



## Экспериментальное исследование затухания волн на поверхности воды, покрытой пластиковой пленкой, с использованием радиолокационных методов<sup>1</sup>

Ермаков С.А.<sup>\*,\*\*</sup>, Доброхотов В.А.<sup>\*</sup>, Лещев Г.В.<sup>\*</sup>, Даниличева О.А.<sup>\*</sup>,  
Хазанов Г.Е.<sup>\*</sup>, Купаев А.В.<sup>\*</sup>, Сергиевская И.А.<sup>\*,\*\*</sup>, Плотников Л.М.<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород

<sup>\*\*</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

### Введение

Как известно, поступление пластикового мусора (ПМ) в океан в последние десятилетия достигло угрожающего масштаба, представляя серьезную экологическую угрозу морским экосистемам. В этой связи проблема дистанционной, в частности, спутниковой диагностики ПМ в океане приобрела исключительную важность и широко обсуждается в литературе. В решении данной проблемы важная роль отводится радиолокационным (РЛ) системам, прежде всего микроволновым радиолокаторам с синтезированной апертурой. Рассеяние микроволнового излучения определяется харак-

теристиками мелкомасштабных гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на водной поверхности, в частности, их нелинейностью, поэтому важным является анализ гидродинамических эффектов изменчивости характеристик ГКВ в присутствии плавающих в приповерхностном слое воды пластиковых предметов. В настоящее время публикаций, относящихся как к гидродинамической, так и радиофизической частям проблемы довольно мало. Можно упомянуть, например, лабораторные и теоретические исследования затухания волн на воде с упругими пластинами [1] в приложении в проблеме плавающих на поверхности моря волногасителей, а также близкие в определенной степени задачи о затухания волн на макроводорослях [2] и фрагментированном льду [3,4]. Что касается радиофизического аспекта, то, насколько нам известно, имеются пока лишь отдельные качественные наблюдения изменения интенсивности РЛ сигнала в скоплениях ПМ.

Настоящая работа посвящена описанию результатов первых натурных экспериментов с «искусственным ПМ», а также лабораторных экспериментов по моделированию затухания ГКВ на пластиковых пленках.

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00167, <https://rscf.ru/project/23-17-00167/>.

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН  
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН  
© Ермаков Станислав Александрович, [stas.ermakov@ipfran.ru](mailto:stas.ermakov@ipfran.ru)  
© Доброхотов Владимир Андреевич, [vdobrokhотов@ipfran.ru](mailto:vdobrokhотов@ipfran.ru)  
© Лещев Георгий Владимирович, [georgeleshev@gmail.com](mailto:georgeleshev@gmail.com)  
© Даниличева Ольга Аркадьевна, [olgadan@ipfran.ru](mailto:olgadan@ipfran.ru)  
© Хазанов Григорий Ефимович, [g.khazanov@ipfran.ru](mailto:g.khazanov@ipfran.ru)  
© Купаев Александр Викторович, [sant3@mail.ru](mailto:sant3@mail.ru)  
© Сергиевская Ирина Андреевна, [i.sergia@ipfran.ru](mailto:i.sergia@ipfran.ru)  
© Плотников Леонид Михайлович, [leonplot@mail.ru](mailto:leonplot@mail.ru)

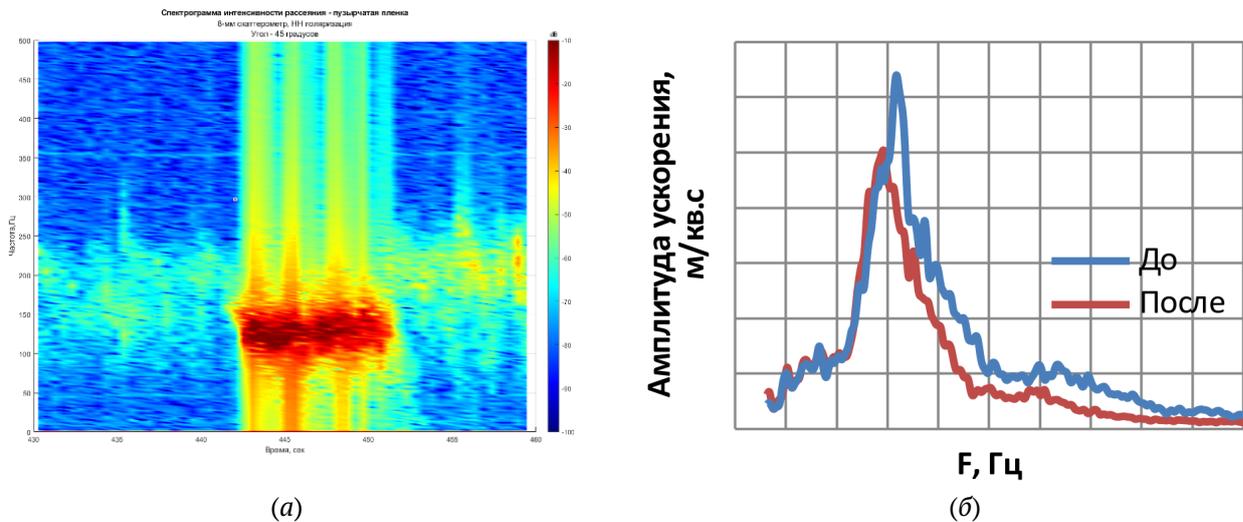


Рис. 1. (а) Спектрограмма РЛ сигнала при прохождении пленки «против ветра», интенсивность РЛ сигнала за подветрой стороной пленки (левая часть) меньше, чем перед наветренной (правая часть), центральная часть – рассеяние на пленке; (б) пектры ускорений в поле ветровых волн до и после прохождения пленки

## Натурные эксперименты

В ходе натурных экспериментов исследовались особенности изменчивости характеристик радиолокационных сигналов в присутствии полиэтиленовой пленки на водной поверхности. Наблюдения проводились на Горьковском водохранилище с маломерного судна с использованием микроволнового скаттерометра, зондирование проводилось при средних углах падения радиоволн перпендикулярно, либо под углом к скорости ветра. В качестве имитатора ПМ использовалась упаковочная «пузырчатая» пленка, как неподвижная (заякоренная), так и свободно дрейфующая в поле ветра и волнения. Исследовалась изменчивость доплеровских спектров радиолокационных сигналов Ка-диапазона при движении локатора параллельно пленке. Наряду с усилением РЛ рассеяния непосредственно в области пленки, обнаружен эффект ослабления интенсивности РЛ сигнала в подветренной области за пленкой (Рис. 1(а)). С использованием установленных на пленке миниатюрных акселерометров зарегистрировано ослабление ветровых волн при прохождении области, занятой пленкой (Рис. 1(б)), что объясняет эффект «РЛ тени» от пленки.

## Лабораторные эксперименты

Лабораторное моделирование влияния ПМ на ГКВ проводилось в овальном ветроволновом бассейне ИПФ РАН, в котором механически возбуждались поверхностные волны с различной крутизной и с длинами порядка 10 – 20 см. В качестве

имитаторов ПМ использовались полиэтиленовые пленки различной толщины и структуры, в том числе, тонкая (20 мкм) стрейч-пленка, толстая пленкой (толщина 200 мкм) и упаковочная «пузырчатая» пленка толщиной около 4 мм. Измерения амплитуд волн выполнялись струнными волнографами. РЛ зондирование ГКВ проводилось с использованием скаттерометра Ка-диапазона, работающего на вертикальной и горизонтальной поляризациях, угол падения микроволн составлял 55 град.

В ходе экспериментов показано, что ГКВ затухают при прохождении области, занятой пластиковой пленкой (рис. 2), коэффициент затухания растет с ростом толщины пленки.

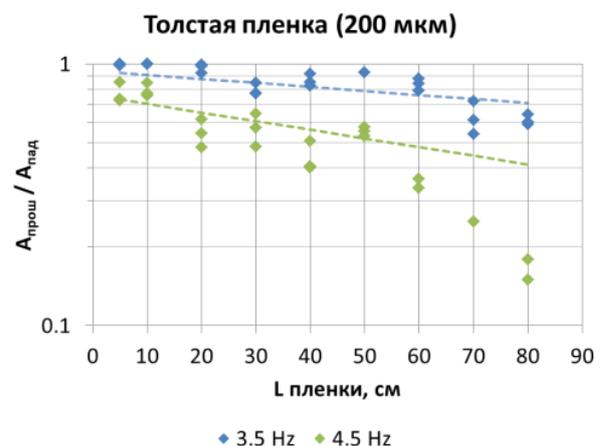


Рис. 2. Относительная амплитуда ГКВ (частоты 3.5 Гц и 4.5 Гц) в зависимости от длины пластиковой пленки

Фазовая скорость ГКВ в присутствии пленки увеличивается по сравнению с чистой поверхностью воды, оценка скорости с учетом упругости и толщины пленки согласуется с экспериментом. Получено, что паразитная капиллярная рябь и buldge-структуры, которые возникают на профиле ГКВ большой крутизны и которые являются основной причиной рассеяния излучения Ка-диапазоне (см. [5]), существенно подавляются пленками, при этом соответственно уменьшается и интенсивность РЛ сигнала. РЛ рассеяние в присутствии пленки становится более неполяризованным по сравнению с рассеянием от ГКВ на чистой воде.

### Список литературы

- [1] *Shugan I., Yang R.-Y., Chen Y.-Y.* An Experimental and Theoretical Study of Wave Damping due to the Elastic Coating of the Sea Surface // *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. V. 8. P. 571. doi: 10.3390/jmse8080571.
- [2] *Hemavathi Sundaram, Manjula Renganathan, Thiru S.A.* comparative study of empirical models for the analysis of wave attenuation by two different coastal plant meadows – A synthetic model lab study. December 2020 // *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 2020. V. 28(3). P. 1–8. doi: 10.1080/09715010.2020.1858358.
- [3] *Meylan M. H., Yiew L.J., Bennetts L.G., French B.J., Thomas G.A.* Surge motion of an ice floe in waves: comparison of a theoretical and an experimental model // *Annals of Glaciology*. 2015. V. 56(69). P. 155–159. doi: 10.3189/2015AoG69A646.
- [4] *Ermakov S.A., Khazanov G.E., DobrokhotoV V.A., Vostryakova D.V., Lazareva T.N.* Wave tank modeling of the damping of gravity waves due to ice floes in application to ocean remote sensing, *Proc. SPIE 11857, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2021. P. 118570U. doi: 10.1117/12.2600164.
- [5] *Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., DobrokhotoV V.A., Lazareva T.N.* Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V. 60, No. 4202812. P. 1–12.