

На правах рукописи

УДК

551.466.2: 528.83

**Хоссейн Фарджам**

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ ПО  
ДАНЫМ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Кудрявцев Владимир Николаевич

**Научный Консультант:** доктор физико-математических наук,  
Шапрон Берtrand

**Официальные оппоненты:** доктор географических наук  
Белоненко Татьяна Васильевна

Кандидат физико-математических наук,  
Караев Владимир Юрьевич

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геофизический Центр РАН»

Защита состоится «29» сентября 2016 г. в 17 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д.212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98. (812) 633-01-82, (812)372-50-92

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.  
(<http://www.rshu.ru/university/dissertations/>)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат географических наук

Воробьев В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

В настоящее время спутниковая альтиметрия позволяет решать различные задачи диагностики океанских течений, поля морских волн, приводного ветра, обеспечивая во многих случаях точность, недостижимую с помощью стандартных контактных или дистанционных средств наземного и морского базирования. Эта информация широко используется в задачах мониторинга и прогноза окружающей среды (Белоненко и Кубряков, 2014; Лебедев, 2015). Спутниковые глобальные альтиметрические данные, доступные через открытые базы данных, например, AVISO (Archivage, Validation et Interpretation des donnees des Satellites Oceanographiques) позволяют анализировать пространственно–временную изменчивость полей уровня поверхности, высот волн и ветра на любых океанических акваториях.

Предоставляемые в открытом доступе спутниковые продукты уровня Level-3(L3) и/или Level-4(L4) имеют, как правило, значительное пространственное и временное осреднение. В применении к альтиметрическим данным, предоставляемые поля имеют пространственное осреднение порядка 100 км и временное осреднение – около недели.

Однако в ряде важных случаев, например, - при исследовании волн и ветра в прибрежной зоне или при исследовании пространственного распределения высот волн, генерируемых движущимся тропическим циклоном, готовые спутниковые продукты уровня L3 и/или L4 не могут быть использованы по определению. В этом случае исследования должны проводиться на основе калиброванных измерений исходного пространственного разрешения (спутниковые продукты уровня Level-1(L1) и/или Level-2(L2)). Основное внимание в данной работе уделено именно работе с альтиметрическими продуктами L2. В настоящее время отсутствуют универсальные «рецепты» и алгоритмы применения данных этого уровня. Этот факт определяет актуальность данной работы, в которой разрабатываемые методы и алгоритмы предназначены для анализа альтиметрических измерений в прибрежной зоне и в зонах движущихся штормов, где поля ветра и волн обладают сильной пространственно-временной изменчивостью.

Исследования последних лет показали (см., например, Gourrion, 2002), что мощность альтиметрического сигнала, по которой восстанавливается скорость ветра, существенно зависит от степени развития ветрового волнения. Поэтому применение стандартных алгоритмов приводит к заниженным оценкам скорости ветра. Точность восстановления ветра может быть значительно улучшена, если доступны двух-частотные альтиметрические данные (Elfouhaily et al., 1998), однако, наличие таких измерений является скорее исключением, чем правилом.

Поля ветровых волн в тропических циклонах все еще изучены крайне слабо. Альтиметрические измерения высот волн в ураганах являются одним из немногих

источников информации. Исследования особенностей генерации волн ураганами/тайфунами исключительно актуальны для развития систем раннего предупреждения о появлении опасных явлений и оценки возможного ущерба прибрежной и береговой инфраструктуре.

Информация о волнении и приводном ветре необходима для основных объектов (судоходство, морская индустрия, морское рыболовство, контроль загрязнения морской среды и так далее) в Аравийском море и в Персидском заливе. Эти акватории играют важную роль в экономике и политике региона и мира. Поэтому, исследование волновых и ветровых режимов важно для Ирана и других стран региона.

### **Цель и задачи исследования**

Основной **целью** работы является исследование закономерностей пространственно-временной изменчивости полей ветра и волн в Индийском океане на основе спутниковых альтиметрических измерений, включая:

- сезонную и межгодовую изменчивость полей;
- эволюцию ветра и волн в прибрежных районах;
- пространственное распределение энергии волн в тропических циклонах.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

- исследование сезонной и межгодовой изменчивости полей приводного ветра и волн в северной части Индийского океана по данным архивных спутниковых измерений и данным реанализа с октября 2009 до декабря 2015 года;
- моделирование влияния эффектов развития ветрового волнения в прибрежной зоне на радиолокационный сигнал;
- оценка точности определения скорости ветра по данным альтиметрических измерений и учета этого эффекта в алгоритмах расчета ветра;
- исследование закономерностей развития волн в прибрежных зонах на основе альтиметрических измерений, применение полу-эмпирических волновых моделей для анализа данных;
- исследование и моделирование особенностей пространственного распределения энергии волн в тропических циклонах по данным альтиметрических измерений.

### **Научная новизна**

- В работе показано, что наиболее интенсивная изменчивость скорости ветра наблюдается в юго-западном районе Аравийского моря и в центральном районе Бенгальского залива и интенсивная изменчивость волн наблюдается в центральном районе Аравийском море и в северном районе Бенгальского залива, что объясняется влиянием сезонных муссонов в Индийском океане. При этом сезонные и межгодовые аномалии в Аравийском море более ярко выражены, чем в Бенгальском заливе.

- Показано, что применение стандартных алгоритмов восстановления скорости ветра в прибрежной зоне по данным альтиметрических измерений приводит к значимым систематическим ошибкам, связанным с влиянием развития ветрового волнения на отраженный альтиметрический сигнал.
- На основе моделирования альтиметрического сигнала от морской поверхности в условиях развивающегося волнения, предложен метод коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов, позволяющий существенно улучшить точность восстановления скорости ветра в прибрежных зонах.
- Исследованы особенности развития ветрового волнения в прибрежной зоне в условиях пространственной изменчивости ветра на основе альтиметрических измерений, предложена и протестирована полу-эмпирическая модель развития волн, которая может быть в дальнейшем внедрена в различные прикладные и фундаментальные исследования.
- Особенности пространственного распределения энергии волн в тропических циклонах, полученные на основе альтиметрических измерений, демонстрирующие эффекты захвата волн движущимися циклонами, выражающиеся в значимом усилении энергии волн в их правом секторе.
- Результаты моделирования альтиметрических измерений с использованием полу-эмпирической модели волн, тестирование и оценка качества модели как инструмента предсказания генерации аномально высоких волн.

### **Практическая и научная значимость**

В диссертации исследованы особенности пространственно-временной изменчивости поля ветра и волн в северной части Индийского океана по данным спутниковых альтиметрических измерений.

Установленные в работе закономерности пространственно-временного режима ветра и волн в северной части Индийского океана могут быть использованы для информационного обеспечения безопасности мореплавания и строительства, а также служить основой при планировании и проведении натурных экспериментов.

Предложенный в работе метод коррекции стандартного альтиметрического алгоритма восстановления ветра для прибрежных зон, может быть внедрен в оперативную практику предоставления улучшенных геофизических продуктов.

Установленные закономерности и модель генерации волн тропическим циклоном могут быть использована для моделирования и предсказания экстремальных явлений, в частности, в Индийском океане.

Предложенный метод анализа поля ветра и волн на основе спутниковых альтиметрических измерений может быть использован при решении задач

обеспечения безопасности и повышения экономической эффективности экономической деятельности и судоходства в открытых и прибрежных водах мирового океана.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- закономерности изменчивости полей ветра и волн, в северной части Индийского океана, показывающие, что сезонные и межгодовые аномалии в Аравийском море выражены более ярко, чем в Бенгальском заливе;
- утверждение о значимых систематических ошибках определения скорости ветра в прибрежной зоне по данным альтиметрических измерений при использовании стандартных алгоритмов, и выявление причин их возникновения;
- метод коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов, позволяющий существенно улучшить точность восстановления скорости ветра в прибрежных зонах;
- особенности развития ветрового волнения в прибрежной зоне в условиях пространственной изменчивости ветра, установленные на основе альтиметрических измерений и моделирования;
- обнаруженные на основе альтиметрических измерений и моделирования особенности пространственного распределения энергии волн в тропических циклонах, демонстрирующие эффекты захвата волн, приводящие к аномальному усилению волн в правом секторе движущегося циклона.

#### **Достоверность**

Научные выводы, сделанные в диссертации, получены на основе анализа большого массива спутниковых альтиметрических измерений, т.е. их можно рассматривать статистически обеспеченными. Основные результаты и выводы, полученные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, обсуждались на международных и российских конференциях и семинарах.

#### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались на различных российских и международных конференциях и семинарах, в частности, на 7<sup>th</sup> Scientific Conference of Iranian Students in the Russian Federation «Surveying Sea Surface Dynamic of Indian Ocean with using of Satellite Altimetry Data » (Moscow, Russia, April 2014)»; Doctoral School of Energy and Geotechnology II «Assessment Energy of Wind-Driven Waves in the Arabian Sea by Satellite Altimetry» (Parnu, Estonia, 12-17 January 2015); 8<sup>th</sup> Scientific Conference of Iranian Students in the Russian Federation «Investigation of Wind Waves Energy in the North of Indian Ocean by Using Satellite Altimetry data» (St. Petersburg, 2015); Международный научный семинар «Sea surface wind and wind waves in the north of Indian Ocean by using satellite altimeter

data» (Санкт–Петербург, Россия, 2015); Декада науки РГГМУ «Альтиметрические измерения в прибрежных зонах» (Санкт–Петербург, Россия, 2016).

По теме диссертации опубликованы 4 работы, из которых 1 публикация в журнале, индексируемом в Web of Science и Scopus, 3 публикации в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Личный вклад автора**

Автор работы принимал участие на всех этапах исследования от постановки задачи до анализа результатов, разрабатывал компьютерные программы, реализующие предложенные в работе методы и алгоритмы, производил обработку спутниковых данных.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографии, включающей 91 наименование, из них 83 на иностранных языках. Общий объём работы – 106 машинописных страниц, включая 39 рисунков.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю, д.ф-м.н. В.Н. Кудрявцеву и консультанту, д.ф-м.н. Б. Шапрону за постановку задачи, внимание к работе и терпение, П. А. Голубкину, научному сотруднику лаборатории спутниковой океанографии, за технические консультации и помощь, и Е.К. Николаевой, зав. кафедрой русского языка РГГМУ, за оказанную помощь в написании диссертации на русском языке. Отдельная благодарность моей жене и родителям за понимание и поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена исследованию особенности сезонной и межгодовой изменчивости поля приводного ветра и поверхностных волн в северной части Индийского океана на основе архивных спутниковых альтиметрических данных и данных реанализа поля ветра с октября 2009 до декабря 2015 года.

**В разделе 1.1** дан обзор литературы по измерению скорости приводного ветра и высот волн с помощью спутникового альтиметра.

**В разделе 1.2** дается обзор литературы по приводному ветру и высоте значимых волн в Индийском океане.

**В разделе 1.3** описана исходная база данных (AVISO) и пространственная и временная изменчивость геофизических полей в терминах ортогональных функций (ЭОФ), или статистических мод.

Система AVISO SSALTO/DUACS обрабатывает данные всех альтиметрических миссий (Jason-1, TOPEX/Poseidon, Envisat, GFO, ERS-1, 2 и Geosat) и формирует однородный каталог продуктов, как для оперативного использования, так и для фундаментальных исследований.

Метод ЭОФ применяется в работе для анализа полей приповерхностного ветра, которые представляются в виде матрицы размером  $n \times r$ , где  $n$  – карта в момент времени,  $r$  – временной ряд для координаты. ЭОФы и коэффициенты разложения восстанавливаются следующим образом (Bjornsson et. al., 1997):

$$F = \sum_{j=1}^p \bar{a}_j \text{ЭОФ}_j \quad (1)$$

где  $\bar{a}_j$  – временная изменчивость и  $\text{ЭОФ}_j$  – пространственная изменчивость. В общем, для каждого рассчитанного  $\text{ЭОФ}_j$  находятся соответствующие  $\bar{a}_j$ .

**В разделе 1.4** приводятся характеристики приводного ветра в период зимнего и летнего муссона в северной части Индийского океана на основе данных NCEP/NCAR.

Обобщение данных направления приповерхностного ветра в северной части Индийского океана на основе NCEP/NCAR анализа в период 2009 – 2015 гг. представлено в Таблице 1. В соответствии с таблицей 1 зимний муссон преобладает с ноября по март, в то время как летний муссон – с июня по октябрь. Переход от зимнего муссона к летнему муссону наблюдается в апреле – мае, и от летнего к зимнему в октябре.

Таблица 1– Режимы скоростей ветра над Аравийским морем и Бенгальским заливом в период с 2009 по 2015 гг. по данным NCEP/NCAR.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Направление ветра (доминирующее)	СВ (зимний муссон)			Ю-ЮВ-ЮЗ (слабый)	ЮЗ-Ю	ЮЗ (летний муссон)			ЮЗ-Ю	Ю-ЮЗ (слабый)	Ю-СВ	СВ-Ю (слабый)

**В разделе 1.5** анализируется поле ветровых волн и зыби в двух частях северного Индийского океана (Аравийское море и Бенгальский залив) в период зимнего и летнего муссонов. Для анализа данных привлекаются полуэмпирические модели высот волн полностью развитого волнения Пирсона-Московица (Pierson and Moskowitz, 1964), уравнение 2, и Хассельмана (Hasselmann et al., 1973) на основе модели WAVE Model (WAM), уравнение 3, (Chen et al., 2002; Eduardo et al. 2012).

$$H_p = 0.22 \frac{U_{10}^2}{g} \quad (2)$$

$$\begin{cases} H_p = 1.614 \times 10^{-2} \times U_{10}^2 & 0 \leq U_{10} \leq 7.5 \text{ ms}^{-1} \\ H_p = 10^{-2} \times U_{10}^2 + 8.134 \times 10^{-4} \times U_{10}^3 & 7.5 \text{ ms}^{-1} < U_{10} \leq 50 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

где  $U_{10}$  (м/с) - скорость ветра на высоте 10 м и  $g$  – ускорение свободного падения.

Сопоставляя альтиметрические измерения с модельными предсказаниями, делается вывод, что волновое поле в Аравийском море и в Бенгальском заливе в основном представлено волнами зыби, при этом высота волны в Аравийском море больше чем в Бенгальском заливе.

В разделе 1.6 проводится анализ пространственной и временной аномалии поля приводного ветра в Аравийском море и Бенгальском заливе с октября 2009 до декабря 2015 года по данным AVISO с помощью метода ЭОФ. Вклад первой моды в полную дисперсию составляет 52% в Аравийском море и 49% в Бенгальском заливе.

На Рисунке 1 показаны аномалии поля приводного ветра (Рисунок 1(а) и Рисунок 1(б)) и их временные ряды (Рисунок 1(в) и Рисунок 1(г)) в акватории исследования. В соответствии с первой модой наиболее интенсивная изменчивость скорости поля приводного ветра наблюдается в юго-западной части Аравийского моря (Рисунке 1(а)) и в центральной части Бенгальского залива (Рисунке 1(б)) – это режим муссонов: во время летних муссонов направление ветра – юго-западное, во время зимних муссонов – северо-восточное. Амплитуда скорости приводного ветра первой моды летом больше, чем зимой в обеих акваториях, но в Бенгальском заливе изменения амплитуд слабые, чем в Аравийском море (Рисунок 1(г)).

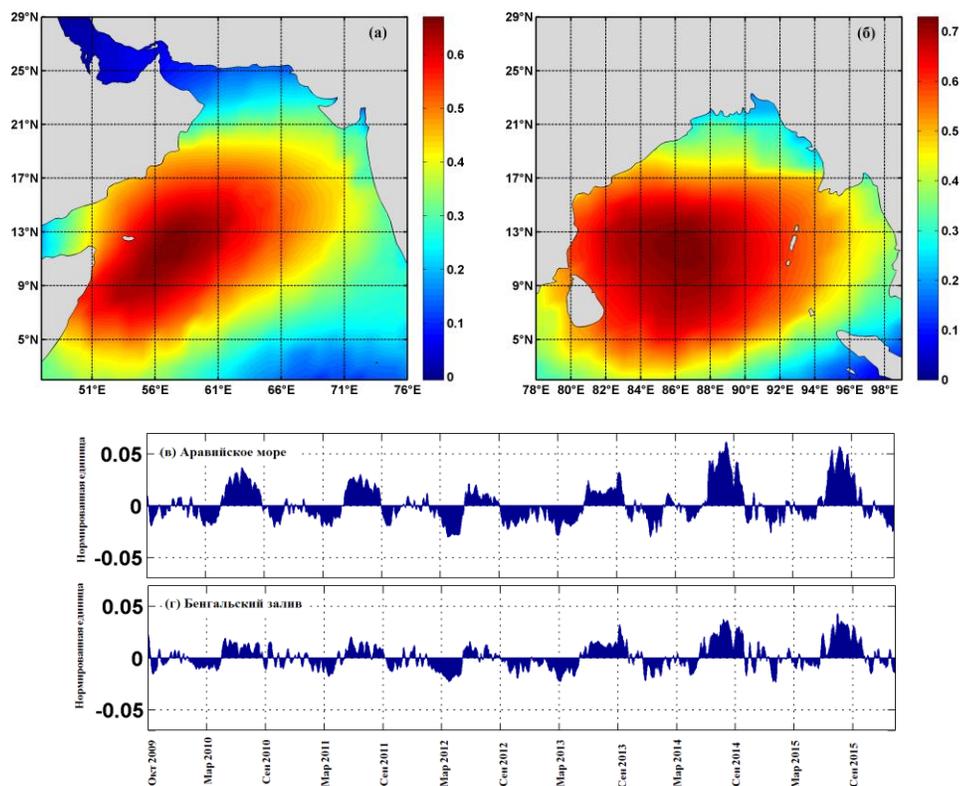


Рисунок 1 – Аномалия первой моды ЭОФ скорости приводного ветра для Аравийского моря (а) и её первый временный ряд (в), а также для Бенгальского залива (б) и её первый временный ряд (г).

В разделе 1.7 анализируется аномалия поля высоты значимых волн в Аравийском море и в Бенгальском заливе с октября 2009 г. до декабря 2015 г. по данным AVISO. На основе метода ЭОФ вклад первой моды поля высоты значимых волн в полную дисперсию составляет 80% и 66% в Аравийском море и Бенгальском заливе соответственно.

Пространственный анализ показывает, что в первой моде самая интенсивная изменчивость высот значимой волны наблюдается в центральной части Аравийского моря (Рисунок 2(а)) и в северной части Бенгальского залива (Рисунок 2(б)).

Первый временный ряд высоты значимой волны регулярнее, чем первый временный ряд приводного ветра в обеих акваториях. В Аравийском море (Рисунок 2(в)) амплитуд временного ряда в период летнего муссона больше чем зимнего муссона, но в Бенгальском заливе (Рисунок 2(г)) амплитуды временного ряда сходны.

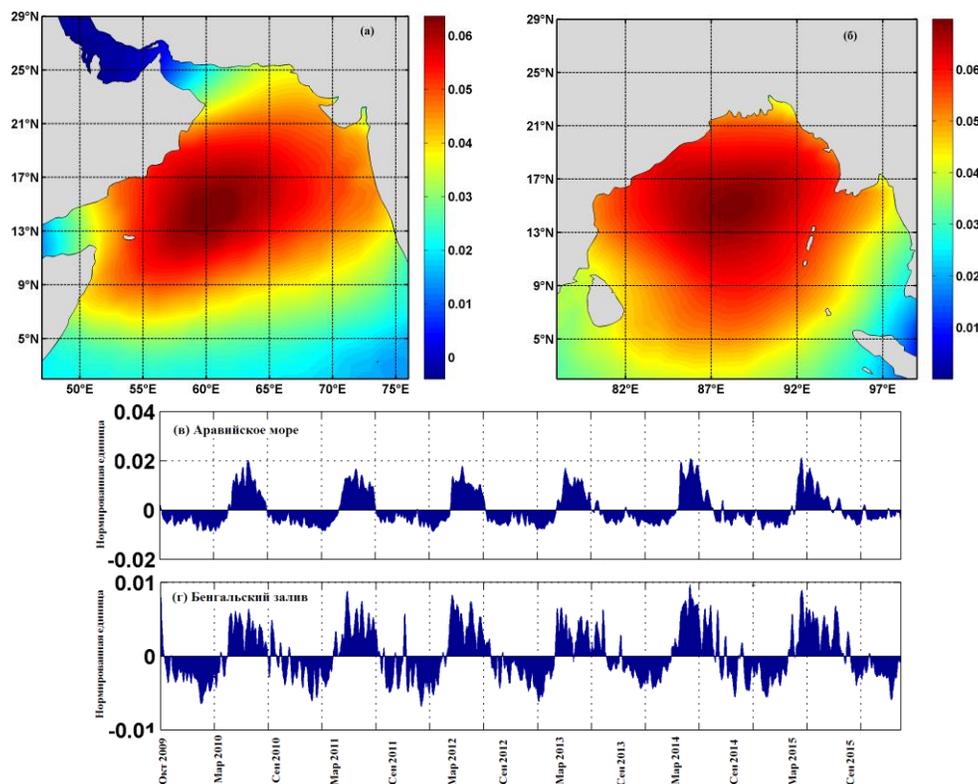


Рисунок 2 – Режим первой моды ЭОФ высоты значимых волн для Аравийского моря (а) и Бенгальского залива (б) и их первой временный ряд (в – Аравийское море, г – Бенгальский залив).

Анализ временных рядов приводного ветра и ветровых волн показывает, что режим изменчивости приводного ветра может определить режим ветровых волн в исследуемом регионе, корреляция между ними в Аравийском море – 66%, а в Бенгальском заливе – 61%.

**Во второй главе** представлены результаты альтиметрических измерений полей ветра и волн в прибрежных районах северной части Индийского океана.

**В разделе 2.1** приводится обзор эмпирических соотношений, основанных на теории подобия, для описания развития волн как функции скорости ветра и безразмерного разгона.

Предполагается, что полная энергия  $E$  и пик частоты  $\omega_p$  зависят только от разгона  $X$ , которые определяются как

$$\tilde{E} \equiv \tilde{E}(\tilde{x}) = \alpha \tilde{X}^\beta \quad \text{и} \quad \tilde{\omega}_p \equiv \tilde{\omega}_p(\tilde{x}) = p \tilde{X}^{-q}, \quad (4)$$

где  $\tilde{E}$  – безразмерная энергия,  $\tilde{\omega}_p$  – безразмерная частота пика, и  $\tilde{X}$  – безразмерный разгон. Согласно анализу размерностей, энергия и частота волн, а также разгон волн масштабируются с использованием скорости ветра  $U_{10}$  и ускорения свободного падения  $g$ :

$$\tilde{E} = \frac{g^2 E}{U_{10}^4}, \quad \tilde{\omega} = \frac{U_{10} \omega_p}{g}, \quad \text{и} \quad \tilde{x} = \frac{gx}{U_{10}} \quad (5)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $p$  и  $q$  являются эмпирическими константами.

**В разделе 2.2** приводится описание технических характеристик двухчастотных альтиметров Jason-1 и Jason-2, работающих в *Ku*-диапазоне и *C*-диапазоне, используемых в данной работе.

**В разделе 2.3** представлен район исследования, который находится в северной части Индийского океана и рассмотренные траектории пролета альтиметра.

**В разделе 2.4** представлен метод оценки скорости ветра по измерениям двухчастотных спутниковых альтиметров. Волны спектрального пика, ветровые волны или волны зыби увеличивают среднеквадратичный наклон поверхности океана, который определяет уровень отраженного от поверхности моря альтиметрического сигнала. Таким образом, развитие ветрового волнения или присутствие зыби при постоянном ветре могут влиять на альтиметрический сигнал.

Вследствие этого, оценки скорости приводного ветра, полученные с помощью стандартного алгоритма на основе *Ku*-диапазона, могут быть занижены. С целью исправления данного недостатка в работе (Elfouhaily et al., 1998) было предложено более детальное исследование параметров ветра с помощью формулы:  $\delta\sigma^0 = \sigma_C^0 - \sigma_{Ku}^0$  для восстановления ветрового напряжения по данным двухчастотного альтиметра. Здесь  $\sigma_C^0$  и  $\sigma_{Ku}^0$  являются удельными эффективными площадями рассеяния (УЭПР) в *C*- и *Ku* диапазонах в децибелах,  $\delta\sigma^0$  – их разность.

Используя разницу между УЭПР в *Ku*- и *C*- диапазонах, мы можем устранить влияние развития волн на альтиметрический сигнал. Поскольку волны в коротковолновом интервале спектра не зависят от возраста волны,  $\delta\sigma^0$  является только функцией скорости ветра. Более подробную информацию см. (Elfouhaily et al., 1988). Таким образом, в контексте данной работы этот параметр,  $\delta\sigma^0$ , может

быть использован для того, чтобы лучше интерпретировать «реальный», быстро меняющийся альтиметрический ветер.

**В разделе 2.5** представлены результаты моделирования альтиметрического сигнала. Следуя приближению геометрической оптики, УЭПР оценивается как (Chapron et al. 1995; Elfouhaily et al. 1998; Karaev et al., 2005):

$$\sigma_{em}^0(0^\circ) = \frac{|R_0|^2}{MSS} \exp(-4k_r^2 h_s^2) \quad (6)$$

где  $R_0$  – коэффициент Френеля при нулевом угле падения,  $\exp(-4k_r^2 h_s^2)$  – коррекция приближения рассеяния геометрической оптики для учета влияния мелкомасштабной шероховатости,  $k_r$  – волновое число радиоволны радара,  $h_s^2$  – дисперсия высоты шероховатости в диапазоне волновых чисел  $k > k_d$  и  $k_d$  – волновое число, разделяющее морскую поверхность на крупно- и мелкомасштабные компоненты, MSS – средний квадратичный наклон крупномасштабной поверхности. MSS и  $h_s^2$  рассчитываются с помощью спектра волн, как:

$$MSS(\alpha, U_{10}, k_r) = \int_0^{k_d} B_0(\alpha, U_{10}, k) d \ln k \quad (7)$$

$$h_s^2 = \int_{k_d}^{\infty} k^{-2} B_0(\alpha, U_{10}, k) d \ln k \quad (8)$$

где  $k$  – волновое число,  $B_0$  – одномерный спектр насыщения поверхности,  $U_{10}$  – скорость ветра на стандартной высоте 10 м,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha = k_p^{1/2} U_{10} g^{-1/2}$  – обратный возраст волны,  $k_p$  – волновое число спектрального пика.

В данной работе мы используем спектр, предложенный в (Elfouhaily and et al., 1997), где закон развития волн представлен формулой:

$$\alpha = 0.84 \times \tanh \left\{ (\tilde{x} / \tilde{x}_0)^{0.4} \right\}^{-0.75} \quad (9)$$

а интеграл спектра волн дает следующее выражение для безразмерной высоты значимых волн:

$$\tilde{H}_s = 0.26 \times \tanh \left\{ (\tilde{x} / \tilde{x}_0)^{0.4} \right\}^{1.25} \quad (10)$$

где  $\tilde{x}$  – безразмерный разгон,  $\tilde{x}_0 = 2.2 \times 10^4$  и  $\tilde{H}_s = H_s g / U_{10}^2$ .

Результаты моделирования УЭПР альтиметрического сигнала ( $Ku$ -диапазон) как функции высоты волн ( $H_s$ ) для различных скоростей ветра (5 м/с, 10 м/с, 15 м/сек) представлены на Рисунке 3. Низкие высота значимых волн ( $H_s$ ) соответствуют начальные стадии развития волн. Для сравнения также представлена двухпараметрическая модель, УЭПР ( $U_{10}$ ,  $H_s$ ), предложенная (Gourrion et al., 2002). Эта двухпараметрическая модель, может применяться для относительно развитого состояния моря.

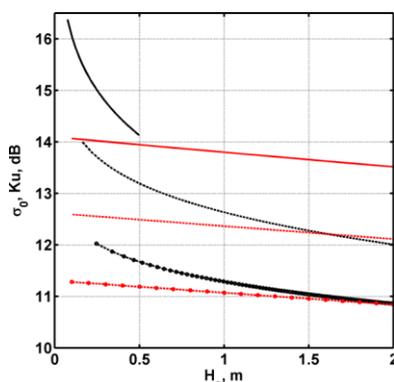


Рисунок 3 – Оценка УЭПР *Ku*-диапазона для скорости ветра 5 м/с (сплошная линия), 10 м/с (пунктирная линия), 15 м/с (штрих – пунктирная линия) как функции  $H_s$ . Представлен расчет по модели спектра (черная линия) и расчет на основе алгоритма Gourgion et al. (2002) (красная линия).

**В разделе 2.6** приводится анализ альтиметрических измерений ветра и волн в прибрежной зоне со спутниковых альтиметров Jason-1 и Jason-2 в Индийском океане. В этой части рассмотрены шесть конкретных проходов альтиметра.

Например: исследуется 45-й проход спутника Jason-1 за 26 января 2013 года в Аравийском море в районе полуострова Катхиявара. Ветер дует с берега, его направление приблизительно совпадает с траекторией альтиметра. Рисунок 4(а) показывает эволюцию высоты значимых волн от береговой линии. Представленный сегмент альтиметра соответствует 220 км между первым и последним измерениями. На этом отрезке высота значимых волн вырастает от 0.6 м до примерно 1.5 метра.

Рисунок 4(б) показывает зависимость восстановленного по данным альтиметра ветра и  $\delta\sigma^0$  от разгона. В данном случае величина  $\delta\sigma^0$  относительно постоянна для всего интервала. Следовательно, можно предположить, что скорость приводного ветра также примерно постоянна вдоль траектории альтиметра (9.5 м/с). Таким образом, увеличение альтиметрической скорости ветра является артефактом, являющимся результатом не учета влияния развития волнового поля на отраженный сигнал.

Примечательно, что УЭПР в *Ku*-, так и в *C*-диапазонах уменьшаются с удалением от берега, (Рисунок 4(в)). Как следствие этого, скорость альтиметрического ветра, полученного на основе данных *Ku*-диапазона, увеличивается с разгоном (Рисунок 4(б) – правая ось ).

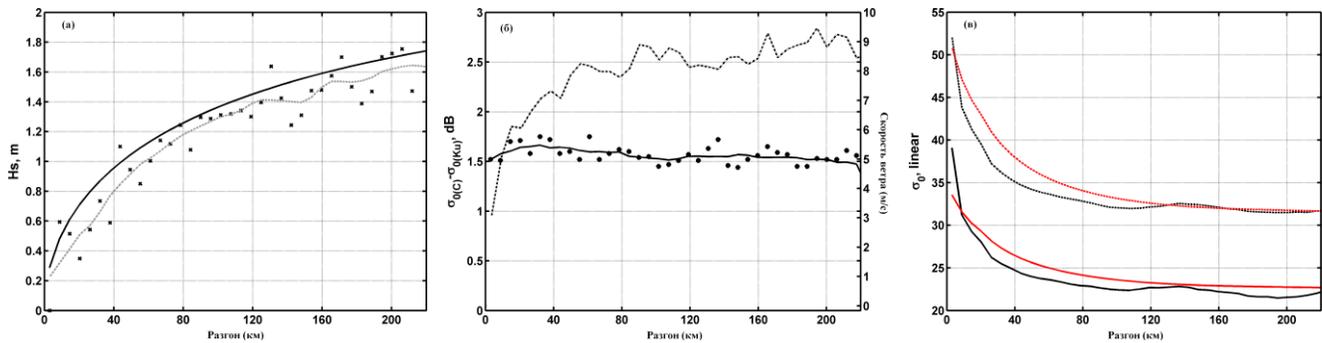


Рисунок 4 - 45-й проход спутника Jason-1 за 26 января 2013 года в исследуемом регионе. (а) Высота значимых волн ( $H_s$ ) по данным альтиметра обозначены (\*),  $H_s$  рассчитанных с использованием эмпирического закона развития волн (уравнение 10, сплошная линия), и сглаженная  $H_s$  (пунктирная линия); (б) разница между УЭПР в  $C$ - и  $Ku$ -диапазонах (символы •) и сглаженная разница между ним (сплошная линия). Соответствующая скорость ветра по данным стандартного альтиметра показана пунктирной линией, правая ось; (в) УЭПР по данным альтиметра (черная сплошная линия для  $Ku$ -диапазона, черная пунктирная линия для  $C$ -диапазона) и УЭПР по модели спектра (красная сплошная линия для  $Ku$ -диапазона и красная пунктирная линия для  $C$ -диапазона).

Спектр Elfouhaily et al. (1997) и законы развития (уравнения 9 и 10) используются для моделирования альтиметрического сигнала, который показан на рисунке 4в. Расчеты показали, что применение уравнения (6) и эмпирического закона развития волн при скорости ветра 9.5 м/с наилучшим образом описывает развитие волн. Моделируемый коэффициент отражения, который вычисляется при помощи возраста волн и наблюдаемых  $H_s$ , совпадает с измеренными УЭПР  $Ku$ - и  $C$ -диапазонов.

**В разделе 2.7** приведен метод повышения точности оценки скорости ветра в прибрежной зоне по альтиметрическим измерениям. При развитии волн в прибрежной зоне альтиметрический ветер, рассчитанный с помощью стандартного алгоритма, будет демонстрировать «ложный» рост, поэтому в подобных условиях необходимо корректировать алгоритм восстановления скорости ветра.

Для этой цели с помощью модели (уравнение 6) для  $Ku$ -диапазона сначала рассчитывается отличие УЭПР морской поверхности при полностью развитом волнении от УЭПР для развивающихся волн (Рисунок 5(б)),

$$\Delta\sigma^0 = \sigma^0(x, U_{10})_{\text{модель}} - \sigma^0(\infty, U_{10})_{\text{модель}}. \quad (11)$$

Эта поправка на развитие должна быть учтена в стандартном алгоритме расчета скорости ветра по данным альтиметрических измерений  $U_{10} = U_{10}(\sigma_{Ku}^0)$ . Для этого измеряемые значения волн  $\sigma_{Ku}^0$  должны быть сначала скорректированы на эффект развития волн:  $\sigma_{исп.}^0 = \sigma_{Ku}^0 - \Delta\sigma^0$ , и далее, скорректированное значение необходимо подставить в используемый алгоритм расчета скорости ветра:

$U_{10} = U_{10}(\sigma_{ucn}^0)$ . Используемый в данной работе алгоритм, (Рисунок 5 (а)) может быть аппроксимирован линейной функцией. Тогда, окончательное выражения для расчета ветра в прибрежной зоне имеет вид:

$$(U_{10})_{ucn.} = -3.12 \sigma_{ucn.}^0 + 49.6 \quad (12)$$

С помощью этой коррекции получается более точная оценка скорости ветра в прибрежном районе в условиях развивающегося волнения.

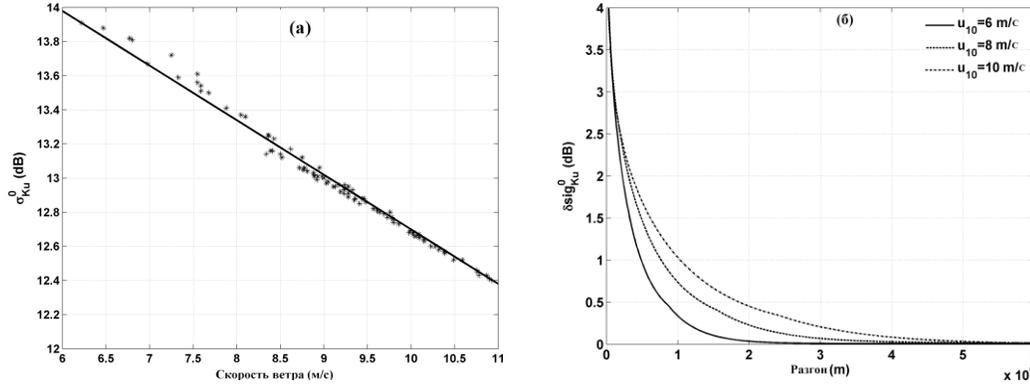


Рисунок 5 – (а) Эмпирическая зависимость между альтиметрической УЭПР *Ku*-диапазона и ветром для Jason-2; (б) Модельный расчет разницы УЭПР *Ku*-диапазона морской поверхности при конечном и бесконечном разгоне волн для скорости ветра 6 м/с (сплошная линия), 8 м/с (пунктирная линия), и 10 м/с (штрих – пунктирная линия).

**В разделе 2.8** приводятся результаты анализа данных альтиметрических измерений по развитию волн в прибрежной зоне в условиях пространственной неоднородности поля ветра. Анализ основан на полу-эмпирической модели развития волн.

**В разделе 2.8.1** приведено уравнение для расчета развития волн при переменных ветрах. С учетом обобщения теории подобия, представленного в работе (Kudryavtsev et al., 2015), уравнение пространственно-временного развития частоты спектрального пика волн имеет вид:

$$\frac{\partial \omega_p}{\partial t} + c_g \frac{\partial \omega_p}{\partial x} = \left(\frac{g}{U_{10}}\right)^2 \varphi(\alpha) \quad (13)$$

где  $\omega_p$  – частота спектрального пика,  $c_g$  – групповая скорость волн,  $U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м,  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\varphi(\alpha)$  – безразмерная универсальная функция возраста волн. Для стационарных условий это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} = q \omega^{(1-1/q)} \frac{g^{1+1/q}}{U_{10}^{2+1/q}} c_q^{1/q} \quad (14)$$

где  $c_q = 21.99$  и  $q = -0.33$  (Hasselmann et al., 1973; Badulin et al., 2007). Изменение частоты спектрального пика вычислялось с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка (Chen and Delin Z., 2012).

Общая безразмерная энергия волн может быть определена через частоту спектрального пика, являющейся решением уравнения (14). Соотношение энергии волн ( $e$ ) и высоты значимых волн ( $H_s$ ) определяется как:  $H_s = 4\sqrt{e}$ . Безразмерная энергия рассчитывается с помощью безразмерной частоты пика как:

$$\tilde{e} = c_e c_q^{q/p} \tilde{\omega}^{p/q} \quad (15)$$

где эмпирические константы JONSWAP –  $c_e = 1.6 \times 10^{-7}$ , а  $p = 1.0$ , безразмерная частота –  $\tilde{\omega}_p = \omega_p u / g$ , безразмерная энергия –  $\tilde{e} = e g^2 / u^2$ .

**В разделе 2.8.2** приведен анализ наблюдения энергии волн. В этой части работы демонстрируется применение описанного выше подхода для различных случаев.

Первый случай – проход № 118 спутника Jason-2 за 8 марта 2013 над Персидским заливом (Рисунок 6 (а)). Персидский залив находится под воздействием ветра (местное название – «шималь»), который дует с северо-запада, его направление приблизительно совпадает с траекторией альтиметра. Рисунок 6 (а) показывает эволюцию высоты значимых волн с использованием обобщения теории подобия для полностью развитого волнения, скорость приводного ветра по данным альтиметра, а также откорректированную скорость ветра вдоль трека альтиметра. Представленный сегмент альтиметра, таким образом, соответствует 400 км между первым и последним измерениями. На этом расстоянии высота значимых волн вырастает с 0.3 м до примерно 2 м. Скорость приводного ветра, восстановленная по данным альтиметра, увеличивается с 4 до 10.5 м/с. Используя эмпирическую зависимость развития ветрового волнения, мы получили реальный ветер с помощью предложенного алгоритма коррекции ветра в прибрежной зоне (Рисунок 6 – точки вдоль пунктирной линии).

Другой случай – проход № 207 спутника Jason-2, 24 декабря 2013 года в Аравийском море. На Рисунке 6(б) показаны данные измерения альтиметра и результаты моделирования ветровых волн с разгоном 400 км в Аравийском море. В этом случае волны растут с 0.3 м до 2.4 м, а скорость ветра по альтиметрическим данным увеличивается с 3 до 10 м/с, но реальный ветер, полученный с помощью модели радиолокационного отражения, меняется с 6 до 10 м/с.

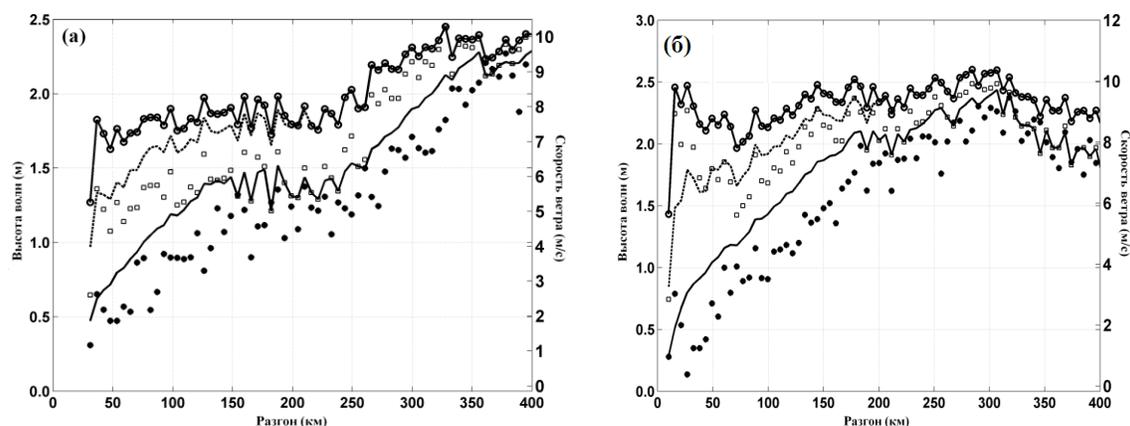


Рисунок 6 – (а) Спутник Jason-2, проход № 118 за 8 марта 2013 в Персидском заливе; (б) Jason-2, 207-й проход за 24 декабря 2013 года в Аравийском море;  $H_s$  по данным альтиметра (символы ●);  $H_s$  по модели (сплошная линия);  $H_s$  по теории Пирсона-Московица (символы □); откорректированный ветер (точки вдоль пунктирной линии, ⊖); исходный стандартный альтиметрический ветер (пунктирная линия), правая ось.

Результаты анализа показывают, что использование обобщенной теории подобия является простым и подходящим методом при расчете эволюции ветровых волн при меняющемся ветровом воздействии в прибрежной зоне.

В разделе 2.9 приведено сравнение измерения альтиметрии с измерением буга для высот и периода волны с помощью теории Гомменджингера (Gommenginger et al., 2003), Бадулина (Badulin, 2014) и закона разгона. В рамках нашего подхода период волны может оцениваться на основе измеренных  $H_s$  и с использованием  $\alpha = 0.84 \times (\tilde{H}_s / 0.26)^{-0.6}$  так:

$$T_p = \frac{2\pi U_{10}}{0.84g} \left( \frac{\tilde{H}_s}{0.26} \right)^{0.6} \quad (16)$$

В Таблице 2 представлен период волны ближайший к платформе, по разным методикам. В этих случаях уравнение 16 (закон разгона) лучше, чем другие методы, может оценивать период высоты значимых волн.

Таблица 2 – Периоды волн, ближайших к бую AD06 ( $18.814^\circ N$ ,  $67.095^\circ E$ ), по разным методикам за 26 января 2013 и за 24 декабря 2013 гг.

Дата	Высота волны (м)		Период волны (с)				Расстояние от буга (км)
	Буй	Альтиметр	Буй	Закон разгона (уравнение 16)	Gommenginger et al., 2003	Badulin, 2014	
20130126	1.2	1.1	4.4	4.6	4.7	5.4	~ 99
20131224	1.9	2	5.2	6.3	6.18	6.5	~ 38

**В третьей главе** приводятся результаты исследования генерации волн в тропических циклонах на основе альтиметрических измерений и моделирования. В качестве модельного инструмента выбрана упрощенная модель генерации волн, основанная на теории подобия развития волн, предложенная в работе (Kudryavtsev et al., 2015). В работе Кудрявцева и др. было смоделировано пространственное распределение энергии волн в переднем правом и заднем левом (по ходу движения) секторах тропических циклонов, а в данной работе пространственное распределение энергии волн тропического циклона моделируется для случаев, когда траектория альтиметра пересекает тропический циклон в произвольном направлении.

**В разделе 3.1** описан набор данных из архива Tropical cyclone best-track data set объединенного американского военно-морского центра (JTWC) в Индийском океане за 2003–2014 г. и исходная база двухчастотных альтиметрических данных Jason-1 и Jason-2.

**В разделе 3.2** описано наблюдение энергии волн в тропических циклонах и их анализ в терминах теории подобия волн. Эффективный разгон определяется как  $x_{эф} = (u_{наб}^2 / g)(\tilde{e}_{наб} / c_e)^{1/p}$  где  $u_{наб}$  и  $\tilde{e}_{наб}$  – наблюдаемая скорость ветра, и наблюдаемая энергия волн,  $c_e = 4.41 \times 10^{-7}$  и  $g$  – ускорение свободного падения. При отсутствии движения циклона эффективный разгон волн определяется как  $x_{эф} = \sqrt{2} r$ , где  $r$  – расстояние от центра циклона до точки альтиметрических измерений. Отклонение измеренной энергии от фоновой зависимости (не учитывающей движение циклона) интерпретируется как влияние эффекта захвата волн циклоном.

**В разделе 3.3** описана модель генерации волн тропическим циклоном, предложенная в (Kudryavtsev et al., 2015). В этой модели безразмерный разгон волн, связанный с радиусом,  $\tilde{l}_r = \sqrt{2} r g / u_r^2$ , и критический разгон

$$\tilde{L}_{cr} = -c_\alpha^{-1/q} \frac{q}{1+q} \alpha_T^{1/q} \quad (17)$$

где  $q$  и  $c_\alpha$  – константы,  $\alpha_T = u(r) / 2V_{||}$  – обратный возраст захваченных волн,  $V_{||}$  – проекция скорости перемещения циклона на траекторию развития волн, играют важную роль в генерации ветровых волн тропическим циклоном.

Распределению параметров волн вдоль радиуса ОВ (на рисунке 7), обратный возраст волны ( $\alpha_r = \omega_p u(r) / g$ ) и безразмерная энергия ( $\tilde{e}_r = e_r g^2 / u(r)^4$ ), определяются из решения уравнений:

$$(\alpha_r / \alpha_{0r})^{1/q} [1 - (1-q)^{-1} \alpha_r / \alpha_T] = 1 - \frac{\tilde{L}_{cr}}{\tilde{l}_r} \quad (18)$$

$$\tilde{e}_r / \tilde{e}_{0r} = (\alpha_r / \alpha_{0r})^{p/q}$$

где  $\alpha_{0r} = c_\alpha \tilde{l}_r^q$  и  $\tilde{e}_{0r} = c_e \tilde{l}_r^p$  – ожидаемые (фоновые) значения возраста волн и энергии для стационарного тропического циклона (когда  $V = 0$ ). В отличие от работы (Kudryavtsev et al., 2015), здесь предполагается, что уравнение (18) может быть



Сплошная линия – аналитическая модель (Kudryavtsev et al., 2015). Маленькие открытые кружки показывают усиление коэффициент рассчитанного по данным альтиметра для тропических циклонов в северной части Индийского океана, большие открытые в южной части Индийского океана.

**В разделе 3.4** приведен анализ распределения энергии волн вдоль траектории альтиметра для тропических циклонов, PHET (03 июня 2010), BENILDE(29 декабря 2011), MAHASEN (13 мая 2013), ALENGA (09 декабря 2011), и 05 A (28 ноября 2011).

На Рисунке 9 представлен тропический циклон MAHASEN в северной части Индийского океана. Во время пересечения альтиметром траектории циклона (в 02:08:37 UTM) 13 мая 2013 года положение шторма находится в 11.4 N, 86,5 E. В это время давление в центре циклона было 989 гПа с поступательным движением 3 (м/с), а радиус максимальной скорости ветра циклона – 45мм.

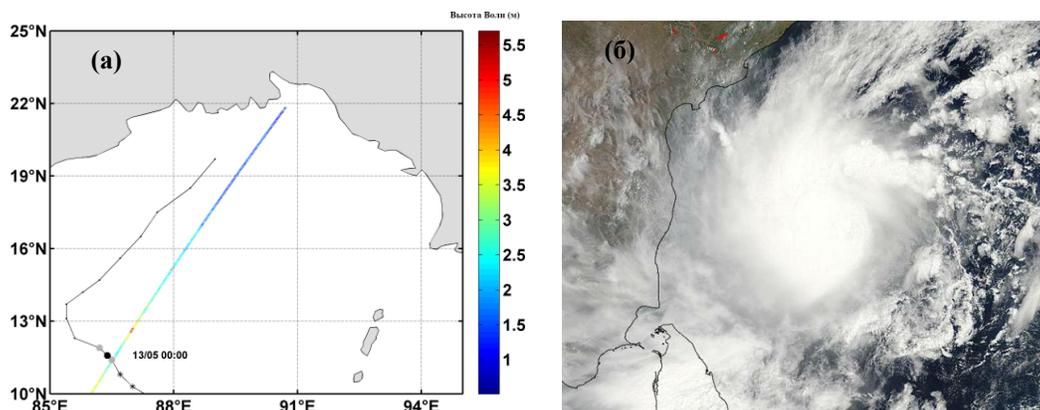


Рисунок 9 – Траектория движения тропического циклона MAHASEN в Бенгальском заливе по данным (JTWC) и спутника Jason-1(цветная линия), 13 мая 2013, 02:08:37 UTC, положение центра тропического циклона (черный кружок) и интерполированные на интервале 6 ч позиции центра циклона (черная линия с маленьким кружкам) (б) его изображения (MODIS, 2013.05.13 07 UTC).

Альтиметрическая скорость ветра, альтиметрическая значимая высота волн, а также сглаженная скорость ветра, которые используются в теоретической модели для тропического циклона MAHASEN показаны на Рисунке 10(a). Рисунок 10 (б) иллюстрирует распределение измеренной энергии волн вдоль альтиметрического трека, а также модельные расчеты для тропического циклона MAHASEN. Отклонение измеренной энергии модели (сплошная линия), от фоновой энергии волн, при  $V=0$ , (пунктирная линия) относится к эффекту захваченных волн.

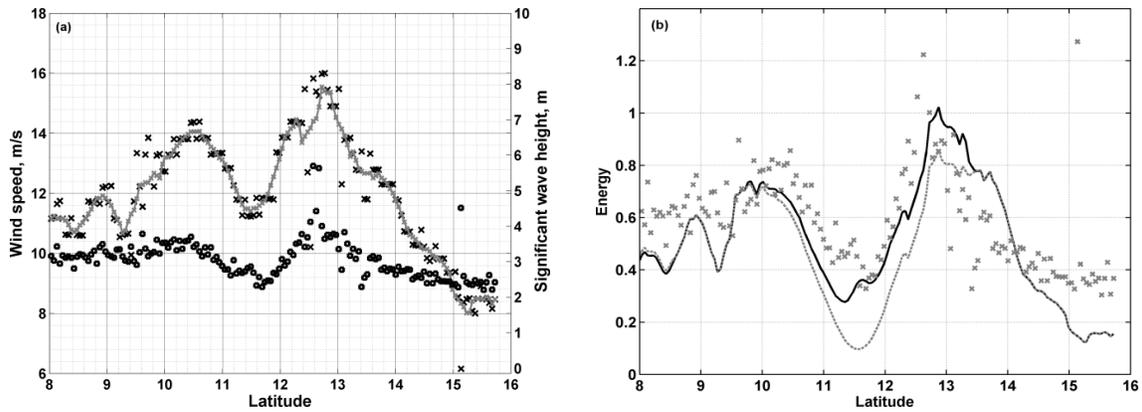


Рисунок 10 – Тропический циклон MAHASSEN: (а) Альтиметрическая скорость ветра вдоль трека альтиметра (символы ×), сглаженная скорость ветра (серая линия), альтиметрическая значимая высота волн (символы •); (б) Альтиметрическая энергия волны (символы ×), профиль модельной энергии волны по ур. (18) с использованием альтиметрической скорости ветра (сплошная линия), и фоновая энергия волны для стационарного циклона (пунктирная линия).

Рисунок 11(а) показывает альтиметрическую скорость ветра и значимую высоту волн, а также сглаженную скорость ветра, которая используется в теоретической модели для тропического циклона ALENGA вдоль трека альтиметра. На Рисунке 11(б) приведена энергия ветровых волн по данным альтиметрических наблюдений и распределение энергии захваченных волн по модели для тропического циклона ALENGA. В этом случае также наблюдается удовлетворительное соответствие модельной энергии и данным наблюдений.

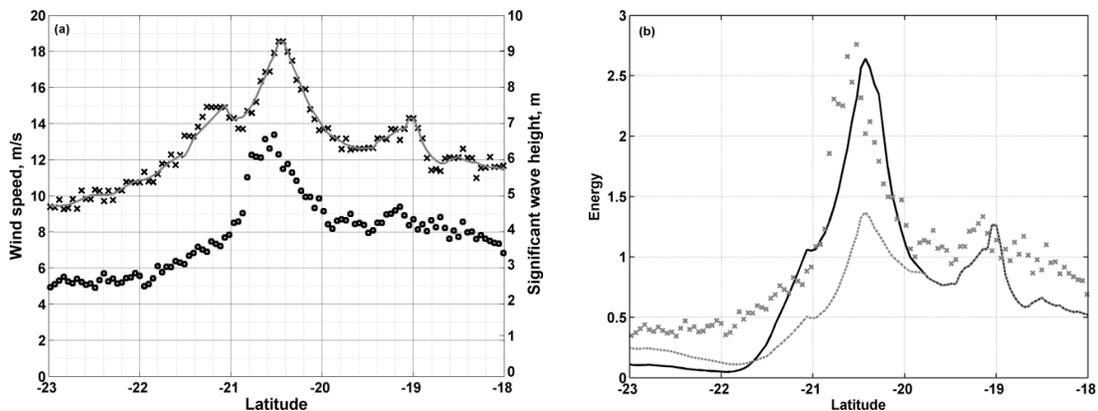


Рисунок 11 – Тропический циклон ALENGA, так же как Рисунок 10.

Достоверность модельного расчета энергии волн в тропических циклонах оценивается с использованием среднеквадратического отклонения и статистического смещения для 10 тропических циклонов в Индийском океане. Оценки подтверждают, что чем выше скорость движения циклонов, тем лучше корреляция между наблюдениями и оценками по модели. В целом для тропических циклонов среднеквадратическое отклонение составляет около 30% со

смещением 0.1. Поэтому, модель может моделировать энергию волн в тропических циклонах в Индийском океане с точностью около 1 м.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

- На основе архивных альтиметрических измерений волн и ветра с октября 2009 до декабря 2015 года, проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости полей ветра и волн в северной части Индийского океана. Установлено, что наиболее интенсивная изменчивость скорости ветра наблюдается в юго-западном районе Аравийского моря и в центральном районе Бенгальского залива и интенсивная изменчивость волн наблюдается в центральном районе Аравийском море и в северном районе Бенгальского залива, что объясняется влиянием сезонных муссонов в Индийском океане. При этом, сезонные и межгодовые аномалии в Аравийском море выражены более ярко, чем в Бенгальском заливе.
- Показано, что применение стандартных алгоритмов восстановления скорости ветра в прибрежной зоне по данным альтиметрических измерений приводит к значимым систематическим ошибкам, связанным с влиянием развития ветрового волнения на отраженный радиолокационный сигнал.
- На основе моделирования отраженного радио-сигнала в поле развивающегося волнения, предложен метод коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов, позволяющий существенно улучшить точность восстановления скорости ветра в прибрежных зонах, который может быть в дальнейшем использован в оперативной практике.
- Исследованы особенности развития ветрового волнения в прибрежной зоне в условиях пространственной изменчивости ветра на основе альтиметрических измерений и моделирования с использованием полу-эмпирической модели ветрового волнения. Предложенный подход может найти свое широкое применение в прибрежных исследованиях.
- На основе альтиметрических измерений исследованы особенности пространственного распределения энергии волн в тропических циклонах, получены экспериментальные подтверждения эффекта захвата волн движущимися циклонами, приводящие к значимому усилению волн в правом секторе циклона.
- Проведено моделирование данных измерений волн в тропических циклонах с использованием полу-эмпирической модели волн, показавшее ее работоспособность и перспективность ее использования как инструмента предсказания генерации аномально высоких волн.

## Список литературы

1. Белоненко Т.В. и Кубряков А.А. Временная изменчивость фазовой скорости волн Россби в Северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 9 – 18.
2. Лебедев А. С. Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 72 – 85.
3. Badulin, S. I. A physical model of sea wave period from altimeter data. //Journal Geophysical Research Oceans. 2014. Vol. 119. 856–869. <http://dx.doi.org/10.1002/2013JC009336>.
4. Badulin, S. I., A. V. Babanin, V. E. Zakharov, and D. Resio Weakly turbulent laws of wind-wave growth // Journal of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 591. 339 – 378. doi:10.1017/S0022112007008282.
5. Bjornsson H. Silvia A. V. A manual for EOF and SVD analyses of climate data // McGill University, CCGCR Report No. 97-1. Montréal, Québec. 1997. 112 – 134.
6. Chapron, B. K., Katsaros, Elfouhaily T., and Vandemark D. A note on relationships between sea surface roughness and altimeter backscatter // Remote Sensing and Global Modelling. 1995. p. 869 – 878.
7. Chen G., Chapron B., Ezraty R., and Vandemark D. A Global View of Swell and Wind Sea Climate in the Ocean by Satellite Altimeter and Scatterometer // Journal of Atmosphere and Oceanic Technology. 2002. Vol. 19. 1849 – 1859.
8. Chen T., Delin Z. On a general formula of fourth order runge-kutta method // Journal of Mathematical Science and Mathematics Education. 2012. Vol. 7.2, pp. 1 – 10.
9. Eduardo de Farias, GG, João A. Lorenzetti, and Chapron B. Swell and wind-sea distributions over the mid-latitude and tropical north Atlantic for the period 2002–2008 // International Journal of Oceanography. 2012. 8 Mar 2012.
10. Elfouhaily, T., Chapron, B., Katsaros, K., & Vandemark D. A Unified Directional Spectrum for Long and Short Wind-Driven Waves // Journal of Geophysical Research. 1997. Vol. 102. 15781 – 96.
11. Elfouhaily, T., Vandemark, D., Gourrion, J., & Chapron, B. Estimation of wind stress using dual-frequency TOPEX data // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. Issue C11. 25101 – 25108.
12. Gommenginger, C. P., Srokosz, M. A., Challenor, P. G., and Cotton, P. D. Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model. // Geophysical Research Letter. 2003. No. 30(22).
13. Gourrion J., Vandemark, D., Bailey S., Chapron B., Gommenginger G. P., Challenor P. G., & Srokosz M. A. A two parameter wind speed algorithm for Ku-band altimeters // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. No. 19. p. 2030–2048.
14. Hasselmann, Klaus, T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the

Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Deutches Hydrographisches Institut. 1973. 8(12):95.

15. Karaev, V. Yu, et al. The concept of a microwave radar with an asymmetric knifelike beam for the remote sensing of ocean waves. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 22.11 (2005): 1809 – 1820.
16. Kudryavtsev, V., Golubkin, P. and Chapron, B. A simplified wave enhancement criterion for moving extreme events // *Journal Geophysical Research Oceans*, 2015. No. 120 p. 7538 – 7558.
17. Pierson, Willard J., and Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii // *Journal of geophysical research*. 1964. No. 69. p. 5181 – 5190.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях из списка ВАК:

1. **Фарджам** Х., Б. Шапрон Особенности поля ветра в северной части Индийского океана на основе анализа данных NCEP за период 2010-2014 // *Учёные записки РГГМУ*, 2015, №. 39. С. 142 – 148.
2. **Фарджам** Х., Б. Шапрон Климатология зыби и ветровых волн в северной части Индийского океана на основе спутниковых альтиметрических данных // *Общество. Среда. Развитие*, 2014 № 4. С. 182 – 189.
3. **Farjami H.**, P. Golubkin, B. Chapron, Impact of the sea state on altimeter measurements in coastal regions, *Remote Sensing Letter*, 2016, 7(10), 935 – 944. DOI:10.1080/2150704X.2016.1201224.
4. **Фарджам** Х., Голубкин П.А., Кудрявцев В.Н. Развитие ветровых волн в прибрежных зонах при переменных ветрах. Пример: в Персидском заливе и в Аравийском море // *Учёные записки РГГМУ*, 2016, в печати.

Другие публикации:

1. **Farjami H.**, V. Kudryavtsev, B. Chapron. Surveying sea surface dynamic of Indian ocean with using of satellite altimetry data. 7<sup>th</sup> Scientific Conference of Iranian Students in the Russian Federation, Moscow, Russia, April 2014, P. 45.
2. **Farjami H.**, V. Kudryavtsev, B. Chapron Assessment energy of wind-driven waves in the Arabian sea by satellite altimetry. Doctoral School of Energy and Geotechnology II, Parnu, Estonia, 12-17 January 2015, P. 67-69.
3. **Farjami H.**, V. Kudryavtsev, B. Chapron Investigation of wind waves energy in the north of Indian ocean by using satellite altimetry data. Abstracts of 8<sup>th</sup> Scientific Conference of Iranian Students in the Russian Federation, 25-26 April 2015, St. Petersburg, Russia, P. 34.