



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГЦ РАН)**

ул. Молодежная, д. 3, г. Москва, 119296
Тел.: +7 (495) 930-05-46; факс: +7 (495) 930-05-06; e-mail: gcras@gcras.ru
ОКПО 02699240, ОГРН 1037739048489, ИНН/КПП 7736053773/773601001

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по науке
ФГБУН Геофизический центр РАН,
профессор РАН, д.ф.-м.н.,
А.А. Соловьев



13 сентября 2016 г.

**ОТЗЫВ
ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Хоссейна Фарджами «*Особенности поля ветровых волн в Индийском океане по данным спутниковых альтиметрических измерений*», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – «Океанология»

Актуальность темы работы не вызывает сомнений. Во-первых, это выбор района исследований. В развитии судоходства Индийский океан уступает Атлантическому и Тихому, но по объемам перевозки нефти он превосходит их. Персидский залив – главный нефтеэкспортный район мира, отсюда начинается большой грузопоток нефти и нефтепродуктов.

Во-вторых, использование данных дистанционного зондирования, в частности спутниковой альтиметрии, позволяет провести объективный анализ пространственно-временной межгодовой и сезонной изменчивости полей скоростей приводного ветра и значимых высот ветровых волн.

В-третьих, автор справедливо указывает на то, что готовые продукты обработки данных спутниковой альтиметрии (уровня L3 и/или L4) не могут быть корректно использованы при анализе пространственно-временной изменчивости

полей скоростей приводного ветра и значимых высот ветровых волн в прибрежной зоне, а также при исследовании пространственного распределения высот волн, генерируемых движущимся тропическим циклоном.

Основной **целью** работы является исследование сезонной и межгодовой изменчивости полей приводного ветра и ветровых волн как на акватории Индийского океана, так и в прибрежных районах, а также пространственное распределение энергии волн в тропических циклонах. Для достижения поставленной цели решалось 5 научных задач, с которыми автор успешно справился.

Научная новизна работы следует из применения данных дистанционного зондирования (спутниковой альтиметрии) к исследованию ветрового режима и режима волнения в различных акваториях Индийского океана.

Впервые показано, что наиболее интенсивная изменчивость скорости приводного ветра наблюдается в юго-западной части акватории Аравийского моря и в центральной части акватории Бенгальского залива. В то же время наиболее интенсивная изменчивость значимых высот ветровых волн наблюдается в центральной части акватории Аравийского моря и в северной части акватории Бенгальского залива.

Автором доказано, что применение стандартных алгоритмов обработки данным альтиметрических измерений для расчётов модуля скорости приводного ветра в прибрежной зоне дает значительную систематическую ошибку, связанную с влиянием развитого ветрового волнения на форму отраженного импульса альтиметра.

На основе полуэмпирической модели отражения зондирующего импульса альтиметра от морской поверхности в условиях пространственной неоднородности развивающегося ветрового волнения, автором разработан уникальный метод коррекции стандартных алгоритмов обработки данных альтиметрических измерений, позволяющий существенно улучшить точность расчета модуля скорости ветра в прибрежных зонах.

В работе впервые исследованы особенности пространственного распределения энергии волн в тропических циклонах Индийского океана, выраженные в эффекте захвата волн движущимися циклонами, то есть в значительном усилении энергии волн в их правом секторе.

Практическая и научная значимость работы также не вызывает сомнений. Выявленные пространственно-временные закономерности ветрового режима и режима волнения в северной части Индийского океана могут быть использованы для обеспечения безопасности мореплавания и строительства объектов береговой инфраструктуры (порты, нефтеналивные терминалы и т.д.), а также служить основой для научно обоснованного планирования и проведении натурных экспериментов.

Разработанный автором метод коррекции стандартного алгоритма обработки данных альтиметрических измерений для восстановления модуля скорости приводного ветра в прибрежных зонах, может быть внедрен в практику улучшения готовых продуктов обработки данных спутниковой альтиметрии (уровня L3 и/или L4).

Установленные закономерности и модель генерации волн тропическим циклоном могут быть использована для моделирования и предсказания

экстремальных явлений в различных частях акватории как Индийского, так и Мирового океана.

Предложенный метод анализа поля приводного ветра и волн на основе спутниковых альтиметрических измерений может быть использован при решении задач обеспечения безопасности и повышения экономической эффективности судоходства в открытых и прибрежных водах Мирового океана.

На защиту автором выносятся 5 положений:

1. *«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»;*
2. *«утверждение о значимых систематических ошибках определения скорости ветра в прибрежной зоне по данным альтиметрических измерений при использовании стандартных алгоритмов, и выявление причин их возникновения»;*
3. *«метод коррекции стандартных альтиметрических алгоритмов, позволяющий существенно улучшить точность восстановления скорости ветра в прибрежных зонах»;*
4. *«особенности развития ветрового волнения в прибрежной зоне в условиях пространственной изменчивости ветра, установленные на основе альтиметрических измерений и моделирования»;*
5. *«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 работы опирается на тот факт, что научные результаты получены на основе анализа большого массива данных спутниковых альтиметрических измерений (2009–2015), которые можно считать статистически обеспеченными. Основные результаты и выводы, полученные в диссертации, опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, обсуждались на 5-ти международных и российских конференциях и семинарах.

Личный вклад автора в представленные в работе научные результаты сомнений не вызывает, так как он принимал участие на всех этапах исследования от постановки задачи до анализа результатов, в разработке и программной реализации, предложенных в работе методов и алгоритмов.

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников из 91 наименования, (из них 83 на зарубежные источники). Она содержит 106 страниц, включая 39 рисунков. Однако стоит отметить, что в списке литературы приведены не все ссылки, которые есть в тексте.

По теме диссертации автором опубликовано 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.

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

Замечания к Введению:

1. В описании актуальности темы нарушен порядок изложения. Но первое место необходимо было бы поставить актуальность выбора района исследований, а потом – необходимость использования данных дистанционного зондирования. Уточнение уровня обработки данных спутниковой альтиметрии «*Level-3 и/или Level-4*» во введении излишне. Более того далее в тексте работы не дается описание данных продуктов результатов обработки спутниковых альтиметрических измерений.
2. Положения, выносимые на защиту, сформулированы расплывчато.
3. Описание подробной структуры работы, которая включает описание не только глав, но и разделов, более характерна для автореферата, а не для текста диссертационной работы.
4. Во введении было бы не лишним четко описать данные, которые использовались в работе. Не понятно, для какого продукта обработки данных спутниковой альтиметрии проводилась коррекция.

В **Первой главе** «*Поле ветра и поверхностных волн в северной части Индийского океана*» подробно описана важная роль ветра и ветрового волнения во взаимодействии атмосферы и океана; в переносе загрязнений в прибрежных районах; в проектировании объектов береговой инфраструктуры, судоходства и навигации, рыболовства, военной отрасли; а также при изучении изменения климата. Рассматривается классификация ветровых волн по Давидану и преимущества различных данных дистанционного зондирования, предоставляющих информацию о поле приводного ветра и ветрового волнения.

В этой главе подробно описана история развития спутниковой альтиметрии и представлен обзор литературы по алгоритмам расчета скорости приводного ветра и высот волн с помощью спутникового альтиметра (раздел 1.1).

Отдельный раздел главы (раздел 1.2) посвящен описанию ветрового режима северной части Индийского океана, который определяется главным образом пассатами и муссонами, являющимися главной причиной образования тропических циклонов в данном регионе Мирового океана.

В главе подробно описаны используемые данные спутниковой альтиметрии (раздел 1.3) и методы их обработки (эмпирические ортогональные функции – ЭОФ) для исследования пространственно-временной изменчивости поля ветра (раздел 1.6) и ветровых волн в Аравийском море и Бенгальском заливе (раздел 1.7) по данным спутниковой альтиметрии с октября 2009 г. по декабрь 2015 г.

В разделе 1.4 данной главы приводятся характеристики приводного ветра в период зимнего и летнего муссона в северной части Индийского океана по данным реанализа NCEP/NCAR и значимых высот волн по данным спутниковых альтиметрических измерений за период с октября 2009 г. по декабрь 2015 г.

Анализу поля ветровых волн и зыби в период зимнего и летнего муссона зыби в разных частях северного Индийского океана (Аравийское море и Бенгальский залив), основанному на использовании полуэмпирических моделей расчета высот волн полностью развитого волнения Пирсона-Московица (Pierson and Moskowitz, 1964) и Хассельмана (Hasselmann et al., 1973), посвящен отдельный раздел первой главы (раздел.1.5).

Замечания к Первой главе:

5. Не понятно, почему для расчетов автор ограничился рассмотрением временно интервала с октября 2009 г. по декабрь 2015 г., а не с января 1993 г. по декабрь 2015 г., что позволяют данные спутниковой альтиметрии, тем более данные реанализа NCEP/NCAR (1 января 1948 – настоящее время).
6. Сравнение средних скоростей приводного ветра, рассчитанного по данным реанализа NCEP/NCAR, со средними высотами ветровых волн, рассчитанными по данным спутниковой альтиметрии, не совсем корректно. Во-первых, поля скоростей приводного ветра по данным реанализа представляют собой данные на регулярной сетке по времени и по пространству, и их осреднение не вносит дополнительных ошибок. Тогда как перед осреднением данные спутниковой альтиметрии переводятся на регулярную сетку по пространству (имеет место как интерполяция, так и экстраполяция в узлы регулярной сетки), что может вносить систематическую ошибку в процесс осреднения данных. Разумнее было бы сравнить средние поля высот ветровых волн, рассчитанные по данным реанализа, с результатами расчетов по данным дистанционного зондирования.
7. Для разложения по ЭОФ временной интервал необходимо брать кратный году, например с января 2009 г. по декабрь 2015 г. а не с октября 2009 г. по декабрь 2015 г., тогда основные моды можно связать с годовой, полугодовой и т.д. изменчивостью поля приводного ветра и высот ветровых волн.
8. Анализ временной изменчивости первых четырех мод разложения на ЭОФ скорости приводного ветра и ветровых волн, к сожалению, не может являться полноценным анализом сезонной и межгодовой изменчивости как это указано в разделах 1.6 – 1.7 и выводах к первой главе. Ни одна мода ЭОФ на прямую не связана с сезонной или межгодовой изменчивостью этих величин. Для этой цели следовало бы привлечь другие методы анализа временных рядов.

Во **Второй главе** «Альтиметрические измерения в прибрежных районах» ней рассматриваются законы развития ветровых волн как функции скорости ветра и безразмерного разгона, основанные на теории подобия (раздел 2.1) и описываются программ альтиметрических измерений спутников Jason-1, OSTM/Jason-2 и SARAL/AltiKa (раздел 2.2). Отдельный раздел (раздел 2,3) этой главы посвящен

описанию района исследования – Аравийскому морю и Персидскому заливу. Последний, по мнению автора работы, «может быть рассмотрен как «природная лаборатория» для анализа теории развития волн».

Расчет скорости приводного ветра по данным альтиметрических измерений в одном частотном диапазоне (например, в *Ku*-диапазоне, который используется в стандартных алгоритмах (Gourrion et al., 2002a and 2002b)) зависит от наличия волн зыби на отражающей поверхности. Сравнение результатов расчета скорости приводного ветра по данным альтиметрических измерений в двух частотных диапазонах позволяет исключить влияние волн зыби на удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) и повысить точности расчета скорости приводного ветра по данным спутниковой альтиметрии (раздел 2.4). Это подтверждается анализом результатов расчета высот ветровых волн, УЭПР и разности УЭПР для двухчастотных альтиметрических измерений (раздел 2.6), основанным на предложенной автором модели зависимости УЭПР от разгона ветра или от возраста волны при описании ветрового волнения с использованием спектра, предложенного Elfouhaily (1997) (раздел 2.5).

В разделе 2,7 автором предлагается оригинальный алгоритм расчета скорости приводного ветра в прибрежных зонах, который базируется на зависимости УЭПР при полностью развитом (неограниченный разгон) и развивающемся ветровом волнении (ограниченный разгон).

Далее в главе представлены анализ развитие ветровых волн при неоднородном поле ветра (раздел 2,8) и алгоритм расчёта высот ветровых волны при изменяющихся условиях ветрового воздействия. Этот подход может стать эффективным инструментом исследования ветровых волн и может широко использоваться для изучения ветрового волнения в прибрежных зонах.

В разделе 2.9 данной главы приведено сравнение расчета высот ветровых волн и периодов по данным альтиметрических измерений с измерениями на буях с помощью теории Гомменджингера и Бадулина (Gommenginger et al., 2003; Badulin, 2014) и закона разгона.

Замечания ко Второй главе:

9. Использование аббревиатуры *MSS* (*mean square slope*) для среднего квадратичного наклона поверхности, не очень удачно, так как аналогичная аббревиатура *MSS* (*mean sea surface*) используется для обозначения средней высоты морской поверхности.
10. В разделе 2.1 отсутствует описание переменных в формулах (2-1) и (2-2), что затрудняет понимание текста.
11. В разделе 2.2 повторяется описание программ альтиметрических измерений спутников Jason-1, OSTM/Jason-2 и SARAL/AltiKa, которые частично повторяют информацию раздела 1.1. Более логично объединить эти разделы в один.
12. Таблица 1. Приведенная в автореферате отнесена к разделу 2.3, тогда как в тексте работы она относится к разделу 1.4.

13. Раздел 2.3, посвящённый описанию района исследования – Аравийскому морю и Персидскому заливу, дополняет информацию раздела 1.4. Более логично объединить эти разделы в один.
14. Подпись под рисунком 2.3 находится на следующей странице после самого рисунка.
15. Вводимое автором понятие «альтиметрический ветер» (раздел 2.4) или «альтиметрическая скорость ветра» вводит читателя в заблуждение так как, по сути оно обозначает скорость приводного ветра, рассчитанную по данным спутниковой альтиметрии
16. В главе часто упоминается стандартный алгоритм расчета скорости приводного ветра по данным альтиметрических измерений в *Ku*-диапазоне (Gourrion et al., 2002a and 2002b), однако сам алгоритм не представлен. Это затрудняет специалистам широкого профиля понимание проводимой автором коррекции данного алгоритма.
17. Название раздела 2.8.2 «Анализ наблюдения энергии волн» не соответствует его содержанию, так как проводится анализ изменчивости значимых высот волн, а не их энергии.
18. Разработанный автором метод коррекции расчета высот ветровых волн по данным альтиметрических измерений (раздел 2.8) справедлив при условии, что ветер дует с берега, а разгон соответствует положению трека, по которому движется спутник, или близко к нему. Будет ли работать данный метод при других условиях?

Третья глава «Генерация волн тропическими циклонами в Индийском океане» посвящена результатам исследования генерации ветровых волн в тропических циклонах на основе моделирования и анализа альтиметрических измерений.

Для модельных расчетов автором выбрана упрощенная модель генерации волн, основанная на теории подобия развития волн (раздел 3.2), предложенная в работе (Kudryavtsev et al., 2015), в которой смоделировано пространственное распределение энергии волн в секторах (передний-правый и левый-задний сектора) тропических циклонов (раздел 3.3). В данной работе пространственное распределение энергии волн тропического циклона моделируется по данным о скорости приводного ветра, рассчитанного по альтиметрическим измерениям вдоль траектории движения спутника, которая пересекает тропический циклон в произвольном направлении.

В качестве исходной информации используется данные из архива Tropical cyclone best-track data set (положение центра 18 циклонов за 2003–2014 г, их размеры, величины давления в центре и на окраине) (раздел 3.1), результаты обработки данных двухчастотных альтиметрических измерений спутников Jason-1 и Jason-2 (скорость приводного ветра, высота ветровых волн) и результатов модельных расчетов (энергия ветровых волн, рассчитанная по сглаженной скорости приводного ветра из данных спутниковой альтиметрии, для движущегося и неподвижного циклона и энергия ветровых волн, рассчитанная непосредственно по данным спутниковой альтиметрии). Анализ этих данных для 4 тропических циклонов (1 циклон в Аравийском море, 1 – в

Бенгальском заливе и 2 – в юго-восточной части Индийского океана) (раздел 3.4) показал «захват» или усиление высоты ветровых волн и их энергии соответствующих секторов тропических циклонов.

Оценки, приведенные в работе подтверждают, что чем выше скорость движения циклонов, тем лучше соответствие модельных расчетов энергии ветровых волн и расчетов по данным альтиметрических измерений. В целом предложенная модель описывает энергию захваченных тропическим циклоном волн с высокой точностью.

Замечания к Третьей главе:

19. Аналогично замечанию 15 ко второй главе относительно понятиям *«альтиметрические измерения энергии волн»* и *«альтиметрические измерения высот значимых волн»*
20. В Таблице 3.1 многие параметры циклонов приведены на английском языке, что затрудняет для не специалистов ее понимание.
21. На рисунке 3.3а неплохо бы показать размеры тропического циклона РНЕТ для того, чтобы более четко показать увеличение высот ветровых волн на его «правой» периферии.
22. На рисунках 3.6–3,10 неплохо бы указать положение центра циклона по нормали к траектории движения спутника.
23. Непонятно как *«модель может моделировать энергию волн в тропических циклонах в Индийском океане с точностью около 1 м»* (раздел 3.4). На лицо несоответствие величины с ее размерностью.

В **заключении** автором сформулированы основные результаты работы (6 пунктов), которые объединяют в себе основные выводы по каждой главе, и на основе которых сформулированы положения, выносимые на защиту (5 положений).

Принципиально важно, что большинство отмеченных выше замечаний носит частный характер и лишь косвенно затрагивают основные научные результаты, многие из которых получены Хоссейном Фарджами впервые и могут рассматриваться как значительный вклад в достижения спутниковой океанологии. Другим подтверждением научной значимости является то, что результаты работы докладывались на большом количестве представительных различных российских и международных конференциях и семинарах.

Общий итог состоит в том, что диссертационная работа Хоссейна Фарджами «Особенности поля ветровых волн в Индийском океане по данным спутниковых альтиметрических измерений» является законченным научным исследованием, представляющим значительный научный интерес и высокое практическое значение, в котором существенно усовершенствована технология стандартных алгоритмов восстановления скорости ветра в прибрежных зонах по данным спутниковых альтиметрических измерений, осуществлено на новом уровне решение крупной научной задачи, а именно, выявлены, в том числе впервые, некоторые закономерности режима ветрового волнения в северной части Индийского океана. Диссертация Хоссейна Фарджами соответствует пункту 9 «Положения о

присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и содержит решение научной проблемы, имеющей важное экономическое значение.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, диссертационная работа отвечает всем требованиям ВАК, а ее автор достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.28 – «Океанология».

Диссертационная работа Хоссейна Фарджамии была обсуждена и одобрена на научном семинаре Лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ФГБУН Геофизического Центра РАН 09 сентября 2016 г. (протокол семинара № 3/16)

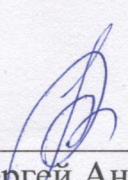
Отзыв подготовлен, доктором физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы», ведущим научным сотрудником Лаборатории геоинформатики и геомагнитных исследований ФГБУН Геофизического Центра Российской академии наук, Лебедевым Сергеем Анатольевичем.

д.ф.-м.н., ведущий научный
сотрудник Лаборатории
геоинформатики и геомагнитных
исследований ФГБУН

Геофизического центра РАН

119296, г. Москва. ул. Молодежная, д. 3, тел.: +7 495 930-56-39,

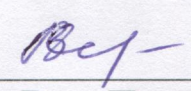
факс: +7 495 930-05-06, E-mail: s.lebedev@gcras.ru


Лебедев Сергей Анатольевич

Личную подпись Лебедева С.А. заверяю

Главный специалист по кадрам
ГЦ РАН




Дасаева Вера Петровна