

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу ПАНФИЛОВОЙ Марии Андреевны

«ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ, СКОРОСТИ
ПРИВОДНОГО ВЕТРА И ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО
ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ
ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Диссертационная работа Марии Андреевны Панфиловой посвящена разработке новых методических подходов для получения характеристик морской поверхности и приводного слоя атмосферы с помощью спутниковых дистанционных средств. Исследование построено на материалах миссий TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) и GPM (Global Precipitation Measurement), осуществлявших зондирование в Ku- и Ka-диапазонах при малых углах падения, не превышавших 18° . Полученные соискателем результаты также могут быть эффективно использованы при обработке данных функционирующего в настоящее время французско-китайского спутника CFOSAT (China-France Oceanography SATellite), что определяет хорошие перспективы развития защищаемой работы.

Актуальность исследования не вызывает сомнений в связи с широко ведущимися в мире работами по обеспечению глобального мониторинга Мирового океана с помощью дистанционных средств аэрокосмического базирования. Первостепенное внимание уделяется характеристикам морского волнения и приводного ветра. Получение этих характеристик по данным рассеяния зондирующего сигнала при малых углах падения может быть значительно затруднено низкой корреляцией измеряемого радиосигнала с восстанавливаемой характеристикой морской поверхности. В защищаемой работе предлагается оригинальный подход, позволяющий повысить качество измерений при малых углах падения с помощью учета зависимости УЭПР (удельной эффективной площади рассеяния) от угла падения. Использование такого подхода может рассматриваться как достойная альтернатива уже применяемым алгоритмам.

Научная новизна работы определяется предлагаемым новым подходом к измерению характеристик морской поверхности при малых углах падения. Измерения при нескольких углах падения позволяют оценить УЭПР при зондировании в надир. Такая характеристика оказывается более чувствительной, прежде всего, к дисперсии уклонов морской поверхности в определенном диапазоне длин морских волн, слабо зависящей от направления движения спутника относительно направления волнения. Близкий подход используется и при разработке методики оценки характеристик морского льда.

Теоретическая и практическая значимость работы обеспечивается тщательной проверкой предложенной модели на большом экспериментальном материале. Проведенное сопоставление с результатами, полученными другими средствами (скаттерометры, волномерные буи), позволяет рассчитывать на внедрение предложенного подхода в практику обработки спутниковых данных, по крайней мере, в качестве равноценной альтернативы. Теоретические предпосылки создания нового алгоритма обработки изначально не гарантировали работоспособность метода и требовали тщательной проверки. Такая проверка была успешно проведена соискательницей и ее соавторами.

Достоверность результатов подтверждается публикациями в высокорейтинговых научных журналах. Три статьи опубликованы в журналах первой четверти. Результаты работ обсуждались на национальных и российских конференциях. В работе использованы апробированные методы анализа данных и верификации результатов.

Апробация результатов была проведена на российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 6 статей, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Обсуждения результатов работ с автором не оставляют сомнений в ее определяющем личном вкладе в выполненные исследования.

Структура работы следует общепринятым стандартам: Введение, 5 глав, Заключение и два приложения. Работа содержит около полусотни рисунков, в списке литературы 112 названий. Следует отметить, что диссертация оформлялась с использованием LaTeX, что позволило автору избежать обычных технических погрешностей в нумерации формул, ссылках и т.п.. В то же время, известные проблемы работы BibTeX с кириллицей и стилем ГОСТ привели к нестандартному оформлению некоторых ссылок в списке литературы (ср. [90] и [91]), где используется разный порядок Авторы-Название).

Во **Введении** приводятся общие сведения о работе, формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Название **Главы 1** «Исторический обзор» не вполне точно отражает ее содержание. Основное место занимает изложение элементов теории электромагнитного рассеяния в приближении геометрической оптики. Обзор предшествующих исследований дается в разделе 1.3 в форме описания спутниковых миссий, данные которых будут использованы в работе. Также рассматриваются проблемы зондирования при малых углах падения, решение которых предлагается в диссертации. Следует отметить использование некоторых рисунков (1.3, 1.4, 1.6) без ссылок на первоисточник.

Глава 2 «Определение дисперсии уклонов по данным дождевого радиолокатора» представляет оригинальный подход, предлагаемый автором для решения проблемы зондирования при малых углах падения. Для более точного восстановления УЭПР рассматриваются измерения при нескольких значениях углов. По этим значениям проводится экстраполяция на нулевой угол (надир). Утверждается, что при таком подходе можно получить достоверную оценку, на которую слабо влияют шумы и направление трека спутника относительно направления ветра. Соответствующий алгоритм обработки данных подробно описан в разделе 2.1. В разделах 2.2, 2.3 проведено моделирование рассеяния от шероховатой поверхности. Одна из целей моделирования – показать, что предлагаемая оценка УЭПР в надире, полученная экстраполяцией угловых зависимостей, позволяет определить сумму парциальных дисперсий уклонов $\sigma_{tot}=(\sigma_x^2+\sigma_y^2)^{1/2}$. Следует отметить неудачность использования одного и того же символа σ и для УЭПР, и для волновых уклонов.

Примеры обработки данных в разделе 2.4 довольно убедительно демонстрируют работоспособность метода (см. рис.2.13). В разделе 2.5 предпринята попытка сопоставления данных измерений с результатами моделирования волнения с помощью модели WaveWatch3 для Персидского залива. Подобное сопоставление затрудняется

необходимостью экстраполяции данных моделирования в область коротких гравитационных и гравитационно-капиллярных волн. Кроме того, возникает проблема выбора пределов длин волн, влияющих на электромагнитное рассеяние. Выбранный предел длины волн 3 мм обеспечивает, как утверждает автор, необходимую точность аппроксимации, т.е. пригоден для решения задачи формально. Оппоненту хотелось бы видеть физическую аргументацию такого выбора. По-видимому, обоснование выбора предела интегрирования потребует дополнительного исследования.

Сопоставление результатов радарных измерений и моделирования на рис.2.17 определенно показывает различия функций источника ST4 и ST6. Подробные комментарии по этому важному вопросу были бы весьма уместны в работе.

Глава 3 «Определение дисперсии уклонов в области нефтяного слика» посвящена исключительно важной практической задаче мониторинга нефтяных загрязнений. Новая методика применена к данным, полученным во время известного инцидента 2010 г. в Мексиканском заливе. В качестве альтернативного источника для сравнения рассмотрены оптические данные спутника MODIS. Показано количественное соответствие радарных и оптических оценок уклонов волн. К сожалению, в этой главе отсутствует обзор работ по актуальнейшей тематике нефтяных загрязнений и методам их мониторинга. Такой обзор заметно усилил бы претензии автора на разработку и развитие оригинального метода оценки дисперсии уклонов волнения.

Глава 4 «Определение скорости ветра по данным радиолокатора Ku-диапазона» наряду с Главой 2 является существенной частью диссертационной работы. Важность ее определяется и практической стороной рассматриваемой проблемы, и необходимостью использования различных процедур калибровки и валидации разрабатываемых физических параметризаций. Это прекрасный повод для соискательницы продемонстрировать свои навыки в работе с большими массивами данных различных типов (спутников, волномерных буюв и т.п.), владение методами математической статистики. Следует признать, что с этой задачей автор справилась достойно.

Проблема оценки скорости ветра традиционно решается в спутниковой альтиметрии и скаттерометрии в форме разработки стандартного информационного продукта – параметризации скорости ветра на стандартном горизонте в терминах измеряемых характеристик рассеянного радиосигнала. Для дождевого радиолокатора такая задача разработчиками прибора не ставилась по описанным соискательницей причинам. Применяя использованный выше новый метод восстановления УЭПР при нулевом угле падения, автор последовательно реализует процедуру разработки физической параметризации путем сопоставления спутниковых данных с подспутниковыми измерениями, в данном случае, с волномерными буюями NDBC (National Data Buoy Center). В целом эта процедура следует известной работе Abdalla (2012). Существенным отличием является вид предлагаемой аппроксимации, которая содержит 4 свободных параметра в отличие от 9-параметрической зависимости Abdalla (2012). При этом новая зависимость представлена одной алгебраической функцией во всем изучаемом диапазоне, тогда как Abdalla (2012) предлагает сшивку двух функций в некоторой точке σ_b^0 . К сожалению, автор не поясняет из каких физических соображений выбирается вид зависимости (4.6). Еще одним отличием авторского подхода является выбор параметров коллокации 25 км и

15 минут против 40-70 км и 1 часа для измерений радара и волномерного бую, соответственно. Дополнительная валидация проведена по данным скаттерометра ASCAT и показала хорошее качество предложенной параметрической модели.

В разделах 4.5-4.7 качество модели обсуждается на примере измерений дождевого радара и скаттерометра ASCAT в Адриатическом море. Показано, что дождевой радар позволяет восстановить поле приводного ветра с приемлемой точностью на всей рассматриваемой акватории вплоть до прибрежной полосы 5 км. Возможность работы в прибрежной зоне – существенное преимущество дождевого радара в сравнении со скаттерометрами. Несмотря на то, что Глава 4, наряду с Главой 2, самая большая по объему, обсуждение ее существенных и практически значимых результатов неоправданно кратко, по мнению оппонента.

В **Главе 5** авторский подход развивается для задачи оценки положения ледовых полей. Данные, используемые в работе, позволяют применить разработанный подход для относительно низких широт менее 65° . В то же время, подход может быть использован для спутников с меньшим наклоном орбиты, что позволяет надеяться на хорошие перспективы его развития. Ближайшей задачей может быть работа с данными спутника CFOSAT, имеющего околополярную орбиту (предельная широта 82.5°). Автор предлагает использовать для характеристики подстилающей поверхности (вода/лед) эксцесс углового распределения УЭПР, т.е. отличие этого распределения от нормального. Сравнение с распределением сплоченности ледяного покрова по данным радиометра показало работоспособность метода. Возможным существенным преимуществом предложенного метода может оказаться слабая зависимость от абсолютных величин УЭПР, что снимает серьезную проблему интеркалибрации данных различных спутников.

В **Заключении** сформулированы выводы работы. Подробное обсуждение результатов работы и перспектив ее развития, к сожалению, отсутствует.

Работа не лишена досадных недостатков, часть которых была отмечена выше.

Ошибки и неточности оформления в работе практически отсутствуют, благодаря использованию LaTeX при верстке текста. Можно отметить лишь оформление списка литературы в разных стилях. Автор виновата в этом лишь отчасти. Кириллический BibTex в ряде случаев работает некорректно и, зачастую, требуется серьезная ручная доводка.

Формулировки по существу работы, требующие уточнения

1. Стр.5, абзац 2. Ссылка [11] требует уточнения. В работе Gourrion et al. (2002) рассмотрен двухпараметрический алгоритм восстановления скорости ветра по альтиметрическим данным, но не восстановление «по энергетике сигнала»;
2. Стр.5, последний абзац. Уместны были бы ссылки на недавние работы соотечественников по проблеме мониторинга нефтяных пленок, например, Ivonin, D. V., S. Skrunes, C. Brekke, and A. Yu. Ivanov (2016), Interpreting sea surface slicks on the basis of the normalized radar cross-section model using RADARSAT-2 copolarization dual-channel SAR images, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068282; Kudryavtsev, V., D. Hauser, G. Caudal, and B. Chapron (2003a), A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface: 1. Background model, *J. Geophys. Res.*, 108(C3), 8054, doi:10.1029/2001JC001003

3. На стр.6 «подход, основанный на исследовании угловой зависимости УЭПР». Формулировка представляется неудачной при описании ключевой, по мнению оппонента, особенности работы;
4. Стр.15 перед (1.6). Неудачные формулировки. По-видимому, детерминированность поверхности в данном контексте вторична. Условие (1.7) также должно выполняться вне зависимости от того, рассматривается детерминированная или статистическая модель;
5. Стр.36, строки 2-4. Насколько существенно предположение о гауссовости распределения? Где оно использовано?
6. Стр. 39, строка 1 снизу. Утверждение о равномерности распределения угла между направлением волнения и сканирования нуждается в аргументации;
7. Стр.40, строка 8. С чем связано изменение значения A в 2017 году? Что можно сказать о внутригодовой изменчивости A ?
8. Стр.48, абзац 3. Явление выполаживания спектра (или формирования вторичного пика) на частоте выше основного максимума хорошо известно (например, M. Zijlema, G. van Vledder, L.H. Holthuijsen, Ocean Eng. 2012; Badulin et al. Nonl.Proc.Geoph. 2005, fig.27). Привязка частоты отсечки к этой особенности спектра вряд ли оправдано, поскольку речь идет о длинах волн диапазона метры и первые десятки метров. Кроме того, автор не обсуждает вопрос о смешанном волнении, наличие второй системы волн также может объяснить вторичный пик;
9. Стр. 58-59/ф.3.2-3.8. Рассуждения представляются некорректными, поскольку автор предполагает, что спектр волнения на чистой воде и воде с нефтяной пленкой одинаков, что, в общем случае неверно. Требуется пояснение;
10. Стр. 69, строка 5 снизу. Чем обоснован выбор масштабов коллокации 25 км-15 минут?
11. Стр.78, строки 4-6. Как именно можно использовать развиваемую модель в альтиметрии? Уместно было бы подробное обсуждение;
12. Стр.91, конец 2 абзаца. Почему положение может быть определено с точностью до одного элемента, если окно осреднения 25 элементов, а дисперсия в гауссовой функции 5 элементов?

Терминологические и другие текстовые неточности

1. 4 стр., 4 строка. Выражение «...покрывают практически всю площадь Мирового океана...» нечетко, требует уточнений, поскольку, например, альтиметрические данные локализованы вдоль треков;
2. Стр.8, Практическая значимость, последний абзац. Следовало бы уточнить, что речь идет об экспресс-алгоритме, что отнюдь не умаляет ценности полученного результата;
3. Стр.7, положения, выносимые на защиту. Неудачные формулировки. №2. Что значит «определяется даже в тех областях полосы обзора, где исходный сигнал слабо коррелирует со скоростью ветра»? №3. Зависимость от чего? Выражение «зависимость... близка к измерениям» требует редакции;
4. Стр.21. «УЭПР при надире от направления ветра». УЭПР в надире?
5. Формула 1.9 Не определена функция $S(k)$;
6. Глава 1.2 Неудачные обозначения, использовавшиеся для других величин. Символ σ использован для УЭПР, уклонов волн и дисперсии (ф.2.6). Символ γ – параметр пиковатости спектров JONSWAP, коэффициента эксцесса (Глава 5);
7. Рис. 1.3-1.6. Отсутствуют ссылки на источники;
8. Стр.27, строка 13. Тип и возраст волнения не являются синонимами, как можно понять это выражение;

9. Стр.31, строка 3. «Пусть ось X направлена вдоль направления сканирования, ось Y - вдоль направления полета» Рисунок показывает иную ориентацию осей (полет по оси X);
10. Термин « $S(k)$ —всенаправленный спектр волнения» не является общепринятым;
11. Рис.2.9, 2.10. Для сравнения следовало бы сделать 2.9 с теми же пределами осей и того же размера, что 2.10;
12. Стр.42, абзац 2 снизу. Неверная формулировка. Дисперсия уклонов не есть интенсивность волнения;
13. Стр.45, последняя строка. Ссылка 90 представляется ошибочной, в этой работе не рассматривался вопрос об уточнении функции источника;
14. Стр.52, посл.строка. «Увеличение при угле... и уменьшение на краю полосы». Не очень хорошо объединять союзом «и» различные сущности;
15. Рис.4.10. Панели используют разные палитры, что затрудняет сравнение;
16. Формулы (4.10) для ошибки выглядят необычно. Нужны комментарии. Откуда $(p-2)$ для несмещенной оценки?
17. Стр.85, строка 2. Согласование в предложении;
18. Стр.91, начало абзаца «Для классификации типа подстилающей поверхности в направлении, перпендикулярном направлению движения», «Классификация в направлении, перпендикулярном...» - это неправильно. Классификация проводится не в направлении.

Отмеченные недостатки не снижают высказанной выше высокой оценки работы. Автор в достаточной степени овладела современными теоретическими и экспериментальными методами. Автору удалось сформулировать цели работы, отвечающие современному уровню исследований в области дистанционного зондирования Земли и получить новые результаты, имеющие важное практическое значение и перспективы дальнейшего развития.

Работа Панфиловой Марии Андреевны соответствует требованиям, установленным ВАК к кандидатским диссертациям, а сам соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29. – Физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент
 д.ф.м.н., гл.н.с, рук. Лаборатории
 нелинейных волновых процессов
 ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36
 +7(499) 124-75-65; e-mail: badulin.si@ocean.ru;
<http://www.ocean.ru>

Бадулин Сергей Ильич



15 сентября 2022г., Москва

Я, Бадулин Сергей Ильич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись доктора физ.-мат. наук С.И. Бадулина удостоверяю:

Верно

Зав. канцелярией ИО РАН

