

Модельные эксперименты по исследованию влияния пластикового мусора на водной поверхности на характеристики радиолокационных сигналов Ka-диапазона

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

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

Проблема загрязнения океана пластиковым мусором (ПМ) и развития физических основ его дистанционной, в том числе радиолокационной, диагностики приобрела в последние годы исключительную важность. В настоящей статье на примере полиэтиленовых плёнок, плавающих на водной поверхности, представлены результаты первых специальных натуральных экспериментов по исследованию влияния ПМ на характеристики радиолокационных сигналов микроволнового диапазона. Радиолокационное зондирование выполнено с использованием доплеровского скаттерометра Ka-диапазона, установленного на движущемся маломерном судне, при средних углах падения микроволн, на вертикальной и горизонтальной поляризации, под углом к ветру и поперёк ветра. Коэффициент затухания ветровых волн при прохождении ими области, занятой плёнкой, измерен с использованием миниатюрных акселерометров. Обнаружено значительное (в единицы – десятки раз) ослабление интенсивности радиолокационного сигнала в подветренной по отношению к плёнке области волнения – эффект «следа» ПМ; показано, что величина эффекта зависит от азимутального угла, под которым проводится зондирование. Предложено качественное физическое объяснение затухания ветровых волн на плёнке и эффекта радиолокационного следа ПМ.

Ключевые слова: пластиковый мусор, ветровые волны, радиолокация, полиэтиленовая плёнка, радиолокационный след пластикового мусора

Одобрена к печати: 04.12.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269

Введение

Как известно, поступление пластикового мусора (ПМ) в океан в последние десятилетия достигло угрожающего масштаба, представляя серьёзную экологическую угрозу морским экосистемам (см., например, работу (Chubarenko et al., 2020)). В этой связи проблема дистанционной, прежде всего спутниковой, диагностики ПМ в океане приобрела исключительную важность и широко обсуждается в литературе в контексте развития различных технологий для решения проблемы обнаружения морского мусора, таких как оптическая съёмка, спектроскопия, СВЧ-измерения (сверхвысокочастотные) (см. публикации (Chubarenko et al., 2020; Salgado-Hernanz et al., 2021; Serafino, Bianco, 2021) и цитированную литературу). Были продемонстрированы возможности обнаружения скоплений ПМ в ходе спутниковых наблюдений в видимом диапазоне (Salgado-Hernanz et al., 2021), однако использование оптических систем, как известно, ограничено светлым временем суток и благоприятными метеоусловиями (малая облачность, отсутствие осадков, тумана и пр.). Поэтому, как и в других задачах диагностики океана, важная роль отводится радиолокаторам микроволнового диапазона, прежде всего радиолокаторам с синтезированной апертурой. Если говорить о радиолокационной (РЛ) диагностике ПМ, то здесь результаты пока весьма немногочисленны и ограничиваются, по сути, лишь наблюдениями «плавающих мусорных островов», которые при рассеянии СВЧ-излучения на водной поверхности в присутствии выступающих над поверхностью воды пластиковых объектов проявляются на РЛ-изображениях как области с повышенной

яркостью. При этом отмечается, что «видимость» мусорных островов на РЛ-изображениях существенно снижается с ростом скорости ветра, поскольку возрастает относительный вклад рассеяния на ветровом волнении, которое маскирует ПМ (см. публикации (Arii et al., 2014; Serafino, Bianco, 2021; Simpson et al., 2022) и цитируемую литературу). Следует отметить, что в работе (Arii et al., 2014), где описаны подобные наблюдения, можно увидеть интересные особенности РЛ-изображений, а именно наличие областей с пониженной интенсивностью волнения, которые окружают «яркие» скопления ПМ. В работе (Arii et al., 2014) этот эффект, однако, остался незамеченным. Очевидно, что при описании динамики гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) в присутствии плавающих пластиковых объектов необходим корректный учёт граничных условий на поверхности пластика, что меняет режим движения частиц жидкости и, в частности, может приводить к затуханию ГКВ, которое в некотором отношении подобно влиянию на волнение плёнок поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПМ может также влиять на возбуждение ветровых волн, процессы их обрушения, нелинейные взаимодействия и прочее, а следовательно, на характеристики РЛ-сигналов, рассеянных на морской поверхности. В материале (Bremer, 2022) утверждается, что изменчивость характеристик капиллярных волн, обусловленная плавающим пластиком, должна влиять на возможности радиолокационной диагностики ПМ, однако ни физические механизмы, ни количественный анализ такой изменчивости в литературе не представлены. Отметим, что ПМ, наряду с гидродинамическим воздействием, может влиять на волнение и за счёт плёнок биогенных ПАВ, продуцируемых фитопланктоном — обрастателем пластика (Zettler et al., 2013). Этот вопрос, однако, в данной работе не рассматривается.

Настоящая работа посвящена результатам первых натуральных экспериментов с «искусственным» ПМ (по аналогии с экспериментами с искусственными сликами ПАВ, см. работы (Ермаков, 2010; Ermakov, Khazanov, 2022) и цитированную литературу). Исследовалось влияние одного из типов мусора — полиэтиленовых (ПЭ) плёнок, плавающих на водной поверхности, — на характеристики радиолокационных сигналов Ка-диапазона. В описываемых в работе экспериментах использована упаковочная воздушно-пузырчатая плёнка, неподвижная (заякоренная) либо свободно дрейфующая в поле ветра и волнения. РЛ-зондирование проводилось с использованием скаттерометра Ка-диапазона, установленного на движущемся маломерном судне. В ходе экспериментов было зарегистрировано усиление РЛ-рассеяния непосредственно от плёнки, а также изменчивость интенсивности рассеяния на ветровом волнении в окрестности плёнки. В частности, обнаружен эффект ослабления интенсивности РЛ-сигнала в подветренной области волнения за плёнкой — эффект «следа» ПМ. С использованием миниатюрных акселерометров зарегистрировано ослабление ветровых волн при прохождении области, занятой плёнкой. Структура работы следующая: вначале дано описание методики экспериментов на Горьковском вдхр., затем представлены результаты измерений, далее — их краткое обсуждение и основные выводы.

Методика экспериментов

Эксперименты проводились на Горьковском вдхр. во второй половине сентября 2023 г. с борта катамарана-лаборатории «Геофизик» Института прикладной физики РАН (ИПФ РАН), на борту которого на высоте около 2,7 м над водой был установлен доплеровский скаттерометр Ка-диапазона. Угловая ширина диаграммы направленности скаттерометра — $\sim 5^\circ$, угол падения зондирующего излучения — $\sim 57^\circ$, размеры облучаемой области на поверхности воды — $0,5 \times 0,9$ м. Скаттерометр работал в режиме непрерывного частотно-модулированного излучения на соосной поляризации (вертикально-вертикальной (VV от *англ.* vertical) либо горизонтально-горизонтальной (HH от *англ.* horizontal)) на приём и передачу; изменение поляризации обеспечивалось механическим поворотом прибора во время экспериментов вокруг оси антенны. В качестве имитатора ПМ использовалась полиэтиленовая упаковочная плёнка с воздушными пузырьками толщиной около 2 мм. Плёнка имела размеры 3×10 м и спускалась с борта судна на поверхность воды. Работы проводились для неподвижной плёнки,

когда она была привязана тонкой плавучей верёвкой к заякоренному буйку, а также в режиме свободно дрейфующей в поле ветра плёнки. Судно двигалось параллельно длинной стороне плёнки последовательными галсами, навстречу и по ветру. Следует отметить, что из-за флуктуаций скорости ветра, оказывающих влияние на скорость и направление движения судна, зачастую при подходе к плёнке приходилось несколько корректировать его курс, с тем чтобы пятно локатора прошло через область плёнки. Это могло приводить к медленным вариациям доплеровского сдвига. Неподвижная плёнка устанавливалась длинной стороной вдоль ветра, в режиме же свободно дрейфующей плёнки последняя со временем разворачивалась поперёк ветра. Это затрудняло эксперимент, поскольку требовало корректировки курса судна во время измерений, а также периодической установки плёнки в исходное положение вдоль ветра. РЛ-зондирование проводилось либо под азимутальным углом $55\text{--}60^\circ$ к курсу судна, либо в поперечном к ветру направлении. Эксперименты выполнялись при скорости ветра $3\text{--}4$ м/с, северо-западное направление. Для неподвижной плёнки проведено по 5 серий экспериментов при зондировании поперёк ветра на вертикальной и горизонтальной поляризации и по 5 серий — на двух поляризациях при зондировании под углом. В режиме дрейфующей плёнки выполнено по две серии экспериментов на вертикальной и горизонтальной поляризации при поперечном к ветру зондировании и столько же при зондировании под углом. Кроме РЛ-измерений проводились измерения ветрового волнения с использованием системы автономных миниатюрных пьезоакселерометров, размещённых в герметичных корпусах, имеющих форму плоского диска диаметром 8 см и высотой около 1 см. Выполнено две серии таких измерений. Запись показаний велась во внутреннюю память акселерометров, а после окончания экспериментов данные измерений переносились в компьютер. Всего использовалось четыре акселерометра, которые крепились к плёнке по два вблизи наветренного и подветренного её краёв. Отметим, что в период проведения экспериментов не наблюдалось сильного цветения фитопланктона и влияние связанных с цветением биогенных плёнок на затухание ветровых волн было существенно слабее, чем влияние полиэтиленовой плёнки.

Результаты экспериментов

Спектры РЛ-сигналов. Неподвижная плёнка

Зондирование под углом к ветру. Рассмотрим особенности доплеровских спектров РЛ-сигнала для случая неподвижной плёнки. На *рис. 1* (см. с. 260) представлены текущие спектры (спектрограммы) РЛ-сигнала при азимутальном угле $55\text{--}60^\circ$ на VV- и HH-поляризации на двух близких по времени галсах, оба — при движении судна навстречу ветру; скорость ветра на втором галсе была несколько меньше, чем на первом. Под каждой из спектрограмм приведены записи скорости движения судна, показывающие, что судно в течение каждого из галсов двигалось практически равномерно со скоростью $1,1\text{--}1,2$ м/с, что позволяет проводить сравнительный анализ полученных доплеровских спектров. Как и следовало ожидать, для случая движения локатора навстречу ветру доплеровские сдвиги на плёнке меньше, чем на волнении (см. обсуждение результатов ниже), уровень интенсивности РЛ-сигнала на плёнке существенно выше, чем при рассеянии на ветровых волнах. Новая и наиболее интересная особенность состоит в том, что интенсивность РЛ-сигнала на волнении в подветренной по отношению к плёнке области заметно меньше, чем в наветренной. Данную особенность можно охарактеризовать как эффект РЛ-следа ПМ. Эффект наглядно иллюстрируется также средними доплеровскими спектрами РЛ-сигнала при рассеянии на ветровых волнах в наветренной и подветренной областях, а также на самой плёнке (см. *рис. 1д, е*).

Пример наблюдения эффекта РЛ-следа при движении судна по ветру приведён на *рис. 2* (см. с. 261). Характер спектрограммы в целом согласуется с данными на *рис. 1* с той разницей, что в данном случае доплеровский сдвиг на волнении ниже, чем из области плёнки. Уменьшение интенсивности РЛ-сигнала теперь проявляется в правой части спектрограммы, поскольку судно сначала проходит наветренную часть волнения, а затем, после прохождения плёнки, — подветренную область.

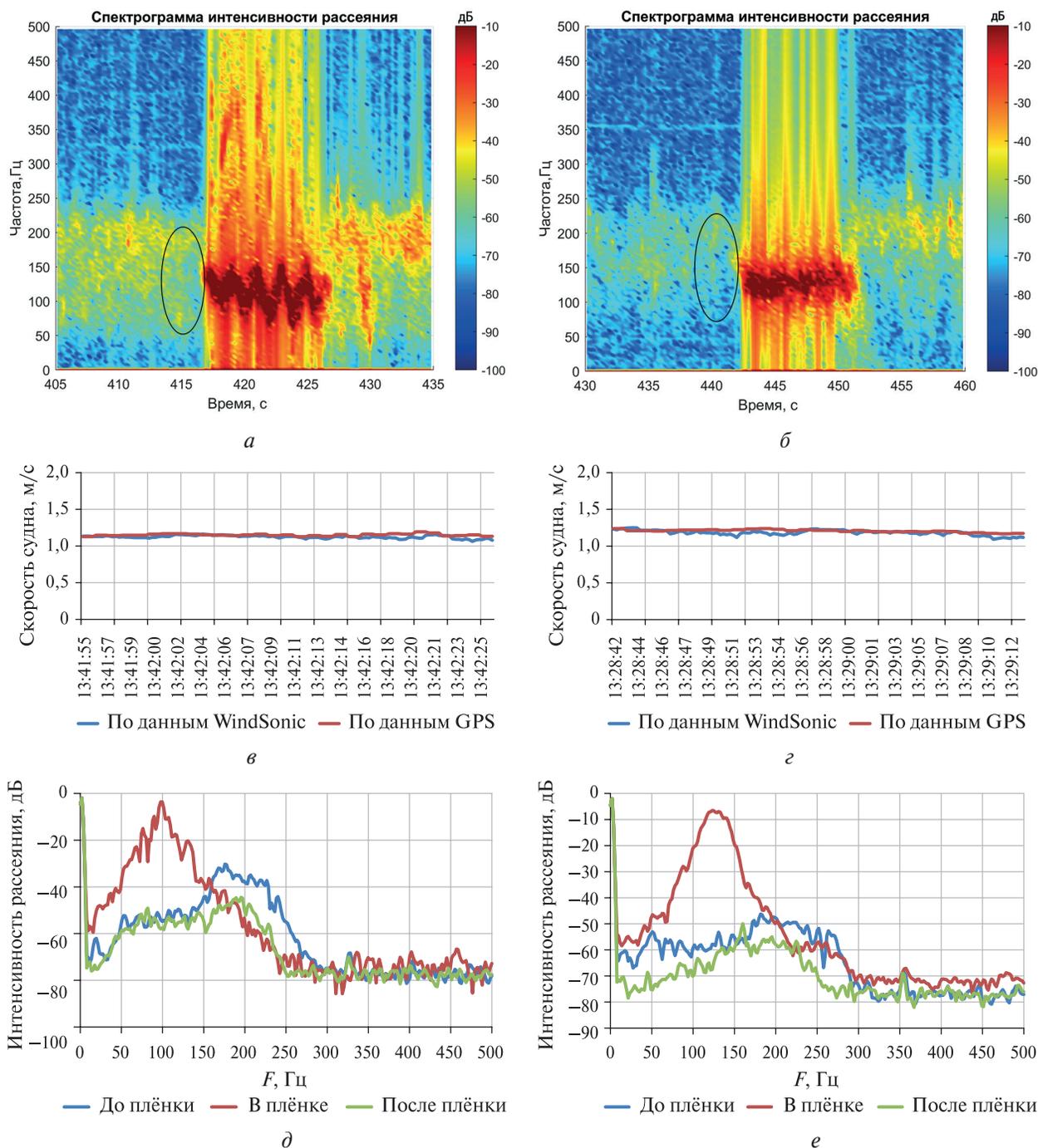


Рис. 1. Примеры спектрограмм РЛ-сигнала (а, б), записей скорости судна (в, г) и средних доплеровских спектров РЛ-сигнала, соответствующих волнению в наветренной области перед плёнкой, в подветренной за плёнкой области и в области плёнки (д, е). Неподвижная плёнка, движение судна навстречу ветру, зондирование под углом. Овалами отмечены области следа плёнки

Отношение значений интенсивности сигнала на VV- и HH-поляризации при рассеянии из области плёнки достаточно близко к 1, т. е. рассеяние можно считать неполяризованным. Рассеяние же на ветровом волнении на VV-поляризации на порядок и более превышает рассеяние на HH-поляризации, что указывает на существенный вклад поляризованной (брэгговской) компоненты в РЛ-сигнал.

Зондирование поперёк ветра. На рис. 3 (см. с. 261) представлены спектрограммы и доплеровские спектры РЛ-сигнала для случая, когда ось антенны скаттерометра была ориентирована перпендикулярно скорости ветра.

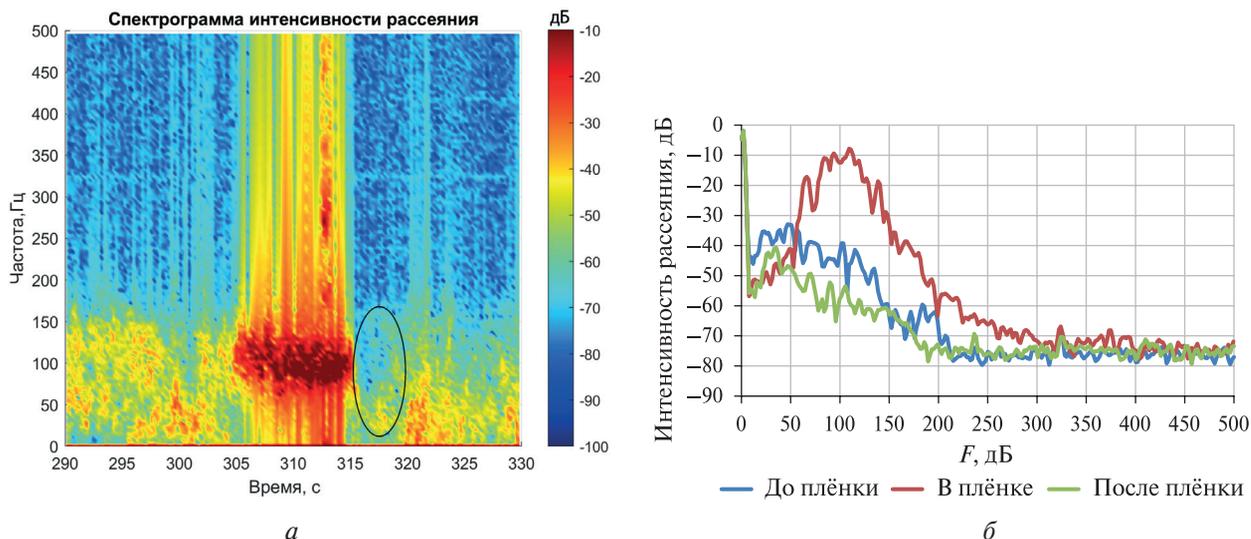


Рис. 2. Спектрограмма РЛ-сигнала на VV-поляризации, доплеровские спектры в плёнке и на волнении до и после плёнки. Неподвижная плёнка, движение судна по ветру, скорость судна — $\sim 1,1$ м/с, скорость ветра — 3,5 м/с, зондирование под углом. Овал — область следа

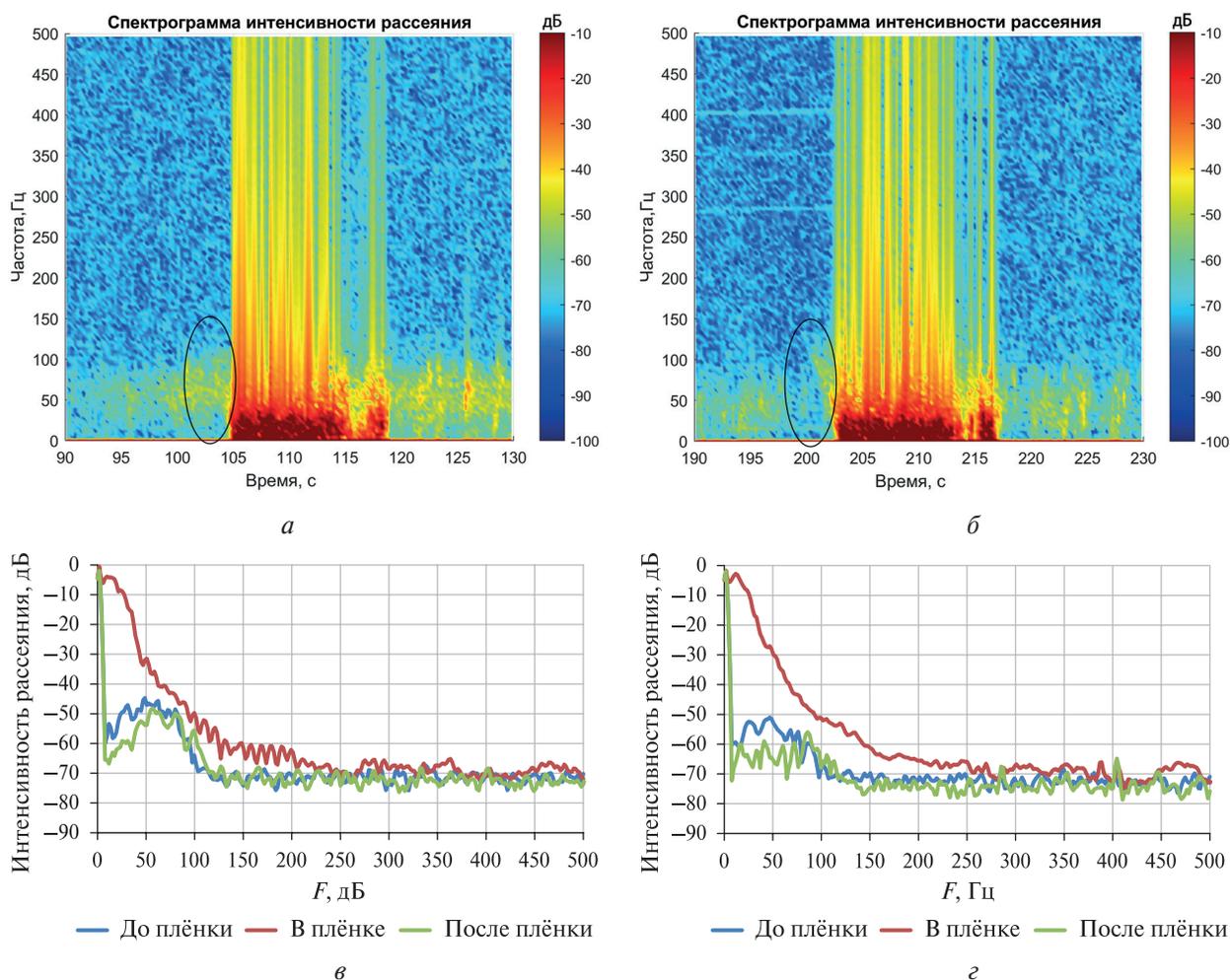


Рис. 3. Спектрограммы (а, б) и доплеровские спектры РЛ-сигнала (в, г) при зондировании поперёк ветра. Движение судна против ветра. Средняя скорость ветра — 3 м/с (VV-поляризация) (а, в) и 2,5 м/с (HH-поляризация) (б, г)

Как следует из рис. 3, радиолокационный доплеровский сдвиг на неподвижной плёнке близок к нулю, а на ветровом волнении он несколько меньше (порядка 60 Гц), чем при зондировании под углом к ветру. Величины интенсивности РЛ-сигнала на вертикальной и горизонтальной поляризации при рассеянии из области плёнки, как и ранее, близки друг к другу, т. е. рассеяние на плёнке является неполяризованным. Интересно, что интенсивность рассеяния на ветровых волнах на VV- и на HH-поляризации при поперечном зондировании также не сильно различается; во всяком случае, это различие меньше, чем при зондировании под углом к ветру. Небольшим также является и различие между сигналами для наветренной и подветренной области, т. е. эффект уменьшения интенсивности РЛ-сигнала после плёнки при наблюдении поперёк ветра выражен сравнительно слабо.

Таким образом, из приведённых данных следует, что с подветренной стороны плёнки образуется след, в котором интенсивность РЛ-сигнала ниже, чем с наветренной стороны плёнки. Эффект довольно значительно проявляется при зондировании под углом к направлению ветра, в этих случаях контраст (отношение интенсивности РЛ-сигнала в наветренной и подветренной области плёнки) имеет величины порядка 10 и несколько меньше при наблюдении поперёк ветра.

Спектры РЛ-сигналов. Дрейфующая плёнка

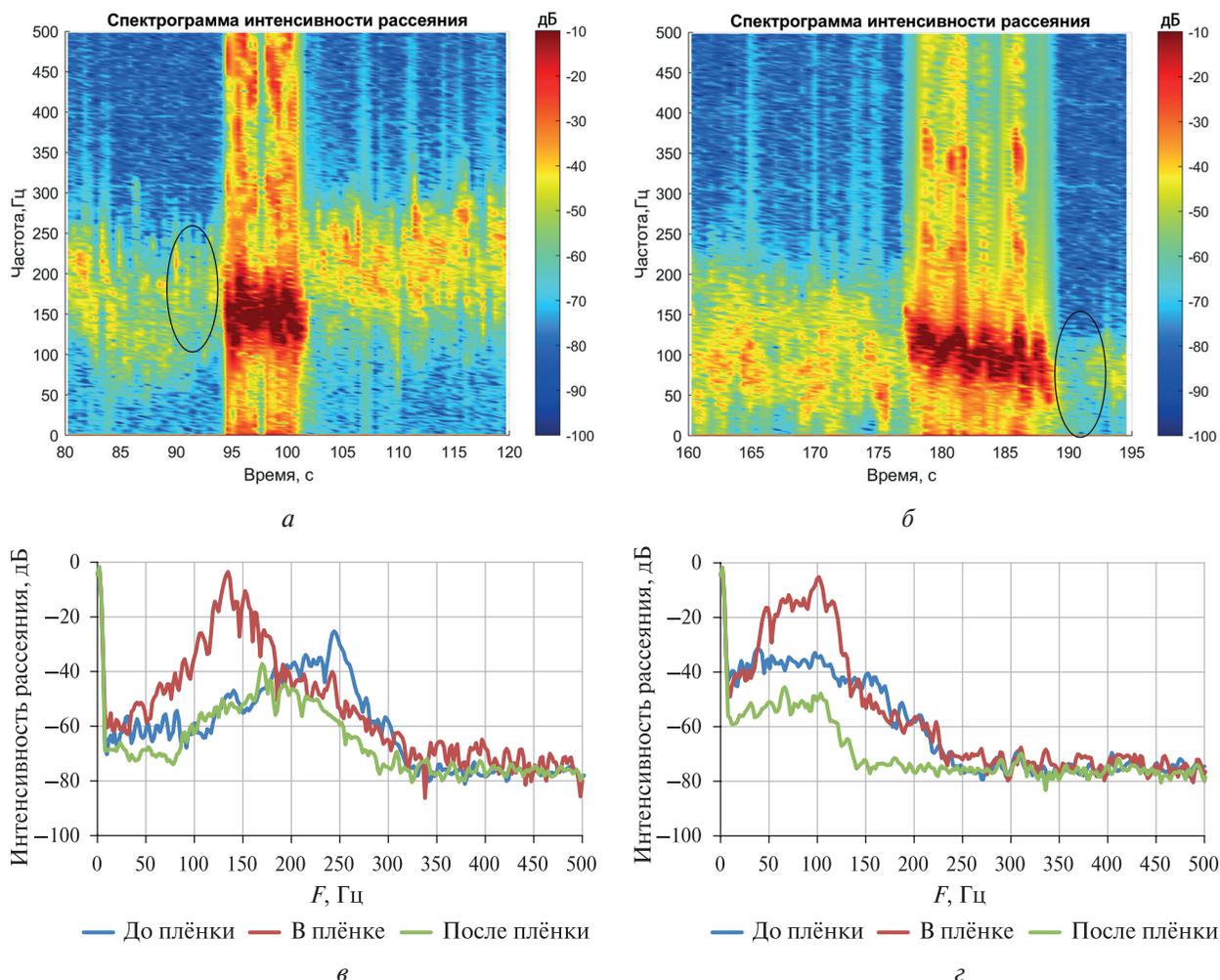


Рис. 4. Спектрограммы и доплеровские спектры на VV-поляризации при зондировании под углом при движении судна против ветра (слева) и по ветру (справа). Скорость ветра — 3 м/с (*a*, *в*) и 2,2 м/с (*б*, *г*) соответственно

Приведём теперь результаты экспериментов со свободно дрейфующей плёнкой. На *рис. 4* (см. с. 262) представлены спектрограммы сигнала на VV-поляризации при зондировании под углом к ветру при движении судна навстречу ветру и по ветру. Качественно спектрограммы не отличаются от приведённых выше для неподвижной плёнки. Имеется некоторое различие в доплеровских сдвигах, а именно: при рассеянии на плёнке при встречном зондировании доплеровский сдвиг несколько больше, а при попутном — меньше, чем для случая неподвижной плёнки.

Скорость движения судна по GPS (*англ.* Global Positioning System — система глобального позиционирования) в эксперименте «движение против ветра» составляла около 1,4 м/с, такое же значение скорости было в случае «движения по ветру» на первой половине галса, а на второй половине галса скорость монотонно уменьшалась до 0,8 м/с. Последним объясняется и монотонное уменьшение доплеровского сдвига на правой половине спектрограммы на *рис. 4б*. Эффект подавления РЛ-сигнала с подветренной стороны плёнки в обоих случаях проявляется достаточно сильно, как и в случае неподвижной плёнки (ср. с *рис. 1, 2*).

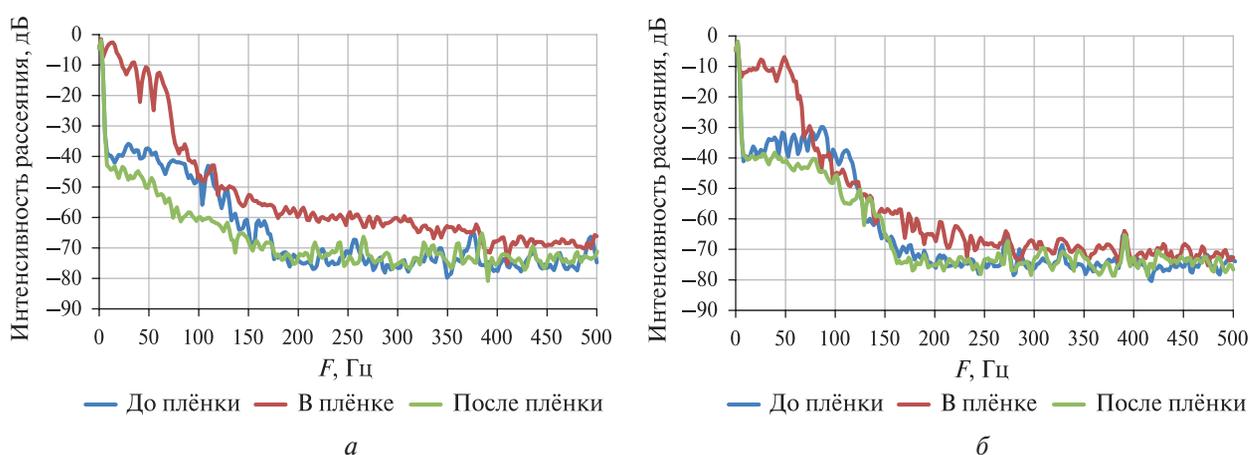


Рис. 5. Доплеровские спектры РЛ-сигнала при поперечном зондировании и движении судна навстречу ветру (*а*) и по ветру (*б*). VV-поляризация, свободная плёнка, скорость ветра — 4 м/с

На *рис. 5* приведены данные наблюдений при поперечном зондировании и движении судна против ветра и по ветру для случая свободной плёнки. Как и для неподвижной плёнки, наблюдается эффект подавления РЛ-сигнала с подветренной стороны плёнки, однако, как и раньше, он выражен слабее, чем при наблюдении под углом к ветру.

Затухание ветровых волн на плёнке

Наблюдения изменчивости спектров ветровых волн при их прохождении через область плёнки проводились для случая неподвижной плёнки, на наветренном и подветренном крае которой крепились по два акселерометра. Типичный пример амплитудных спектров ускорений в поле ветровых волн на наветренном и подветренном крае плёнки показан на *рис. 6а* (см. с. 264), из которого следует, что волны в результате прохождения области плёнки заметно ослабляются. На *рис. 6б* представлен спектральный коэффициент затухания ветровых волн на плёнке, рассчитанный как $\delta = \ln(A_0/A_L)/L$, где A_0 и A_L — спектральные амплитуды ускорения в начале плёнки и на её подветренном краю, L — длина плёнки.

Следует подчеркнуть, что результаты измерения волнения акселерометрами корректно рассматривать лишь на сравнительно низких частотах ветровых волн. Акселерометры, очевидно, занижают величину ускорения на частотах, отвечающих длинам волн порядка диаметра корпуса акселерометра или меньшим, поэтому в данном случае результаты измерений на частотах более 3,5 Гц обсуждаться не будут.

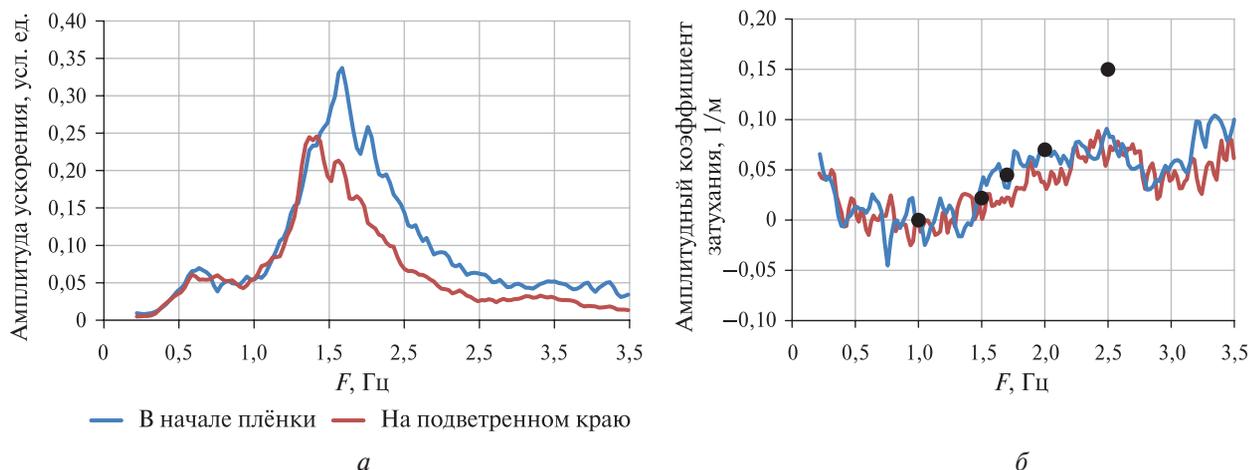


Рис. 6. Пример спектров ускорений на наветренном и подветренном краях плёнки (а) и коэффициента затухания волн для двух пар акселерометров (б). Средняя скорость ветра — 4 м/с. Символы — теория затухания на нерастяжимой плёнке

Обсуждение результатов

Рассмотрим подробнее приведённые в предыдущем разделе результаты по радиолокационным доплеровским сдвигам. Для случая неподвижной плёнки доплеровский сдвиг F_{Df} сигнала обратного рассеяния на неровностях водной поверхности, связанных с плёнкой, определяется выражением:

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

где k_{em} и θ — волновое число и угол падения электромагнитной волны; V_s — скорость судна; φ — азимутальный угол, т. е. угол между направлениями оси антенны и скоростью судна.

Для случая, отвечающего рис. 1, полагая длину зондирующей волны 0,87 см, угол падения 57° , азимутальный угол 60° , скорость судна 112 и 120 см/с, получим оценки доплеровских сдвигов сигнала из области плёнки соответственно 108 и 115 Гц, что неплохо отвечает экспериментальным значениям. Отметим, что РЛ-спектры достаточно широкие, что наряду с движением рассеивателей в поле орбитальной скорости длинных волн определяется также качкой судна под действием длинных волн, это хорошо видно на примерах спектрограмм (см., например, рис. 4).

Доплеровский сдвиг F_{Dw} при рассеянии на волнении можно записать в виде:

$$F_{Dw} = \frac{1}{\pi} k_{em} \sin \theta [V_s \cos \varphi \pm (C + V_{dr} \cos \varphi)],$$

где C — фазовая скорость волны; V_{dr} — скорость ветрового дрейфа; знаки «+» и «-» отвечают направлению движения судна соответственно против ветра и по ветру. При анализе доплеровских сдвигов важным является вопрос о природе рассеивателей, который активно обсуждается, в частности, в контексте проблемы брэгговского и неполяризованного рассеяния (Ермаков et al., 2022a, b). Доплеровский сдвиг, соответствующий квазилинейным брэгговским волнам (в условиях данных экспериментов их длина составляет 0,52 см), а также нелинейным структурам (см. работу (Ермаков et al., 2022a)) на профиле см-дм-волн, определяющих неполяризованную компоненту, с учётом проекции скорости ветрового дрейфа (в экспериментах — около 5 см/с), составляет ~ 70 Гц. Это в сумме с доплеровским сдвигом из-за движения судна удовлетворительно согласуется с измеренными значениями при движении навстречу ветру. При движении по ветру доплеровские сдвиги из-за волнения меньше, чем на неподвижной плёнке и сдвинуты относительно доплеровского сдвига на плёнке влево примерно на ту же величину около 70 Гц (см. рис. 2). Как уже отмечалось, доплеровский сдвиг на

ветровом волнении при зондировании поперёк ветра — порядка 60 Гц (см. *рис. 3*); напомним, что в отличие от случая зондирования под углом здесь отсутствует дополнительный сдвиг частоты из-за ветрового дрейфа.

Доплеровские спектры РЛ-сигнала для дрейфующей плёнки качественно подобны случаю неподвижной плёнки, за исключением того, что доплеровские сдвиги от плёнки при встречном по отношению к ветру зондировании несколько больше, а при попутном — меньше, чем для неподвижной плёнки, что связано с её дрейфом в поле ветра.

Подчеркнём, что проведённый в данной работе анализ доплеровских сдвигов следует рассматривать как качественный. Детальный количественный анализ затруднён тем, что в ходе экспериментов приходилось иногда корректировать направление движения судна так, чтобы облучаемое локатором пятно на поверхности воды не выходило из области плёнки и прилегающей наветренной и подветренной зоны. Это приводило к некоторым изменениям азимутального угла, под которым проводилось зондирование, а значит, и к вариациям доплеровских сдвигов. Ещё более сложными становятся эксперименты со свободно дрейфующей плёнкой. В этом случае усложнение связано с тем, что плёнка, устанавливаемая в начале каждого эксперимента длинной стороной вдоль ветра, начинает разворачиваться поперёк ветра и тогда коррекция курса судна может быть ещё большей. Влияние этих эффектов планируется более детально количественно исследовать в ходе будущих экспериментов.

При зондировании как поперёк ветра, так и под углом величины интенсивности РЛ-сигнала на вертикальной и горизонтальной поляризации при рассеянии из области плёнки близки, что указывает на существенно неполяризованный характер рассеяния на плёнке. Рассеяние же на ветровых волнах на VV-поляризации при зондировании под углом существенно (на порядок и более) превышает сигнал на HH-поляризации и представляется, таким образом, поляризованным. Для случая поперечного зондирования волнения поляризационное отношение значительно меньше, чем под углом, что указывает на больший вклад неполяризованной компоненты, этот вывод согласуется со сделанным нами ранее в работе (Ermakov et al., 2022b).

Сравним результаты измерений затухания поверхностных волн на ПЭ-плёнке с теорией затухания в присутствии плёнки ПАВ (см., например, работу (Ermakov, Khazanov, 2022)). В частном случае горизонтально нерастяжимой плёнки пространственный коэффициент затухания составляет:

$$\delta = \frac{\sqrt{(v\omega k^2)/8}}{C_g(k)}, \quad (1)$$

где v — коэффициент кинематической вязкости воды; ω , k , $C_g(k)$ — частота, волновое число и групповая скорость волны соответственно. Отметим, что на чистой воде коэффициент затухания составляет $\delta = (2v\omega k^2)/C_g(k)$.

Результаты расчётов согласно выражению (1) неплохо согласуются с полученным в эксперименте коэффициентом затухания на частотах порядка 1,5–2 Гц (см. *рис. 6*). Для более высокочастотных и, соответственно, более коротких волн теоретическое значение завышено по сравнению с экспериментом. Это связано, во-первых, с тем, что акселерометры некорректно применять на высоких частотах порядка 3–3,5 Гц и более (см. выше), а во-вторых, с тем, что для высоких частот следует учитывать изгибную упругость плёнки как пластинки конечной толщины. Интересно отметить, что в спектре ускорений ветровых волн наблюдается локальный максимум на частоте 3 Гц, отвечающий второй гармонике энергонесущих компонент спектра на частоте около 1,5 Гц. Поскольку, как видно из *рис. 6*, энергонесущие волны практически не испытывают затухания на плёнке, затухание второй гармоники также незначительно, с чем, по-видимому, и связан локальный минимум коэффициента затухания на частоте ~3 Гц.

Количественно эффект следа можно характеризовать контрастом, величины которого для описанных выше экспериментов имеют порядок 10 и более при зондировании под углом и несколько меньше для поперечного зондирования (*рис. 7*, см. с. 266).

Уменьшение интенсивности РЛ-сигнала после плёнки связано как с непосредственным подавлением в плёнке свободных брэгговских волн, так и (что не менее существенно) с затуханием более длинных ветровых волн см-дм-диапазона. Для см-дм-волн характерно наличие нелинейных структур вблизи гребней типа паразитной капиллярной ряби и валообразных bulge/тое структур. Первая даёт вклад в брэгговскую компоненту, а вторые — в неполяризованную компоненту (Ermakov et al., 2022b). Частичное ослабление см-дм-волн при прохождении плёнки должно приводить к ослаблению упомянутых нелинейных структур и, соответственно, образованию области с пониженной интенсивностью РЛ-сигнала. После прохождения плёнки см-дм-волны начинают усиливаться в поле ветра, что при превышении пороговых значений крутизны этих волн вновь приводит к возбуждению нелинейных структур и, соответственно, восстановлению интенсивности РЛ-сигнала. Масштаб развития ветровых волн можно оценить как величину, обратную ветровому инкременту $\beta \approx 0,04 \left(\frac{u_*^2 k^2}{\omega C_g} \right)$ (Plant, 1982), где u_* — скорость трения ветра. Для ветровых волн с длиной около 10–30 см этот масштаб имеет порядок 10 м, что сопоставимо с наблюдаемыми масштабами следа.

Для количественного описания эффекта следа ПМ можно использовать полуэмпирическую модель контрастов ветровых волн в сликах, связанных с плёнками ПАВ (см. работы (Ермаков, 2010; Ermakov et al., 2022b) и цитированную литературу). Здесь, однако, мы ограничимся лишь оценками по порядку величины. Согласно приведённым выше на *рис. 6* данным о затухании волн на ПЭ-плёнке, крутизна см-дм-волн уменьшается примерно в 1,5 раза при прохождении плёнки. При этом, как следует из экспериментальных зависимостей интенсивности РЛ-сигнала Ка-диапазона от крутизны волн см-дм-диапазона (Ermakov et al., 2022b), интенсивность рассеяния Ка-диапазона снижается примерно на порядок величины, что согласуется со значениями контрастов на *рис. 7*.



Рис. 7. Контрасты РЛ-следа при зондировании поперёк и под углом к ветру

Заключение

Кратко резюмируем полученные результаты.

Выполнены первые контролируемые натурные эксперименты по исследованию влияния пластикового мусора в водной среде на характеристики поляризованных радиолокационных сигналов Ка-диапазона на примере полиэтиленовых (ПЭ) пузырчатых плёнок, плавающих на водной поверхности. Зондирование выполнено с использованием доплеровского скаттерометра Ка-диапазона, установленного на движущемся маломерном судне, при средних углах падения микроволн, на вертикальной и горизонтальной поляризации, под углом к ветру и поперёк ветра. С использованием установленных на плёнке акселерометров проведены измерения изменчивости характеристик ветровых волн при прохождении ими плёнки.

Измерено затухание ветровых волн при прохождении области, занятой плёнкой, получена зависимость коэффициента затухания волн от их частоты. Полученная экспериментальная зависимость удовлетворительно описывается теорией затухания волн на воде с нерастяжимой плёнкой.

Получено, что рассеяние на плёнке является неполяризованным, а его интенсивность существенно выше, чем при рассеянии на волнении. Рассеяние на ветровых волнах содержит как поляризованную (брэгговскую), так и неполяризованную компоненту; поляризационное отношение и радиолокационные доплеровские сдвиги слабо различаются в наветренной и подветренной по отношению к плёнке области.

Обнаружено довольно значительное (в единицы—десятки раз) ослабление интенсивности РЛ-сигнала в подветренной по отношению к плёнке области волнения — эффект следа ПМ; величина эффекта зависит от азимутального угла, под которым проводится зондирование.

Эффект следа качественно объясняется подавлением в области ПЭ-плёнки как квазилинейной брэгговской ряби, так и нелинейных *bulge/toe* структур на профиле более длинных крутых волн см-дм-диапазона, определяющих брэгговскую и неполяризованную компоненту РЛ-рассеяния.

Авторы благодарны 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. *Ермаков С.А.* Влияние плёнок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 163 с.
2. *Arii M., Koiwa M., Aoki Y.* Applicability of SAR to Marine Debris Surveillance after the Great East Japan Earthquake // *IEEE J-STARS*. 2014. V. 7. No. 5. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
3. *Bremer T.* Tracing waves to find phantom plastic // TU Delft. 2022. <https://www.tudelft.nl/en/stories/articles/tracing-waves-to-find-phantom-plastic>.
4. *Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L. et al.* 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111198>.
5. *Ermakov S., Khazanov G.* Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a viscoelastic 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., Dobrokhotov V., Lazareva T.* (2022a) Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V. 60. Article 4202812. P. 1–12. DOI: 10.1109/tgrs.2021.3086627.
7. *Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Plotnikov L.M. et al.* (2022b) New Features of Bragg and Non-Polarized Radar Backscattering from Film Slicks on the Sea Surface // *J. Marine Science Engineering*. 2022. V. 10. Article 1262. <https://doi.org/10.3390/jmse10091262>.
8. *Plant W.J.* A relationship between wind stress and wave slope // *J. Geophysical Research*. 1982. V. 87. P. 1961–1967. <https://doi.org/10.1029/JC087iC03p01961>.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A.* Life in the “Plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris // *Environmental Science and Technology*. 2013. V. 47. P. 7137–7146. DOI: 10.1021/es401288x.

Model experiments on investigation of the influence of plastic garbage on water surface on the characteristics of Ka-band radar signals

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

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*

The problem of ocean pollution by plastic garbage (PG) and the development of physical principles of its remote sensing, including radar diagnostics, has become extremely important in recent years. In this paper, we present the results of the first special field experiments on studying the influence of PG on the characteristics of microwave radar signals using the example of polyethylene films floating on water surface. Radar sensing was carried out using a Ka-band Doppler scatterometer, installed on a moving small-sized vessel, at moderate microwave incidence angles, at vertical and horizontal polarizations, at some angle to the wind and across the wind. The damping coefficient of wind waves as they pass through the area covered by the film was measured using miniature accelerometers. A significant attenuation (from units to tens of times) of the radar signal intensity in the region of the wave leeward of the film — the PG “trace” effect — was detected, and it was shown that the magnitude of the effect depends on the azimuthal angle at which the sensing is carried out. A qualitative physical explanation of wind wave attenuation on the film and the PG radar trace effect is given.

Keywords: plastic garbage, wind waves, microwave radar probing, polyethylene film, plastic garbage radar trace

Accepted: 04.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269

References

1. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (The effect of films on the dynamics of gravitational-capillary waves), Nizhny Novgorod: IPF RAN, 2010, 165 p. (in Russian).
2. Arii M., Koiwa M., Aoki Y., Applicability of SAR to Marine Debris Surveillance after the Great East Japan Earthquake, *IEEE J-STARS*, 2014, Vol. 7, No. 5, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
3. Bremer T., Tracing waves to find phantom plastic, *TU Delft*, 2022, <https://www.tudelft.nl/en/stories/articles/tracing-waves-to-find-phantom-plastic>.
4. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L. et al., From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast, *Marine Pollution Bull.*, 2020, Vol. 156, Article 111198, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111198>.
5. Ermakov S., Khazanov G., Resonance damping of gravity-capillary waves on water covered with a viscoelastic 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., Dobrokhotov V., Lazareva T. (2020a), Wave Tank Study of Steep Gravity-Capillary Waves and Their Role in Ka-Band Radar Backscatter, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2022, Vol. 60, Article 4202812, pp. 1–12, DOI: 10.1109/tgrs.2021.3086627.
7. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Plotnikov L. M. et al. (2020b), New Features of Bragg and Non-Polarized Radar Backscattering from Film Slicks on the Sea Surface, *J. Marine Science Engineering*, 2022, Vol. 10, Article 1262, <https://doi.org/10.3390/jmse10091262>.
8. Plant W. J., A relationship between wind stress and wave slope, *J. Geophysical Research*, 1982, Vol. 87, pp. 1961–1967, <https://doi.org/10.1029/JC087iC03p01961>.
9. Salgado-Hernanz P. M., Bauzà J., Alomar C., Compa M. 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.
10. 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.

11. 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.
12. Zettler E. R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A., Life in the “Plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris, *Environmental Science and Technology*, 2013, Vol. 47, pp. 7137–7146, DOI: 10.1021/es401288x.