

## Лабораторное исследование особенностей радиолокационного рассеяния Ка-диапазона и затухания волн на воде, покрытой полиэтиленовой плёнкой

В. А. Доброхотов, С. А. Ермаков, И. А. Сергиевская

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

Загрязнение океана пластиковым мусором (ПМ) и дистанционная диагностика последнего выступает сегодня одной из актуальных экологических проблем. Важную роль в развитии методов дистанционной диагностики океана играют спутниковые радиолокаторы микроволнового диапазона. В статье описываются результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния полиэтиленовых (ПЭ) плёнок различной толщины на гравитационно-капиллярные волны (ГКВ) и интенсивность микроволнового излучения, отражённого от взволнованной водной поверхности, покрытой ПЭ-плёнкой. Показано, что ГКВ затухают при прохождении области, покрытой ПЭ-плёнкой, коэффициент затухания увеличивается с ростом толщины плёнки, при этом ПЭ-плёнку с толщиной порядка десятков микрометров можно рассматривать как абсолютно нерастяжимую упругую плёнку с нулевыми изгибными напряжениями. Получено, что паразитная капиллярная рябь и «валообразная» форма гребня (*англ.* bulge/toe), которые возникают на профиле ГКВ большой крутизны и становятся основной причиной рассеяния излучения в Ка-диапазоне, существенно подавляются ПЭ-плёнками, при этом, соответственно, уменьшается и интенсивность радиолокационного (РЛ) сигнала. РЛ-рассеяние в присутствии плёнки становится более неполяризованным по сравнению с рассеянием от ГКВ на чистой воде.

**Ключевые слова:** полиэтиленовая плёнка, гравитационно-капиллярная волна, радиолокационное рассеяние, паразитная капиллярная рябь, bulge/toe структуры

Одобрена к печати: 13.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257

### Введение

Загрязнение океана пластиковым мусором (ПМ) и дистанционная диагностика последнего становится сегодня одной из актуальных экологических проблем, при этом важную роль в её решении играют спутниковые радиолокаторы микроволнового диапазона (см., например, работы (Arii et al., 2014; Salgado-Hernanz et al., 2021; Serafino, Bianco, 2021)).

Макропластик, т. е. плавающие на поверхности или в приповерхностном слое воды пластиковые предметы с размерами порядка единиц – десятков сантиметров и более, может оказывать существенное влияние на распространение мелкомасштабных ветровых волн сантиметрового – дециметрового диапазона длин, в том числе на их затухание, что может служить физической основой для развития методов радиолокационной (РЛ) диагностики ПМ. Лабораторные и теоретические исследования влияния плавающих объектов на волны проводились, например, в контексте задач затухания волн на макроводорослях (Sundaram et al., 2020), фрагментированном льду (Хазанов и др., 2023; Sutherland, Balmforth, 2019), плоских упругих плавающих пластинах (Shugan et al., 2020), в последнем случае в приложении к проблеме разработки плавающих на поверхности моря волногасителей.

В плавучих мусорных островах пластиковые фрагменты выступают над поверхностью воды и могут приводить к увеличению РЛ-сигнала, поэтому такие острова проявляются как «яркие» пятна на радиолокационных изображениях океана (см., например, работу (Simpson et al., 2022)). В то же время часть ПМ, например полиэтиленовые (ПЭ) плёнки, дрейфуют в приповерхностных слоях воды, куда микроволновое излучение не проникает. Плавающий пластик изменяет гидродинамический режим движения частиц воды в поле поверхностных волн, приводя, в частности, к дополнительному затуханию ветровых волн — увеличению

«эффективной вязкости» воды, влиянию на возбуждение волнения, процессы обрушения волн разных масштабов и пр. Это изменяет условия распространения ветровых волн и, как результат, приводит к вариациям характеристик радиолокационных сигналов и «визуализации» на радиолокационных панорамах зон, связанных со скоплениями ПМ. В публикации (Bremer, 2014) отмечено, что важным фактором, определяющим возможности РЛ-диагностики ПМ, представляется обусловленная плавающим пластиком изменчивость характеристик капиллярных волн, хотя ни физические механизмы, ни количественный анализ такой изменчивости представлен не был.

Настоящая работа посвящена первому лабораторному моделированию влияния ПЭ-плёнок на затухание гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на поверхности воды, а также изучению особенностей обратного РЛ-рассеяния микроволн Ка-диапазона гравитационно-капиллярными волнами, распространяющимися в области плёнки.

### Методика экспериментов

Лабораторные эксперименты по исследованию особенностей распространения гравитационно-капиллярных волн сантиметрового–дециметрового диапазона на поверхности воды, покрытой полиэтиленовыми плёнками, проводились в овальном ветро-волновом бассейне Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН). В начале прямого участка бассейна был установлен механический волнопродуктор, который позволял возбуждать цуги поверхностных волн с частотами от 3 до 4,5 Гц и с разной крутизной ( $kA = 0,1-0,3$ ,  $k$  — волновое число,  $A$  — амплитуда волн). ПЭ-плёнка длиной  $L$  размещалась на поверхности воды на некотором расстоянии от волнопродуктора. Ширина ПЭ-плёнки составляла 30 см и совпадала с шириной бассейна, длина менялась от 5 до 60 см. Измерения амплитуды волн в цугах проводились с помощью двух струнных волнографов, один из которых размещался на фиксированном расстоянии  $H$  перед плёнкой и второй — сразу после плёнки. Длина цуга и расстояние  $H$  выбирались таким образом, чтобы можно было разделить во времени падающую и отражённую волну для оценки коэффициента отражения от ближней границы плёнки. Для определения коэффициента отражения от дальней границы внутри плёнки создавался небольшой разрез, внутрь которого помещался волнограф № 2. Схема эксперимента приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема эксперимента по измерению затухания ГКВ на плёнках

На рис. 2 (см. с. 249) представлены примеры сигналов двух волнографов при прохождении цуга волн через область, покрытую полиэтиленовой плёнкой.

В экспериментах использовались ПЭ-плёнки трёх типов: тонкая плёнка толщиной 20 мкм, толстая толщиной 200 мкм и пузырчатая плёнка (толщина 2 мм). Пузырчатая плёнка — плёнка, состоящая из нескольких тонких слоёв и имеющая между слоями периодически расположенные воздушные ячейки с диаметром 10 мм.

Для определения трансформации профиля волн в области плёнки, в том числе оценки изменения длины волны ГКВ, проводилась фотосъёмка со специальной подсветкой плоским лазерным пучком (плоскость пучка параллельна продольной оси бассейна), фотографии делались через боковой иллюминатор бассейна.

Отражение от ближней границы плёнки характеризуется коэффициентом  $K_{отр} = A_{отр} / A_{пад}$ , определяющим отношение средних амплитуд цугов отражённой и падаю-

щей волн (см. рис. 2). Соответственно, коэффициент отражения от дальней границы —  $K_{отр}^* = A_{отр}^* / A_{пад}^*$ . Для оценки  $A_{отр}^*$ ,  $A_{пад}^*$  второй волнограф устанавливался в разрез в плёнке у её дальней границы. В таблице представлены средние коэффициенты отражения от ближней границы, полученные по данным с волнографа № 1.

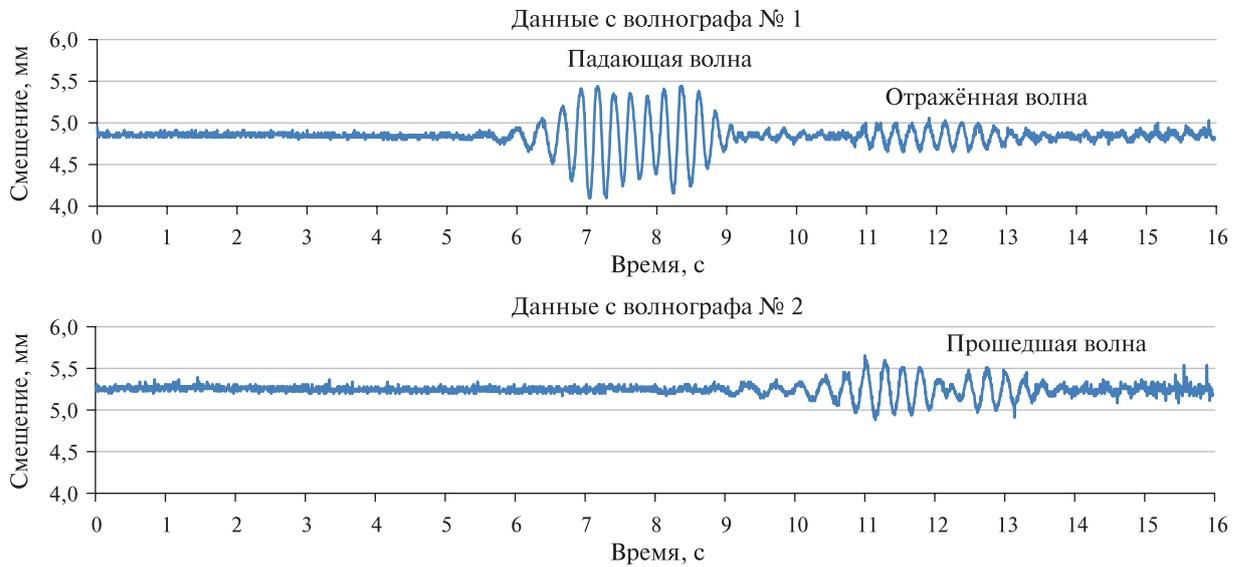


Рис. 2. Пример цугов волн до и после прохождения плёнки на поверхности воды

Средние коэффициенты отражения (в %) для трёх типов плёнки

Тип плёнки	Частота ГКВ, Гц		
	3,5	4,0	4,5
Тонкая	—	4	7
Толстая	13	17	22
Пузырчатая	20	26	—

Эксперименты показали, что  $K_{отр}^*$  много меньше  $K_{отр}$ , амплитуда отражённого сигнала обычно близка к уровню шума в сигнале, из-за чего численная оценка  $K_{отр}$  не всегда возможна. Поэтому в дальнейшем анализе отражением от дальней границы плёнки пренебрегается.

Считая, что затухание волны по мере распространения в области плёнки экспоненциальное, можно оценить коэффициент затухания волны  $\gamma_f$  при прохождении плёнки с длиной  $L$  как

$$\gamma_f \approx \ln \left( \frac{A_{пад}}{A_{пр}} \sqrt{1 - K_{отр}^2} \right) \cdot \exp \left( -2\nu k_{ГКВ}^2 \frac{H}{v_{гр}} \right) \frac{v_{гр}}{L}, \quad (1)$$

где  $v_{гр}$  — групповая скорость волн;  $k_{ГКВ}$  — волновое число ГКВ;  $A_{пр}$  — амплитуда прошедшего через плёнку цуга.

В выражении (1) полагается, что ГКВ затухает, проходя расстояние  $H$  от первого волнографа до начала плёнки с декрементом  $2\nu k_{ГКВ}^2 \cdot H / v_{гр}$ , где  $\nu$  — кинематическая вязкость воды.

Радиолокационные измерения осуществлялись с использованием скаттерометра Ка-диапазона с длиной волны 8,7 мм, размещённом на высоте 1 м над поверхностью воды, угол падения составлял  $55^\circ$ , брэгговское волновое число  $k_{бр} = 11,5$  рад/см, размер облучаемого радиолокатором пятна поперёк бассейна был около 20 см, а в продольном направлении составлял

около 35 см. При локации ПЭ использовались ПЭ-плёнки длиной около 60 см, центр пятна находился примерно в середине плёнки. Изменение поляризации излучаемого и принимаемого сигнала реализовывалось за счёт поворота локатора вокруг оси антенны.

## Результаты экспериментов

### Затухание гравитационно-капиллярных волн

Примеры зависимости отношения средних амплитуд волн в цуге по данным с первого ( $A_{пад}$ ) и второго ( $A_{пр}$ ) волнографов от длины плёнки  $L$  для нескольких частот волн и типов плёнок представлены на рис. 3. Пунктирными линиями показаны рассчитанные зависимости для модели затухания на абсолютно нерастяжимой плёнке без изгибных напряжений (см. ниже обсуждение результатов).

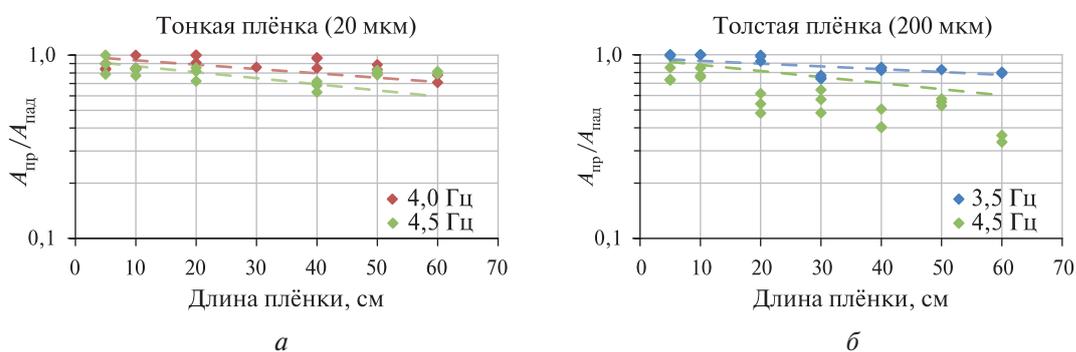


Рис. 3. Отношение амплитуд прошедшей через плёнку и падающей волн как функция длины плёнки: *a* — тонкая плёнка, *б* — толстая парниковая плёнка. Крутизна падающей волны  $kA = 0,1-0,15$

Покажем, как меняется амплитуда волны в цуге с разной начальной крутизной при прохождении области, покрытой ПЭ-плёнкой. Пример отношения амплитуд прошедшей и падающей волн в зависимости от крутизны ГКВ представлен на рис. 4 для волны 3 Гц. Видно, что отношение слабо зависит от крутизны волны.

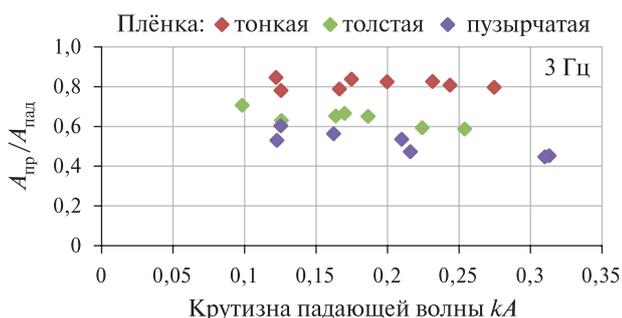


Рис. 4. Отношение амплитуд прошедшей через плёнку и падающей волн как функция крутизны падающей волны. Длина плёнки  $L = 60$  см

Примеры профилей ГКВ конечной амплитуды на чистой поверхности и на поверхности, покрытой ПЭ-плёнкой, приведены на фотографиях на рис. 5 (см. с. 251). На чистой поверхности хорошо видна паразитная капиллярная рябь (ПКР) и «валообразная» форма гребня (англ. bulge/toe) вблизи гребня ГКВ (см. также работу (Ermakov et al., 2021)). На профиле волны, покрытой ПЭ-плёнкой, ПКР практически не проявляется, хотя нелинейность профиля (его асимметрия) и, очевидно, bulge/toe структуры сохраняются, хотя и в меньшей степени (см. рис. 5б–г). Отметим также, что на профиле волны под плёнкой видны локальные неровности, вызванные плёнкой, которые могут оказывать влияние на микроволновое рассеяние.

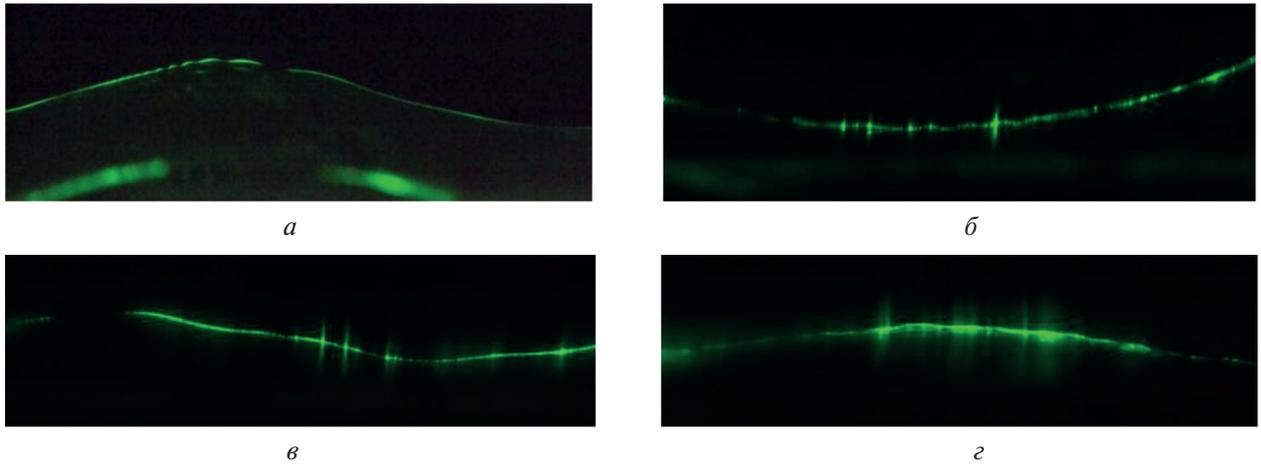


Рис. 5. Примеры профилей поверхностных волн с частотой 3 Гц на чистой поверхности воды (а) и на воде, покрытой ПЭ-плёнками: б — тонкая плёнка, в — толстая плёнка, г — пузырчатая плёнка. Крутизна волн  $kA \approx 0,2-0,25$

### Радиолокационное рассеяние в присутствии ПЭ-плёнки

Рассеяние волн Ка-диапазона на квазипериодических ГКВ конечной амплитуды при умеренных углах падения излучения обусловлено в основном брэгговским рассеянием на паразитной капиллярной ряби и неполяризованным рассеянием от bulge/toe структур на профиле несущей ГКВ. В работе (Ermakov et al., 2021) показано, что нелинейные структуры (и ПКР, и bulge/toe структуры) очень чувствительны к изменению крутизны несущей ГКВ. Уменьшение крутизны несущей волны, например из-за наличия на воде поверхностно-активной плёнки, приводит к значительному уменьшению сигнала обратного рассеяния.

На рис. 6 (см. с. 252) представлены спектры интенсивности радиолокационного рассеяния на вертикальной (VV — от *англ.* vertical) и горизонтальной (HH — от *англ.* horizontal) поляризации для ГКВ с частотой 4 Гц при двух значениях крутизны ГКВ: умеренном и близком к предельному значению крутизны нелинейной волны. Приведены спектры для различных плёнок, а для сравнения показаны также спектры РЛ-сигнала при отражении от чистой поверхности (последний случай подробно рассмотрен нами в работе (Ermakov et al., 2021)). Отметим, что спектры для ГКВ с частотой 3 Гц имеют схожий характер.

Как видно из рис. 6, в доплеровских спектрах РЛ-сигнала при рассеянии на ГКВ сравнительно малой амплитуды наблюдается локальный максимум на частотах около 65 Гц, при этом интенсивность пика на VV-поляризации выше, чем на HH-поляризации. С ростом крутизны ГКВ частота максимума спектра несколько сдвигается в сторону более высоких частот, хотя и меньше, чем на чистой воде, а различие в спектральной интенсивности на разной поляризации уменьшается. С ростом толщины плёнки интенсивность спектральных максимумов уменьшается в целом тем сильнее, чем толще плёнка, при этом в отличие от пика на VV-поляризации пик на HH-поляризации больше носит характер плато.

## Обсуждение результатов

### Затухание квазилинейных гравитационно-капиллярных волн

Для интерпретации представленных выше результатов по затуханию ГКВ на плёнке воспользуемся моделью абсолютно нерастяжимой плёнки с упругостью  $E = \infty$ , в которой при этом отсутствуют изгибные напряжения. В рамках этой модели коэффициент затухания волны во времени равен  $\sqrt{(\nu\omega k^2)}/8$  (см., например, работу (Ermakov, Khazanov, 2022)), где  $\nu$  — вязкость воды;  $k$  — волновое число;  $\omega$  — частота волны. Затухание волны на чистой поверхности будем описывать временным декрементом  $2\nu k^2$ .

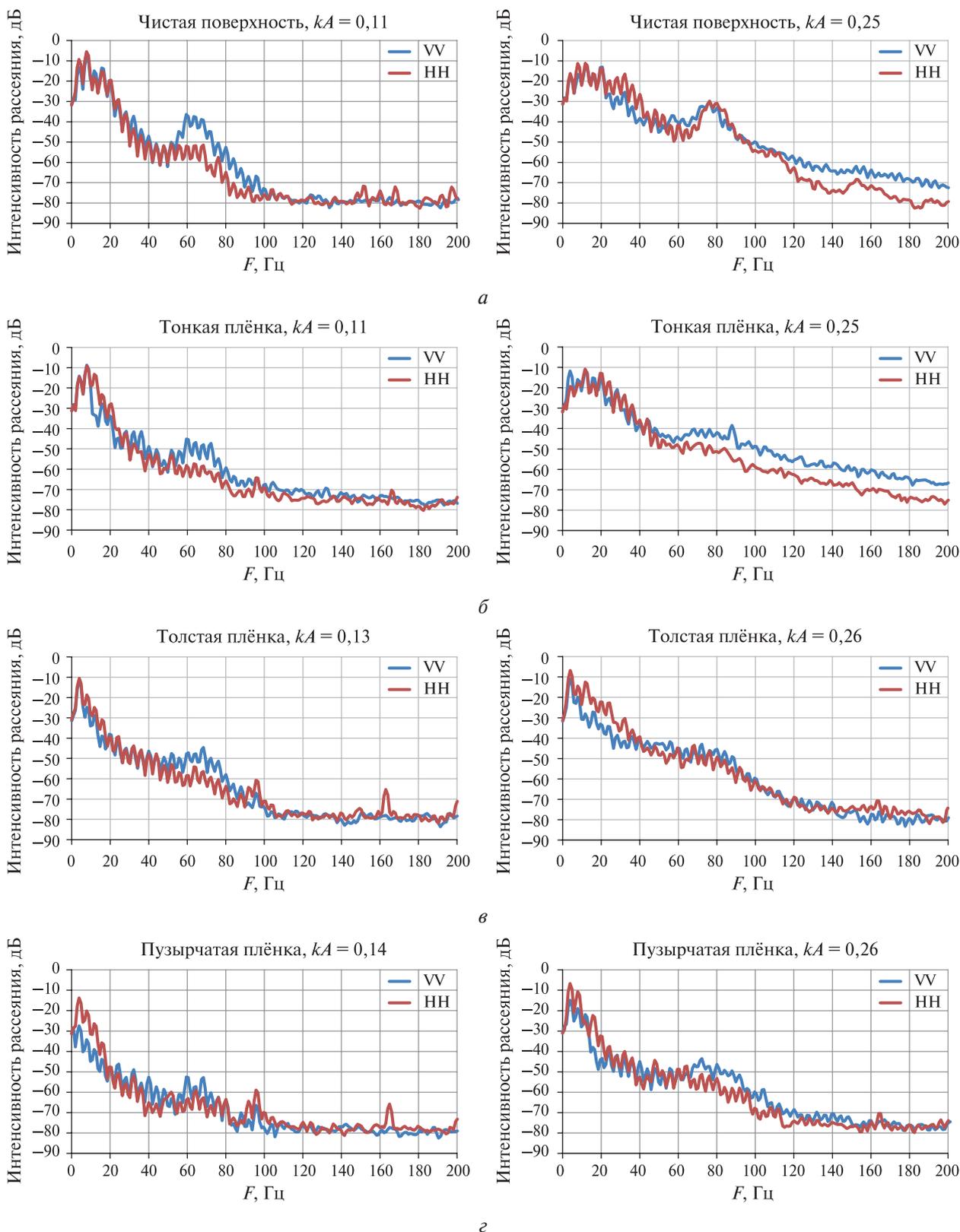


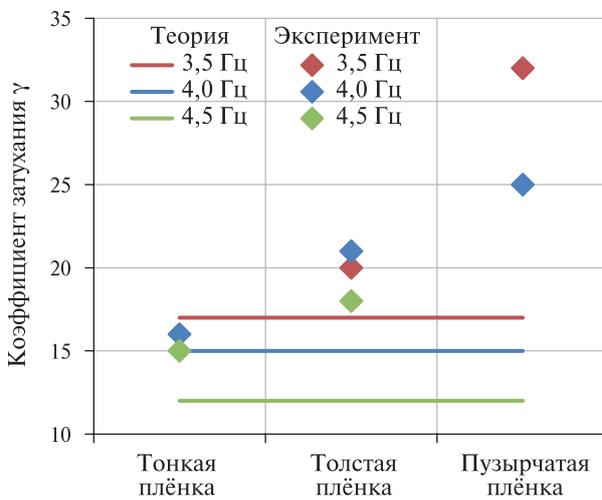
Рис. 6. Спектры интенсивности РЛ-сигнала на VV- и HH-поляризации при рассеянии на ГКВ с частотой 4 Гц на чистой поверхности (*a*); на поверхности, покрытой тонкой плёнкой (*б*), толстой плёнкой (*в*), пузырьчатой плёнкой (*г*)

Тогда относительная амплитуда волны при прохождении абсолютно нерастяжимой плёнки с длиной  $L$  может быть записана в виде:

$$\frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{пад}}} \approx \exp\left[-2\nu k^2 \cdot \frac{H}{v_{\text{гр}}}\right] \sqrt{1 - K_{\text{отр}}^2} \exp\left[-\sqrt{\frac{\nu\omega k^2}{8}} \cdot \frac{L}{v_{\text{гр}}}\right]. \quad (2)$$

Зависимости относительной амплитуды от длины плёнки, рассчитанные согласно выражению (2), приведены на *рис. 3*. Из сравнения результатов расчётов с экспериментальными зависимостями можно заключить, что имеет место неплохое согласие с моделью нерастяжимой плёнки для тонкой плёнки, для толстой же плёнки наблюдается расхождение с моделью с ростом частоты ГКВ.

Рассчитанные коэффициенты затухания  $\gamma$ , полученные в эксперименте и рассчитанные теоретически в рамках модели нерастяжимой плёнки, нормированные на коэффициент затухания на чистой воде, приведены на *рис. 7*.



*Рис. 7.* Нормированные коэффициенты затухания ГКВ различных частот. Сравнение эксперимента и модели нерастяжимой плёнки

Видно, что наблюдается неплохое согласие эксперимента и модели для случая тонкой плёнки. Это позволяет рассматривать последнюю как абсолютно нерастяжимую плёнку с нулевыми изгибными напряжениями. Для ПЭ-плёнок большей толщины отмечается заметное расхождение с моделью — тем большее, чем больше толщина плёнки. Можно полагать, что для корректного описания затухания на толстых плёнках требуется учёт изгибных напряжений в плёнке, аналогично, например, теории затухания волн на льду (Meylan et al., 2018); этот вопрос, однако, будет исследоваться нами в дальнейшем.

Следует заметить, что при расчётах мы использовали длину ГКВ, рассчитанную по дисперсионному отношению для чистой поверхности, однако это допущение не совсем корректно. Анализ фотографий профилей волн позволяет оценить влияние плёнки на длину ГКВ. Так, на толстой парниковой плёнке длина волны с частотой 3 Гц увеличивается на 6–11 %, на пузырьчатой плёнке — на 18–20 %. Данный эффект, предположительно, также связан с влиянием изгибной упругости толстых плёнок и будет более детально изучен отдельно.

### Радиолокационное рассеяние на волнах в присутствии ПЭ-плёнки

Известно, что ПКР и bulge/toe структуры на профиле ГКВ конечной амплитуды являются квазистационарными и распространяются с фазовой скоростью  $V$  несущих волн (Ермаков et al., 2021). В связи с этим доплеровский сдвиг, соответствующий максимуму спектра РЛ-сигнала, находится в окрестности  $f_D = k_{br} \cdot V/2\pi$ , что составляет 60 Гц для малых значений крутизны несущей волны и до 75–80 Гц для предельных значений крутизны. В работе

(Ермаков et al., 2021) показано, что в присутствии плёнок поверхностно-активных веществ увеличивается затухание ГКВ, уменьшается их крутизна и, соответственно, падает интенсивность обратно рассеянного РЛ-сигнала. При этом подавление сигнала в окрестности доплеровского пика на VV-поляризации сильнее, чем на HH-поляризации. Последнее объясняется тем, что ПКР с масштабами порядка брэгговской длины волны (около 0,5 см), дающая значительный вклад в рассеяние на VV-поляризации, гасится сильнее, чем имеющие больший масштаб bulge/toe структуры, которые и определяют в основном неполяризованную компоненту рассеяния.

Схожая ситуация наблюдается при рассеянии на поверхности, покрытой ПЭ-плёнками. Это следует из рис. 6б–г, а также рис. 8, где представлены примеры зависимости интенсивности РЛ-сигнала на VV- и HH-поляризации в спектральном интервале от 45 до 95 Гц вблизи локального максимума, соответствующего скорости несущих волн с частотой 4 Гц, от крутизны этих волн. Следует заметить, что мы связываем сигнал на частотах ниже 40–50 Гц с отражениями излучения от металлических частей бассейна, с этим же связана и плавно убывающая «подставка» на более высоких частотах. Наличие такой подставки также влияет на оценку интенсивности сигнала, связанного с рассеянием на ПКР и bulge/toe структурах, и отношения интенсивности на VV- и HH-поляризации, так называемого поляризационного отношения (ПО). Зависимость ПО от крутизны волн приведена на рис. 9 (см. с. 255).

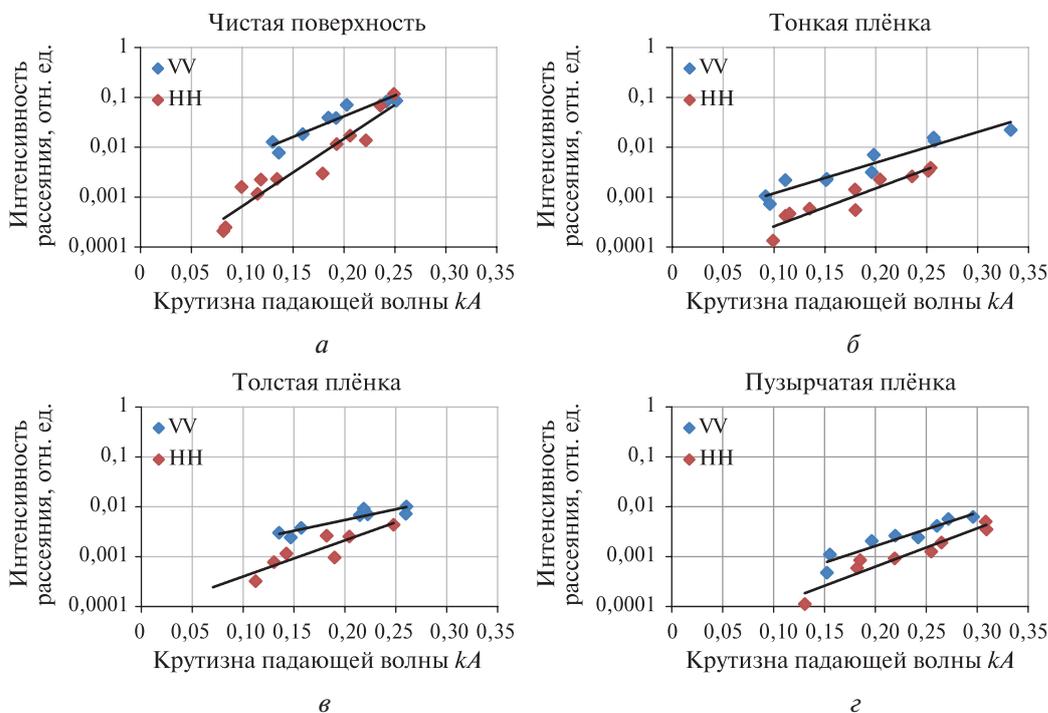


Рис. 8. Интенсивность радиолокационного рассеяния на ГКВ с частотой 4 Гц в зависимости от крутизны падающей на плёнку волны на чистой поверхности (а), на тонкой плёнке (б), на толстой плёнке (в), на пузырьчатой плёнке (г)

Из рис. 9 следует, что при малой крутизне волн ПО значительно меньше для всех ПЭ-плёнок, чем на чистой поверхности (исключение составило одно значение ПО тонкой плёнки для крутизны 0,1 волны с частотой 3 Гц), причём чем толще плёнка, тем меньше ПО. Это, по всей видимости, свидетельствует о том, что ПЭ-плёнка сильно подавляет ПКР на профиле крутых ГКВ, тогда как bulge/toe структуры гасятся слабее. Данный вывод справедлив для волн с частотами 3–4 Гц на небольших (порядка нескольких длин ГКВ) расстояниях от начала ПЭ-плёнки, на больших расстояниях интенсивность сигнала обратного рассеяния становится весьма малой и оценка ПО затруднительна.

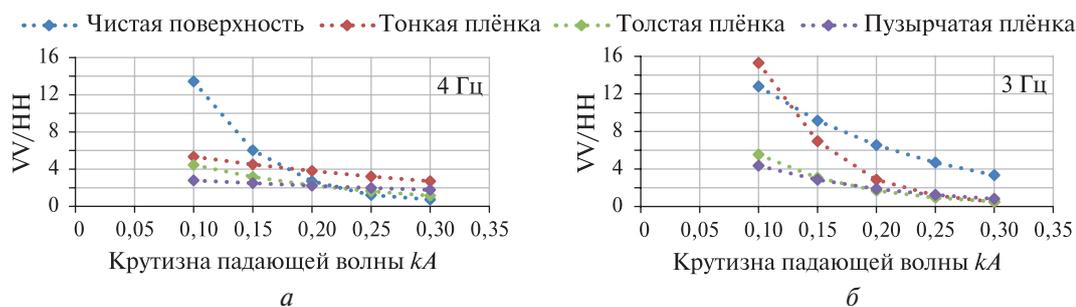


Рис. 9. Поляризационное отношение ( $VV/HH$ ) в зависимости от крутизны волны для ГКВ с частотой 4 Гц (а) и 3 Гц (б)

## Заключение

Суммируем основные результаты, полученные в работе.

Проведено лабораторное моделирование влияния ПЭ-плёнок на затухание ГКВ сантиметрового – дециметрового диапазона на поверхности воды, а также на величину обратно рассеянного микроволнового РЛ-сигнала при отражении от области, покрытой плёнкой.

Показано, что ГКВ затухают при прохождении области, занятой ПЭ-плёнкой, коэффициент затухания ГКВ увеличивается с ростом толщины плёнки, коэффициент отражения ГКВ от границы плёнки также растёт с увеличением её толщины. Показано, что при оценке величины коэффициента затухания ПЭ-плёнку с толщиной порядка десятков микрометров можно описывать как абсолютно нерастяжимую упругую плёнку с нулевыми изгибными напряжениями. Для толщины плёнок более 100 мкм расхождение между теорией затухания ГКВ на абсолютно нерастяжимой плёнке и экспериментом достигает значений порядка 1,5–2, что свидетельствует о необходимости учёта поправок на изгибные упругие напряжения аналогично теории затухания волн на поверхности, покрытой льдом.

Получено, что паразитная капиллярная рябь и bulge/toe структуры, которые возникают на профиле ГКВ большой крутизны и становятся основной причиной рассеяния микроволнового излучения Ка-диапазона, подавляются ПЭ-плёнками, при этом, соответственно, уменьшается и интенсивность РЛ-сигнала. РЛ-рассеяние в присутствии плёнки становится более неполяризованным, чем рассеяние на ГКВ на чистой воде. Это свидетельствует о том, что полиэтиленовая плёнка сильнее подавляет паразитную капиллярную рябь на профилях крутых гравитационно-капиллярных волн, тогда как bulge/toe структуры подавляются слабее.

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

## Литература

1. Хазанов Г. Е., Ермаков С. А., Доброхотов В. А. и др. Исследование затухания гравитационных волн на фрагментированном льду // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 229–241. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-229-241.
2. 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. P. 1729–1744. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
3. Bremer T. Tracing waves to find phantom plastic // TU Delft. 2014. <https://www.tudelft.nl/en/stories/articles/tracing-waves-to-find-phantom-plastic>.
4. Ermakov S., Khazanov G. Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a viscoelastic film of finite thickness. I. A reappraisal // Physics of Fluids. 2022. V. 34. Article 092107. <https://doi.org/10.1063/5.0103110>.
5. Ermakov S., Sergievskaya I., Dobrokhотов 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. P. 1–12. DOI: 10.1109/tgrs.2021.3086627.

6. Meylan M. H., Bennets L. G., Doble M., Mosig E. M. Dispersion relations, power laws, and energy loss in waves for the marginal ice zone // *J. Geophysical Research: Ocean*. 2018. V. 123. P. 3322–3335. <https://doi.org/10.1002/2018JC013776>.
7. 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.
8. Serafino F., Bianco A. Use of X-Band Radars to Monitor Small Garbage Islands // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 3558. DOI: 10.3390/rs13183558.
9. 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. Marine Science and Engineering*. 2020. V. 8. Article 571. DOI: 10.3390/jmse8080571.
10. Simpson M., 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.
11. Sundaram H., Renganathan M., 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 // *ISH J. Hydraulic Engineering*. 2020. V. 28. No. 3. P. 1–8. DOI: 10.1080/09715010.2020.1858358.
12. Sutherland B. R., Balmforth N. J. Damping of surface waves by floating particles // *Physical Review Fluids*. 2019. V. 4. Article 014804. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.014804.

## Laboratory study of Ka-band radar scattering and wave damping on water covered with plastic film

V. A. Dobrokhотов, S. A. Ermakov, I. A. Sergievskaya

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

Ocean pollution by plastic garbage (PG) and remote diagnostics of the latter is an urgent ecological problem nowadays. Microwave satellite radars play an important role in the development of remote ocean diagnostics methods. This article presents the results of laboratory experiments on studying the effect of polyethylene (PE) films of different thicknesses on gravity-capillary waves (GCW) and on the intensity of microwave radiation reflected from a wavy water surface covered with PE film. It is shown that GCWs are attenuated when passing the region covered with PE film and the attenuation coefficient increases with film thickness. PE film with thicknesses of the order of dozens of microns can be considered as an absolutely non-stretchable elastic film with zero bending tensions. It is found that parasitic capillary ripples and bulge/toe structures, which appear on the profile of large-steepness GCW and represent the main source of scattering of Ka-band radiation, are significantly suppressed by PE films, while the intensity of the radar signal decreases accordingly. Radar scattering in the presence of the film becomes more unpolarized compared to scattering from GCW on clean water.

**Keywords:** plastic film, gravity-capillary wave, radar scattering, parasitic capillary ripples, bulge/toe structures

Accepted: 13.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257

## Reference

1. Khazanov G. E., Ermakov S. A., Dobrokhотов V. A. et al., Damping Of Gravity Waves On Fragmented Ice, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 229–241 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-229-241.
2. 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, Vol. 7, No. 5, pp. 1729–1744, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.

3. Bremer T., Tracing waves to find phantom plastic, *TU Delft*, 2014, <https://www.tudelft.nl/en/stories/articles/tracing-waves-to-find-phantom-plastic>.
4. Ermakov S., Khazanov G., Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a viscoelastic film of finite thickness. I. A reappraisal, *Physics Fluids*, 2022, Vol. 34, Article 092107, <https://doi.org/10.1063/5.0103110>.
5. Ermakov S., Sergievskaya I., Dobrokhотов 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, pp. 1–12, DOI: 10.1109/tgrs.2021.3086627.
6. Meylan M. H., Bennets L. G., Doble M., Mosig E. M., Dispersion relations, power laws, and energy loss in waves for the marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Ocean*, 2018, Vol. 123, pp. 3322–3335, <https://doi.org/10.1002/2018JC013776>.
7. 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, Vol. 168, Article 112347, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112347.
8. Serafino F., Bianco A., Use of X-Band Radars to Monitor Small Garbage Islands, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 3558, DOI: 10.3390/rs13183558.
9. 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. Marine Science and Engineering*, 2020, Vol. 8, Article 571, DOI: 10.3390/jmse8080571.
10. Simpson M., 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.
11. Sundaram H., Renganathan M., 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, *ISH J. Hydraulic Engineering*, 2020, Vol. 28, No. 3, pp. 1–8, DOI: 10.1080/09715010.2020.1858358.
12. Sutherland B. R., Balmforth N. J., Damping of surface waves by floating particles, *Physical Review Fluids*, 2019, Vol. 4, Article 014804, DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.014804.