Модель проявления пластиковых плёнок на радиолокационных изображениях морской поверхности

С. А. Ермаков, И. А. Сергиевская

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

Волжский государственный университет водного транспорта
Нижний Новгород, 603950, Россия

Выполнено обобщение полуэмпирической модели спектра мелкомасштабных ветровых волн на поверхности воды, покрытой плавающими высокоупругими плёнками, имитирующими пластиковый мусор в океане. Получено выражение для дополнительного источника в уравнении для спектра ветровых волн, определяющего генерацию мелкомасштабных волн длинными волнами дм-м-диапазона. Проведён анализ натурных измерений затухания длинных ветровых волн при их распространении в присутствии пластиковой плёнки, получены оценки её упругости. На основе развитой модели даны оценки изменчивости брэгговской компоненты радиолокационного сигнала при рассеянии из области пластиковых плёнок. Модель использована для описания наблюдаемых проявлений на РСА-изображениях областей загрязнения водной поверхности морским мусором (пластиком). Показано, что оценки подавления интенсивности волнения (брегговской компоненты радиолокационного сигнала), рассчитанные в рамках модели, удовлетворительно согласуются с наблюдениями.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование океана, морская поверхность, ветровые волны, пластиковый мусор, пластиковые плёнки

Одобрена к печати: 11.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-296-305

Введение

Как известно (см., например, работы (Chubarenko et al., 2020; Li et al., 2021)), пластиковое загрязнение Мирового океана к настоящему времени достигло угрожающих масштабов. Это загрязнение связано, в частности, с бытовым мусором: пластиковыми пакетами, посудой, упаковочной плёнкой и прочим, который попадает в океан с речными стоками, с судов, из прибрежных рекреационных зон. Полиэтиленовые плёнки и пакеты, составляющие значительную часть пластикового мусора, обладают близкой к нейтральной плавучестью и находятся, как правило, в самом верхнем слое моря или на его поверхности. Под действием ветра и океанских течений происходит формирование плавучих мусорных островов, таких, например, как GPGP (*англ.* Great Pacific Garbage Patch) (Jarzyna, 2011).

Обнаружение скоплений пластикового мусора (ПМ) представляет собой важный раздел проблемы дистанционной, в том числе радиолокационной, диагностики океана. Как показывают наблюдения, скопления ПМ на поверхности океана видны на радарных микроволновых изображениях поверхности как светлые области, соответствующие усилению интенсивности рассеянного сигнала объёмными пластиковыми фрагментами, выступающими над водной поверхностью, а также как тёмные области, предположительно соответствующие зонам ПМ, где пластиковые плёнки и пакеты находятся на поверхности воды или непосредственно под ней (см., например, работы (Arii et al., 2014; Simpson et al., 2022, 2023)). В литературе обсуждаются различные физические механизмы влияния ПМ на характеристики радиолокационных сигналов, включая рассеяние микроволн собственно на плавающих пластиковых макрообъектах, на коротких ветровых волнах, характеристики которых меняются при наличии этих объектов, на плёнках поверхностно-активных веществ (ПАВ), связанных с микроводорослями-обрастателями пластика (Evans, Ruf, 2021; Simpson et al., 2023, Suaria et al., 2023, Sun et al., 2023).

Как уже отмечалось, интенсивность обратного рассеяния из областей объёмного мусора обычно усиливается по сравнению с чистой водой, однако может снижаться в соседствующих с ПМ областях. В специальных экспериментах с пластиковыми плёнками, использовавшимися в качестве образцов ПМ (Ермаков и др., 2024), было показано, что пластиковая плёнка эффективно подавляет ветровые волны см-дм-диапазона, в результате чего с подветренной стороны плёнки появляется область пониженной интенсивности радиолокационного (РЛ) сигнала — РЛ-след. Затухание ветровых волн в присутствии пластиковых плёнок изучалось не только в полевых, но и в лабораторных условиях (Доброхотов и др., 2023), где было показано, что это затухание может быть удовлетворительно описано на основе модели волн на поверхности воды с высокоупругой плёнкой. Другой важный механизм проявления ПМ, обсуждаемый в литературе в связи с проблемой диагностики микропластика, основан на гипотезе о том, что пластик колонизируется микроводорослями, жизнедеятельность которых ведёт к появлению органических плёнок ПАВ в океане и, как результат, к подавлению интенсивности микроволнового рассеяния. В работах (Evans, Ruf, 2021; Sun et al., 2023), например, это было высказано в виде гипотезы, однако ряд специальных экспериментов (см. публикацию (Vodeneeva et al., 2024) и цитированную литературу) показал, что образцы пластика после попадания в воду действительно достаточно быстро (за время порядка недели) становятся местом обитания водорослей-обрастателей, что приводит к образованию органических биоплёнок. Количественное описание характеристик рассеянных сигналов в присутствии ПМ, однако, в литературе пока отсутствует. Возможный подход для такого описания может быть основан на моделях микроволнового рассеяния, представленных в литературе (см., например, (Kudryavtsev et al., 2003; Sergievskaya, Ermakov, 2024)).

Количественное описание изменчивости обратного рассеяния микроволн на взволнованной водной поверхности, покрытой плёнками, может быть сделано в рамках композитной модели (Kudryavtsev et al., 2003), согласно которой интенсивность РЛ-сигнала представляет собой сумму поляризованной (брэгговской) и неполяризованной компоненты. В результате оказывается возможным получить в чистом виде брэгговскую компоненту, которая определяется спектром мелкомасштабных ветровых волн с брэгговским волновым числом k_{br}. Изменчивость спектра мелкомасштабных волн в присутствии плёнок может быть определена из уравнения для волнового действия с учётом дополнительного источника волн брэгговской длины, определяющего их генерацию в условиях недостаточной ветровой накачки, например, при наблюдении поперёк ветра и/или в присутствии плёнок ПАВ на поверхности (Sergievskaya, Ermakov, 2024).

В настоящей работе выполнено обобщение полуэмпирической модели спектра волнения на поверхности воды, покрытой высокоупругими (пластиковыми) плёнками. В рамках модели даны теоретические оценки изменчивости брэгговской компоненты РЛ-сигнала при отражении микроволнового излучения от области поверхности воды, покрытой пластиковыми плёнками. Получены оценки упругости пластиковой плёнки по данным натурных измерений затухания ветровых волн. Модель использована для описания наблюдений проявлений областей загрязнения волной поверхности морским мусором на РСА-изображениях (РСА — радиолокатор с синтезированной апертурой).

Модель

В основе композитной модели лежит представление полной удельной эффективной площади рассеяния $\sigma^0_{\mathrm{VV,HH}}$ в виде суммы брэгговской $\sigma^0_{B_pp}$ и небрэгговской σ^0_{NBC} (*англ.* Non-Bragg Component) компоненты (Kudryavtsev et al., 2003; Phillips, 1988):

$$\sigma^0_{pp} = \sigma^0_{B_pp} + \sigma^0_{\mathrm{NBC}}.$$

Здесь индекс *pp* соответствует поляризациям излучаемой и принимаемой электромагнитных волн — вертикальной (V, *англ.* vertical) и горизонтальной (H, *англ.* horizontal). Поляризационная разность PD (*англ.* polarization dispersion) определяется спектром волнения $F(k_{br})$ на брэгговском волновом числе k_{br} следующим образом:

$$\mathrm{PD} = \sigma^0_{\mathrm{VV}} - \sigma^0_{\mathrm{HH}} = 16\pi k_e^4 \left(g^2_{\mathrm{VV}} - g^2_{\mathrm{HH}}\right)(\theta) F(k_{br}),$$

где $k_{br} = 2k_e \cdot \sin\theta$; θ — угол падения; k_e — волновое число электромагнитных волн; g^2_{VV} и g^2_{HH} — коэффициенты отражения (Valenzuela, 1978), которые зависят от поляризации падающих/отражённых электромагнитных волн, диэлектрической проницаемости воды и угла падения, а также от величины дисперсии уклонов длинных волн (Kudryavtsev et al., 2003). Обрушения длинных волн на морской поверхности при умеренной и большой скорости ветра проявляются в виде сильных всплесков на VV- и HH-поляризациях и вносят значительный вклад в неполяризованную составляющую (Sergievskaya et al., 2020). Всплески имеют почти одинаковую интенсивность на обеих поляризациях в σ^0_{pp}, но практически отсутствуют в PD, т. е. обрушение волн практически не проявляется в брэгговской составляющей.

Анализ брэгговской компоненты РЛ-сигнала, по сути, сводится к анализу спектра волнения на брэгговском волновом числе, которое при микроволновом зондировании соответствует ветровым волнам сантиметрового диапазона и коротковолновой части дециметрового, последняя отвечает микроволновым радиолокаторам L-диапазона.

Для описания ветрового волнения будем использовать феноменологическое уравнение баланса для спектра кривизны $B(k, \varphi)$ волн с волновым числом k. Это уравнение для стационарного состояния запишем в виде (Ермаков, 2010; Kudryavtsev et al., 2003):

$$\tilde{\beta}(u^*, k, \varphi, E) B(k, \varphi) - \alpha^{n(k)} B(k, \varphi)^{n(k)+1} + I_s(k, \varphi) = 0, \tag{1}$$

здесь $B(k, \varphi) = k^4 F(k, \varphi)$; $F(k, \varphi)$ — спектр возвышений морской поверхности; $\tilde{\beta}(u^*, k, \varphi, E) = \beta(u^*, k, \varphi) - 2\gamma(E, k)$; $\beta(u^*, k, \varphi)$ — безразмерный (делённый на частоту волны) инкремент ветрового возбуждения волн, который можно представить в виде $\beta(u^*, k, \varphi) = C_\beta \left[ku^* / \omega(k)\right]^2 \cos(\varphi)$ (Donelan, Pierson, 1987), где φ — угол между направлением ветра и направлением наблюдения, $-\pi/2 \leqslant \varphi \leqslant \pi/2$, вне этого интервала $\beta(u^*, k, \varphi) = 0$; $\omega(k)$ — частота волн; C_β — числовой параметр, равный 0,025–0,04 (см. работы (Plant, 1982; Stewart, 1974)); $u^*(V_{wind})$ — скорость трения; V_{wind} — скорость ветра; $\gamma(E, k)$ — безразмерный коэффициент затухания, определяемый состоянием поверхности; E — поверхностная упругость плёнки, если $E = 0$, плёнки на поверхности нет. Второе слагаемое в уравнении (1) устанавливает нелинейное ограничение роста волн $\alpha(k)$, $n(k)$ — параметры нелинейного ограничения волн); I_s — дополнительный источник генерации волн, определяющий ветровое волнение в случае дефицита прямой ветровой накачки, т. е. когда $\tilde{\beta}(u^*, k, \varphi, E) < 0$. Последнее условие обычно отвечает малой и умеренной скорости ветра (до 7–8 м/с), сантиметровым волнам и плёнкам с большой упругостью. Обычно дополнительный источник связывают с длинными волнами, в частности с обрушениями волн дм-м-диапазона.

Коэффициент затухания волн при наличии мономолекулярной плёнки ПАВ определяется большими сдвигами скорости в вязком пограничном слое и имеет вид (см., например, (Ермаков, 2010; Левич, 1959) и цитированную литературу):

$$\gamma(E, k) = 2\nu k^2 \frac{1 + X - XY}{1 + 2X - X^2}, \tag{2}$$

где $X = \dfrac{Ek^2}{(2\omega^3 \nu \rho^2)^{1/2}}$, $Y = \dfrac{Ek}{4\rho\omega\nu}$, здесь k, ω — волновое число и частота волн; ν и ρ — вязкость и плотность воды.

Для плёнок ПАВ с небольшой упругостью естественно предположить, что интенсивность дополнительного источника генерации волн не зависит от наличия плёнок ПАВ из-за слабого подавления такими плёнками длинных волн дм-м-диапазона. Предположим, что параметры $n(k)$ и α не зависят ни от характеристик плёнки, ни от скорости и направления ветра. Запишем систему уравнений, включающую формулу (1) для области чистой воды и области с плёнкой и выражение для контраста волн K (отношение интенсивности волн на чистой воде $B_0(k, \varphi)$ и в плёнке $B_f(k, \varphi)$):

$$\begin{cases} \tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,0)B_0(k,\varphi)-\alpha^{n(k)}B_0(k,\varphi)^{n(k)+1}+I_s(k,\varphi)=0, \\ \tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,E)B_f(k,\varphi)-\alpha^{n(k)}B_f(k,\varphi)^{n(k)+1}+I_s(k,\varphi)=0, \\ K=\dfrac{B_0(k,\varphi)}{B_f(k,\varphi)}. \end{cases} \quad (3)$$

Предполагая, что $\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,E)$ в плёнке и на чистой поверхности может быть рассчитано (см. ссылки выше), а контраст волн K в рамках используемой нами модели, равный контрасту брегговских компонент РЛ-сигнала при отражении от чистой поверхности и областей, покрытых плёнкой, может быть определён по данным натурных экспериментов, из системы (3) получаем:

$$\left.\begin{aligned} &\alpha B_0(k,\varphi)=\left(\frac{-\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,E)/K+\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,0)}{1-1/K^{n+1}}\right)^{1/n}, \\ &\alpha I_s=-\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,E)\alpha B_f(k,\varphi)+(\alpha B_f(k,\varphi))^{n+1}=-\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,0)\alpha B_0(k,\varphi)+(\alpha B_0(k,\varphi))^{n+1}. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Для нахождения интенсивности источника по выражению (4) будем использовать контрасты брегговской компоненты РЛ-сигнала, измеренные поперёк ветра (Ermakov et al., 2022). Контрасты получены в результате обработки данных натурных экспериментов с плёнкой ПАВ с упругостью 20–25 мН/м (плёнка олеиновой кислоты), типичной для морских плёнок ПАВ, в работе (Sergievskaya, Ermakov, 2024). Мы выбрали направление поперёк, потому что тогда инкремент ветрового роста равен нулю и $\tilde{\beta}(u^*,k,\varphi,E)$ не зависит от выбора конкретного выражения для $\beta(u^*,k,\varphi)$. Тогда, анализируя полученные по выражению (4) зависимости интенсивности дополнительного источника от скорости ветра и волнового числа (см. подробно (Sergievskaya, Ermakov, 2024)), можно найти следующее эмпирическое выражение для источника:

$$\alpha I_s\left(k,\pi/2\right)\approx 4{,}4\cdot 10^{-8}\cdot u^{*3}/k^{2,5}, \quad (5)$$

где $u^*(V_{wind})$ (в см/с) (Vickers et al., 2015), k (в рад/см).

В работах (Ермаков, 2010; Kudryavtsev et al., 2003) предполагается, что интенсивность дополнительного источника определяется волнами с волновыми числами k_{lw} = min(01 рад/см, k_{lw}/10), на которые плёнки с малой упругостью слабо влияют. Расширим область применения выражения (5) на случай высокоупругих плёнок, для которых нельзя пренебрегать затуханием длинных волн. Для этого перепишем уравнение (5) в виде:

$$\alpha I_s\approx 4{,}4\cdot 10^{-8}\left[\frac{u^{*2}k_{lw}^2}{\omega_{lw}^2}\right]^{1,5}\left[\frac{\omega_{lw}^2}{k_{lw}^2}\right]^{1,5}\frac{1}{k^{2,5}},$$

где индексы lw относятся к длинным волнам. Отметим, что выражение $\dfrac{u^{*2}k_{lw}^2}{\omega_{lw}^2}=\dfrac{\beta(u^*,k_{lw},0)}{C_\beta}$ определяет интенсивность волнения с волновым числом k_{lw} при малом затухании $\gamma(E, k_{lw})$ дециметровых – метровых волн, например, на чистой поверхности или в присутствии плёнки ПАВ с умеренной упругостью (см. спектр Донелана – Пирсона), при этом $\beta(u^*,k_{lw},0)\sim\tilde{\beta}(u^*,k_{lw},0,E)$. Поскольку для типичных морских плёнок $\beta(u^*,k_{lw},0)>>2\gamma(E,k_{lw})$, можно записать:

$$\frac{u^{*2}k_{lw}^2}{\omega_{lw}^2}=\frac{\beta(u^*,k_{lw},0)-2\gamma(E,k_{lw})}{C_\beta}.$$

И, соответственно, выражение для дополнительно источника может быть представлено в виде:

$$\alpha I_s(k,\varphi) \approx 4{,}4\cdot 10^{-8}\left[\frac{\beta_\gamma(u^*,u_{lw},0)-2\gamma(E,k_{lw})}{C_\beta}\right]^{1,5}\frac{\left(\omega_{lw}^2/k_{lw}^2\right)^{1,5}}{k^{2,5}}. \quad (6)$$

Формула (6) даёт те же значения αI_s, что и найденное нами эмпирическое выражение для интенсивности дополнительного источника в случае плёнок с умеренной упругостью. Предположим теперь, что уравнение (6) справедливо и для случаев, когда затухание дециметровых и метровых волн не мало, так что $\beta(u^*,k_{lw},\varphi)\sim\gamma(E,k_{lw})$, например, когда на поверхности присутствуют пластиковые плёнки или наблюдается след от пластикового мусора (Ермаков и др., 2024), и сравним контрасты волн, рассчитанные с использованием выражения (6), с данными натурных наблюдений.

Оценки РЛ-контрастов для пластиковых плёнок

Оценим, насколько существенно влияние пластиковых плёнок на источник см-волн и, соответственно, на брэгговскую компоненту радиолокационного сигнала. Для этого сначала определим упругость пластиковых плёнок, исходя из данных натурных измерений коэффициента затухания ветровых волн дм-м-диапазона длин. Эти измерения описаны в работе (Ермаков и др., 2024), где использовались волнографы-акселерометры, установленные на наветренном и подветренном крае плавающей пластиковой плёнки толщиной 200 мкм и длиной порядка 10 м. Полученные экспериментальные зависимости пространственного коэффициента затухания $\delta_{\exp}$ от частоты волн приведены на *рис. 1*. Временной коэффициент затухания волн может быть рассчитан как $\gamma(f,k)=\delta_{\exp}C_{gr}+\beta(u^*,k,0)/2$, где C_{gr} — групповая скорость волн. Эффективную упругость пластиковой плёнки можно оценить с использованием экспериментальных значений и выражений (2) для модели затухания на мономолекулярной плёнке. Отметим, что в силу немонотонности теоретической зависимости коэффициента затухания от упругости, заданной величине коэффициента могут отвечать, вообще говоря, два значения упругости. Эти значения для некоторых частот и длин волн приведены в *таблице*.

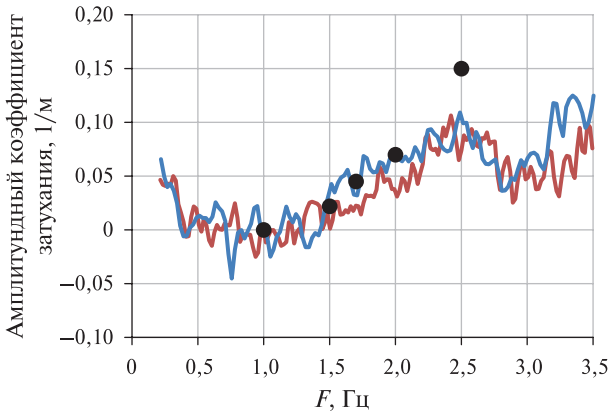

Рис. 1. Измеренная зависимость пространственного коэффициента затухания волн от частоты F в присутствии пластиковой плёнки. Средняя скорость ветра 4 м/с. Чёрные кружки — величина $\gamma(0, k)/\gamma(f, k)$ на нерастяжимой плёнке $E=\infty$ (Ермаков и др., 2024)

Оценки величины упругости полиэтиленовой плёнки

Частота волны, Гц	Длина волны, см	$\delta_{\exp}$, 1/м	$\gamma(E, k)/\gamma(0, k)$	Упругость, мН/м
1,75	51	0,050	95	310/360
2,00	40	0,075	75	200/300
2,50	25	0,090	37	110/220

Ниже будет рассмотрен случай зондирования пластикового мусора в L-диапазоне при угле падения микроволн 24° (Arii et al., 2014), в этом случае k_{br} составляет 0,43 рад/см в направлении поперёк ветра. На *рис. 2* представлены контрасты длинных волн с волновым числом 0,043 рад/см от скорости ветра. Это волновое число соответствует верхней границе диапазона для дополнительного источника. Оценка контрастов длинных волн с таким волновым числом проводилась согласно выражению (1) при $n = 5$ (Kudryavtsev et al., 2003). Расчёты на *рис. 2* проведены для пластиковых плёнок с упругостью 200, 300 и 400 мН/м. Здесь же представлен контраст длинных волн в слике ПАВ (упругость 25 мН/м). Хорошо видно, что уменьшение интенсивности дополнительного источника на воде, покрытой пластиковой плёнкой, не учитывать нельзя, в отличие от случая плёнок ПАВ, как было сделано ранее в работе (Sergievskaya, Ermakov, 2024). Поэтому при оценке контрастов волн в области, покрытой полиэтиленовой плёнкой, мы используем формулу (6) для интенсивности дополнительного источника.

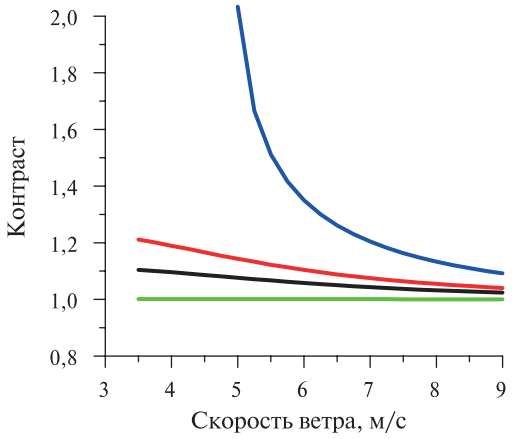

Рис. 2. Контраст длинных волн с волновым числом 0,043 рад/см, определяющим интенсивность дополнительного источника в L-диапазоне. Упругость 200 мН/м (чёрная кривая), 300 мН/м (красная), 400 мН/м (синяя) и 25 мН/м (зелёная)

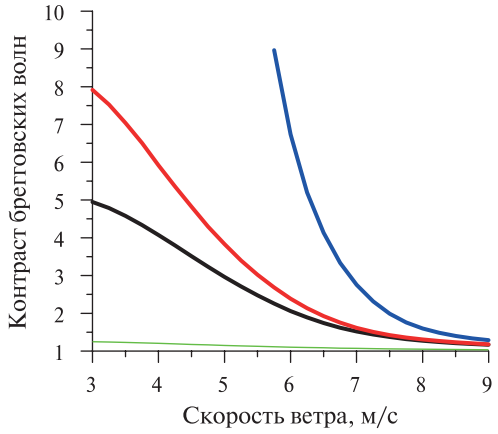

Рис. 3. Контраст волн с волновым числом 0,43 рад/см при зондировании поперёк ветра в присутствии пластиковых плёнок. Чёрная кривая — $E = 200$ мН/м, красная — $E = 300$ мН/м, синяя — $E = 400$ мН/м, зелёная — плёнка ПАВ с упругостью $E = 25$ мН/м

На *рис.* 3 показан рассчитанный контраст волн на брэгговском волновом числе $k_{br} = 0{,}43$ рад/см для нескольких значений эффективной упругости пластиковых плёнок при наблюдении поперёк ветра. Для сравнения на *рис. 3* представлен контраст волн в области плёнки ПАВ с упругостью $E = 25$ мН/м, что соответствует биогенным плёнкам, связанным, например, с микроводорослями-обрастателями плавающего в воде пластика. Видно, что в L-диапазоне плёнки ПАВ практически не гасят волны в отличие от пластиковой плёнки.

Использование модели для анализа РСА-наблюдений морского мусора

Применим описанную выше модель для описания проявлений пластикового мусора на радиолокационных снимках залива Онагава, префектура Мияги, полученных с помощью PALSAR (*англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) (L-диапазон, поляризация VV и HH, угол падения 24°) 8 апреля 2011 г. (*рис. 4*, см. с. 302). Изображения были получены почти через месяц после землетрясения и последующего катастрофического цунами 11 марта 2011 г. (Arii et al., 2014). На снимках отчётливо видны тёмные области с пониженной интенсивностью обратного рассеяния (отмечены прямоугольниками), синхронно проведённая аэрофотосъёмка подтверждает наличие фрагментов мусора в указанных областях. Используемое изображение получено приблизительно через месяц после землетрясения. В области,

ограниченной жёлтым кругом, рассчитано отношение сигнал/шум для пластикового мусора. Согласно данным исследовательского проекта 5 Gyres (https://www.zdnet.com/article/the-plastic-legacy-of-great-east-japan-tsunami-debrf/) последующее за землетрясением цунами вынесло в море от 5 до 20 млн т мусора, при этом в составе мусора через месяц после его выноса в море остаётся в основном плавающий пластик как наиболее долгоживущий материал, который не разлагается и обрастает водорослями. Оценки контраста PD в тёмных областях на РСА-изображениях составили величины порядка 7–10 дБ, скорость ветра на момент получения изображения была 11–16 км/ч, а направление наблюдения было близко к направлению поперёк ветра (см. https://www.timeanddate.com/weather/@2111401/historic?month=4&year=2011). Сравнение оценок наблюдаемых контрастов с рассчитанными (см. *рис. 3*) в рамках предложенной выше модели даёт удовлетворительное совпадение, что свидетельствует о корректности модели и возможности использования её для идентификации пластиковых плёнок по их проявлению на РСА-изображениях морской поверхности.

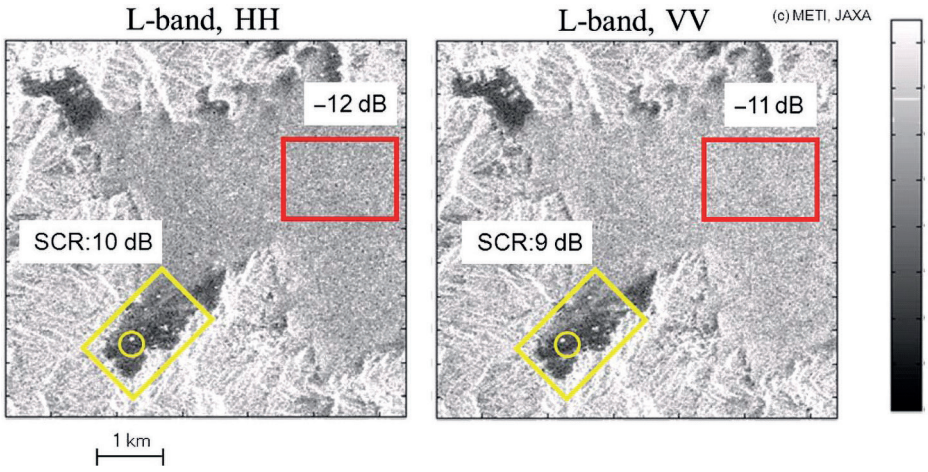

Рис. 4. Плавающие объекты в заливе Онагава, штат Мияги, наблюдаемые PALSAR в L-диапазоне

Заключение

- Дано обобщение композитной модели РЛ-рассеяния с учётом влияния высокоупругих пластиковых плёнок на дополнительный источник мелкомасштабных брэгговских волн см- и частично дм-диапазонов длин. Показано, что в выражении для источника необходимо учитывать увеличение коэффициента затухания длинных волн дм-м-диапазона в присутствии пластиковых плёнок.
- По данным натурных измерений затухания волн дм-м-длин получены оценки упругости пластиковой плёнки.
- Рассчитаны контрасты брэгговской компоненты РЛ-сигнала с учётом модифицированного дополнительного источника. Показано, что контрасты волн для пластиковой плёнки значительно превосходят контрасты для биогенных плёнок ПАВ.
- Проанализированы данные наблюдений пластикового мусора спутниковым радиолокатором PALSAR L-диапазона после землетрясения и катастрофического цунами у берегов Японии в 2011 г. Получено удовлетворительное согласие наблюдаемых РЛ-контрастов с оценками в рамках развитой модели подавления волн пластиковой плёнкой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00167 «Исследование влияния плавающих пластиковых объектов и биогенных плёнок на распространение поверхностных волн в приложении к проблеме радиолокационного зондирования пластикового мусора в океане», https://rscf.ru/project/23-17-00167/).

Литература

1. *Доброхотов В. А.*, *Ермаков С. А.*, *Сергиевская И. А.* Лабораторное исследование радиолокационного рассеяния Ка-диапазона и затухания волн на воде, покрытой полиэтиленовой плёнкой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 247–257. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257.
2. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. 163 с.
3. *Ермаков С. А.*, *Доброхотов В. А.*, *Лещев Г. В. и др.* Модельные эксперименты по исследованию влияния пластикового мусора на водной поверхности на характеристики радиолокационных сигналов Ка-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 257–269. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269.
4. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.
5. *Arii M.*, *Koiwa M.*, *Aoki Y.* Applicability of SAR to marine debris surveillance after the Great East Japan earthquake // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. V. 7. No. 5. P. 1729–1744. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
6. *Chubarenko I.*, *Esiukova E.*, *Khatmullina L. et al.* From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast // Marine Pollution Bull. 2020. V. 156. Article 111198. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111198.
7. *Donelan M. A.*, *Pierson W. J.*, *Jr.* Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry // J. Geophysical Research: Oceans. 1987. V. 92. No. C5. P. 4971–5029. DOI: 10.1029/JC092iC05p04971.
8. *Ermakov S. A.*, *Sergievskaya I. A.*, *Plotnikov L. M. et al.* New features of Bragg and non-polarized radar backscattering from film slicks on the sea surface // J. Marine Science and Engineering. 2022. V. 10. No. 9. Article 1262. DOI: 10.3390/jmse10091262.
9. *Evans M. C.*, *Ruf C. S.* Toward the detection and imaging of ocean microplastics with a spaceborne radar // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2021. V. 60. Article 4202709. 9 p. DOI: 10.1109/tgrs.2021.3081691.
10. *Jarzyna K.* The great pacific garbage patch. an outline of the problem, Antypody // A Quarterly Magazine of Australia, New Zealand and Oceania Research Association. 2011. No. 4. P. 2–14.
11. *Kudryavtsev V. N.*, *Hauser D.*, *Caudal G.*, *Chapron B.* A semi-empirical model of the normalized radar cross section of the sea surface 1. Background model // J. Geophysical Research: Oceans. 2003. V. 108. No. C3. Article 8054. DOI: 10.1029/2001JC001003.
12. *Li P.*, *Wang X.*, *Su M. et al.* Characteristics of plastic pollution in the environment: A review // Bull. Environmental Contamination and Toxicology. 2021. V. 107. No. 4. P. 577–584. DOI: 10.1007/s00128-020-02820-1.
13. *Phillips O. M.* Radar returns from the sea surface — Bragg scattering and breaking waves // J. Physical Oceanography. 1988. V. 18. P. 1065–1074. DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1065:RRFTSS>2.0.CO;2.
14. *Plant W.* A relationship between wind stress and wave slope // J. Geophysical Research: Oceans. 1982. V. 87. No. C3. P. 1961–1967. DOI: 10.1029/JC087iC03p01961.
15. *Sergievskaya I.*, *Ermakov S.* On an empirical model of the source of short wind waves based on radar observations of marine film slicks // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2024. V. 21. Article 3510705. 5 p. DOI: 10.1109/LGRS.2024.3474796.
16. *Sergievskaya I. A.*, *Ermakov S. A.*, *Ermoshkin A. V. et al.* The role of micro breaking of small-scale wind waves in radar backscattering from sea surface // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 24. Article 4159. DOI: 10.3390/rs12244159.
17. *Simpson M. D.*, *Marino A.*, *de Maagt P. et al.* Monitoring of plastic islands in river environment using Sentinel-1 SAR data // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 18. Article 4473. DOI: 10.3390/rs14184473.
18. *Simpson M. D.*, *Marino A.*, *de Maagt P. et al.* Investigating the backscatter of marine plastic litter using a C- and X-band ground radar, during a measurement campaign in Deltares // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 6. Article 1654. DOI: 10.3390/rs15061654.
19. *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.
20. *Stewart R. W.* The air-sea momentum exchange // Boundary-Layer Meteorology. 1974. V. 6. No. 1–2. P. 151–167. DOI: 10.1007/BF00232481.
21. *Sun Y.*, *Bakker T.*, *Ruf C.*, *Pan Y.* Effects of microplastics and surfactants on surface roughness of water waves // Scientific Reports. 2023. No. 13. Article 1978. DOI: 10.1038/s41598-023-29088-9.

22. *Valenzuela G. R.* Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review // Boundary-Layer Meteorology. 1978. V. 13. No. 1–4. P. 61–85. DOI: 10.1007/BF00913863.
23. *Vickers D.*, *Mahrt L.*, *Andreas E. L.* Formulation of the sea-surface friction velocity in terms of the mean wind and bulk stability // J. Applied Meteorology and Climatology. 2015. V. 54. No. 3. P. 691–703. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0099.1.
24. *Vodeneeva E.*, *Pichugina Y.*, *Zhurova D. et al.* Epiplastic algal communities on different types of polymers in freshwater bodies: A short-term experiment in karst lakes // Water. 2024. V. 16. No. 22. Article 3288. DOI: 10.3390/w16223288.

A model of manifestations of plastic films in radar imagery of the sea surface

S. A. Ermakov, I. A. Sergievskaya

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia
E-mail: stas.ermakov@ipfran.ru
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia

A semi-empirical model of the spectrum of small-scale wind waves on the water surface covered with floating highly elastic films simulating plastic debris in the ocean is generalized. An expression for an additional source in the equation for the spectrum of wind waves is developed, which determines the excitation of small-scale Bragg waves by long waves of the decimeter-meter range. An analysis of field measurements of damping of long wind waves during their propagation in the presence of a plastic film is performed, and estimates of its elasticity are obtained. Within the framework of the model, estimates of the variability of the Bragg component of the radar signal during backscattering from the area of plastic films are given. The model is used to describe the manifestations in synthetic aperture radar images of areas of water surface pollution by marine debris. It is shown that the estimates of the suppression of the intensity of the radar signal obtained within the framework of the model are satisfactorily consistent with the observations.

Keywords: ocean radar probing, sea surface, wind waves, plastic debris, plastic films

Accepted: 11.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-296-305

References

1. Dobrokhotov V. A., Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Laboratory study of Ka-band radar scattering and wave damping on water covered with plastic film, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 247–257 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-247-257.
2. Ermakov S. A., *Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln* (The influence of films on the dynamics of gravity-capillary waves), Nizhnii Novgorod: IPF RAN, 2010, 163 p. (in Russian).
3. Ermakov S. A., Dobrokhotov V. A., Leshchev G. V. et al., Model experiments on investigation of the influence of plastic garbage on water surface on the characteristics of Ka-band radar signals, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 257–269 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-257-269.
4. Levich V. G., *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* (Physicochemical hydrodynamics), Moscow: GIFML, 1959, 700 p.
5. Arii M., Koiwa M., Aoki Y., Applicability of SAR to marine debris surveillance after the great east japan earthquake, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, V. 7, No. 5, pp. 1729–1744, DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308550.
6. Chubarenko I., Esiukova E., Khatmullina L. 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, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111198.

7. Donelan M. A., Pierson W. J., Jr., Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, V. 92, No. C5, pp. 4971–5029, DOI: 10.1029/JC092iC05p04971.
8. Ermakov S. A., Sergievskaya I. A., Plotnikov L. M. et al., New features of Bragg and non-polarized radar backscattering from film slicks on the sea surface, *J. Marine Science and Engineering*, 2022, V. 10, No. 9, Article 1262, DOI: 10.3390/jmse10091262.
9. Evans M. C., Ruf C. S., Toward the detection and imaging of ocean microplastics with a spaceborne radar, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, V. 60, Article 4202709, 9 p., DOI: 10.1109/tgrs.2021.3081691.
10. Jarzyna K., The great pacific garbage patch. an outline of the problem, Antypody, *A Quarterly Magazine of Australia*, *New Zealand and Oceania Research Association*, 2011, No. 4, pp. 2–14.
11. Kudryavtsev V. N., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semi-empirical model of the normalized radar cross section of the sea surface 1. Background model, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2003, V. 108, No. C3, Article 8054, DOI: 10.1029/2001JC001003.
12. Li P., Wang X., Su M. et al., Characteristics of plastic pollution in the environment: A review, *Bull. Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, V. 107, No. 4, pp. 577–584, DOI: 10.1007/s00128-020-02820-1.
13. Phillips O. M., Radar returns from the sea surface — Bragg scattering and breaking waves, *J. Physical Oceanography*, 1988, V. 18, pp. 1065–1074, DOI: 10.1175/1520-0485(1988)018<1065:RRFTSS>2.0.CO;2.
14. Plant W., A relationship between wind stress and wave slope, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1982, V. 87, No. C3, pp. 1961–1967, DOI: 10.1029/JC087iC03p01961.
15. Sergievskaya I., Ermakov S., On an empirical model of the source of short wind waves based on radar observations of marine film slicks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, V. 21, Article 3510705, 5 p., DOI: 10.1109/lgrs.2024.3474796.
16. Sergievskaya I. A., Ermakov S. A., Ermoshkin A. V. et al., The role of micro breaking of small-scale wind waves in radar backscattering from sea surface, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 24, Article 4159, DOI: 10.3390/rs12244159.
17. Simpson M. D., Marino A., de Maagt P. et al., Monitoring of plastic islands in river environment using Sentinel-1 SAR data, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 18, Article 4473, DOI: 10.3390/rs14184473.
18. Simpson M. D., Marino A., de Maagt P. et al., Investigating the backscatter of marine plastic litter using a C- and X-band ground radar, during a measurement campaign in Deltares, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, No. 6, Article 1654, DOI: 10.3390/rs15061654.
19. 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.
20. Stewart R. W., The air-sea momentum exchange, *Boundary-Layer Meteorology*, 1974, V. 6, No. 1–2, pp. 151–167, DOI: 10.1007/BF00232481.
21. Sun Yu., Bakker T., Ruf C., Pan Y., Effects of microplastics and surfactants on surface roughness of water waves, *Scientific Reports*, 2023, No. 13, Article 1978, DOI: 10.1038/s41598-023-29088-9.
22. Valenzuela G. R., Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, V. 13, No. 1–4, pp. 61–85, DOI: 10.007/BF00913863.
23. Vickers D., Mahrt L., Andreas E. L., Formulation of the sea-surface friction velocity in terms of the mean wind and bulk stability, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2015, V. 54, No. 3, pp. 691–703, DOI: 10.1175/JAMC-D-14-00991.
24. Vodeneeva E., Pichugina Y., Zhurova D. et al., Epiplastic algal communities on different types of polymers in freshwater bodies: A short-term experiment in karst lakes, *Water*, 2024, No. 16, No. 22, Article 3288, DOI: 10.3390/w16223288.