се нарича на английски *growing wind sea* или *young wind sea* а тук ще бъде наричано етап на нарастване на вълните. На този етап поради наличието на къси вълни с високи честоти, грапавостта на морската повърхност е по-висока от тази на следващия етап, когато нарастването под въздействие на вятъра е спряло поради достигнато насищане. Дългопериодичните компоненти движещи със скорост по-висока от скоростта на вятъра се превръщат в *swell* (който пък ще продължи да нараства докато има високочестотни компоненти). На база на описания механизъм грапавостта на морската повърхност намалява след изтичане на достатъчно време от началото на бурята и намаляване на високочестотните компоненти на които основно въздейства вятъра. Такова състояние на морето, при което вълните вече не нарастват под въздействие на вятъра, се нарича на английски *developed wind sea* или *mature wind sea* и ще бъде наричано етап на развито ветрово вълнение. На база на описаният механизъм грапавостта на морската повърхност съществено зависи от продължителността на бурята с тенденция да е максимална на ранен етап и да намалява след това. Използването на линейни формули за C_d не отчита този ефект, който ограничава стойностите му. Очевиден проблем при практическото приложение на този подход с директно използване на u_* от вълнови модел в модел за щормови нагони е, че вълновите модели на практика се калибрират и то не от гледна точка на прогнозата на u_* , а практически винаги за адекватна прогноза на значимата височина на вълните.

Според Taylor and Yelland [24] при скорости на вятъра над 12м/с зависимостта на C_d от възрастта на вълните е много по-слабо изразена и при високи скорости на вятъра водеща е зависимостта от стръмността на вълните (дефинирана като отношението на средната височина на вълните към средната им дължина или височината на пиковата компонента към дължината λ или на значимата височина на вълните към средната дължина, както се определя стръмността от SWAN като това води до разлика в числените стойности на

стръмността на база на използваната дефиниция). На база на експериментални резултати пък Wang et al [25] показват, че зависимостта на C_d от възрастта на вълните е в съгласие с наблюденията само при $u_* < 0.5$ а при по-големи стойности доминира зависимостта от стръмността. Тези и много други изследвания на зависимостта на C_d от стръмността на вълните са основание да бъде изпробван за Черно море и този подход.

Зависимостта на C_d от стръмността на вълните δ (която се получава като характерна височина на вълните, например значимата височина и характерна дължина, например средна дължина) е изследван като се приложи подхода на Guan and Xie [26]. Тези автори получават зависимост от вида:

$$C_d = 0.001 * (0.78 + 0.475 * f(\delta) * W_{10}) \quad (6)$$

където $f(\delta)$ е $0.85^B A^{1/2} \delta^{-B}$ и A и B са емпирично определени параметри за които в статията им се предлагат поредица възможни стойности на база на експериментални резултати на различни автори. Тествани бяха варианти с $B=-1.7$ и -2 бяха тествани и се установи че водят до изключително ниски C_d и нереално ниски нараствания на нивото. Съществуват и няколко комбинации от параметри, които са много близо до -1 (примерно -1.01 и -1.03) и ако приемем, че $m = -1$ то (6) добива вида:

$$C_d = 0.001 * (0.78 + C \delta W_{10}) \quad (7)$$

И в нашето изследване ще приемем C за параметър подлежащ на калибриране (нещо което няма как да не направим, доколкото δ от SWAN се определя не на база на доминантна дължина на вълната, а на средна и съответно води до известна разлика в стойността на стръмността, което налага прекалибриране).

Тъй като най-значимите щормови нагони по нашето крайбрежие са се случили далеч преди периода за който разполагаме с архивирани данни от модела ALADIN с пространствена и времева разделителна способност съответстваща на настоящата, а най-значимият щормови нагон е наблюдаван през 1979, а и не разполагаме с никакви измервания на щормови нагони след 2010г, експериментите няма да бъдат проведени с входна информация от ALADIN, а с полета на атмосферното налягане и вятъра, получени в

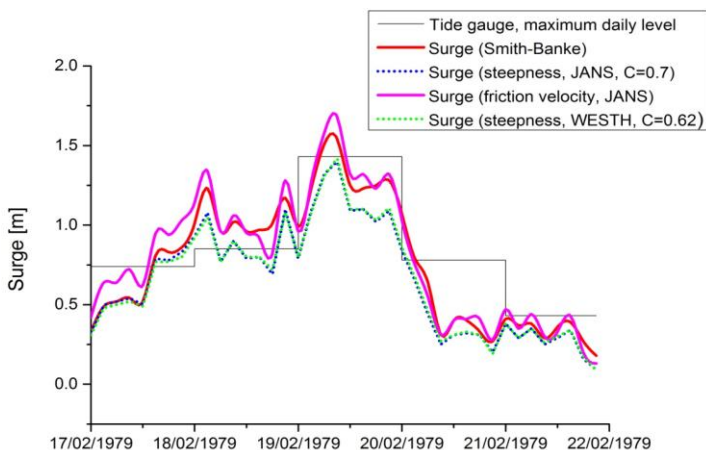
рамките на проекта по седма рамкова програма на ЕС- IncREO (Increasing Resilience Through Earth Observation). В процеса на изпълнение на проекта беше извършен т.нар. динамичен downscaling на реанализа Era Interim [27] с модела ALADIN до 0.125° пространствена разделителна способност и един час по времето [28,29] а на базата на тези атмосферни данни и направена възстановка на вълнението и щормовия нагон за 10 значителни бури в Черно море през последните десетилетия (за тези резултати ще стане дума и в заключението на дисертацията) . Числени експерименти бяха проведени първо за бурята от февруари 1979 на база на измерените максимални дневни нива (тъй като разполагаме само с тази информация) и беше калибриран параметъра C в (7). След това така полученият вариант на модела беше бѐде тестван за три бури през 1996, 1998 и 2010. За първите две бури разполагаме с данни за максималните дневни нива от мареографски станции (те са изследвани и в [2] но за съжаление не разполагаме с почасовите максимални нива). За бурята през март 2010г разполагаме и с почасови стойности но не от стандартна мареографска станция, а от измервания на базата на института по океанология в Шкорпиловци. Проведена симулация на щормови нагон и за 2012г, но за съжаление не разполагаме с никакви измервания за морското ниво по време на тази буря. Налична е почасова информация за морското ниво за единственият значим щормови нагон след 2012г- по време на бурята на 25.10.2014г, когато морското ниво се повишава с около 80см.

Отчитането на влиянието на включването на тангенциалните напрежения породени от вълнението, влияещи на теченията е тривиална задача. В крайна сметка се оказва, че влиянието на отчитането на вълновите сили не води до съществен ефект- ефекта остава в рамките на под 1% при тази разделителна способност. Все пак при по-висока такава този механизъм би започнал да играе много по-съществена роля, доколкото тези сили са най-големи в плитка вода.

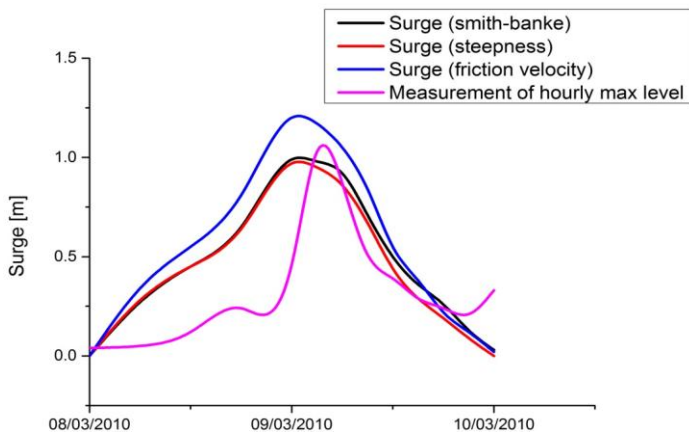
Що се отнася до отчитането на зависимостта на динамичният коефициент на триене от вълнението, първоначално бяха проведени поредица експерименти при постоянен вятър с различна скорост с цел да се установи как зависи коефициента от скоростта на вятъра при различните вече описани подходи за море с вълнение на ранен етап на нарастване (когато се очаква грапавостта да е най-голяма) и на състояние с развито вълнение (етапа е определен на база на спирането на нарастването на значимата височина на вълнението, като се изчаква да минат още 6 часа след спирането. Симулациите със SWAN с постоянен вятър бяха проведени за точка в дълбока вода (дълбочина

300 метра) източно от българският бряг, като вятъра е зададен като постоянен. Тествани са за двата етапа на развитие на вълнението подходите с определяне на C_d от директно определената от SWAN при използване на параметризация JANS стойност на u_* . Резултата от тези експерименти е, че директно използване на u_* води до по-високи стойности от определените от линейните формулировки и особено високи такива на ранен етап на бурите. Що се отнася до случая на ползване на зависимост от стръмността, получихме че за етапа на максимално развитие на бурите полученият чрез използване на стръмността C_d е с ограничена максимална стойност на етапа на максимално развитие на бурята, което е в пълно съгласие с експериментално известните факти.

Първата буря, за която са проведени експерименти е бурята от Февруари 1979. Тази буря беше избрана за калибриране на избраните подходи за определяне на зависимостта на C_d от вълнението. Налични са измерени максимални дневни нива (по [30]) за Иракли и не са налични за Варна и Бургас където мареографите не са били предвидени за измерване на такъв висок щормови нагон. Максимума на повишение на нивото за Иракли е достигнат на 19 февруари и е 1.43м. Числена симулацията започва няколко дни преди началото на бурята от нулево морско ниво (т.е. от ден за който се приема несмутено морско ниво). За случая на симулации със зависимост на C_d от стръмността на вълните са проведени множество експерименти с различни стойности на C в (7). Стойността при която е получена най-близка стойност за максимума на 19.02.1979 до измерената за този ден е $C=0.62$ за случая с използване на параметризация WESTH в SWAN и $C=0.70$ за случая на използване на параметризация JANS. При такива стойности на C резултатите които са получени за щормовия нагон са практически неразличими. Използването на формула на Smith-Banke води до известно надценяване на максимума- вместо 1.43м е симулиран 1.53м. Използване на подхода с директно прилагане на u_* от SWAN води до по-голямо надценяване. Резултатите са показани на фиг.8. Така калибрираната зависимост на C_d във вида $C_d=0.001(0.78+0.62\delta W_{10})$ за случая на използване на SWAN с избраната за оперативното му приложение параметризация на Westhuysen (WESTH) беше тествана и за други бури, за които разполагаме с някаква информация.



Фиг.8. Симулации на щормови нагон за буря от Февруари 2012г с различни подходи за определяне на C_d . Стъпаловидната крива е по данни за максималните измерени дневни нива в мареографска станция Иракли.



Фиг.9. Като фиг.8 но за буря от Март 2010г. В този случай са налични и часови данни за максимално ниво от измервания в базата на ИО-БАН в Шкорпиловци.

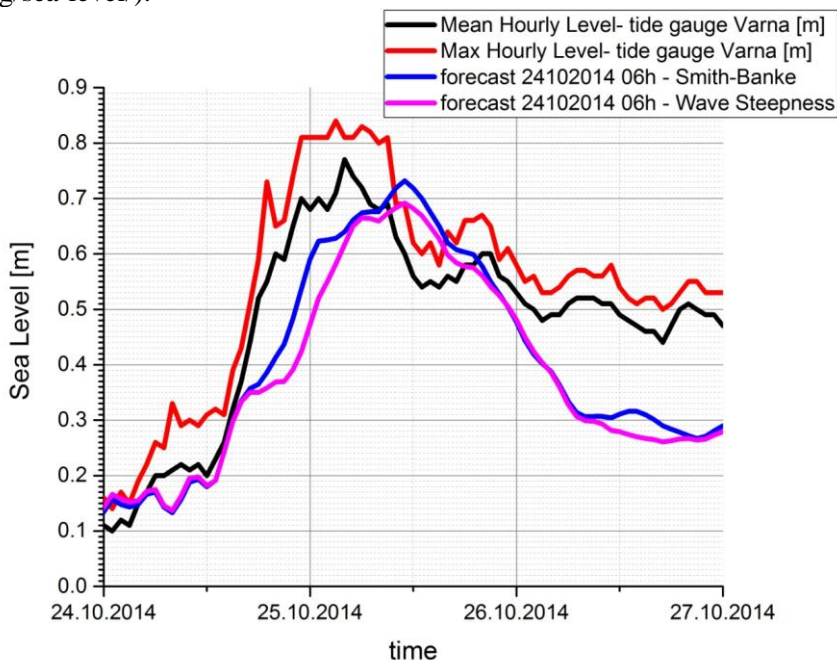
Изводите за 1996 са, че избраният подход с използване на зависимост от стръмността на вълните тук дава най-добър резултат а този с ползване на динамичната скорост на триене- най-голямо надценяване. За бурята от 1998 изводите са аналогични на тези за 1996г- използването на подхода със зависимост на C_d от стръмността на вълните има ефект на намаляване на максималното ниво за бурята с около 10см и води до ограничаване на възможността за надценяване по време на максимума на бурята.

На фиг.9 са показани симулации за буря от Март 2010г. Тази буря предизвика наводняване на ниско разположени части от курорта Златни Пясъци. В този случай резултата за максималното ниво с ползване на формула на Smith-Banke и този с използване на зависимост от стръмността на вълнението е практически еднакъв, което показва, че подхода с използване на данни за стръмността на вълните не води във всички случаи просто до намаляване на максималният нагон с 10см (каквото поведение наблюдаваме при трите предходни случая), а при такива ситуации (виж кривата на измерването) имаме дори леко подценяване, този подход не води до допълнително подценяване а до стойност близа до тази при използване на формула на Smith-Banke. Това може да се счита за ценна характеристика на подхода. Независимо как са проведени симулациите в този случай, значително е надценена продължителността на нагона, въпреки че максимума му е добре симулиран.

Общият извод от направените симулации, че е избран подход който успешно да използва информация от вълновия модел в модела за прогнозиране на щормови нагони. Разбира се това не означава, че така е отстранен главният възможен източник на грешки- тепърва предстои работа по прилагане на по-модерен подход към третирането на дънното триене. Все пак и в този си вид модела е използваем за прогноза на щормово повишение на морското ниво. Разбира се наличието на твърде малък обем инструментални данни пречи за получаването на каквито и да било количествени оценки за случаи на значими нагони (доколкото само те са от практически интерес за морската метеорологична прогноза). В момента вече са налични онлайн данни в реално време за морското ниво, но след 2012г значими нагони липсват с изключение на случаи от порядъка на 50-60см, които бяха успешно прогнозирани и все пак не представляват особено опасни явления, а все пак системата описана в дисертацията е посветена основно на тези явления.

Единственият случай на значим щормови нагон след 2012г е този на 25 октомври 2014, когато морското ниво се повиши със 70-

80см, но без да са ни известни случаи на наводнения или нанесени щети. За този случай разполагаме с детайлни данни от измервания. Данните са от мареограф във Варна и са изтеглени от център за данни на Институт по Океанология на БАН (ИО-БАН) където в реално време са налични данни за морското ниво след 2013г (<http://www.bgodc.io-bas.bg/sea-level/>).



Фиг.10. Прогноза на височината на морското ниво на база на прогностична информация за полетата на вятъра и атмосферното налягане от старта на модела ALADIN в 6ч на 24.10.2014г. Прогнозата е за +72ч. Показани са средната почасова и максималната почасова стойност на височината на морското ниво от измерванията на мареограф Варна, както и прогностичните симулации с отчитане и без отчитане на влиянието на вълнението върху щормовия нагон.

За бурята от 25.10.2014г са налични данни само от мареографа във Варна. Данните са във вид на едноминутни стойности на морското ниво. Чрез почасово осредняване са получени средните стойности на

морското ниво за всеки час от бурята и отделно са получени и максималните нива за всеки час. Тези стойности са сравнени с оперативната прогноза за морското ниво от 06ч UTC на 24.10.2014 с разглеждания модел с и без отчитане на влиянието на вълнението. Резултатите са на база на прогнозата от сутринта на 24.10.2014 тъй като предупрежденията издадени от филиал Варна се базират на последователните прогнози от 22.10.2014, 23.10.2014 и 24.10.2014. Прогностичната симулация започва 24ч преди началният час на прогнозата (т.е. от 06ч на 23.10.2014г), когато морското ниво е около 0м- т.е. може да се приеме за несмутено (близко до средната си стойност).

Сравнение на измерванията на прогнозите на височината на морското ниво с и без отчитане на влиянието на вълнението са показани на фиг.42. Симулираните стойности на щормовия нагон са близки до измерените средни почасови стойности и с около 10см по-ниски от максималните почасови. Следва да се отбележи, че в този случай (есенен) дълбочината до която се интегрира е основен проблем, тъй като това е есенна буря (и на практика първата буря за периода октомври 2014- март 2015. Известно подценяване е възможно да се е получило най-вече заради неподходяща дълбочина на интегриране. Прави също така впечатление, че морското ниво на база на прогностичните симулации спада още в първата половина на 26.10.2014г, докато на база на измерванията това се случва повече от 24ч по-късно. Симулациите на други щормови нагони след 2013г (макар и доста по-незначителни) показват, че твърде бързото спадане на моделираното ниво е проблем, който тепърва следва да се изясни. Що се отнася до симулациите с и без отчитане на влияние на вълнението- те в този случай са доста близки, а отчитането на влияние на вълнението върху щормови нагони по-скоро може да води до предимства при нагони над 1м.

В резултат от извършената изследователска работа, описана в глава 3, моделът за прогнозиране на щормови нагони е въведен в оперативната дейност на секция Морски прогнози и са внесени промени в модела- еднопосочно взаимодействие с оперативния вълнови модел. За малкото на брой случаи на щормови нагони след 2012г прогнозата им беше успешна. Наличието на информация за морското ниво в реално време тепърва ще даде възможност да се продължи с оценката на въведеният подход за еднопосочно взаимодействие на модела за прогнозиране на вълнение и модела за

прогнозиране на щормови нагони и ако е необходимо да се прекалибрират получените стойности на коефициентите в израза за C_d .

Глава.4 Заключение и обобщение

Освен в рамките на оперативните дейности системата за моделиране на вълнение и щормови нагони е използвана и в рамките на вече споменатият проект EU-FP7 IncREO. Освен обобщение, четвърта глава съдържа и кратко описание на тези изследвания, което е базирано на публикацията Galabov et al, 2015 [28]. Реконструирани са 10 бури в западната част на Черно море през 1976,1977, 1979, 1981, 1996, 1997,1998, 2006, 2010, 2012г. Последната е използвана за калибриране на оперативния вълнови модел SWAN. Поради наличието на повече информация, същата буря е използвана и за оценка на успешността на проведените реконструкции, а след това избраният подход е приложен и за останалите девет бури. Моделните резултатите с използване на ветрове от downscaling са с много по-ниско систематично отклонение сравнено със систематичното отклонение при директно използване на ветрове от ERA Interim (който подценява твърде много вълнението по време на бурята. Използването за форсинг на моделите на вятър от downscaling подобрява резултатите от реконструкцията на бурята. Минимално систематично отклонение е постигнато с използване на параметризация WESTH, а параметризацията KOM1 води до надценяване на височините на вълните. Извода в публикацията, така както и в случая на калибриране за оперативни цели е в подкрепа на използване на параметризация WESTH. За случаи на директно използване на реанализа обаче KOM1 става предпочитана, поради частичното намаляване на подценяването на скоростта на вятъра по време на бури. След това са реконструирани полетата на значимите височини на вълнението и щормовите нагони и за останалите девет бури. Използван е и вече описаният за отчитане на параметрите на вълнението в модела за симулиране на щормови нагони (като процедурата е описана в силно съкратена форма в [28].

Заклучителната глава съдържа още и кратко обобщение на извършената работа и постигнатите резултати.

Заклучение

В резултат на изпълнението на всички посочени дейности в оперативната практика освен функциониращият оперативно от началото на XXI век вълнови модел от трето поколение WAVEWATCH III в оперативната практика е въведен и модела с висока пространствена разделителна способност SWAN. Въведени са в оперативната практика и промените в оперативния модел за прогнозиране на щормови нагони, които вече бяха описани. При това са внесени и известни промени в обратботката и визуализацията на резултатите от този модел. Схематично функционирането на системата е показано на фиг.11

Изхода на SWAN във вид на визуализирани полета на значимата височина на вълнението и средната посока на разпространение се предоставят чрез защитена с парола уеб страница за вътрешно ползване в НИМХ-БАН, като основен потребител на тази информация е НИМХ-филиал Варна. Освен това достъп до въпросната уеб страница има и Морска Администрация- спасителен координационен център. Публичен достъп до същата прогноза има чрез вече споменатият уеб сайт в онлайн ГИС среда изработен в рамките на проекта Мониторинг и информационна система на Черно море (МИСЧМ) финансиран от ДП „Пристанищна Инфраструктура” и иновационен фонд на Норвегия.

Доколкото щормовите нагони са с доста по-ниска честота на възникване в сравнение с епизодите на значително явление, макар и прогнозата на щормови нагони да се прави регулярно, тази информация се предоставя на синоптиците на филиал Варна само при прогноза за повишение на морското ниво поне с 50см чрез изпращане на email с времеви серии на стойностите на морското ниво и карта на максималните очаквани морски нива за следващите три дена за българското крайбрежие. В тези случаи най-често се предоставя на синоптиците и кратък коментар на резултатите на модела.

Като финално обобщение на дисертацията:

- моделът SWAN е избран е за прогнозиране на вълнението в българската крайбрежна зона на Черно море.

-моделът е адаптиран за оперативните нужди и калибриран с цел надеждно прогнозиране на вълнението с фокус върху прогнозиране на вълнението по време на бури

-изследвани са различни параметризации на генерацията и дисипацията на вълновата енергия и е избрана комбинация от експоненциално нарастване по Westhuysen [7].



Фиг.11. Схематично представяне на функционирането на оперативната система за прогнозиране на вълнение и щормови нагони с висока пространствена разделителна способност за българското крайбрежие на Черно море.

-използваният коефициент на триене с дъното е заменен с получен на база на работата на Zijlema et al, 2012 [18]

-изследвана е възможността за отчитане на взаимодействие на вълнението с повърхностните течения и на база на предварителните резултати за момента не се налага отчитане на това взаимодействие в оперативната практика.

-Извършени са промени в модела за прогнозиране на щормови нагони: отчита се влиянието на вълнението посредством директно използване на преноса на енергия от вълнението към теченията и чрез

отчитане на влиянието на стръмността на вълнението върху динамичният коефициент на триене.

-системата от числени модели за вълнение и щормово повишаване на морското ниво е използвана не само в оперативната прогноза, но и за реконструкции на исторически бури.

Създадената система е с висока практическа стойност за осигуряване на оперативните морски прогнози на НИМХ-БАН и е изградена в съответствие с ръководствата на световната метеорологична организация Guide to Wave analysis and forecasting. WMO-№. 702 и Guide to storm surge forecasting WMO No.1076. Системата функционира успешно и се ползва за издаване на оперативни морски прогнози, предупреждения за опасни явления (включително във вид на цветови кодове в системата МЕТЕОАЛАРМ). Използвана е също така и за реконструкции на исторически бури, за експертиси в полза на държавни институции (агенция по рибарство и аквакултури) както и в полза на частни лица. Използвана е и за изготвяне на експертни становища по съдебни дела. Използва се и за изследвания на климатични характеристики на опасни морски явления. Този тип климатични изследвания са обект на бъдещата работа на автора.

Приноси

1.Числен вълнови модел с висока пространствена разделителна способност SWAN е адаптиран за прогнозиране на вълнението в Черно море в оперативен режим. Избрани са оптимална за оперативната употреба изчислителна мрежа, дискретизация в спектралното пространство, стъпка по времето, батиметрия. Моделът е част от оперативната система числени модели на НИМХ-БАН от 2012г на база на заповед за внедряване на директора на НИМХ-БАН **N13 /13.01.2012** и от тогава работи успешно в оперативен режим.

2.Проведено е изследване на различни параметризационни схеми описващи процеса на генерация и дисипация в дълбока вода на вълновата енергия. Изследвани са параметризациите на Komen, Janssen, Westhuysen както и модифицирана по метода на Rogers параметризация на Komen. Калибрирането на вълновият модел SWAN е извършено с фокус върху прогнозирането на вълнението по време на екстремни бури. Установено е предимство на параметризацията на Westhuysen за Черно море (същото е потвърдено и за Средиземно море). Калибрирана

е дисипацията на вълнова енергия поради триене в дъното в междинна вода. Подбрана е оптимална стойност на коефициента на триене. Изследван е ефекта от отчитане в оперативен режим на взаимодействието между вълнението и повърхностните течения. Не е установен положителен ефект върху качеството на прогнозите за Черно море. Аналогично изследване за Средиземно море също не установява наличие на съществен ефект от отчитането на това взаимодействие в оперативен режим за френското средиземноморско крайбрежие.

3. В съществуващ оперативен модел за прогнозиране на щормово повишение на морското ниво са внесени промени- отчита се влиянието на вълнението в този модел. Отчита се както директното въздействие чрез т.нар. вълнови сили, така и влиянието на вълнението върху динамичният коефициент на триене. Установено е, че оптимално за прогнозата е използване на информация за стръмността на вълнението а не директно използване на динамичната скорост на триене. Калибрирането на модела за прогнозиране на щормово повишение на морското ниво и тестовете са проведени също както и на вълновият модел SWAN с фокус върху значителни бури.

4. Системата е използвана успешно не само за прогноза но и за реконструкция на исторически бури в западната част на Черно море. Изводите за предимства на параметризационната схема на Westhuysen в модела SWAN са потвърдени и в този случай. Системата е използвана и за изготвяне на редица експертни становища в полза на институции, фирми и граждани, както и за изготвяне на експертни становища по съдебни дела.

ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА.

Публикация в списание с импакт фактор:

1. Galabov, V., Kortcheva, A., Bogatchev, A., Tsenova, B.: Investigation of the hydro-meteorological hazards along the bulgarian coast of the black sea by Reconstructions of historical storms. J. Environ. Prot. Ecol **16**, 1005-1015 (2015)

(публикацията е цитирана четири пъти до момента- веднъж от автори от института по океанология на БАН, два пъти от руски автори и един път от турски автор)

Публикации в национални списания:

2. Galabov ,V. On the parameterization of whitecapping and wind input in deep and shallow waters and the strategies for nearshore wave modelling in closed seas. Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology, 18, 1-2, 2013, 18-38
3. Galabov, V. Wave-current interactions in the Black Sea and Mediterranean sea: tests with two operational models. Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology, 21, 1-2, 2016, 24-31
4. Galabov, V. Operational storm surge modelling in the Western Black Sea: one way coupling with a wave model. Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology, 21, 1-2, Bulgarian Academy of Sciences, 2016, 10-23

Доклади на международни научни конференции публикувани в пълен текст и индексирани в Scopus/ Web of Science:

5. Galabov ,V, Kortcheva, A, Dimitrova, M. Towards a system for sea state forecast in the Bulgarian coastal zone: the case of the storm of 07-08 February 2012. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, www.sgem.org, SGEM2012 Conference Proceedings, 2012, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/SGEM2012/S14.V3012, 1017-1024 *(публикацията е цитирана веднъж в монография на румънски език)*

Други публикации на доклади на международни и национални научни конференции:

6. Anna Kortcheva, Vasko Galabov, Marieta Dimitrova, Andrey Bogatchev. Hindcast of extreme hydro-meteorological events along the Bulgarian Black Sea coast. In: proceedings of International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014, Padua, Italy, 2014, AO6, 10pp
7. Васко Гълъбов, Анна Корчева, Мариета Димитрова. Числена Прогноза на вълнението в Черно Море в открито море и крайбрежни води. доклади: Втори национален конгрес по физически науки, съюз на физиците в България, 2013
8. Kortcheva A., Galabov V.. Early Warning System for the hydro-meteorological hazard along the Bulgarian coast of the Black Sea. CMDRCOE Proceedings 2016, 2016, ISSN:2367-766X, 147-163

Принос към публикациите: Публикации 2,3,4 са самостоятелни, но роля и за трите имат обсъжданията на резултатите с колеги от Meteo France- Jean Michel Lefevre на 2, Lotfi Aouf на 3 и Patrick Ohl, Denis Paradis, Joel Hofman на 4. Тези три публикации съществуват и във вид на вътрешни отчети на DPREVI MAR/ Meteo France и са депозирани в библиотеката им. Приноса в публикации 1,5 на които съм първи автор е основен що се отнася до морско моделиране и написване на публикациите. Имам съществен принос за получаване на резултатите от морските модели и в публикация 6 (която има известно припокриване с 1). Публикация 7 е обобщение на дългогодишни резултати и приноса ми към нея е равностоен на този на останалите автори. Оценявам като равностоен и приноса си към публикация 8.

ЛИТЕРАТУРА (цитирана в автореферата)

1. Kortcheva, A., Kortchev, G., Lefevre, J-M., 2000. Operational numerical wind-wave model for the Black Sea. *Mediterranean Marine Science*. 1(1), 65 – 70
2. Mungov, G., Daniel, P., 2000. Storm surges in the western Black Sea. Operational forecasting. *Mediterranean Marine Science*, 1(1), 45-503.
3. Tolman, H.L., 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH III. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 222, pp133
4. Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part 1: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, C4, 7649-7666
5. Komen, G. J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K., 1984. On the Existence of A Fully-Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), 1271-1285
6. Janssen, P.A.E.M., 1991. Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1631–1642
7. Van der Westhuysen, A. J., Zijlema, M., Battjes, J.A., 2007. Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coast. Eng.*, 54, 151–170
8. Phillips, O. M., 1957. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 2(5), 417–445
9. Snyder, R.L., Dobson, F.W., Elliot, J.A., Long, R.B., 1981. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, *J. Fluid Mech.*, 102, 1-59
10. Hasselmann, K., 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping. *Boundary - Layer Meteorol.*, 6, 107–127
11. Yan, L., 1987. An improved wind input source term for third generation ocean wave modeling. Scientific report WR- No 87-8, The Bilt, The Netherlands
12. Alves, J. H. G. M., and M. L. Banner, (2003): Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 1274–1298

13. Rogers, W. E., Hwang, P. A., Wang, D. W., 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: Three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33(2), 366-389
14. Galabov, V., Kortcheva, A., Dimitrova, M., 2012. Towards a system for sea state forecasts in the Bulgarian Black Sea coastal zone: the case of the storm of 07-08 February. *SGEM2012 Conference Proceedings*, 3, 1017 – 1024
15. Bubnova, R., Hello, G., Benard, P., Geleyn, G.D., 1995. Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the ARPEGE/Aladin NWP system. *Monthly Weather Review*, 123(2), 515-535
16. Gospodinov, I., Spiridonov, V., Bénard, P., Geleyn, J. F., 2002. A refined semi-Lagrangian vertical trajectory scheme applied to a hydrostatic atmospheric model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 128(579), 323-336
17. Bogatchev, A., 2008. Changes in operational suite of ALADIN – BG. *ALADIN Newsletter No 34*
18. Zijlema, M., van Vledder, G.Ph., Holthuisen, L.H., 2012. Bottom friction and wind drag for wave models. *Coastal Engineering*, 65, 19-26
19. Bouws, E., Komen, G.J., 1983. On the balance between growth and dissipation in an extreme, depth-limited wind-sea in the southern North Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 13 (9), 1653–1658
20. Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z., Suppl.*, 12, A8
21. Daniel, P., 1997. Forecasting tropical cyclones storm surges at Meteo-France. *Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III*, Computational Mechanics Publications, 119-128
22. Smith, S. D., Banke, E. G., 1975. Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(429), 665-673

23. Powell, M. D., Vickery, P. J., Reinhold, T. A., 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929), 279-283
24. Taylor, P.K., Yelland, M.J., 2001. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 572-590
25. Wang, J., Song, J., Huang, Y., 2013. On the parameterization of drag coefficient over sea surface. *Acta Oceanol. Sin.*, 32(5), 68-74
26. Guan, C., Xie, L., 2004. On the linear parameterization of drag coefficient over sea surface. *Journal of Physical Oceanography*, 34(12), 2847-2851
27. Dee, D.P., and 35 coauthors, 2005. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597
28. Galabov, V., Kortcheva, A., Bogatchev, A., Tsenova, B., 2015. Investigation of the hydro-meteorological hazards along the bulgarian coast of the black sea by Reconstructions of historical storms. *J. Environ. Prot. Ecol.*, 16, 1005-1015
29. Kortcheva, A., Galabov, V., Dimitrova, M., Bogatchev, A., 2014. Hindcast of extreme hydro-meteorological events along the Bulgarian Black Sea coast. In:proceedings of International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014, Padua, Italy, 2014, AO6, 1-10
30. Andreeva, N., Valchev, N., Trifonova, E., Eftimova, P., Kirilova, D., Georgieva, M., 2011. Literary review of historical storm events in the western Black Sea. *Proc. of Union of Scientists–Varna, Marine Sciences*, 105-112

БЛАГОДАРНОСТИ

Изказвам своята благодарност на първо място на научния ми ръководител д-р Анна Корчева, както и на д-р Георги Корчев за неоеценимата помощ по време на работата по настоящата дисертация.

Изказвам своята благодарност на всички колеги от Meteo France, които също ми оказаха ценна помощ за провеждането на изследванията и обсъждаха всички получени резултати с мен. Особена благодарност дължа на непрежалимия напуснал ни рано Jean-Michel Lefevre за многогодишната съвместна работа. Благодарност дължа и на Dr. Lotfi Aouf, Pierre Daniel, Denis Paradis, Joel Hofman и Patrick Ohl.

Изказвам своята благодарност за многогодишната работа по осигуряване на много качествени резултати от атмосферния модел ALADIN на д-р Андрей Богачев, д-р Валери Спиридонов и д-р Боряна Ценова.

Изказвам своята благодарност също така и на ръководството на НИМХ- БАН в лицето на настоящия директор на НИМХ- БАН проф. д-р Христомир Брънзов и бившия директор проф. д-р Георги Корчев, ръководството на департамент Прогнози и Информационно обслужване в лицето на проф. д-р Христо Георгиев, както и бившия ръководител на департамента проф. д-р Валери Спиридонов. Изказвам своята благодарност и на всички останали колеги за оказаната подкрепа.

Изказвам своята голяма благодарност и на семейството си!

Работата по настоящата дисертация е реализирана с подкрепата на проект BG051PO001-3.3.06-0063 “Програма за мултидисциплинарно обучение на докторанти, постдокторанти и млади учени” финансиран от оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, кофинансиран от Европейски Социален Фонд на ЕС 2007-2013. Изследванията са подпомогнати също и от проекта по седма рамкова програма на ЕС IncREO. Разходите за финансиране на посещенията ми в Meteo France са за сметка на Campus France. Тези посещения са осъществени в рамките на двустранното сътрудничество между НИМХ-БАН и Meteo France.

По време на работата са използвани данни от измервания, предоставени от Институт по Океанология на БАН, за което им благодаря!

