

Лабораторные исследования радиолокационного рассеяния на поверхностных волнах, распространяющихся над погружённой в воду вертикальной пластиковой плёнкой

С. А. Ермаков^{1,2}, В. А. Доброхотов¹, И. А. Сергиевская^{1,2}

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

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

Масштабы роста загрязнения Мирового океана пластиковым мусором увеличиваются с каждым годом. Макропластик оказывает существенное влияние на экологическое состояние Мирового океана, что делает задачу диагностики пластикового загрязнения океана крайне актуальной. Исследуется распространение гравитационно-капиллярных волн над вертикально расположенными в воде полиэтиленовыми плёнками, а также изучаются характеристики радиолокационного сигнала при рассеянии на поверхностных волнах в присутствии этих вертикальных плёнок. Лабораторные эксперименты проводились в кольцевом ветро-волновом бассейне. Генерация поверхностных волн производилась с помощью механического волнопродуктора. Профили гравитационно-капиллярных волн регистрировались с помощью фотографии поверхности, подсвеченной лазерным пучком ножевой формы. Использовались полиэтиленовые плёнки с разной толщиной. Радиолокационные измерения осуществлялись с использованием скаттерометра Ка-диапазона. Измерения интенсивности обратного рассеяния проводились на вертикальных поляризациях излучаемых и рассеянных электромагнитных волн. Установлено, что колеблющаяся под действием гравитационно-капиллярных волн вертикальная полиэтиленовая плёнка возбуждает вторичные короткие капиллярные волны. Это приводит к увеличению интенсивности и уменьшению доплеровского сдвига радиолокационного сигнала обратного рассеяния. При удалении от вертикальной плёнки короткие капиллярные волны затухают и её влияние на характеристики радиолокационного сигнала уменьшается.

Ключевые слова: пластиковый мусор, полиэтиленовая плёнка, радиолокационное рассеяние, гравитационно-капиллярные волны

Одобрена к печати: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-320-330

Введение

Количество поступающего в Мировой океан пластикового мусора возрастает с каждым годом. Пластиковый мусор переносится океанскими течениями и формирует «пластиковые острова», занимающие огромные по площади районы океана. Разрушение макропластика под действием метеорологических факторов, бактерий, ветровых волн приводит к образованию микропластика — частиц с размерами порядка и менее миллиметра. Всё это оказывает существенное влияние на экологическое состояние Мирового океана, его флоры и фауны и делает задачу диагностики пластикового загрязнения океана крайне актуальной. Развитию физических основ и методов диагностики пластикового мусора (ПМ), в первую очередь с использованием аэрокосмических средств наблюдений океана, в последние годы посвящено значительное число работ (см., например, обзор (Gallitelli et al., 2024) и цитированную литературу). Из наиболее распространённых типов ПМ в океане следует отметить плёнки из полиэтилена (ПЭ), а также изготовленные из него пакеты, контейнеры и бутылки, плавающие в верхних слоях воды. Согласно публикации (Suaria et al., 2023), полиэтиленовый ПМ составляет более 60 % массы ПМ, второе место занимает полипропилен (около 30 %).

Плавающие на поверхности или в приповерхностном слое воды пластиковые предметы с размерами порядка единиц–десятков сантиметров и более непосредственно являются

рассеивателями электромагнитного излучения из-за выступающих над поверхностью воды частей, воздушных полостей под фрагментами ПМ и пр. Кроме того, изменение характеристик рассеянного электромагнитного излучения может происходить и через влияние ПМ на характеристики ветровых волн на морской поверхности, что является физической основой для развития дистанционных, в том числе радиолокационных (РЛ) методов мониторинга ПМ (см. (Hu, 2021; Simpson et al., 2022) и цитированную литературу).

Наряду с такими физическими процессами трансформации характеристик ветровых волн, как дифракция, рассеяние, затухание поверхностных волн на плавающих пластиковых объектах, можно указать и обсуждаемый в литературе биофизический аспект проблемы диагностики ПМ. Именно на частицах ПМ происходит развитие фитопланктона, зачастую специфических его видов, и формирование так называемой пластисферы. С фитопланктоном пластика связано образование плёнок поверхностно-активных веществ (микробиологические биоплёнки), которые проявляются на поверхности воды как области подавления мелкомасштабных ветровых волн — слики, и эти области проявляются на спутниковых изображениях океана (Davaasuren et al., 2018; Evans, Ruf, 2021; Sun et al., 2023).

Задача подавления ветровых волн ПМ осложняется тем, что причиной подавления коротких ветровых гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) в присутствии ПМ могут быть не только упомянутые биоплёнки, но и непосредственно ПЭ-плёнки. В нашей работе (Доброхотов и др., 2023) было экспериментально показано, что короткие поверхностные волны затухают при распространении в областях поверхности воды, покрытой ПЭ-плёнкой. Механизм затухания здесь аналогичен затуханию ГКВ на плёнках поверхностно-активных веществ (ПАВ) и связан с диссипацией энергии волн в тонких погранслоях под плёнкой (Ермаков, Khazanov, 2022). В случае ограниченных кусков плёнки, сравнимых с длиной ГКВ, следует учитывать ещё и рассеяние волн на границах плёнки, возбуждение вторичных ГКВ при изгибных колебаниях ПЭ-плёнок в поле волн и пр.

Если обсуждать задачу распространения ГКВ в присутствии ПМ, то здесь важно отметить, что фрагменты ПМ, например ПЭ-пакеты, плавают не только на поверхности, но и в приповерхностном слое воды, и поэтому следует рассматривать влияние на волны как горизонтально ориентированных фрагментов ПМ, так и вертикальных их частей. Поэтому при решении проблемы изучения влияния ПМ на ГКВ возникает задача о распространении ГКВ над вертикально ориентированной ПЭ-плёнкой. Отметим, что схожая задача возникает и при исследовании распространения поверхностных волн в прибрежной зоне в присутствии водорослей (см., например, работу (van Veelen et al., 2020), где описаны эксперименты с вертикально ориентированными пластиковыми имитаторами водорослей).

Задача о распространении ГКВ над вертикально расположенными подводными гибкими пластинами рассматривалась теоретически в работах (Chakraborty, Mandal, 2014; Chakraborty et al., 2016; Gayen et al., 2016; Jarvis, Taylor, 1969) как задача о дифракции волн на ограниченных препятствиях. Экспериментальные же исследования, насколько нам известно, являются единичными. Кроме того, нам не известны исследования проявления вертикально расположенных в воде ПЭ-плёнок в характеристиках сигналов микроволновых радиолокаторов, что принципиально важно для развития методов дистанционной диагностики ПМ в океане.

Настоящая работа нацелена на экспериментальное исследование двух связанных между собой задач. Первая — изучение распространения ГКВ с различными частотами над вертикально расположенными в воде ПЭ-плёнками. Вторая — исследование характеристик РЛ-сигнала при рассеянии на ГКВ в присутствии вертикально ориентированных находящихся в воде ПЭ-плёнок.

Методика экспериментов

Лабораторные эксперименты по изучению особенностей распространения и затухания ГКВ сантиметрового — дециметрового диапазона на поверхности воды в присутствии вертикально ориентированных ПЭ-плёнок проводились в кольцевом ветро-волновом бассейне Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН). Для генерации поверхностных волн был установ-

лен механический волнопродуктор, с помощью которого возбуждались цуги поверхностных волн с частотами от 3,0 до 4,5 Гц и с разной крутизной ($kA \sim 0,1...0,3$, k — волновое число, A — амплитуда волны). Наряду с измерением амплитуд ГКВ волнографами регистрировались профили ГКВ с помощью фотографии поверхности, подсвеченной лазерным пучком ножевой формы. Полиэтиленовая плёнка с длиной L размещалась на фиксированном расстоянии от волнопродуктора. Измерения амплитуды волн в цугах проводились с помощью двух струнных волнографов, один из которых устанавливался на фиксированном расстоянии $H_1 = 45$ см перед плёнкой, а второй — на расстоянии $H_2 = 25$ см после плёнки. При определении коэффициентов отражения количество волн в цугах составляло порядка 5–10, в зависимости от частоты падающей волны.

В экспериментах использовались ПЭ-плёнки трёх типов: тонкая (толщиной 60 мкм), толстая (толщиной 200 мкм) и пузырчатая плёнка (общая толщина 2 мм). Пузырчатая плёнка состояла из трёх тонких слоёв, содержащих между собой периодически расположенные воздушные ячейки с диаметром порядка 10 мм. Плёнки имели ширину 30 см и совпадали с шириной бассейна. На дне плёнки крепились грузами, вблизи поверхности ПЭ-плёнки оставались свободными. Исследовались случаи, когда верхний край плёнки был достаточно близко (1–2 мм) к поверхности воды, а также когда край плёнки находился на глубине 1 и 5 см. Фотография области наблюдения с вертикально ориентированной плёнкой представлена на *рис. 1*.

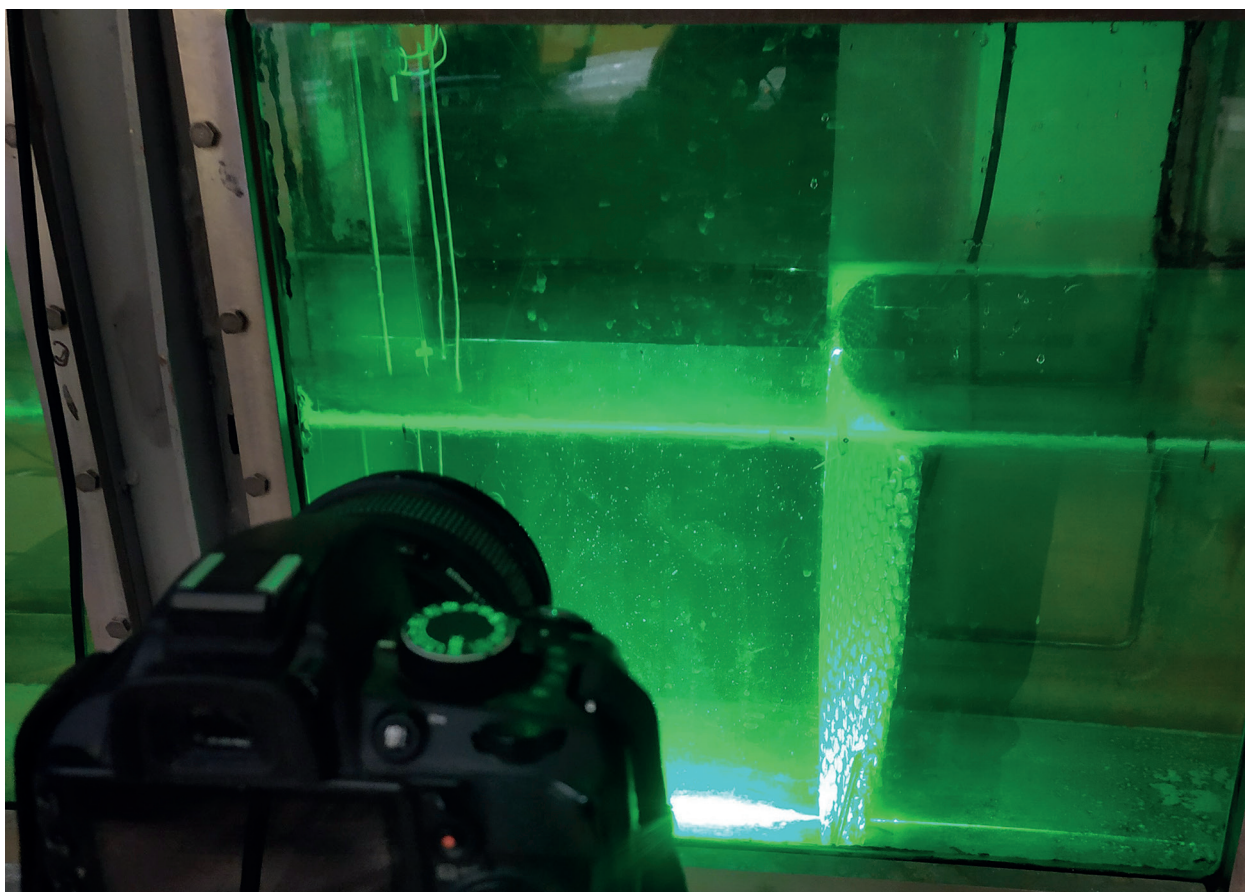


Рис. 1. Фотография пузырчатой ПЭ-плёнки, установленной в ветро-волновом бассейне ИПФ РАН

Для контроля влияния ПЭ-плёнок на ГКВ проводилась фотосъёмка профилей волн с использованием специальной подсветки поверхности воды лазерным пучком ножевой формы, который ориентировался вертикально вниз и плоскость которого была перпендикулярна продольной оси бассейна. Пример типичного профиля ГКВ с крутизной $kA \approx 0,25$

в отсутствии погружённой плёнки приведён на *рис. 2*. Как уже описывалось в работе (Ермаков et al., 2021), для крутых ГКВ характерно наличие сильно нелинейных структур — паразитной капиллярной ряби на передних склонах и «валов» (*англ.* bulge/toe) на гребнях ГКВ.

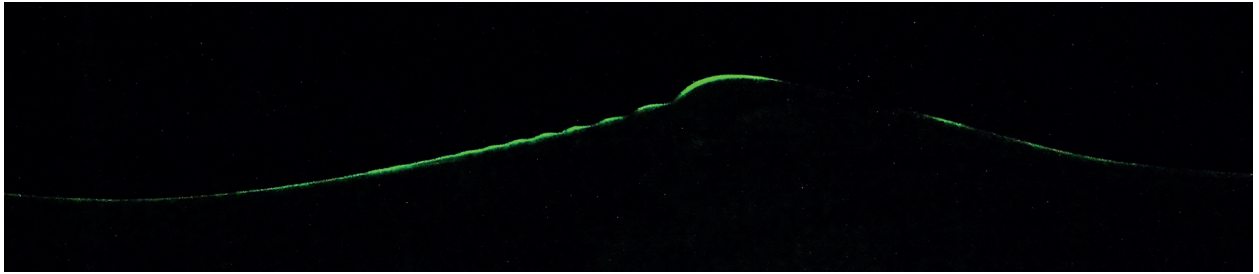


Рис. 2. Фотография профиля нелинейной ГКВ с крутизной $kA \approx 0,25$ в отсутствии ПЭ-плёнки

Радиолокационные измерения проводились с использованием скаттерометра Ка-диапазона с длиной волны 8,7 мм, размещённого на высоте 1 м над поверхностью воды. Угол падения составлял 57° , брэгговское волновое число $k_{br} = 11,5$ рад/см. Размер облучаемого радиолокатором пятна поперёк бассейна был порядка 20 см, а в продольном направлении составлял около 35 см, пятно радиолокатора располагалось сразу после вертикально ориентированной ПЭ-плёнки. Измерения интенсивности РЛ-сигнала обратного рассеяния проводились на вертикальных поляризациях (V, *англ.* Vertical) излучаемых и рассеянных электромагнитных волн (VV-поляризация).

Результаты экспериментов

Коэффициенты отражения и прохождения гравитационно-капиллярных волн

Примеры зависимостей отношения средних амплитуд волн в пути по данным с первого ($A_{пад}$) и второго ($A_{пр}$) волнографов от частоты ГКВ для разной толщины и числа вертикально ориентированных плёнок представлены на *рис. 3*. $A_{отр}$ — амплитуда отражённой волны.

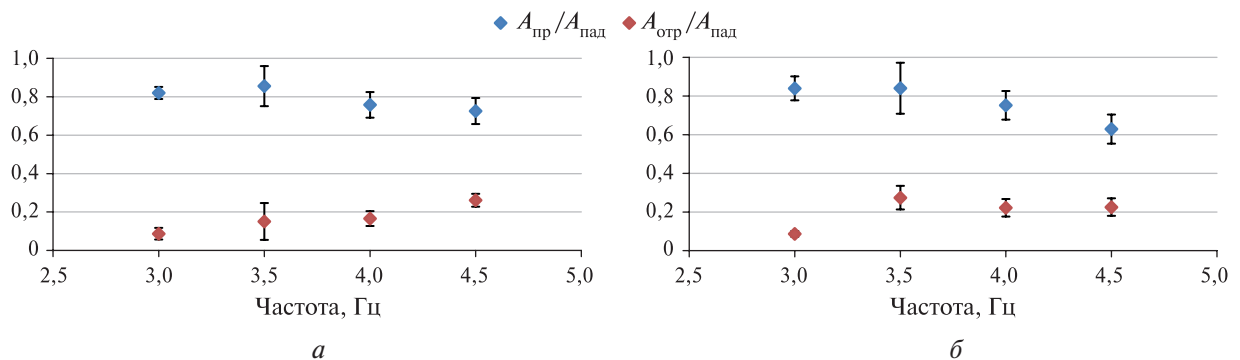


Рис. 3. Коэффициенты отражения и прохождения ГКВ в присутствии вертикально ориентированных ПЭ-плёнок как функции частоты волн: *а* — тонкая плёнка 60 мкм; *б* — пузырчатая плёнка 2 мм. Крутизна падающих волн $kA \approx 0,1$. Достоверность $\alpha = 0,9$

Из *рис. 3* видно, что коэффициенты отражения $R = A_{отр}/A_{пад}$ для плёнки 60 мкм и для толстой пузырчатой плёнки сравнимы по величине, меняются в пределах 0,1–0,25 и в целом растут с частотой ГКВ, хотя в силу малости значений более определённые выводы о частотных зависимостях R сделать сложно.

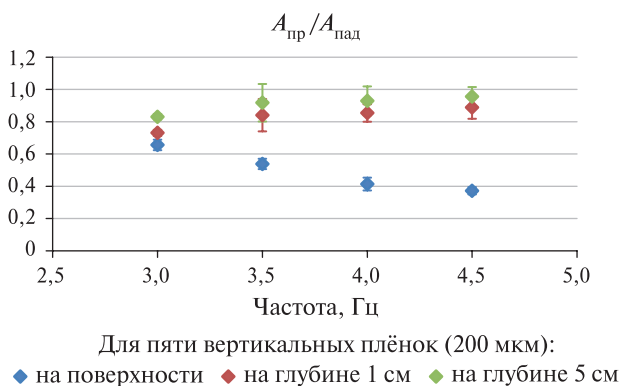


Рис. 4. Коэффициент прохождения ГКВ в присутствии вертикально ориентированных ПЭ-плёнок как функция частоты волн при различных уровнях заглубления верхнего края плёнки

Коэффициенты прохождения $T = A_{\text{пр}}/A_{\text{пад}}$ спадают с частотой ГКВ, изменяясь в диапазоне 0,85–0,6, и также сравнимы по величине для плёнок разной толщины. Отметим, что коэффициенты T и R довольно быстро меняются с глубиной погружения верхнего края плёнки — T возрастает, а R убывает, приближаясь соответственно к 1 и 0, когда глубина погружения оказывается порядка длины волны. Этот эффект ожидаем, учитывая, что волновое движение спадает с глубиной z как $\exp(-kz)$. Наиболее отчётливо этот эффект проявляется для системы из нескольких последовательно установленных в воде плёнок, как показано на рис. 4.

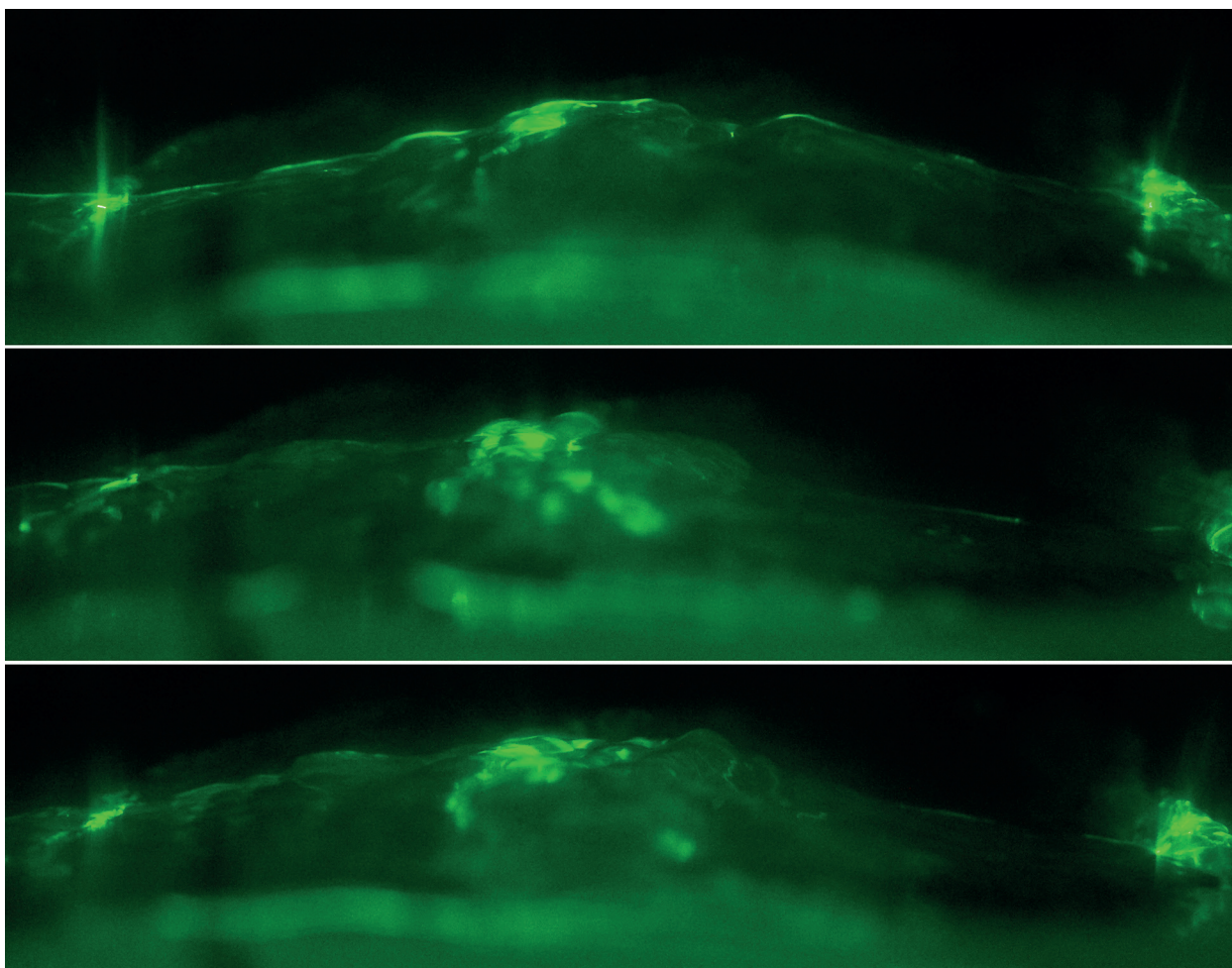


Рис. 5. Примеры профилей ГКВ с частотой 3 Гц за вертикальной пузырчатой плёнкой (2 мм)

Вертикальная плёнка приводит не только к частичному отражению и прохождению ГКВ, но и к искажению их профиля. Примеры профилей ГКВ с частотой 3 Гц вблизи ПЭ-плёнки представлены на рис. 5. Видно, что вместо хорошо известных нелинейных структур — паразитной капиллярной ряби и bulge/toe, на профиле ГКВ в присутствии плёнки возникают

сложные нерегулярные мелкомасштабные искажения, которые очевидно связаны с взаимодействием волны и колеблющейся под её действием ПЭ-плёнки.

Радиолокационное рассеяние в присутствии ПЭ-плёнки

Лабораторные измерения обратного РЛ-рассеяния на поверхности воды вблизи вертикально ориентированной ПЭ-плёнки проводились с использованием лишь одиночной пузырьчатой плёнки. Это связано с тем, что плёнка, несмотря на колебания при прохождении ГКВ, остаётся в среднем в вертикальном положении в течение всего времени эксперимента, тогда как более гибкие тонкие плёнки под действием волн заглубляются и вытягиваются в горизонтальном направлении. При этом их влияние на поверхностные волны и, соответственно, на РЛ-сигнал со временем практически пропадает.

Примеры спектров обратного РЛ-рассеяния на VV поляризации при распространении вынужденных поверхностных волн с частотой 3 и 4 Гц представлены на рис. 6.

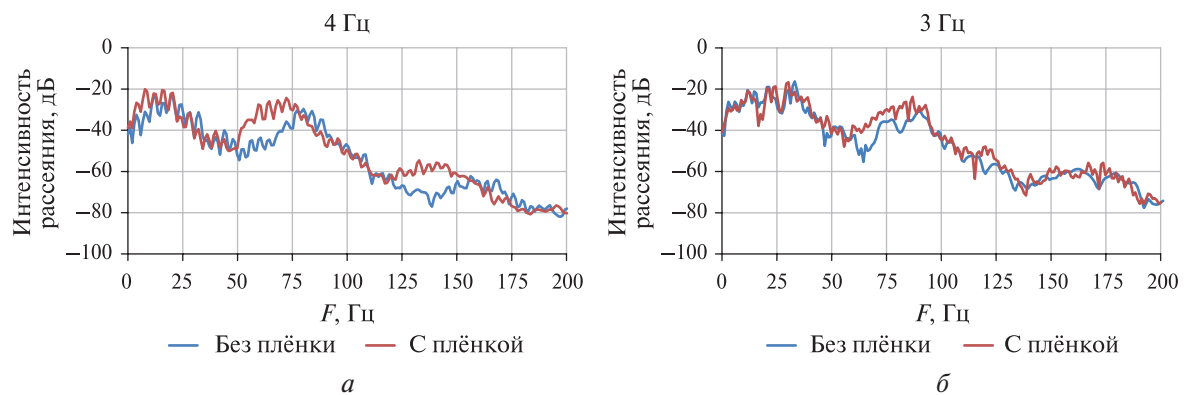


Рис. 6. Спектры интенсивности РЛ-сигнала на VV-поляризации при рассеянии на ГКВ при наличии и в отсутствии вертикальной пузырьчатой плёнки с частотой: *a* — 4 Гц; *б* — 3 Гц. Крутизна падающих волн $kA \approx 0,27$

Из рис. 6 видно, что в области сразу после вертикальной ПЭ-плёнки спектры РЛ-сигнала характеризуются большей интенсивностью брэгговского пика (частота порядка 50–90 Гц), при этом сам пик сдвинут влево, в область меньших частот, по сравнению со спектрами в отсутствие плёнки. Причины указанных особенностей будут рассмотрены ниже в разд. «Обсуждение результатов».

Обсуждение результатов

Вначале рассмотрим результаты по влиянию вертикально расположенных плёнок на распространение ГКВ. Как уже отмечалось во введении, распространение поверхностных волн при наличии погружённой в воду гибкой вертикальной пластины теоретически исследовалось в работах (см., например, (Chakraborty, Mandal, 2014; Chakraborty et al., 2016)). В частности, в публикации (Chakraborty, Mandal, 2014) приведены результаты численных расчётов коэффициентов отражения и прохождения поверхностных волн для различных параметров задачи, а именно: отношения вертикальных координат верхнего и нижнего краёв пластины a/b , отношения длины волны к длине пластины $b-a$ (далее $a \ll b$), толщины плёнки h , упругих свойств пластины. Последние описываются параметром:

$$D = \frac{Eh^3}{12\rho(1-\nu^2)g}, \quad (1)$$

где E — модуль Юнга материала плёнки; h — толщина плёнки; ρ — плотность плёнки; ν — коэффициент Пуассона; g — ускорение свободного падения. Сопоставим результаты расчётов (1) с данными наших экспериментов. Величина E для ПЭ имеет порядок 0,5 ГПа, $\nu \approx 0,4$, $\rho \approx 800...900$ кг/м³. Для плёнки толщиной $h \approx 2$ мм получаем, что $D \approx 5 \cdot 10^{-5}$ м⁴, параметр $D/b^4 \approx 0,006$, $\varepsilon/b = (\rho_p)/(\rho_w b) \approx 5 \cdot 10^{-3}$ (ρ_w — плотность воды). Будем далее полагать, что в случае, когда верхний край плёнки близок к поверхности, расстояние до неё $a \approx 2$ мм, и величину a/b примем равной 0,007.

В работе (Chakraborty, Mandal, 2014) выполнены расчёты коэффициента прохождения волн при различных значениях параметров, в том числе и близких к вышеуказанным, хотя приведённый в ней параметр ε/b несколько меньше и составляет 0,0001. Используя эти расчёты, можно оценить, что при $kb > 1$ коэффициент T практически постоянен и имеет величину около 0,6. Это значение неплохо согласуется с нашим экспериментом.

Сравним действие вертикальной и горизонтальной плёнок на характеристики ГКВ. Данное сравнение интересно при рассмотрении влияния объёмных пластиковых объектов, например плавающих в верхнем слое воды пластиковых пакетов, на ГКВ. Пусть объект имеет верхнюю горизонтальную часть длиной L и высоту вертикальной части b . Тогда уменьшение амплитуды ГКВ при прохождении горизонтально расположенной части плёнки можно оценить как $\exp\{-\gamma L/C_g\}$, где C_g — групповая скорость ГКВ, а для коэффициента затухания ГКВ примем его величину для нерастяжимой плёнки $\gamma = (\nu \omega k^2/2)^{1/2}$, ω — угловая частота ГКВ. Если $L = 30$ см, частота ГКВ 4 Гц, длина волны 10 см, то получим, что амплитуда после прохождения горизонтальной части плёнки составит 0,72 от падающей ГКВ. Для вертикальной части плёнки согласно *рис. 3б* имеем для коэффициента прохождения над вертикальной пузырчатой плёнкой $T = 0,75$. Таким образом, можно заключить, что при сопоставимых размерах горизонтальной и вертикальной частей плёнок их вклады в ослабление ГКВ могут иметь один и тот же порядок величины.

Рассмотрим теперь подробнее особенности доплеровских спектров РЛ-сигнала при рассеянии на ГКВ в присутствии плёнки и в её отсутствие. Спектры характеризуются наличием максимума, положение которого в отсутствие плёнки соответствует частоте около 75 Гц для 4-герцовых волн и 85–90 Гц для 3-герцовых волн. Такие доплеровские сдвиги отвечают скорости распространения сильно нелинейных ГКВ соответствующих частот, рассеяние микроволн при этом обусловлено нелинейными структурами на профиле крутых ГКВ — паразитной рябью и bulge/toe, «вмороженными» в профиль несущих волн (Ermakov et al., 2021).

Важная особенность спектров РЛ-сигнала в присутствии ПЭ-плёнки состоит в том, что интенсивность спектральных пиков оказывается большей, чем в отсутствие плёнки (см. *рис. 6*). При этом усиление в доплеровском спектре РЛ-сигнала в присутствии плёнки проявляется в левой части спектрального пика. Поскольку частота в доплеровском спектре определяется скоростью рассеивающих волн $\omega_d = 2k_e \sin(\theta)V(k_e$ — волновое число падающей электромагнитной волны; θ — угол падения; V — скорость рассеивателей), то усиление в левой части доплеровского пика указывает на появление свободных брэгговских волн, которые возбуждаются при колебаниях ПЭ-плёнки под действием падающих см-дм-волн большой амплитуды и скорости которых меньше, чем скорости см-дм-ГКВ. Напомним, что рассеяние на см-дм-ГКВ обусловлено наличием паразитной капиллярной ряби и bulge/toe структур, которые движутся со скоростью см-дм-ГКВ. Возбуждение колеблющейся ПЭ-плёнкой свободных брэгговских волн, как уже отмечалось, иллюстрирует *рис. 5*.

Генерация свободных брэгговских волн колеблющейся вертикальной плёнкой приводит к тому, что, в отличие от эффекта ослабления РЛ-сигнала при рассеянии на горизонтально расположенных ПЭ-плёнках (Доброхотов и др., 2023), интенсивность РЛ-рассеяния в области непосредственно за вертикально ориентированной ПЭ-плёнкой возрастает по сравнению со случаем отсутствия плёнки. Это наглядно иллюстрирует *рис. 7* (см. с. 327), где показаны зависимости интенсивности РЛ-сигнала от крутизны kA волн для случаев с вертикальной плёнкой и в её отсутствие. Интенсивность рассчитывалась как интеграл по спектру РЛ-сигнала в диапазоне частот от 45 до 90 Гц (см. *рис. 6*).

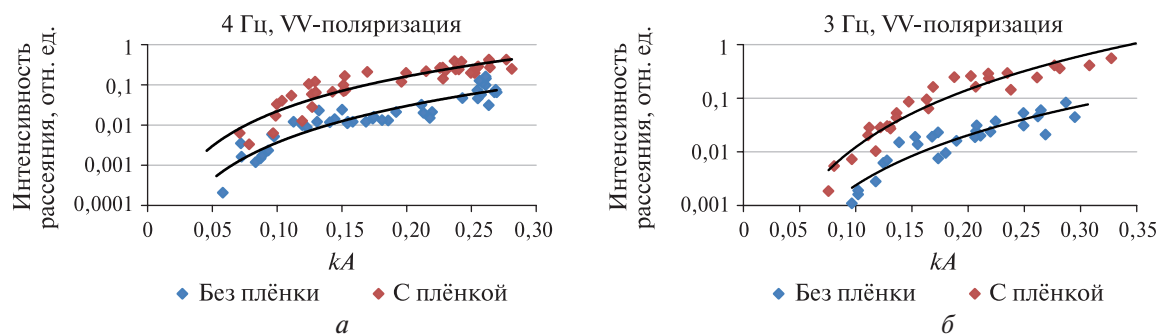


Рис. 7. Интенсивность обратного РЛ-рассеяния на чистой поверхности и с вертикально ориентированной пузырчатой ПЭ-плёнкой на VV-поляризации для падающих волн с частотой: а — 4 Гц; б — 3 Гц

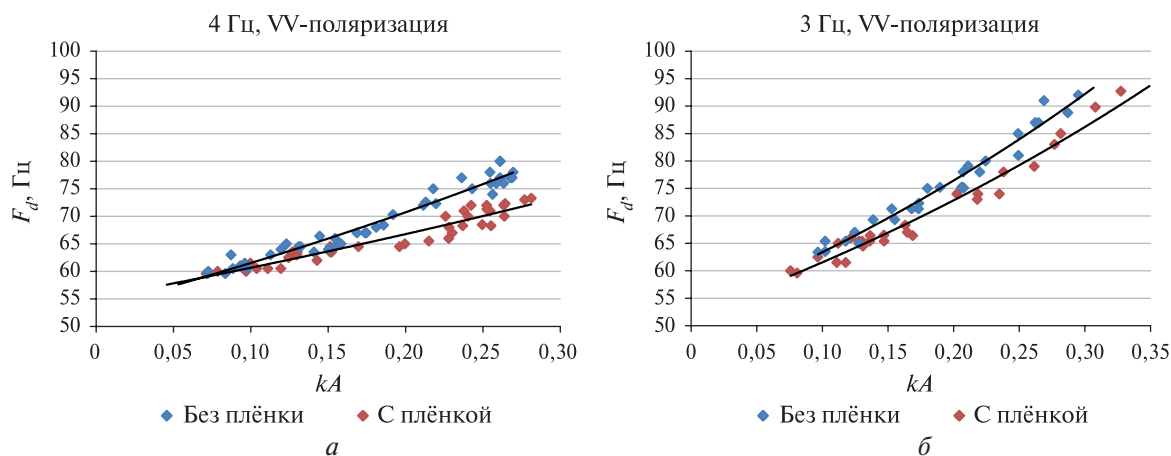


Рис. 8. Частота доплеровского сдвига (F_d) на чистой поверхности и в присутствии ПЭ-плёнки для падающих ГКВ с частотой: а — 4 Гц; б — 3 Гц

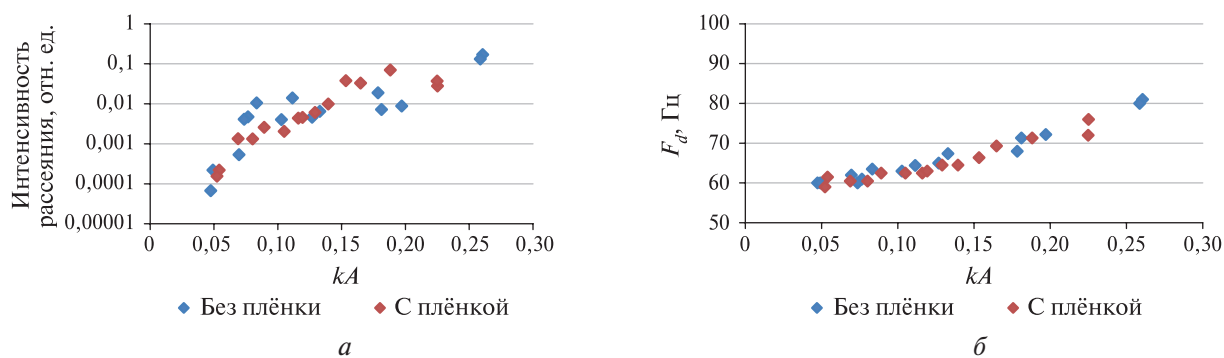


Рис. 9. Интенсивность РЛ-рассеяния (а) и доплеровский сдвиг (б) волн с частотой 4 Гц на чистой поверхности и с вертикальной ПЭ-плёнкой при удалении пятна локатора на 30 см от плёнки

В присутствии вертикальной плёнки, как уже отмечалось выше, доплеровский сдвиг РЛ-сигнала уменьшается по сравнению с отсутствием плёнки. Следует ожидать, что это уменьшение будет тем значительнее, чем больше крутизна ГКВ, что и подтверждает рис. 8. Такое поведение доплеровского сдвига, очевидно, связано с усилением колебаний ПЭ-плёнки при росте крутизны ГКВ и, как результат, более интенсивным возбуждением мелкомасштабных волн верхним краем плёнки.

Заметим, что возбуждаемые колебаниями ПЭ-плёнки свободные вторичные капиллярные волны быстро затухают в пространстве, характерная длина затухания для волн длиной около 0,5 см, даже на чистой поверхности воды в отсутствие органических плёнок, имеет

порядок 10 см. Поэтому при удалении от ПЭ-плёнки описанные выше эффекты должны практически пропадать. Это подтверждает *рис. 9* (см. с. 327), где показаны интенсивность и доплеровские сдвиги РЛ-сигнала при смещении пятна от плёнки.

Заключение

Проведены лабораторные исследования влияния вертикально ориентированных ПЭ-плёнок на затухание ГКВ сантиметрового – дециметрового диапазона на поверхности воды, а также на величину обратно рассеянного РЛ-сигнала вблизи ПЭ-плёнки.

Измерены коэффициенты отражения и прохождения ГКВ в присутствии вертикальных ПЭ-плёнок, полученные значения удовлетворительно согласуются с известными теоретическими расчётами.

Установлено, что колеблющаяся под действием поверхностных ГКВ вертикальная ПЭ-плёнка возбуждает вторичные короткие капиллярные волны. Эти волны вносят вклад в РЛ-сигнал, увеличивая интенсивность обратного рассеяния и уменьшая доплеровский сдвиг в РЛ-спектрах при рассеянии из области поверхности, непосредственно соседствующей с границей плёнки. С удалением от плёнки короткие капиллярные волны затухают и влияние плёнки в РЛ-рассеянии уменьшается.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00167, <https://rscf.ru/project/23-17-00167/>).

Литература

1. *Доброхотов В. А., Ермаков С. А., Сергеевская 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. *Chakraborty R., Mandal B. N.* Scattering of water waves by a submerged thin vertical elastic plate // *Archive of Applied Mechanics*. 2014. V. 84. P. 207–217. DOI: 10.1007/s00419-013-0794-x.
3. *Chakraborty R., Mondal A., Gayen R.* Interaction of surface water waves with a vertical elastic plate: a hyper-singular integral equation approach // *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2016. V. 67. Article 115. 18 p. DOI: 10.1007/s00033-016-0709-0.
4. *Davaasuren N., Marino A., Boardman C. et al.* Detecting microplastics pollution in world oceans using SAR remote sensing // *IGARSS 2018 — 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2018. P. 938–941. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517281.
5. *Ermakov S. A., Khazanov G. E.* Resonance damping of gravity–capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness: A reappraisal // *Physics of Fluids*. 2022. V. 34. Article 092107. <https://doi.org/10.1063/5.0103110>.
6. *Ermakov S., Sergievskaya I., Dobrokhoto V., Lazareva T.* Wave tank study of steep gravity-capillary waves and their role in Ka-band radar backscatter // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 60. Article 4202812. 12 p. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3086627>.
7. *Evans M. C., Ruf C. S.* Toward the detection and imaging of ocean microplastics with a spaceborne radar // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V. 60. Article 4202709. 9 p. DOI: 10.1109/tgrs.2021.3081691.
8. *Gallitelli L., Girard P., Andriolo U. et al.* Monitoring macroplastics in aquatic and terrestrial ecosystems: Expert survey reveals visual and drone-based census as most effective techniques // *Science of the Total Environment*. 2024. V. 955. Article 176528. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176528.
9. *Gayen R., Gupta S., Chakrabarti A.* Approximate solution of the problem of scattering of surface water waves by a partially immersed rigid plane vertical barrier // *Applied Mathematics Letters*. 2016. V. 58. P. 19–25. DOI: 10.1016/j.aml.2016.01.018.
10. *Hu C.* Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: Challenges and potentials // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 259. Article 112414. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414.
11. *Jarvis R. J., Taylor B. C.* The scattering of surface waves by a vertical plane barrier // *Mathematical Proc. Cambridge Philosophical Soc.* 1969. V. 66. P. 417–422. DOI: 10.1017/S030500410004514X.

12. 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. Article 4473. DOI: 10.3390/rs14184473.
13. 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.
14. Sun Y., Bakker T., Ruf C., Pan Y. Effects of microplastics and surfactants on surface roughness of water waves // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. Article 1978. DOI: 10.1038/s41598-023-29088-9.
15. van Veelen T. J., Fairchild T. P., Reeve D. E., Karunarathna H. Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure // *Coastal Engineering*. 2020. V. 157. Article 103648. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103648.

Laboratory studies of radar scattering from surface waves propagating over a vertical plastic film submerged in water

S. A. Ermakov^{1,2}, V. A. Dobrokhotov¹, I. A. Sergievskaya^{1,2}

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

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

The scale of growth of plastic garbage in the world's oceans is increasing every year. Macroplastics have a significant impact on the ecological state of the World Ocean, which makes the problem of plastic ocean pollution diagnostics extremely urgent. In this paper, we investigate the propagation of gravity-capillary waves over vertically arranged polyethylene films in water, and study the characteristics of the radar signal in surface wave scattering in the presence of these vertical films. Laboratory experiments were carried out in a ring wind-wave tank. Surface waves were generated using a mechanical wave maker. The profiles of gravity-capillary waves were recorded using a photograph of the surface illuminated by a knife-shaped laser beam. Polyethylene films with different thicknesses were used. Radar measurements were performed using a Ka-band scatterometer. Backscattering intensity measurements were performed on vertical polarizations of emitted and scattered electromagnetic waves. It is found that the vertical polyethylene film oscillating under the action of gravity-capillary waves excites secondary short capillary waves. This results in the increase of backscatter and reduction of radar Doppler shift. When moving away from the vertical film, the short capillary waves attenuate, and the influence of the film on the radar backscattering decreases.

Keywords: plastic garbage, polyethylene film, radar scattering, gravity-capillary waves

Accepted: 21.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-320-330

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, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 247–257 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257.
2. Chakraborty R., Mandal B. N., Scattering of water waves by a submerged thin vertical elastic plate, *Archive of Applied Mechanics*, 2014, Vol. 84, pp. 207–217, DOI: 10.1007/s00419-013-0794-x.
3. Chakraborty R., Mondal A., Gayen R., Interaction of surface water waves with a vertical elastic plate: a hypersingular integral equation approach, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*, 2016, Vol. 67, Article 115, 18 p., DOI: 10.1007/s00033-016-0709-0.
4. Davaasuren N., Marino A., Boardman C. et al., Detecting microplastics pollution in world oceans using SAR remote sensing, *IGARSS 2018 — 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2018, pp. 938–941, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517281.

5. Ermakov S. A., Khazanov G. E., Resonance damping of gravity–capillary waves on water covered with a visco-elastic film of finite thickness: A reappraisal, *Physics of Fluids*, 2022, Vol. 34, Article 092107, <https://doi.org/10.1063/5.0103110>.
6. Ermakov S., Sergievskaya I., Dobrokhoto V., Lazareva T., Wave tank study of steep gravity-capillary waves and their role in Ka-band radar backscatter, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, Vol. 60, Article 4202812, 12 p., <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3086627>.
7. Evans M. C., Ruf C. S., Toward the detection and imaging of ocean microplastics with a spaceborne radar, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2021, Vol. 60, Article 4202709, 9 p., DOI: 10.1109/tgrs.2021.3081691.
8. Gallitelli L., Girard P., Andriolo U. et al., Monitoring macroplastics in aquatic and terrestrial ecosystems: Expert survey reveals visual and drone-based census as most effective techniques, *Science of the Total Environment*, 2024, Vol. 955, Article 176528, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176528.
9. Gayen R., Gupta S., Chakrabarti A., Approximate solution of the problem of scattering of surface water waves by a partially immersed rigid plane vertical barrier, *Applied Mathematics Letters*, 2016, Vol. 58, pp. 19–25, DOI: 10.1016/j.aml.2016.01.018.
10. Hu C., Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: Challenges and potentials, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 259, Article 112414, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414.
11. Jarvis R. J., Taylor B. C., The scattering of surface waves by a vertical plane barrier, *Mathematical Proc. Cambridge Philosophical Soc.*, 1969, Vol. 66, pp. 417–422, DOI: 10.1017/S030500410004514X.
12. 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, Vol. 14, Article 4473, DOI: 10.3390/rs14184473.
13. 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, Vol. 193, Article 115109, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115109.
14. Sun Y., Bakker T., Ruf C., Pan Y., Effects of microplastics and surfactants on surface roughness of water waves, *Scientific Reports*, 2023, Vol. 13, Article 1978, DOI: 10.1038/s41598-023-29088-9.
15. van Veelen T. J., Fairchild T. P., Reeve D. E., Karunarathna H., Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure, *Coastal Engineering*, 2020, Vol. 157, Article 103648, DOI: 10.1016/j.coastaleng.2020.103648.