

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЕНКИ НА НЕБРЕГГОВСКУЮ КОМПОНЕНТУ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

*В.В. Малиновский, А.С. Миронов,
А.Е. Кориненко*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: odmi@alpha.mhi.iuf.net

Представлены результаты натурных исследований радиолокационного рассеяния и характеристики обрушений в области искусственного слива. Показано, что доля активной фазы обрушений уменьшается под действием пленки. Этот эффект приводит к уменьшению небрегговской компоненты рассеяния. Рассматривается подход к определению параметров пленки по радиолокационным данным.

Введение. Радиолокационная (РЛ) информация является базовой при обнаружении нефтяных разливов на морской поверхности. Нефтяные пленки проявляются в радиолокационных изображениях (РЛИ) в виде “темных пятен” по отношению к “фону” вследствие уменьшения рассеяние радиоволн в зоне слива за счет подавления коротких ветровых волн. Аналогичные проявления (“look-alikes”) могут вызываться также различными природными явлениями, например, дождевыми осадками [1], зонами конвергенции течений [2, 3], пространственными неоднородностями температуры морской поверхности [4].

Проблема идентификации контрастов в РЛИ нетривиальна. Нефтяные пленки и “look-alikes” вызывают практически одинаковые РЛ контрасты, составляющие 0.6 дБ –13 дБ [5], имеют схожие геометрические характеристики, в том числе площадь, длину периметра, форму [6, 7]. В настоящее время для распознавания РЛ проявлений нефтяных пленок используется комплексный анализ радиолокационных данных, метеорологической, гидрологической информации и специфических признаков “темных участков” в РЛИ [см., например, 6 – 8]. В работе [9] предложен метод определения нефтяных разливов, основанный на регрессионных зависимостях, аргументами кото-

рых являются значения РЛ рассеяния в слике и на “фоне”, геометрия пленок и их комбинации.

Как правило, алгоритмы разделения нефтяных пленок и “look-alikes” базируются на статистически обеспеченных данных, полученных в результате обработки большого числа САР. Например, для получения распределения размеров нефтяных разливов в [10] были обработаны 1399 РЛИ морей Юго-восточной Азии и идентифицировано 7218 сливков. Метод [9] верифицирован для 237 нефтяных разливов и 153 “look-alikes”.

Известные алгоритмы идентификации пленок основаны только на эмпирических зависимостях и не учитывают особенности формирования удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) в зоне слива. Такой подход затрудняет интерпретацию получаемых результатов с физической точки зрения и не дает фундаментальной базы для последующего развития методов разделения в САР нефтяных пленок и “look-alikes”.

Другой возможный подход к решению проблемы заключается в учете изменения различных компонент УЭПР морской поверхности, покрытой пленкой и анализе РЛ поляризационного соотношения [11]. В работе [11] сделано допущение о том, что влиянием пленки на небрегговскую компоненту можно пренебречь, поскольку обрушения формируются волнами дециметрового и метрового диапазонов [12]. В литературе существуют различные версии, касающиеся вопроса влияния пленок на длинные волны. Гашение капиллярных и гравитационно – капиллярных волн пленкой происходит за счет сильного увеличения вязкой диссипации. Уровень спектра ветровых волн длиннее 30 см – 50 см на чистой воде и в области слива в соответствии с расчетами [13] практически одинаков в широком диапазоне ветров и различных значениях упругости поверхностной пленки. Наблюдения естественных и искусственных сливков [14] также показали, что сильное гашение при умеренных и слабых ветрах наблюдается для волн сантиметрового диапазона, тогда как для волн длиннее 15 см – 20 см влияние пленки несущественно.

С другой стороны, в лабораторном эксперименте [15] обнаружено сильное подавление волн в области спектрального пика с частотой 2 Гц. При измерениях, проведенных в Норвежском море [16], наблюдалось гашение волн с брэгговским волновым числом ниже 30 рад/м на большой площади морской поверхности, покрытой натуральным сликом. Незначительное влияние пленки олеинового спирта на ветровые волны в частотном интервале между 0.12 Гц и 0.7 Гц отмечалось в [17].

Таким образом, для анализа САР изображений с целью идентификации поверхностных пленок требуется дополнительное изучение поведения небрэгговской компоненты рассеяния в случае подавления дециметровых и метровых волн, ответственных за процесс обрушения. При этом необходимо отметить, по крайней мере, на следующие вопросы. Во-первых, изменяются ли характеристики обрушений в слике? Во-вторых, если характеристики обрушений изменяются, то насколько существенно это влияет на вклад небрэгговской компоненты в суммарную УЭПР?

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка изменения небрэгговской компоненты рассеяния от морской поверхности, покрытой искусственной пленкой.

Методика выполнения работ. Эксперимент проводился в октябре 2006 г. на океанографической платформе ЭО МГИ НАН Украины. Радиолокационные измерения выполнялись радиолокатором с непрерывным излучением на длине волны $\lambda_r = 8 \cdot 10^{-3}$ м (волновое число $k_r = 785$ рад/м) на вертикальной (ВВ) и горизонтальной (ГГ) поляризациях приема сигнала. Полученные РЛ сигналы пересчитывались в значения УЭПР по известным калибровочным характеристикам. Радиолокатор располагался на высоте 13.5 м относительно уровня моря. Размер облучаемого участка поверхности составлял ~ 1.5 м \times 2 м.

Регистрация характеристик обрушений ветровых волн осуществлялась с помощью видеокамеры, расположенной на высоте 7.5 м. Направление визирования выбиралось равным 45° к горизонту, обеспечивая обзор моря ~ 12 м \times 12 м. Сигнал с камеры записывался на видеомагнитофон. Обработка видеозаписей выполнялась по ориги-

нальной методике, предложенной в [18,19]. Алгоритм [18,19], основанный на анализе функции распределения вариаций яркости натурных видеозаписей, позволяет определять фазы обрушений (*A* – барабашки, *B* – растекшаяся пена) и значения доли поверхности *Q*, занятой обрушениями с вероятностью выше 90%. Разделение фаз обрушений производилось по методу, описанному в [19], где выделение барабашков осуществлялось с учетом их кинематических характеристик. Ниже долю морской поверхности, покрытой активной фазой обрушений будем обозначать *q*. Для повышения достоверности эта доля определялась как среднее значений величин *q*, полученных при обработке 1000 кадров, что соответствовало временному интервалу 40 с. Использование методики [19] также позволило рассчитать число обрушений (фаза *A*) в заданном интервале времени.

Поверхностная пленка формировалась из растительного масла с упругостью $E \approx 10$ мН/м. Радиолокационные измерения и определение характеристик обрушений в области слика проводились по схеме, описанной [11]. Масло, разливаемое с мостика, формировало тонкую пленку, переносимую течением. При этом регистрация данных производилась в последовательности “чистая вода – слик – чистая вода”. Скорость ветра определялась с помощью стандартного комплекса ГМ-63, установленного на высоте 23 м.

Результаты радиолокационных измерений. В ходе эксперимента было проведено 9 РЛ измерений. Восемь записей, полученных на “чистой воде”, использовались для анализа угловой зависимости РЛ поляризационного отношения. Метеорологические условия характеризовались преимущественно восточным ветром, что позволило выполнить только одну съемку с формированием искусственного слика с мостика платформы. Результаты этого измерения показаны на рисунке 1, где приводятся временные реализации РЛ сигнала на ВВ (рис.1а) и ГГ (рис.1б) поляризациях. Зондирование поверхности выполнялось “вслед волне” при скорости ветра $U = 12.1$ м/с и угле наблюдения относительно надира $\theta = 49^\circ$. Поверхностная пленка формировалась в интервале времени от 13.65 час до

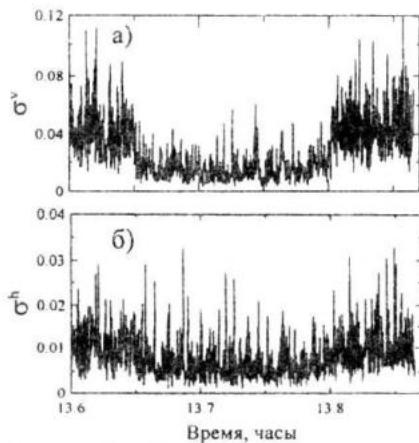


Рисунок 1 – Временные реализации РЛ сигнала: а) – вертикальная поляризация; б) – горизонтальная поляризация. Слик формировался в интервале времени от 13.65 час до 13.8 час

13.8 час. Как следует из рисунка 1, подавление рассеяния в области слика на ВВ поляризации σ_f^v больше, чем на ГГ σ_f^h . Контрасти сигналов по отношению к рассеянию на чистой воде σ_{bg}^p составляют $K^v = \sigma_{bg}^v / \sigma_f^v = 2.4$ и $K^h = \sigma_{bg}^h / \sigma_f^h = 1.4$. Здесь и ниже верхним индексом p будем обозначать поляризацию сигнала (v – ВВ, h – ГГ). Скорость ветра, показанная на рисунке 2а, при проведении измерений менялась незначительно и среднеквадратическое отклонение U составляло 0.6 м/с. Таким образом, уменьшение рассеяния на пленке вызвано только подавлением поверхностных волн. На рисунке 2б представлено поляризационное отношение $P = \sigma^v / \sigma^h$, сглаженное скользящим средним по интервалу 50 с. Значения P составляют 4.3 и 2.6, соответственно, для чистой воды и области слика.

Результаты измерений характеристик обрушений. Проведенные измерения показали, что поверхность пленка не только гасит гравитационно–капиллярные волны, но и изменяет характеристики обрушений. Наиболее наглядно это проявляется в числе обрушений на единицу поверхности в единицу времени N . На рисунке 3 символами (●) приводится временная реализация N , полученная 14.10.06, где отмечено время измерений в слике, сформированном из растительного масла. Значения скорости ветра показаны на рисунке 3а сплошной

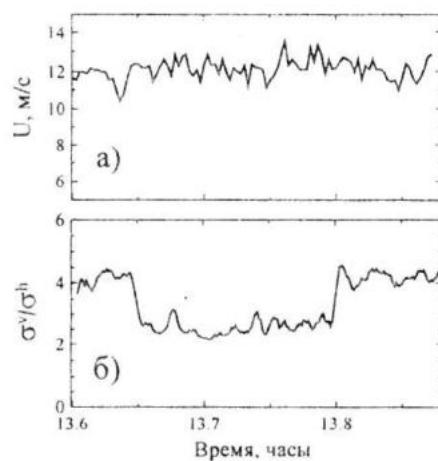


Рисунок 2 – Поляризационное отношение для данных, показанных на рис. 1: а) – скорость ветра при проведении измерений; б) – временная реализация P , сглаженная скользящим средним по интервалу 50 с

линией (правая шкала). Как следует из рисунка 3а количество обрушений в слике резко падает (~ 3 раза) по отношению к чистой воде. Этот эффект не связан с изменением метеоусловий, поскольку скорость ветра во время измерений менялась незначительно. На рисунке 3б показано изменение значений q для рассматриваемых измерений. Несмотря на разброс точек как на “фоне”, так и в области покрытой пленкой,

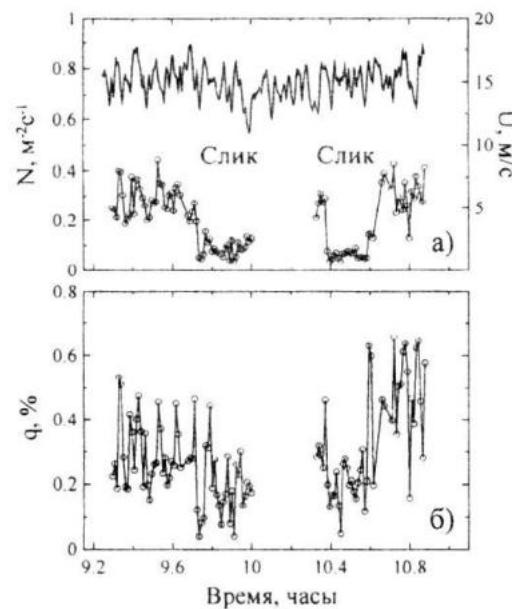


Рисунок 3 – Временные реализации характеристик обрушений: а) – число обрушений в единицу времени на единицу площади; сплошной линией показана скорость ветра (шкала справа); б) – значений q

наблюдается уменьшение значений q в слике. Контраст $K_q = q/q_f \approx 2$, где q_f – доля поверхности, покрытая фазой A , на пленке. Ветровые зависимости $K_N = N/N_f$ и K_q иллюстрируются на рисунках 4а и 4б, соответственно. Как видно из рисунка 4, контраст фазы A при увеличении скорости ветра меняется незначительно от ~1.5 до ~2, тогда как K_N увеличивается от 2.5 до 4.8 при росте U от 13 м/с до 15.5 м/с.

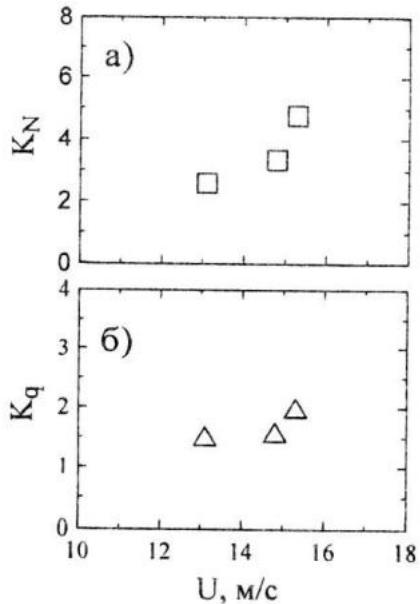


Рисунок 4 – Зависимости от скорости ветра: а) – величины N ; б) – величины q

Обсуждение результатов. Исследования особенностей формирования РЛ рассеяния от покрытой пленкой морской поверхности при зондировании “на ветер” приводятся в [11], где основная идея интерпретации данных заключалась в следующем. Поверхностная пленка подавляет резонансно-рассеивающую рябь и приводит к уменьшению брегговской компоненты рассеяния σ_b . Небрегговская компонента σ_{nb} , связанная с обрушениями ветровых волн, не зависит от поляризации радиосигнала. В следствие того, что вклад σ_{nb} в суммарную УЭПР на ГГ больше, чем на ВВ [13] РЛ контраст “слик/чистая вода” на ВВ оказывается выше, чем на ГГ. При анализе данных в [11] было высказано предположение об отсутствии влияния пленки на обрушения и дисперсию уклонов длинных

волн. Для уточнения данного вопроса рассмотрим основные компоненты, формирующие РЛ сигнал.

В рамках композитной модели рассеяния УЭПР представляется как сумма брегговской и небрегговской компонент $\sigma^P = \sigma_{0br}^P + \sigma_{nb}$ и в упрощенном виде может быть записана как [20]

$$\sigma^P = \sigma_{0br}^P \cdot \left(1 + j^P \cdot \overline{\zeta^2} \right) + \sigma_{nb} \quad , \quad (1)$$

$$\sigma_{0br}^P = B(k_b) \cdot T^P(\theta) \quad , \quad (2)$$

где σ_{0br}^P – “чисто брегговская компонента

рассеяния; $j^P = 1/(2\sigma_{0br}) \partial^2 \sigma_{0br} / \partial \theta^2$; $\overline{\zeta^2}$ – дисперсия уклонов длинных волн, модулирующих брегговскую рябь; $B(k_b)$ – уровень спектра ветровых волн на брегговском волновом числе $k_b = 2 \cdot k_r \cdot \sin \theta$; T^P – коэффициент, зависящий от геометрии наблюдений и поляризации; $G^P(\theta)$ – геометрический коэффициент [21].

Небрегговская компонента при $\theta > 25^\circ$ определяется обрушениями ветровых волн. Для углов наблюдения $\theta < 25^\circ$ основной вклад в σ_{nb} вносят зеркальные отражения [13]. В работе [22] показано, что σ_{nb} пропорционально q . Филлипс предложил выражать величину q через статистическую характеристику $\Lambda(k, \phi)$ – длину обрушающихся гребней на единицу поверхности [23]

$$q = C_q \int_{\phi} \int_{k < k_m} \Lambda(k, \phi) d\phi dk \quad ,$$

где C_q – эмпирическая константа; k_m – волновое число верхней границы обрушающихся волн. Вопрос о выборе значения k_m , в целом, остается открытым. В лабораторном эксперименте [24] установлено, что у волн короче 20 см – 30 см при большой локальной кривизне гребней генерируется капиллярная рябь, что приводит к стабилизации амплитуды длинной волны. Этот процесс должен исключать опрокиды-

вание гребня. В натурном эксперименте [12] показано, что 90% заполненности морской поверхности обеспечивается короткими волнами с $k > 3k_p$, где k_p – волновое число спектрального пика, а влияние энергонесущих волн заключается в сильной модуляции обрушений. Аналогичный вывод о том, что на низких волновых числах обрушения редки, но становятся более частыми с увеличением k сделан в [25].

Таким образом, значение q , а, следовательно, и σ_{nb} определяется в основном ветровыми волнами дециметрового и метрового диапазонов. В общем случае под заполненностью морской поверхности понимается сумма активной фазы обрушений и растекшаяся пена. Отметим, что при расчетах σ_{nb} во внимание принимается только активная фаза. Явное выражение для σ_{nb} приводится в [20]

$$\sigma_{nb} = \sigma_{wb}(\theta) \cdot q , \quad (3)$$

$$\sigma_{wb} = \sigma_{0wb}(\theta) \left(1 + M \overline{\theta_{wb}} A_{wb} \right) , \quad (4)$$

где $\sigma_{0wb}(\theta)$ – эмпирическая функция, имеющая смысл УЭПР барашка; $M = \partial \sigma_{0wb} / \partial \theta$; $\overline{\theta_{wb}}$ – средний наклон барашка ($\overline{\theta_{wb}} \sim 0.1$); A_{wb} – функция, учитывающая влияние наклонов барашков на азимутальное распределение небрегговского рассеяния.

Определим спектральный контраст на пленке как $K_B = B_f(k_b) / B(k_b)$, где B_f – уровень спектра в слике. Учитывая, что $K_q = q / q_f$, и принимая во внимание (3), небрегговская компонента рассеяния от поверхности покрытой пленкой, будет равна $\sigma_{nb}^f = K_q^{-1} \cdot \sigma_{nb}$. Тогда выражение (1) для области слика запишется в виде

$$\sigma_f^p = K_B B(k_b) T^p \left(1 + j^p \overline{\zeta^2} \right) + K_q^{-1} \sigma_{nb} . \quad (5)$$

Вклад небрегговской компоненты в суммарную УЭПР зависит от диапазона радиоволн. Для наших измерений доля σ_{nb} на чистой воде составляет ~ 0.2 на ВВ и ~ 0.6 на ГГ поляризациях [20]. Для оценки роли величины K_q в контрасте РЛ сигнала вве-

дем следующие отношения компонент рассеяния к суммарной УЭПР

$$a^p = \sigma_{nb} / \sigma^p \quad b^p = \sigma_{0br} / \sigma^p . \quad (6)$$

Теоретические значения (6), рассчитанные по модели [20] при наших условиях измерений составляют

$$\begin{aligned} a^v &= 0.2 & b^v &= 0.68 \\ a^h &= 0.6 & b^h &= 0.37 \end{aligned} . \quad (7)$$

С учетом (1) и обозначений (7) запишем РЛ контраст в виде

$$K^p = \left[K_B b^p \left(1 + j^p \overline{\zeta^2} \right) + K_q^{-1} a^p \right]^{-1} . \quad (8)$$

Характерное значение спектрального РЛ контраста при наличии поверхностной пленки с упругостью ~ 10 мН/м составляет $K_B = 4 - 5$ дБ [13] на брегговской длине волны 5.6 мм и $U = 12$ м/с. Используя модельные значения (7) и задавая $K_q^{-1} = 0.5$ (двукратное уменьшение q) получаем оценки РЛ контрастов на ВВ и ГГ поляризациях, соответственно, $K^v = 2.6$ и $K^h = 1.6$, что хорошо согласуются с результатами наблюдений.

Радиолокационное поляризационное отношение. Как отмечалось выше поляризационное отношение в слике уменьшается из-за неодинакового влияния пленки на короткие и длинные волны. Данный эффект должен проявляться при любой геометрии зондирования, но с различными величинами контрастов, поскольку вклады σ_b^p и σ_{nb} в суммарную σ^p зависят как от угла наблюдения θ , так и разности φ между направлением облучения поверхности и направлением скорости ветра [13]. Примем, что $\varphi = 0^\circ$ соответствует измерениям “по ветру”, а $\varphi = 180^\circ$ – “против ветра”.

На рисунке 5 представлены зависимости P от U для $\theta = 49^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ при экспериментах на чистой воде (\square) и области пленки (\circ). Результаты наблюдений при

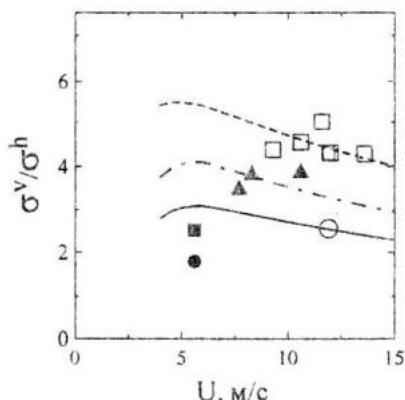


Рисунок 5 – Ветровые зависимости поляризационного отношения. Символами обозначены: данные, полученные: (□) – на чистой воде, (○) – в слике при $\theta = 49^\circ$, $\varphi = 0^\circ$; (\blacktriangle) – на чистой воде при $\theta = 48^\circ$, $\varphi = 180^\circ$; (■) – на чистой воде, (\bullet) – слике при $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 180^\circ$. Кривые соответствуют модельным расчетам P для данных, обозначенных (□) – сплошная; (\blacktriangle) – штрих-пунктир; (■) – пунктир

$\theta = 48^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ и фоновых условий обозначены как (\blacktriangle). Значения поляризационных отношений на чистой воде (■) и слике (\bullet), полученные при $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 180^\circ$, заимствованы из [11]. Линиями на рисунке 5 показаны теоретические зависимости, рассчитанные по модели [20] для чистой поверхности, при $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ (сплошная), $\theta = 48^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ (штрих-пунктир) и $\theta = 49^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ (пунктир). Как следует из рисунка 5 полученные экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с их теоретическими значениями. С ростом θ значения P увеличиваются. Отметим, что поляризационное отношение на чистой воде при зондировании “по ветру” больше, чем при измерениях “на ветер”. Отношение P в слике к его величине на “фоне” равны 0.6 для $\theta = 49^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ и 0.72 для $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 180^\circ$.

Использование двух поляризаций при РЛ наблюдениях загрязнений морской поверхности дает принципиальную возможность оценки свойств поверхностных пленок. Рассмотрим подход к решению этой

задачи. Учитывая, что небрегговская компонента, связанная с обрушениями, не зависит от поляризации $\sigma_{nb}^v = \sigma_{nb}^h = \sigma_{nb}$ и принимая во внимание (1) и (2), запишем разность сигналов на ВВ и ГГ

$$\begin{aligned} \sigma^v - \sigma^h &= \\ &= B \cdot \left[T^v - T^h + \overline{\zeta^2} \left(j^v T^v - j^h T^h \right) \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

Величины T^p и j^p зависят только от угла наблюдения. Как показано выше, дисперсия уклонов длинных волн может изменяться в области пленки. Однако расчеты показывают, что при уменьшении $\overline{\zeta^2}$ на 20% выражение в квадратных скобках в (9) изменяется не более чем на 5% в диапазоне $30^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$. Таким образом, существенно уменьшается за счет гашения резонансной ряби только $B(k_b)$, а отношение разностей (9) на пленке и чистой воде будет в основном определяться контрастом уровней спектра

$$\frac{\sigma_f^v - \sigma_f^h}{\sigma_{bg}^v - \sigma_{bg}^h} \approx \frac{B_f(k_b)}{B(k_b)} = K_B. \quad (10)$$

Значение K_B зависит как от скорости ветра, так и упругости E поверхностной пленки и может быть рассчитано теоретически (см. рис.10 в [13]). Тогда при известных U , k_b и найденной по РЛ данным величине спектрального контраста, используя (10), можно оценить параметр E .

Продемонстрируем данный подход на примере. На рисунке 6 показана разность сигналов на ВВ и ГГ поляризациях, пред-

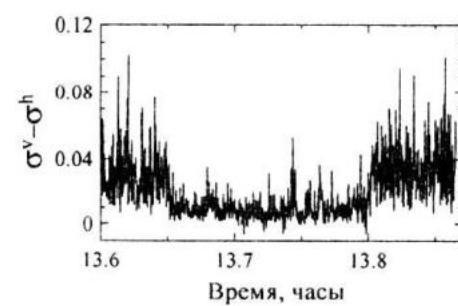


Рисунок 6 – Разность сигналов на ВВ и ГГ поляризациях, показанных на рисунке 1

ставленных на рисунке 1. Средние значения $\sigma^v - \sigma^h$ составляют 0.03 на чистой воде и 0.01 в области слика, следовательно отношение B_f / B , рассчитанное по (10), составляет -4.7 дБ. Эта величина отмечена горизонтальной линией на рисунке 7, где приводятся теоретические значения спектрального контраста для волновых чисел $k \geq 10$ рад/м при ветре $U = 12$ м/с, выполненные по модели [20] для упругостей пленки 5 мН/м (пунктир), 10 мН/м (сплошная) и 20 мН/м (штрих-пунктир). Брегговское волновое число, составляющее 1122 рад/м при $\theta = 49^\circ$, отмечено на рисунке 7 вертикальной линией. Таким образом, полученное в эксперименте подавление уровня спектра на -4.7 дБ при $k_b = 1122$ рад/м должно вызываться пленкой с $E = 10$ мН/м, что соответствует упругости растительного масла, использовавшегося для создания слика.

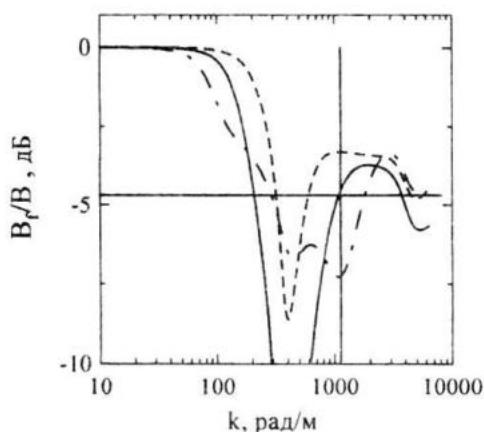


Рисунок 7 – Контраст уровней спектров ветровых волн с волновыми числами $k \geq 10$ рад/м для поверхности, покрытой пленкой с упругостью 5 мН/м (пунктир), 10 мН/м (сплошная) и 20 мН/м (штрих-пунктир) при $U = 12$ м/с. Горизонтальная линия соответствует оценке K_B , полученной по РЛ измерениям; вертикальная линия – брегговскому волновому числу

Выводы. Результаты проведенных натурных исследований позволяют сделать следующие выводы. В области морской поверхности, покрытой пленкой растительного масла наблюдается существенное (в ~ 3 раза) уменьшение числа обрушений в единицу времени на единице поверхности по отношению к чистой воде. Одновременно фаза A обрушений снижается в 1.5 – 2 раза.

Это может свидетельствовать о том, что в зоне слика наиболее сильно подавляются "мелкомасштабные" обрушения, поскольку их суммарный вклад в долю заполненной поверхности меньше, чем вклад от крупных баращков. При изменении скорости ветра от 13 м/с до 15.5 м/с контрасты q "чистая вода – слика" изменяются незначительно, в то время как контрасты K_N увеличиваются от 2.5 до 4.8.

Уменьшение значений q в слике приводит к снижению небрегговской компоненты рассеяния. Учет изменения характеристик обрушений на поверхности, покрытой пленкой, позволяет количественно согласовать наблюдаемые контрасты РЛ сигнала с теоретическими расчетами. Использование двух поляризаций РЛ сигнала дает принципиальную возможность оценивать упругость поверхностной пленки

Полученные результаты могут быть использованы в задачах идентификации загрязнений морской поверхности по радиолокационной информации.

ЛИТЕРАТУРА

- Melsheimer, C., W. Alpers, M. Gade, Simultaneous observation of rain cells over the ocean by the synthetic aperture radar aboard the ERS satellites and by surface-based weather radars // Journ. Geophys. Res., 106(C3), 4665-4678, 10.1029/2000JC000263, 2001.
- Johannessen, J. A., Kudryavtsev V., Akimov D., et.al. On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current features // Journ. Geophys. Res. – V.110. – No.C7. – C07017. – doi:10.1029/2004JC002802, 2005.
- Гродский С.А., Дулов В.А., Кудрявцев В.Н. Связь зон ослабления РЛ сигналов с конвергенцией поверхностных течений // Исслед. Земли из космоса. – 1992. – № 3. – С.10–15.
- Beal R.C., Kudryavtsev V.N., Thompson D.R. et al. The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS 1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream // Journ. Geophys. Res. – 1997. – V.102. – C3. – P.5799–5814.
- Espedal H.A. Oil spill and its look-alikes in ERS SAR imagery // Исслед. Земли из космоса. – 1998. – № 5. – С.94–102.

6. Calabresi G., Frate F.D., Lichtenegger J., et. al. Neural networks for the oil spill detection using ERS-SAR data // Proceedings of IGARSS '99. – 1999. – V.1. – P.215 – 217.
7. Frate Del F. Salvatori, L. Oil spill detection by means of neural networks algorithms: a sensitivity analysis // Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International. – V.2. – 2004. – P.1370–1373.
8. Espedal H.A., Johannessen O.M., Johannessen J.A. et al. COASTWATCH'95: ERS ½ SAR detection of natural film on the ocean surface // Journ.Geophys.Res. – 1998. – V.103. – No.C11. – P.24969–24982.
9. Nirchio F., Sorgente M., Giancaspro A. et al. Automatic detection of oil spills from SAR images // Int. Journal of Rem. Sensing. – 2005. – V.26. – No.6. – P.1157–1174.
10. Lu J., H.Lim, S.C. Liew, M. Bao, L.K. Kwoh. Oil pollution statistics in Southeast Asian waters complied from ERS SAR imagery // Earth Observation Quarterly. – 1999. – N61. – P.13–17.
11. Малиновский В.В., Дулов В.А., Кориненко А.Е. и др. Натурные исследования характеристик радиолокационного расщепления от морской поверхности в области искусственного слива // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины: МГИ – Севастополь – 2005. – С.171–176.
12. Dulov V.A., Kudryavtsev V.N., Bol'shakov A.N. A field Study of whitecap coverage and its modulation by energy containing surface waves // Gas Transfer at Water Surface / Eds M.A. Donelan, W.M. Drennan, E.S. Saltzman, R. Wanninkhof. AGU. – 2002. – P.296–301.
13. Kudryavtsev, V., D. Akimov, J. Johannessen, and B. Chapron. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // Journ.Geophys.Res. – 2005. – 110. – C07016. – doi:10.1029/2004JC002505.
14. Ermakov S.A., Zuikova A.M., Panchenko A.R. et al. Surface film effect on short wind waves // Dynamic of Atm. and Ocean. – 1986. – V.10. – P.31–50.
15. Gade M, Alpers W, Hühnerfuss H., Lange P.A. Wind wave tank measurements of wave damping and radar cross section in the presence of monomolecular surface films // Journ. Geoph. Res. – 1998. – V.103. – NoC2. – P.3167–3178.
16. Hühnerfuss H., Alpers W., Dannhauer H. et al. Natural and man-made sea slicks in the North Sea investigated by a helicopter-born 5-frequency radar scatterometer // International Journal of Remote Sensing. – 1996. – V.17. – P.1567–1582.
17. Hühnerfuss H., Alpers W., Jones W.L. et al. The damping of ocean surface waves by a monomolecular film measured by wave staffs and microwave radars // Journ. Geoph. Res. – 1981. – V. 86. – No.C1. – P.429–438.
18. Дулов В.А., Миронов А.С., Большаков А.Н. и др. Выделение обрушений ветровых волн из видеозаписей морской поверхности // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины: МГИ – Севастополь – 2004. – С.119–124.
19. Миронов А.С., Дулов В.А. Методика определения кинематических свойств обрушений на основе видеозаписей морской поверхности // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины: МГИ – Севастополь – 2006. – в наст сборнике.
20. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. 1. Background model // Journ.Geophys.Res. – 2003. – 108 (C3). – 8054. – doi:10.1029/2001JC001003.
21. Plant W.J. A two-scale model of short wind generated waves and scatterometry // Journ.Geophys.Res. – 1986. – V.91. – C9.– P.10735–10749.
22. В.В.Кудрявцев, В.В.Малиновский. О влиянии внутренних волн на радиолокационный сигнал при малых углах скольжения // Морск. Гидрофиз.журнал. – 1988. – №6. – С.3–9.
23. Phillips O.M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in the wind-generated gravity waves // J.Fluid Mech. – 1985. – 156. – P.505–531.
24. Ермаков С.А., Рувинский К.Д., Салашин С.Г. и др. Экспериментальное исследование генерации капиллярно–гравитационной ряби сильнолинейными волнами на поверхности глубокой жидкости // Изв. АН СССР, ФАО. – 1986. – Т.22. – №10. – С. 1072–1081.
25. Belcher S.E., Vassilicos J.C. Breaking waves and equilibrium range of wind-wave spectra // J. Fluid Mech. – 1997. – V.342. – P.377–401.