

Натурные эксперименты по радиолокационному зондированию пластикового мусора в поверхностном слое водоёма

С. А. Ермаков^{1,2}, В. А. Доброхотов¹, О. А. Даниличева¹,
Г. В. Лещев¹, Л. М. Плотников¹, И. А. Сергиевская^{1,2}

¹ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

² *Волжский государственный университет водного транспорта*
Нижний Новгород, 603950, Россия

Представлены результаты натурных экспериментов по актуальной проблеме радиолокационной (РЛ) диагностики пластикового мусора в водной среде. С использованием скаттерометров Ка- и Х-диапазонов проведено зондирование разных типов пластикового мусора: притопленной полиэтиленовой плёнки, а также объёмного мусора — плавающих в воде кусков поролона. Получено, что при прохождении области фрагментированного мусора (поролона) ветровые волны дм-м-диапазона сильно подавляются, коэффициент затухания волн при этом имеет максимум на частотах, близких к частотам собственных колебаний фрагментов мусора, само затухание может быть объяснено возбуждением волнами резонансных колебаний фрагментов. Притопленная же плёнка практически не приводит к затуханию дм-м-волн. В экспериментах с поролоном в подветренной относительно мусора области водной поверхности формируется зона пониженной интенсивности РЛ-сигнала — «РЛ-след», для притопленной плёнки след практически отсутствует. Микроволновое рассеяние на фрагментированном поролоне не поляризовано и связано, видимо, с рассеянием на неровностях поверхности и на краях кусков поролона; интенсивность рассеяния на 1,5–2 порядка выше, чем из соседних областей ветрового волнения. Рассеяние на притопленной плёнке примерно на порядок величины сильнее, чем на ветровых волнах, является поляризованным и связано с возбуждением вторичных брэгговских волн см-диапазона над плёнкой из-за её колебаний под действием более длинных дм-м-волн.

Ключевые слова: ветровые волны, радиолокация, фрагментированный пластиковый мусор, полиэтиленовая плёнка

Одобрена к печати: 11.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-279-289

Введение

Как известно, возрастающее загрязнение Мирового океана пластиком — серьёзная экологическая проблема (см., например, работы (Chubarenko et al., 2020; Li et al., 2021; Suaria et al., 2023; van Sebille et al., 2020)), для решения которой требуется развитие методов, прежде всего дистанционных, диагностики пластикового мусора (ПМ) в водной среде (Salgado-Hernanz et al., 2021). Одним из наиболее эффективных инструментов всепогодного мониторинга ПМ в океане выступает спутниковая радиолокация микроволнового диапазона (Arii et al., 2014; Serafino, Bianco, 2021). Для эффективного использования радиолокаторов как инструмента для обнаружения ПМ необходимо развитие физических основ радиолокационного (РЛ) зондирования мусора. В настоящее время в литературе обсуждается ряд механизмов, определяющих рассеяние микроволн ПМ и связанных в том числе с затуханием ветровых волн в областях ПМ, непосредственным рассеянием электромагнитного излучения пластиковыми фрагментами, возбуждением вторичных мелкомасштабных поверхностных волн за счёт колебаний плавающих объектов и др. В работе (Simpson et al., 2022) представлены РЛ-изображения SAR (*англ.* Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 скоплений плавающего на воде ПМ и отмечено, что интенсивность обратного рассеяния из областей объёмного ПМ обычно увеличивается по сравнению с чистой водой, однако может снижаться в соседствующих с ПМ

областях (Arii et al., 2014; Simpson et al., 2022, 2023). Недавно был проведён ряд специальных исследований, направленных на разработку физических основ и методов дистанционного зондирования ПМ в океане. В частности, влияние пластиковых плёнок на поверхностные волны изучалось в ряде лабораторных экспериментов, где было показано, что плавающие полиэтиленовые (ПЭ) плёнки приводят к затуханию волн, а колебания притопленных плёнок в поле волн вызывают генерацию вторичной мелкомасштабной ряби (Доброхотов и др., 2023; Ермаков и др., 2024б). Были проведены первые натурные эксперименты с плавающими на поверхности воды пластиковыми плёнками (см. (Ермаков и др., 2024а)), в ходе которых показано, что эти плёнки эффективно подавляют короткие ветровые волны, в результате чего с подветренной стороны плёнки появляется область пониженной интенсивности РЛ-сигнала.

Настоящая работа стала продолжением и развитием экспериментального изучения влияния ПМ на ветровые волны и характеристики сигналов микроволновых радиолокаторов, начатого ранее в исследовании (Ермаков и др., 2024а). В данной статье приведены описание аппаратуры и методики проведения экспериментов, собственно результаты экспериментов по радиолокационному зондированию в Ка- и Х-диапазонах находящейся непосредственно под поверхностью воды (притопленной) ПЭ-плёнки, а также объёмного ПМ — плавающих в воде кусков поролона, обсуждение результатов и основные выводы.

Аппаратура и методика экспериментов

Измерения проводились в 2024–2025 гг. в южной части акватории Горьковского водохранилища с борта маломерного судна — плавучей лаборатории катамарана «Геофизик» Института прикладной физики РАН. На судне на высоте 2,7 м над поверхностью были размещены два когерентных (доплеровских) скаттерометра Ка- и Х-диапазона. Оба скаттерометра работают в режиме непрерывного частотно-модулированного излучения на соосных поляризациях на приём и передачу — на вертикальной V (*англ.* Vertical) (VV) поляризации для Х-скаттерометра и на вертикальной и горизонтальной H (*англ.* Horizontal) (HH) поляризации для скаттерометра Ка-диапазона; для последнего изменение поляризации обеспечивалось поворотом прибора вокруг продольной оси антенны. Угол падения микроволнового излучения для скаттерометра Ка-диапазона составлял 57° , для скаттерометра Х-диапазона — 45° . Ширина диаграммы направленности Ка-скаттерометра около 5° , а Х-скаттерометра — 3° , так что масштабы облучаемой области поверхности для обоих приборов были близки и составляли менее 1 м. Зондирование велось при азимутальных углах 45° и 90° по отношению к продольной оси судна. Эксперименты проводились при скорости ветра 3–4 м/с.

В качестве имитаторов пластикового мусора использовалась ПЭ-плёнка толщиной 200 мкм, а также в качестве объёмного ПМ — поле из кусков поролона толщиной 5 см и размерами кусков 50×50 см (*рис. 1*, см. с. 281). Размеры плёнки были 3×10 м, размеры поля из поролона 2×5 м. Куски поролона связывались в гирлянды, которые крепились с помощью тонкой плавучей верёвки к тонкой плавающей полипропиленовой трубе, привязанной, как и для ПЭ-плёнки, к зякоренному буйку.

Отметим, что поролон пропитывался водой и был почти полностью погружён в воду, выступая над её поверхностью на несколько миллиметров. Полиэтиленовая плёнка, в отличие от пузырчатой, использовавшейся в наших предыдущих экспериментах (Ермаков и др., 2024а), оказывалась притопленной и находилась в приповерхностном слое воды толщиной в несколько сантиметров. Механизм притапливания плавучей пластиковой плёнки анализировался нами в недавней работе (Хазанов, Ермаков, 2025). Следует сказать, что при помещении плёнки на воду под ней обычно образовывались воздушные пузыри, однако они составляли небольшую площадь плёнки и пропадали со временем. Такие пузыри сами по себе, видимо, не оказывают заметного влияния на РЛ-сигнал, поскольку ПЭ-плёнка, если её поверхность не смочена водой, является прозрачной для микроволн.

Измерения ветрового волнения выполнялись с использованием автономных миниатюрных пьезоакселерометров, размещённых в герметичных корпусах, имеющих форму плоского

диска диаметром 8 см и высотой около 1 см (см. (Ермаков и др., 2024а)). Запись показаний велась во внутреннюю память акселерометров, данные затем переносились для дальнейшей обработки в компьютер. Акселерометры крепились вблизи наветренного и подветренного краёв поля имитаторов ПМ.

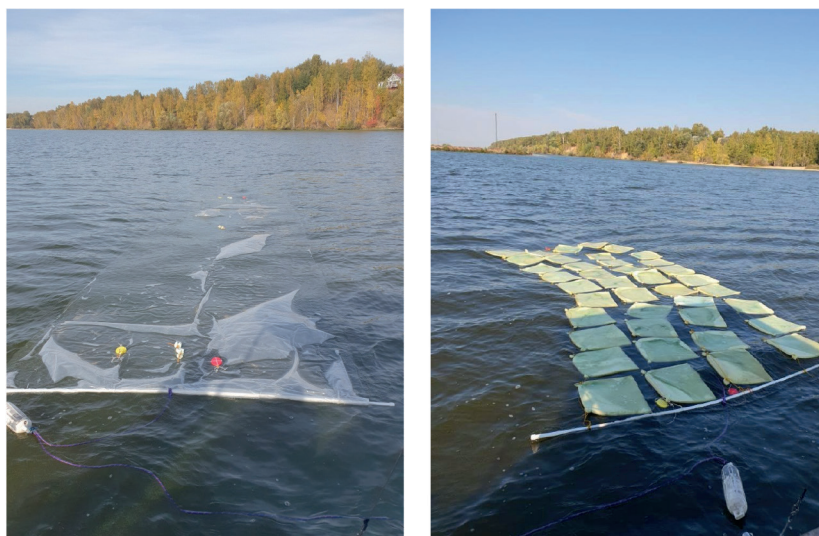


Рис. 1. Притопленная ПЭ-плёнка (слева) и поле из кусков поролона (справа)

Эксперименты выполнялись по методике, описанной в работе (Ермаков и др., 2024а). Имитаторы ПМ были привязаны тонкой плавучей верёвкой к заякоренному буйку, судно двигалось параллельно длинной стороне имитаторов ПМ последовательными галсами навстречу и по ветру.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Затухание ветровых волн в присутствии пластикового мусора

Пластиковый мусор — поролон. Рассмотрим вначале результаты по затуханию ветровых волн для ПМ из кусков поролона. Примеры амплитудных спектров ускорения a в поверхностных волнах для двух пар акселерометров в начале области поролона (с наветренной стороны) и в её конце (на расстоянии L) представлены на рис. 2 (см. с. 282). Соответствующие результаты для коэффициентов затухания волн, рассчитанных как $\ln[a(0)/a(L)]/L$, приведены на рис. 3 (см. с. 282).

Заметим, что во всех представленных случаях для поролона наблюдается максимум коэффициента затухания на частотах F порядка 2,0–2,5 Гц, соответствующие длины ветровых волн порядка 0,6–0,8 м. Сравнение с коэффициентом затухания волн на пузырьчатой ПЭ-плёнке (см. (Ермаков и др., 2024а)) показывает, что последний не имеет такого выраженного максимума, как на рис. 3, и по значению примерно в три раза меньше. Отметим также, что частота максимума коэффициента затухания для поролона лежит выше, чем частота пика спектра ветровых волн, которая для условий эксперимента близка к 1 Гц. Естественно предположить, что затухание связано с возбуждением колебаний кусков поролона под действием волн и, соответственно, потерями энергии последних на это возбуждение. Очевидно, что потери энергии волн будут наибольшими, когда возбуждение колебаний кусков поролона происходит на их собственных частотах. Несложно показать, что собственную частоту вертикальных колебаний плавающих кусков поролона можно оценить как $F_v \approx \sqrt{(\rho_w/\rho_p) \cdot (g/h)}/2\pi$, где h — равновесная глубина погружения поролона, ρ_w и ρ_p — плотность воды и пропитанного водой поролона соответственно; g — ускорение свободного падения. Полагая, что h близка

к толщине поролона и $\rho_w \approx \rho_p$, получим частоту $F_v \approx 2,2$ Гц, которая хорошо соответствует экспериментальной частоте максимума коэффициента затухания волн на *рис. 3*.

Пластиковый мусор — притопленная ПЭ-плёнка. Приведём теперь результаты измерений ветровых волн в области притопленной пластиковой плёнки. На *рис. 4* показаны примеры спектров вертикальных компонент ускорения в волнах, а на *рис. 5* (см. с. 283) даны оценки коэффициента затухания ветровых волн для притопленной ПЭ-плёнки.

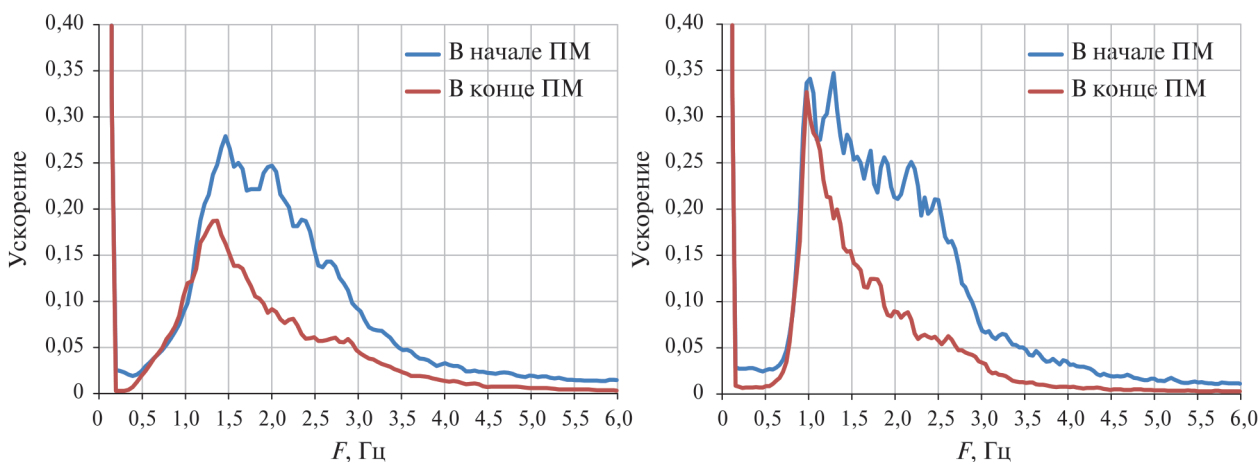


Рис. 2. Примеры спектров ускорения волн в присутствии поролонового ПМ при скорости ветра 2 м/с (слева) и 3 м/с (справа)

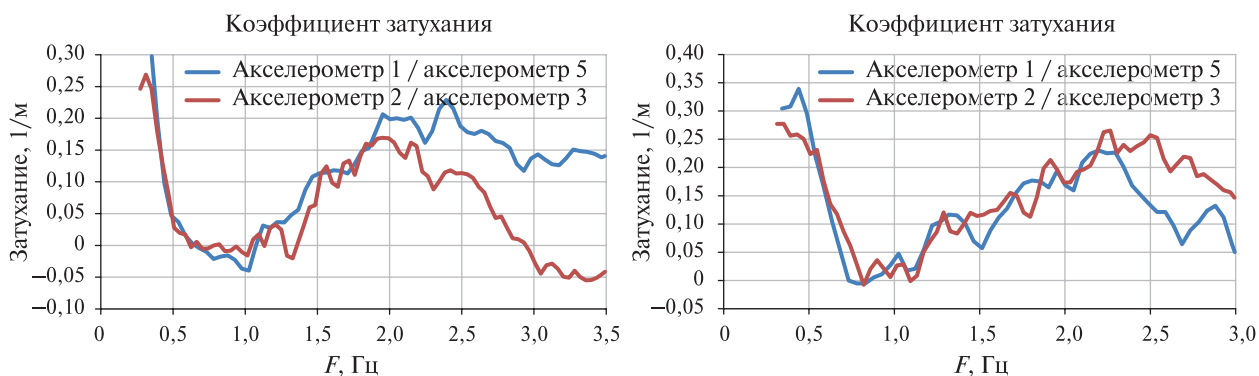


Рис. 3. Коэффициенты затухания как функции частоты ветровых волн, полученные по данным двух пар акселерометров (см. *рис. 2*). Скорость ветра 2 м/с (слева) и 3 м/с (справа)

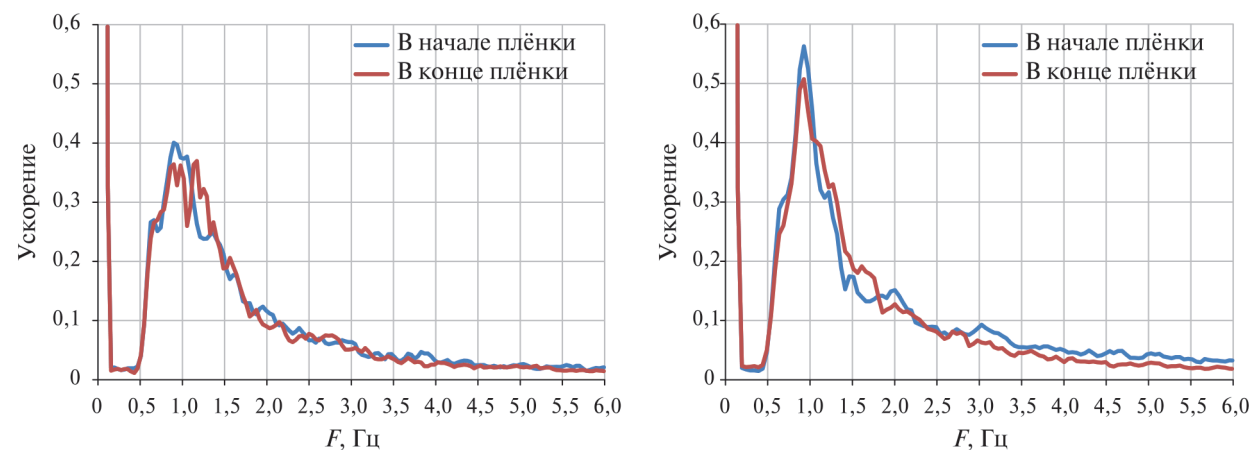


Рис. 4. Примеры спектров ускорения в волнах для притопленной полиэтиленовой плёнки при скорости ветра 3–4 м/с

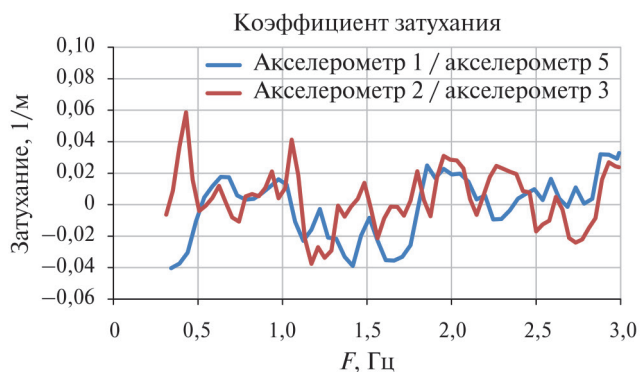


Рис. 5. Коэффициент затухания ветровых волн как функция частоты, скорость ветра 3–4 м/с

Как следует из представленных на рис. 5 данных, затухание волн дм-м-длин в случае притопленной плёнки оказывается весьма малым по сравнению с поролоном (см. рис. 3) или плавающей пузырьчатой плёнкой (ср. (Ермаков и др., 2024a)).

Характеристики радиолокационных сигналов при рассеянии на пластиковом мусоре

Пластиковый мусор — поролон. На рис. 6 показаны спектрограммы сигналов скаттерметров Ка- и Х-диапазонов для случая движения судна навстречу ветру вдоль границы области, занятой поролоном.

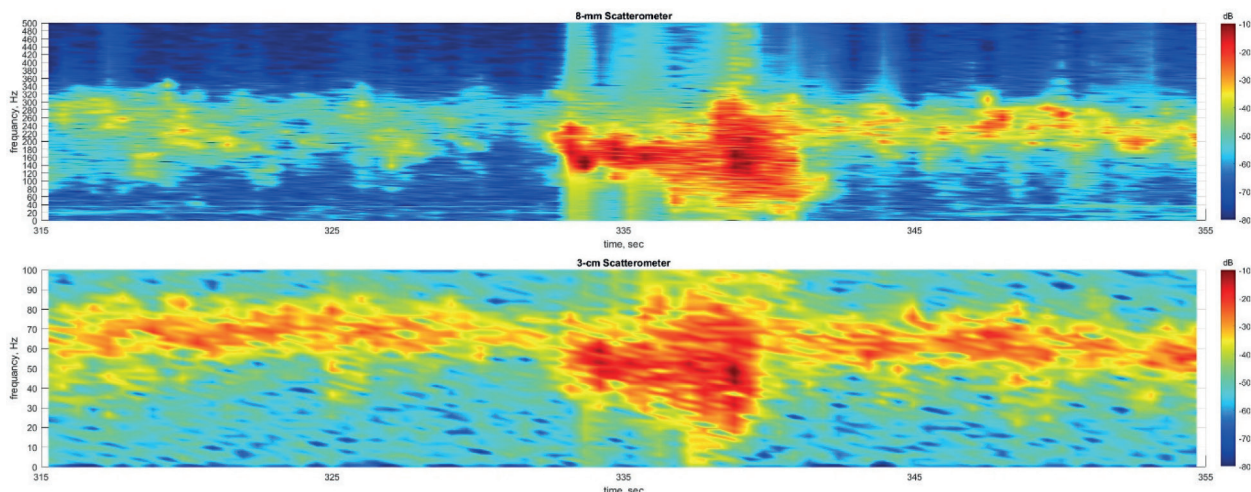


Рис. 6. Спектрограмма интенсивности обратного РЛ-рассеяния по данным скаттерметров Ка-диапазона (сверху) и Х-диапазона (снизу). Поролон, VV-поляризация, азимутальный угол 45°. Движение судна навстречу ветру. Скорость ветра 3,5 м/с

Другой пример приведён на рис. 7 (см. с. 284) для случая, когда судно движется по ветру вдоль области ПМ. Азимутальный угол в обоих случаях составлял 45°.

Из приведённых выше данных следует, что на подветренной стороне области ПМ формируется область, в которой интенсивность рассеяния меньше, чем с наветренной стороны (РЛ-след). Эффект был ранее зарегистрирован в работе (Ермаков и др., 2024a) в экспериментах с плавающей пузырьчатой плёнкой при зондировании в Ка-диапазоне. Как видно, аналогичная особенность имеет место и для Х-диапазона, и это связано с достаточно сильным затуханием ветровых волн, проходящих область ПМ. Области рассеяния на поролоне на спектрограммах лежат ниже по частоте, чем области рассеяния на волнах при движении судна навстречу ветру, и выше — при движении по ветру. Это связано с тем, что при движении навстречу ветру волны бегут на локатор со своей фазовой скоростью и доплеровский сдвиг на волнах складывается с доплеровским сдвигом из-за движения судна. При движении же по ветру доплеровский сдвиг на поролоне, связанный с перемещением судна, остаётся тем же, а доплеровский сдвиг на волнах вычитается из скорости судна.

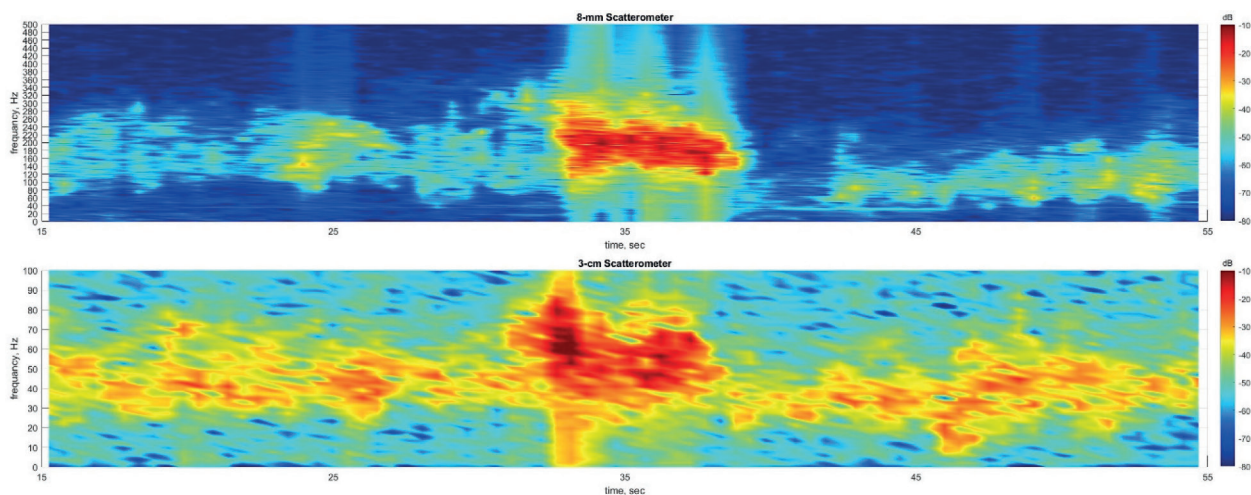


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для поляризации НН и движения судна по ветру. Скорость ветра 3 м/с

Усреднённые доплеровские спектры РЛ-сигнала, соответствующие условиям экспериментов на рис. 6, 7, приведены на рис. 8.

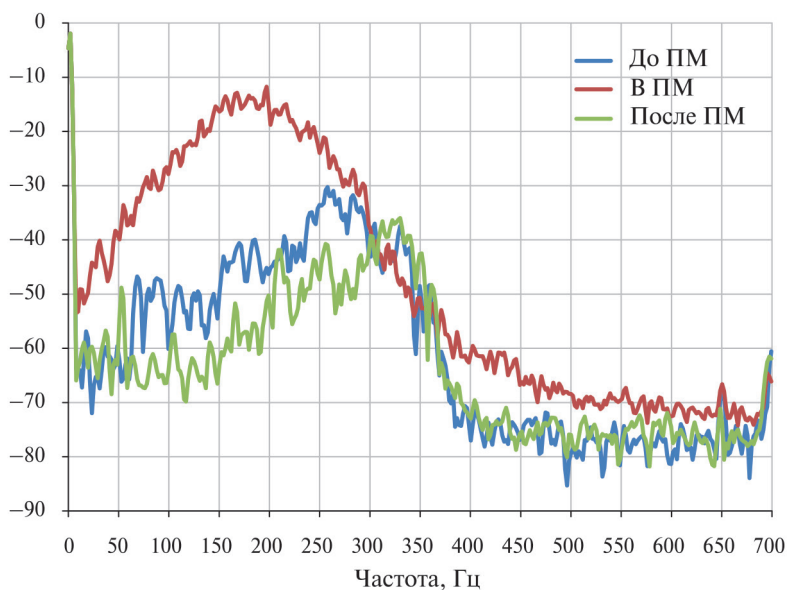


Рис. 8. Доплеровские спектры РЛ-сигнала Ка-диапазона в эксперименте с ПМ-поролоном. Поляризация VV, азимутальный угол 45°, движение навстречу ветру

Убедимся, что доплеровский сдвиг FDf , отвечающий рассеянию из области поролон, соответствует скорости движения судна. Используя соотношение между FDf и скоростью судна V_s ,

$$F_{Df} = \frac{1}{\pi} k_{em} \sin \theta \cdot V_s \cdot \cos \varphi,$$

где k_{em} и θ — волновое число и угол падения электромагнитной волны; φ — азимутальный угол, легко оценить, что доплеровскому сдвигу F_{Df} на рис. 8 соответствует скорость $V_s \approx 1,3$ м/с, что хорошо согласуется с величиной скорости судна в экспериментах.

Доплеровские сдвиги при рассеянии на ветровых волнах в наветренной и подветренной по отношению к поролону областях сдвинуты на частоту, соответствующую скорости рассеи-

вающих волн. Важно отметить, что интенсивность рассеяния на поролоне, как следует из рис. 8, на 1,5–2,0 порядка превышает интенсивность рассеяния на ветровых волнах. При этом поляризационное отношение (отношение интенсивности сигнала на вертикальной и горизонтальной поляризации) на поролоне близко к единице; это свидетельствует о неполяризованном характере рассеяния. При рассеянии же на ветровых волнах поляризационное отношение существенно превышает единицу, что указывает на значительный вклад брэгговской компоненты в полную интенсивность рассеяния (см. также (Ермаков и др., 2024а)). Можно полагать, что высокий уровень рассеяния на поролоне связан как непосредственно с неровностью его поверхности, так и с рассеянием на краях кусков (напомним, что поролон был смочен водой, поэтому должен хорошо отражать микроволновое излучение). Спектр рассеяния на поролоне достаточно широкий, ширина спектра, если оценивать её по уровню 0,1 от максимума, порядка 10^2 Гц. Естественно предположить, что эта ширина связана с колебаниями кусков поролона под действием ветровых волн. Проведём соответствующие оценки для вертикальных колебаний кусков поролона, считая, что они максимальны, когда частота волны близка к собственной частоте кусков, при этом, как было получено выше, максимально и затухание волн. В условиях описываемых экспериментов эта частота порядка 2 Гц (см. выше). Если оценить вертикальную орбитальную скорость V_{orb} в волнах, имеющих частоту 2 Гц и амплитуду 3–4 см, то получим значения порядка 36–48 см/с. Определяя ширину спектра, соответствующую таким колебаниям, как $\Delta F = 2k_e \cos\theta \cdot V_{orb} / \pi$, получим величины порядка 86–115 Гц. Конечно, приведённые оценки следует рассматривать в основном как качественные, поскольку характер движения кусков поролона более сложный, включающий горизонтальные колебания и колебания вокруг вертикальной оси. Тем не менее эти оценки дают правильный порядок наблюдающихся в эксперименте величин.

Пластиковый мусор — притопленная ПЭ-плёнка. Рассмотрим теперь особенности рассеяния в экспериментах с притопленной ПЭ-плёнкой. На рис. 9 приведены примеры спектрограмм для сигналов Ka- и X-скаттерометров.

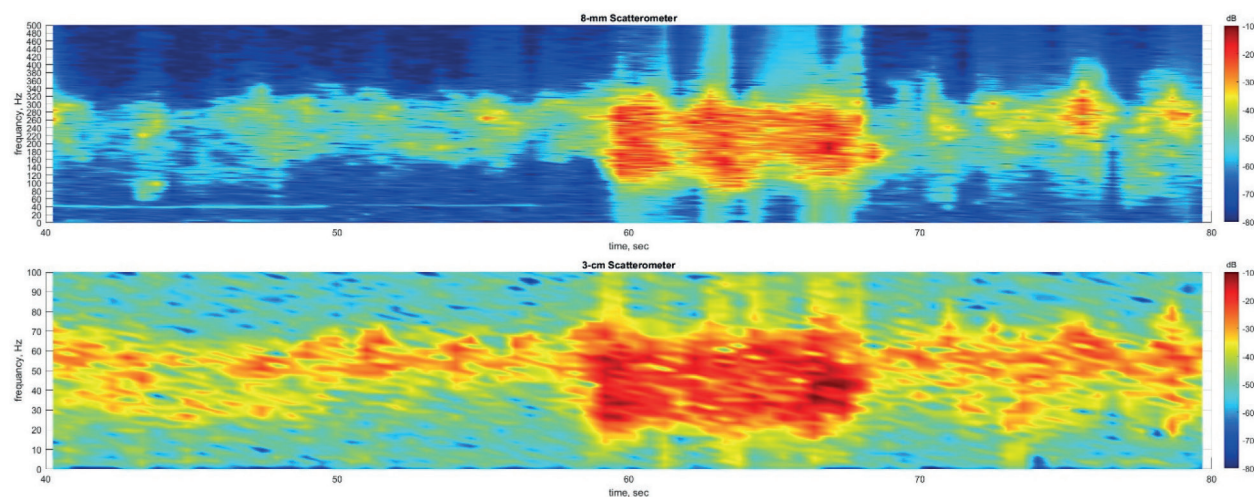


Рис. 9. Спектрограмма интенсивности обратного РЛ-рассеяния по данным скаттерометров Ka-диапазона (сверху) и X-диапазона (снизу). Притопленная ПЭ-плёнка, VV-поляризация, азимутальный угол 45° . Движение судна навстречу ветру. Скорость ветра 3 м/с

Отметим некоторые особенности рассеяния в присутствии притопленной ПЭ-плёнки. Во-первых, для притопленной плёнки практически отсутствует РЛ-след, т. е. интенсивность РЛ-сигнала до и после плёнки близки друг другу. Во-вторых, в отличие от спектрограмм в экспериментах с поролоном, здесь отсутствует сильное различие в доплеровском сдвиге для области плёнки и для ветровых волн. Наконец, интенсивность рассеяния из области плёнки существенно, примерно на порядок, превышает рассеяние на ветровом волнении, хотя здесь

это превышение и меньше, чем в случае поролона. Перечисленные особенности иллюстрируются усреднёнными спектрами на *рис. 10*.

Наконец, приведём ещё спектры для области притопленной плёнки на разных поляризациях (*рис. 11*).

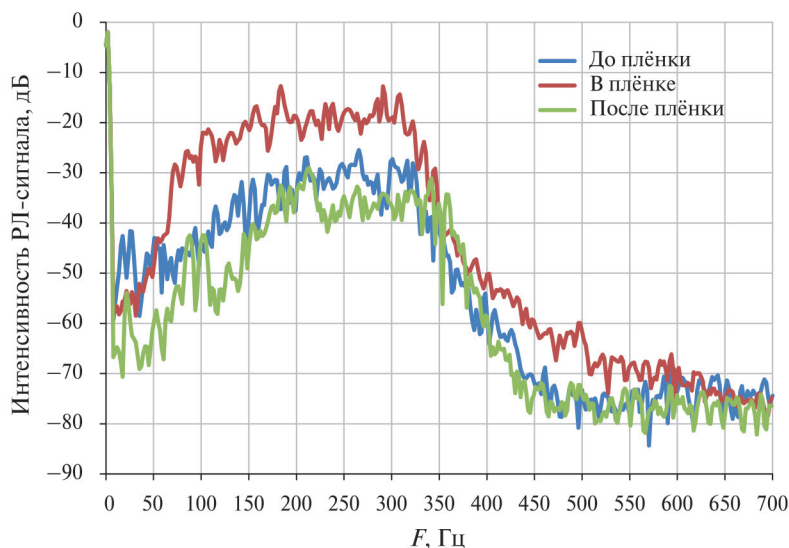


Рис. 10. Спектры интенсивности обратного РЛ-рассеяния Ка-диапазона. Притопленная плёнка, VV-поляризация, азимутальный угол 45° . Движение судна навстречу ветру

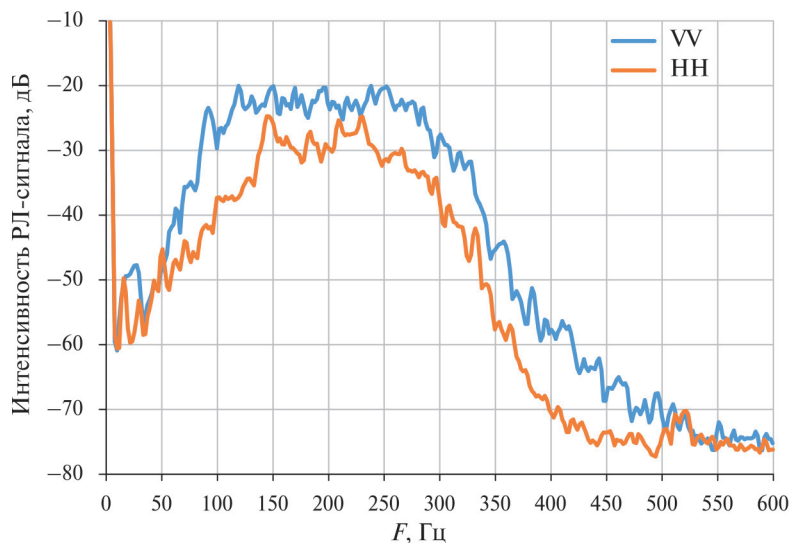


Рис. 11. Средний спектр интенсивности обратного рассеяния на притопленной полиэтиленовой плёнке на VV- и HH-поляризации, Ка-диапазон, при азимутальном угле зондирования 45°

Поляризационное отношение для сигналов из области притопленной плёнки больше 1, в случае, представленном на *рис. 11*, оно составляет 5. Это указывает на значительный вклад брэгговской составляющей, в отличие от рассеяния на поролоне.

Особенности, которые иллюстрируют *рис. 9–11*, могут быть объяснены, если полагать, что над притопленной плёнкой под действием её колебаний в поле дм-м-волн возбуждается мелкомасштабная рябь, которая даёт существенную добавку в рассеяние микроволн в дополнение к рассеянию на исходном ветровом волнении. Эти вторичные волны (см. также (Ермаков и др., 2024б)), по-видимому, близки к свободным квазилинейным волнам и распро-

страняются в разных направлениях от источников возбуждения — дм-м-волн под плёнкой. За счёт вторичных волн и происходит наблюдаемое уменьшение результирующего доплеровского сдвига, уширение доплеровского спектра РЛ-сигнала и увеличение поляризационного отношения.

Заключение

В ходе выполненных натурных экспериментов по зондированию пластикового мусора в Ка- и Х-диапазонах с разными типами имитаторов пластикового мусора, а именно с объёмным фрагментированным мусором — плавающими кусками поролона и с полиэтиленовой плёнкой, которая притапливается и плавает непосредственно под поверхностью воды, получено:

- ветровые волны дм-м-диапазона длин сильно подавляются плавающим фрагментированным поролоном, тогда как притопленная полиэтиленовая плёнка практически не приводит к затуханию ветровых волн;
- коэффициент затухания ветровых волн на фрагментированном поролоне существенно превышает затухание волн на нерастяжимых поверхностных плёнках и имеет максимум на частотах, близких к частотам собственных колебаний фрагментов; такое затухание может быть объяснено возбуждением волнами резонансных колебаний фрагментов мусора;
- значительное подавление ветровых волн плавающим мусором приводит к формированию области пониженной интенсивности рассеянного РЛ-сигнала — РЛ-следа, тогда как за притопленной пластиковой плёнкой следа практически нет;
- микроволновое рассеяние на фрагментированном поролоне не поляризовано и предположительно связано с рассеянием на неровностях поверхности и краях кусков поролона; интенсивность рассеяния на 1,5–2 порядка превышает рассеяние на невозмущённом ветровом волнении;
- рассеяние на притопленной плёнке превышает (примерно на порядок величины) рассеяние на ветровом волнении, однако, в отличие от поролона, является поляризованным, что связано с возбуждением вторичных мелкомасштабных волн брэгговских длин см-диапазона длин над плёнкой за счёт её колебаний под действием более длинных ветровых дм-м-волн.

Полученные в описанных экспериментах результаты, в частности возрастание интенсивности рассеянного РЛ-сигнала на имитаторах ПМ, качественно согласуются с данными спутниковых радиолокационных наблюдений (см., например, работу (Simpson et al., 2022)) и могут быть использованы при интерпретации изображений ПМ на спутниковых РСА-панорамах (радар с синтезированной апертурой).

Авторы выражают благодарность А. В. Купаеву за разработку и подготовку к работе волнографов-акселерометров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00167).

Литература

1. *Доброхотов В. А., Ермаков С. А., Сергиевская И. А.* Лабораторное исследование особенностей радиолокационного рассеяния Ка-диапазона и затухания волн на воде, покрытой полиэтиленовой плёнкой // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 6. С. 247–257. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257.
2. *Ермаков С. А., Доброхотов В. А., Лещев Г. В. и др.* (2024а) Модельные эксперименты по исследованию влияния пластикового мусора на водной поверхности на характеристики радиолокационных сигналов Ка-диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21. № 1. С. 257–269. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269.

3. Ермаков С. А., Доброхотов В. А., Сергиевская И. А. (2024б) Лабораторные исследования радиолокационного рассеяния на поверхностных волнах, распространяющихся над погружённой в воду вертикальной пластиковой плёнкой // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21. № 6. С. 320–330. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-320-330.
4. Хазанов Г. Е., Ермаков С. А. Численное моделирование динамики плавучей полиэтиленовой пленки в поле поверхностных волн // *Фундам. и приклад. гидрофизика*. 2025. Т. 18. № 2. С. 68–82. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-5).
5. Arii M., Koiwa M., Aoki H. Applicability of SAR to marine debris surveillance after the Great East Japan earthquake // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. V. 7. No. 5. P. 1729–1744. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
6. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L. et al. From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tideless coast // *Marine Pollution Bull.* 2020. V. 156. Article 111198. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111198.
7. Li P., Wang M. et al. Characteristics of plastic pollution in the environment: A review // *Bull. Environmental Contamination and Toxicology*. 2021. V. 107. No. 4. pp. 577–584. DOI: 10.1007/s00128-020-02820-1.
8. Salgado-Hernanz P. M., Bauzá J., Alomar C. et al. Assessment of marine litter through remote sensing: recent approaches and future goals // *Marine Pollution Bull.* 2021. V. 168. Article 112347. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112347.
9. Serafino F., Bianco A. Use of X-band radars to monitor small garbage islands // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. No. 18. Article 3558. DOI: 10.3390/rs13183558.
10. Simpson M. D., Marino A., de Maagt P. et al. Monitoring of plastic islands in river environment using Sentinel-1 SAR data // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 18. Article 4473. DOI: 10.3390/rs14184473.
11. Simpson M. D., Marino A., de Maagt P. et al. Investigating the backscatter of marine plastic litter using a C- and X-band ground radar, during a measurement campaign in Deltares // *Remote sensing*. 2023. V. 15. No. 6. Article 1654. DOI: 10.3390/rs15061654.
12. Suaria G., Cappa P., Perold V. et al. Abundance and composition of small floating plastics in the eastern and southern sectors of the Atlantic Ocean // *Marine Pollution Bull.* 2023. V. 193. Article 115109. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115109.
13. van Sebille E., Aliani S., Law K. L. et al. The physical oceanography of the transport of floating marine debris // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15. No. 2. Article 023003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6d7d.

Field experiments on radar probing of plastic debris in the surface layer of a water body

S. A. Ermakov^{1,2}, V. A. Dobrokhotov¹, O. A. Danilicheva¹,
G. V. Leshchev¹, L. M. Plotnikov¹, I. A. Sergievskaya^{1,2}

¹ *Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia*
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru

² *Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia*

Results of field experiments on the pressing problem of radar probing of plastic debris in water environment are presented. The Ka- and X-band microwave remote sensing of different types of plastic debris, namely, volumetric debris such as foam rubber pieces floating in water and submerged plastic film, has been conducted. It was found that wind waves of dm-m range passing through an area of fragmented debris (foam) are strongly suppressed, and the damping coefficient has a maximum at frequencies close to the oscillation frequencies of the debris fragments. The attenuation can be explained by the excitation of resonant oscillations of the fragments by the waves. A submerged film does not significantly damp wind waves. In the downwind area of the water surface, a region of reduced scattered radar signal intensity, known as a radar wake, arise for foam rubber, while a wake does not form for submerged film. The intensity of microwave scattering on foam rubber pieces is non-polarized and is presumably related to scattering on surface irregularities and the edges of the foam rubber pieces; the scattering intensity is 1.5–2 orders of magnitude higher than the scattering on undisturbed wind waves. The scatter-

ing on the submerged film is approximately an order of magnitude higher than for wind waves, and it is polarized and related to the excitation of secondary small-scale waves of Bragg wavelengths (cm-range wavelengths) above the film, due to its vibrations caused by longer wind waves.

Keywords: wind waves, radar, fragmented plastic debris, polyethylene film

Accepted: 11.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-279-289

References

1. Dobrokhotov V.A., Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Laboratory study of Ka-band radar scattering and wave damping on water covered with plastic film, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 247–257 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257.
2. Ermakov S.A., Dobrokhotov V.A., Leshchev G.V. et al. (2024a), Model experiments on investigation of the influence of plastic garbage on water surface on the characteristics of Ka-band radar signals, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 257–269 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269.
3. Ermakov S.A., Dobrokhotov V.A., Sergievskaya I.A. (2024b), Laboratory studies of radar scattering from surface waves propagating over a vertical plastic film submerged in water, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 320–330 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-320-330.
4. Khazanov G.E., Ermakov S.A., Numerical modeling of a floating polyethylene film dynamics in the field of surface waves, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2025, V. 18, No. 2, pp. 68–82 (in Russian), [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(2\)-5](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(2)-5).
5. Arii M., Koiwa M., Aoki Y., Applicability of SAR to marine debris surveillance after the Great East Japan Earthquake, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, V. 7, No. 5, pp. 1729–1744, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
6. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L., Lobchik O., From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast, *Marine Pollution Bull.*, 2020, V. 156, Article 111198, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111198.
7. Li P., Wang X., Su M. et al., Characteristics of plastic pollution in the environment: A review, *Bull. Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, V. 107, No. 4, pp. 577–584, DOI: 10.1007/s00128-020-02820-1.
8. Salgado-Hernanz P.M., Bauzà J., Alomar C. et al., Assessment of marine litter through remote sensing: recent approaches and future goals, *Marine Pollution Bull.*, 2021, V. 168, Article 112347, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112347.
9. Serafino F., Bianco A., Use of X-band radars to monitor small garbage islands, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 18, Article 3558, DOI: 10.3390/rs13183558.
10. Simpson M.D., Marino A., de Maagt P. et al., Monitoring of plastic islands in river environment using Sentinel-1 SAR data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 18, Article 4473, DOI: 10.3390/rs14184473.
11. Simpson M.D., Marino A., de Maagt P. et al., Investigating the backscatter of marine plastic litter using a C- and X-band ground radar, during a measurement campaign in Deltares, *Remote sensing*, 2023, V. 15, No. 6, Article 1654, DOI: 10.3390/rs15061654.
12. Suaria G., Cappa P., Perold V. et al., Abundance and composition of small floating plastics in the eastern and southern sectors of the Atlantic Ocean, *Marine Pollution Bull.*, 2023, V. 193, Article 115109, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115109.
13. van Sebille E., Aliani S., Law K.L. et al., The physical oceanography of the transport of floating marine debris, *Environmental Research Letters*, 2020, V. 15, No. 2, Article 023003, DOI: 10.1088/1748-9326/ab6d7d.