



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Даниличевой Ольги Аркадьевны «Применение методов дистанционного зондирования для исследования изменчивости ветрового волнения и сликов на морской поверхности» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Работа выполнена в Отделе радиофизических методов в гидрофизике (отд. 220) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Ермаков Станислав Александрович, заведующий отделом ИПФ РАН, доктор физико-математических наук.

В 2019 г. соискатель ученой степени окончила магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки/ специальности 03.04.03 Радиофизика.

В период с 01.09.2019 по 31.08.2023 обучалась в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000008 от 10 июля 2023 года.

В период подготовки диссертации соискатель Даниличева Ольга Аркадьевна работала младшим научным сотрудником отдела радиофизических методов в гидрофизике (отд. 220) в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

### **Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации**

Основные результаты диссертации получены автором лично, либо при непосредственном участии: проведение ряда натурных, в том числе подспутниковых, экспериментов и обработка полученных данных по растеканию плёночных разливов на поверхности воды, по исследованию взаимосвязи между концентрацией хлорофилла и



радиолокационным сигналом и по модуляции радиолокационного рассеяния, вызванного ветровыми волнами; проведение и обработка данных лабораторных исследований влияния коротких ГКВ на деформацию плёнки; разработка физической модели, описывающей растекание плёночных сликов на взволнованной поверхности воды; поиск, обработка и анализ спутниковых радиолокационных изображений сложных сликовых структур на поверхности моря и длинных ветровых волн в присутствии льда; интерпретация полученных данных.

### **Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования**

1. В ходе натурных экспериментов, в том числе подспутниковых, по растеканию плёночных разливов в присутствии ветрового волнения впервые количественно изучен эффект вытягивания пленочных сликов в направлении скорости ветра. Показано, что продольный размер слика сильно зависит от скорости ветра и растёт со временем быстрее поперечного по отношению к направлению скорости ветра размера, последний при этом от скорости ветра практически не зависит.

2. С использованием данных лабораторного моделирования эффекта формирования стационарной границы плёнки за счет баланса градиента поверхностного натяжения и индуцированных гравитационно-капиллярными волнами напряжений, разработана физическая модель асимметричного растекания плёнок на водной поверхности с учетом таких напряжений. Показано, что ограничение скорости роста масштаба пленочного слика, поперечного по отношению к направлению ветра, со временем определяется балансом поперечных компонент индуцированных напряжений и сил, связанных с градиентом поверхностного натяжения вблизи границы слика, а рост продольного масштаба описывается в рамках гипотезы о “перетекании ПАВ” с боковых частей слика к его подветренной границе за счёт действия продольных компонент индуцированных волновых напряжений. Модель удовлетворительно описывает результаты выполненных натурных экспериментов по растеканию сликов.

3. В ходе комплексных радиофизических спутниковых экспериментов впервые зарегистрированы проявления толстых биогенных пленок, формирующихся в зонах высокой концентрации фитопланктона, которая характеризуется высокими значениями индекса FAI и концентрации хлорофилла-а, как областей повышенной яркости на оптическом спутниковом изображении. При этом получено, что, в отличие от оптических изображений, интенсивность радиолокационного рассеяния с ростом концентрации фитопланктона (а, следовательно, и хлорофилла-а) монотонно снижается.

4. По результатам анализа смещений сложных сликовых структур на последовательных спутниковых радиолокационных изображениях участка морской поверхности с использованием метода максимальной кросс-корреляции, восстановлено поле поверхностных течений и показано частичное соответствие геометрии сликов и структуры поля течений. Неполное соответствие может быть обусловлено как нестационарностью течений, так и низкой точностью определения компонентов скорости, направленных вдоль сликовых полос, что является недостатком метода максимальной кросс-корреляции. Показано, что использование специальной обработки - «отслеживания» локальных сликовых особенностей позволяет более корректно восстановить скорости поверхностных течений, что приводит к лучшему соответствию геометрии сликов и структуры течений.



5. На основе анализа результатов выполненных натуральных экспериментов по наклонному РЛ зондированию ветрового волнения при умеренных ветрах показано, что обратное рассеяние характеризуется наличием коротких пиков, связанных с острыми гребнями интенсивных, в т.ч. обрушивающихся, волн с длинами порядка и более единиц метров (ДВВ). При этом интенсивности пиков на VV и HH поляризациях оказываются близкими по величине, что свидетельствует о существенно небрэгговском характере рассеяния в областях обрушений, в областях вне гребней интенсивных ДВВ рассеяние можно охарактеризовать как близкое к брэгговскому. Величины доплеровских сдвигов для брэгговской компоненты ниже, чем для небрэгговской из-за значительного вклада в рассеяние “медленных” брэгговских волн. Показано, что степень подавления (контраст) брэгговской компоненты в области, занятой пленкой, выше, чем небрэгговской, при этом разница в доплеровских сдвигах для двух компонент возрастает.

6. На основе анализа радиолокационных изображений длинных ветровых волн, прошедших через зону фрагментированного льда, получены оценки коэффициента затухания этих волн, которые хорошо согласуются с известными из литературы данными контактных натуральных измерений.

#### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность научных результатов подтверждается соответствием теоретических результатов с данными натуральных экспериментов, а также физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями.

Научные результаты, изложенные в диссертации, с достаточной степенью полноты опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и докладывались на ряде российских и международных конференций.

#### **Практическая и теоретическая значимость результатов исследования**

1. Разработана физическая модель, описывающая динамику тонких плёночных разливов на морской поверхности, которая учитывает влияние ветровых волн на деформацию плёнки. Данная модель поможет улучшить существующие модели, ориентированные на прогнозирование распространения антропогенных загрязнений.

2. Результаты, полученные в ходе натуральных экспериментов по исследованию взаимосвязи между интенсивностью обратного радиолокационного рассеяния поверхности водоёма и концентрацией фитопланктона могут быть полезны для развития методов экологического мониторинга внутренних водоемов и прибрежных зон океана.

3. Исследование взаимосвязи между геометрией сликовых структур на поверхности моря и структурой поля поверхностных течений может выступать основой для дальнейшего развития методов корректной интерпретации спутниковых изображений сложных сликовых структур.

4. Результаты радиофизических экспериментов по исследованию обратного радиолокационного рассеяния от морской поверхности в присутствии длинных ветровых волн, в частности, исследование вклада небрэгговской компоненты в радиолокационный сигнал и понимание механизмов образования этой компоненты будет полезно, например, для разработки улучшенной комбинированной модели обратного радиолокационного рассеяния.



5. Возможность оценки затухания длинных энергонесущих ветровых волн и зыби на льду с помощью спутниковых радиолокационных данных позволит улучшить понимание процессов взаимодействия льда и океана, что поможет усовершенствовать модели климата и системы Земли в полярных широтах.

**Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук**

1. Хазанов Г.Е., Ермаков С.А., Доброхотов В.А., Лещев Г.В., Купаев А.В., Даниличева О.А. Исследование затухания гравитационных волн на фрагментированном льду. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. – Т. 20. – № 1. – С. 229-241.
2. Вострякова Д. В., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Даниличева О.А., Ермаков С.А. Лабораторное исследование компрессии поверхностно-активной пленки и трансформации ее границы под действием поверхностной волны //Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2023. – Т. 15. – №. 4. – С. 63–73.
3. Danilicheva, O., Sergievskaya, I., Ermakov, S., Shomina, O., Kupaev, A., & Kapustin, I. A. study of relation between non-Bragg microwave radar backscattering and decimeter-scale wind waves //Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2021. – SPIE, 2021. – Т. 11857. – С. 93-99.
4. Ermakov S., Danilicheva, O., Kapustin, I., Shomina, O., Sergievskazya, I., Kupaev, A., Molkov, A. Film slicks on the sea surface: their dynamics and remote sensing //IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2020. – P. 3545-3548.
5. Danilicheva O. A., Ermakov S. A., Kapustin I. A. Retrieval of surface currents from sequential satellite radar images //Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosm. – 2020. – V. 17. – P. 93-96.
6. Ermakov S. A., Danilicheva O., Kapustin I., Leschev G., Molkov A. Deformation of film slicks on the water surface. Experiment and model //Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2020. – V. 17. – №. 6. – P. 97-102.
7. Даниличева О. А., Ермаков С. А., Капустин И. А. О восстановлении поля поверхностных морских течений с использованием последовательных спутниковых радиолокационных изображений сликовых структур //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – №. 2. – С. 206. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-206-214
8. Ермошкин, А. В., Капустин, И. А., Даниличева, О. А., Поплавский, Е. И., & Русаков, Н. С. Исследование морфологических особенностей пленочных загрязнений на водной поверхности по данным радиолокационных наблюдений //Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – №. 64. – С. 48-57.
9. Ermakov S. A., Danilicheva, O.A., Kapustin, I.A., Molkov A.A. Drift and shape of oil slicks on the water surface //Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. – SPIE, 2019. – V. 11150. – P. 146-152. doi:10.1117/12.2533203
10. Danilicheva O. A., Ermakov S. A., Kapustin, I.A., Lavrova O.Y. Characterization of surface currents from subsequent satellite images of organic slicks on the sea surface //Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. – SPIE, 2019. – V. 11150. – P. 377-383. doi: 10.1117/12.2533448



11. Sergievskaya I. A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Molkov A.A., Danilicheva O.A., Shomina O.V. Modulation of dual-polarized X-band radar backscatter due to long wind waves //Remote Sensing. – 2019. – V. 11. – №. 4. – P. 423. doi:10.3390/rs11040423
12. Sergievskaya I.A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Danilicheva O.A. Particularities of radar backscattering associated with wave breaking on the sea surface //Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018. – SPIE, 2018. – V. 10784. – P. 139-145. doi:10.1117/12.2325708
13. Ermakov S.A., Kapustin, I.A., Molkov A.A., Leschev G.V., Danilicheva O.A. Remote sensing of evolution of oil spills on the water surface //Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2018. – SPIE, 2018. – V. 10784. – P. 117-122.

Работа аспиранта представляет высокую научную ценность. Материалы диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени, изложены полно. Ссылки на отдельные результаты, в том числе работы, выполненные аспирантом в соавторстве, оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.4. Радиофизика.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Применение методов дистанционного зондирования для исследования изменчивости ветрового волнения и сликов на морской поверхности» Даниличевой Ольги Аркадьевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения геофизических исследований по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Присутствовало на заседании 16 чел.

Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

протокол №4 от « 27 » июня 2023 г.



Шаталина Мария Викторовна,  
кандидат физико-математических наук,  
Учёный секретарь отделения геофизических  
исследований, н.с. отд. 260