

## Радиолокационные контрасты искусственных сликов при скользящих углах зондирования

А.Е. Кориненко<sup>1</sup>, В.В. Малиновский<sup>1</sup>, В.Н. Кудрявцев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: korinenko.alex@gmail.com

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, 195196, Россия

В работе представлены результаты радиолокационных (РЛ) исследований морской поверхности под малыми углами скольжения при наличии искусственной пленки. Эксперименты проводились в 2014–2015 годах в районе Стационарной океанографической платформы, пос. Качивели, Южный берег Крыма. При измерениях использовался навигационный радиолокатор X-диапазона с горизонтальной поляризацией излучения/приема сигнала, установленный на океанографической платформе на высоте 15 м над уровнем моря. Углы наблюдения морской поверхности составляли от 6 град. до 1 град. относительно горизонта. Для создания поверхностных загрязнений использовалось растительное масло. Показано, что из-за сильной спекл-структуры РЛ изображения, вызванного отражениями сигнала от обрушений наиболее крупных ветровых волн, РЛ контрасты между чистой поверхностью и поверхностью, покрытой пленкой, выражены слабо, что существенно понижает достоверность РЛ обнаружения поверхностных загрязнений. После «подавления» спекл-структуры РЛ изображения (путем логарифмирования сигнала с последующим осреднением, что эквивалентно расчету среднего геометрического значения сигнала) проявление поверхностных сликов на РЛ изображениях становится явным. Анализ статистических характеристик сигнала показал, что падение РЛ сигнала в слике связано с подавлением числа обрушений наиболее коротких ветровых волн, отражающих радиоволны. Приведены характеристики РЛ-контрастов сликов в зависимости от скорости ветра и его направления.

**Ключевые слова:** радиолокационные измерения, скользящие углы зондирования, обрушения ветровых волн, поверхностные загрязнения, ветровые волны, морская поверхность

Одобрена к печати: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-185-194

### Введение

Данные, получаемые с радиолокационных (РЛ) станций, установленных на ИСЗ или на борту летательных аппаратов, широко используются для исследования поверхностных проявлений океанических явлений (течения, вихри, фронтальные разделы), а также идентификации и выявления источников нефтяных загрязнений в портах, зонах интенсивного судоходства и районах нефте- и газодобычи (см., например, (Johannessen et al., 2005; Kudryavtsev et al., 2005) и цитируемую там литературу). Однако частота спутниковой РЛ съемки заданного региона крайне невысока – порядка одной съемки за несколько дней. Преимуществом РЛ станций, базирующихся на морских платформах, судах или на береговых сооружениях, является то, что они могут проводить мониторинг характеристик морской поверхности практически непрерывно (Dankert, Rosenthal, 2004; Senet et al., 2001). При скользящих углах зондирования механизм обратного рассеяния существенно отличается от Брэгговского резонансного рассеяния, типичного для умеренных углов падения. В этом случае РЛ сигнал формируется в результате квази-зеркальных отражений от нелинейных особенностей обрушающихся ветровых волн (Jessup et al., 1991; Liu et al., 1998; Kudryavtsev et al., 2003). В результате РЛ изображение морской поверхности приобретает выраженную спекл-структуру, формируемую отражениями от наиболее крупных (с пространственным масштабом порядка пятна разрешения РЛ станции) обрушений. Происхождение спекл-структуры как РЛ-отражений от гребней обрушающихся волн подтверждается значениями Доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала (см., например, (Jessup

et al., 1991; Liu et al., 1998)). Обрушения волн меньшего (по сравнению с пятном разрешения) пространственного масштаба не формируют спеклы изображения, но вносят существенный вклад в среднее значение удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) поверхности, которое на порядок (и более) превышает величину Брэгговского рассеяния (Phillips, 1988; Kudryavtsev et al., 2003).

Известно, что при умеренных углах падения проявление сликов на РЛ изображениях в виде «темных» пятен обусловлено подавлением коротких Брэгговских волн поверхностными пленками (см., например, обзор литературы в (Ермаков и др., 2006; Кудрявцев и др., 2008)). Согласно экспериментальным и теоретическим исследованиям, спектральный диапазон коротких волн, подверженный гасящему воздействию пленок, зависит от их упругости, но обычно не распространяется на волны длиннее 0,2 м (Ермаков и др., 2006; Ermakov et al., 1986; Gade et al., 1998; Kudryavtsev et al., 2005). В этом контексте возникает вопрос – способны ли поверхностные пленки влиять на РЛ сигнал при скользких углах, когда обратное рассеяние формируется отражениями радиоволн от обрушающихся волн с длинами на порядок и более превышающих длину радиоволны, т.е. обрушениями волн длиннее 0,3 м? Экспериментальные исследования (Malinovsky et al., 2007) показали, что интенсивность обрушений коротких ветровых волн существенно подавляется в сликах. Анализ 4-х поляризационных РСА изображений сликов, проведенный в работе (Hansen et al., 2016), показал, что «небрэгговская» компонента УЭПР в С-диапазоне, формируемая отражениями радиоволн от обрушений волн, существенно подавляется в поверхностных пленках. В работе (Кудрявцев и др., 2008; Hansen et al., 2016) было предположено, что механизмом уменьшения интенсивности обрушений волн в сликах является подавление коротковолновых гармоник, порождающих нелинейную неустойчивость и опрокидывание гребня волны (Longuet-Higgins, 1978). Следуя этому механизму, можно предположить, что, в отличие от обрушений коротких волн (длины волн порядка метра и менее), крупномасштабные обрушения (длины волн порядка 10 м и более) не подвержены воздействию поверхностных пленок, так как супер-гармоники, порождающие неустойчивость гребней этих волн, являются достаточно «длинными», что исключает воздействие молекулярной вязкости.

Основной целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей проявлений сликов в РЛ изображениях морской поверхности в Х-диапазоне на горизонтальной (ГГ) поляризации при скользких углах зондирования и оценка наблюдаемости поверхностных загрязнений при различных скоростях ветра и азимутах наблюдения.

### **Результаты натурных исследований**

Натурный эксперимент проводился в августе–октябре 2014–2015 гг. в районе Стационарной океанографической платформы, расположенной в Голубом заливе, пос. Кацевели, Южный берег Крыма. При измерениях использовалась судовая РЛС «Река» ([www.micran.ru](http://www.micran.ru)) ближнего обзора с высоким разрешением по дальности. Радиолокатор, работающий в кру-

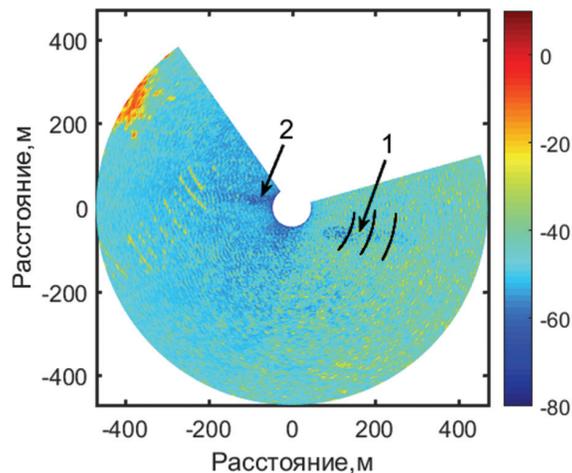
говом режиме на длине волны 3 см при горизонтальной поляризации передачи/приема сигнала, устанавливался на океанографической платформе. Определение шумовых характеристик аппаратуры осуществлялось по записям РЛ сигнала в штилевых условиях, т.е. при полном отсутствии РЛ отражений от моря. В результате осреднения 76 «шумовых» сканов были рассчитаны значения уровня шума для всех азимутов и дальностей. При последующей обработке радиолокационных данных уровень шума вычитался из исходных значений сигнала. Далее, РЛ сигнал, очищенный от шумов, пересчитывался в значения УЭПР морской поверхности  $\sigma_0$  по калибровочной зависимости, полученной по РЛ отражениям от уголкового отражателя, который в штилевую погоду размещался на поплавке мористее платформы на расстоянии от 150 м до 600 м.

Искусственные слики формировались путем разлива растительного масла с известной упругостью 12 мН/м (Ермаков и др., 2006). Разливы масла осуществлялись с катера на удалении от 250 м до 1000 м от платформы так, чтобы была возможность длительной РЛ регистрации слика по мере его дрейфа. Всего в 2014–2015 годах было проведено 37 разливов растительного масла в широком диапазоне скоростей ветра (от 4 м/с до 16 м/с), азимутов и дальностей радиолокационных измерений.

#### *Контрасты УЭПР в линейных единицах*

В начале рассмотрим контрасты УЭПР морской поверхности при анализе данных в линейных единицах. На *рис. 1* приведен фрагмент радиолокационного изображения, осредненного за 20 оборотов радиолокатора. Средняя скорость ветра составляла 7,2 м/с, направление ветра – восточное. При внимательном рассмотрении *рис. 1* можно обнаружить, что уровень сигнала в зоне слика несколько уменьшается, однако это уменьшение выделяется с трудом на фоне чистой морской поверхности.

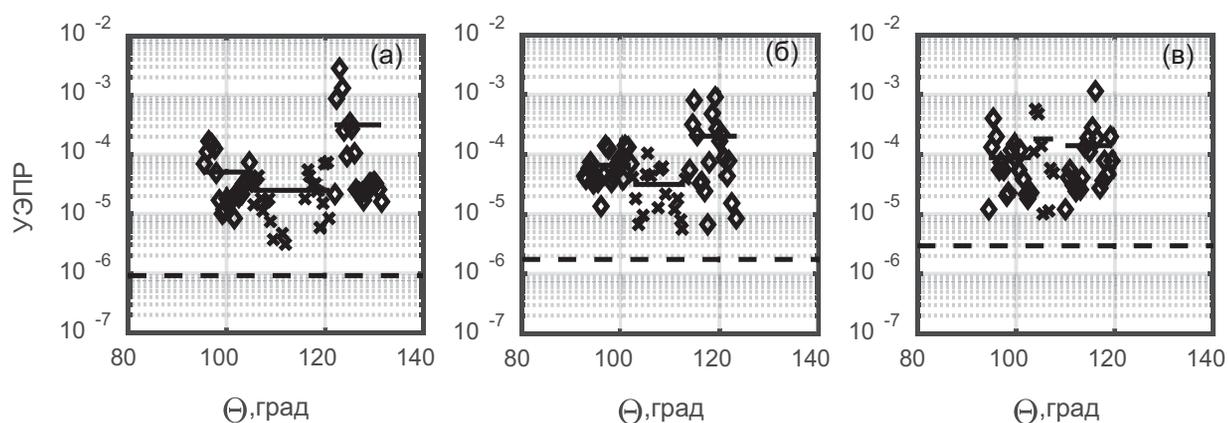
На *рис. 2* приведены зависимости УЭПР морской поверхности от азимута для углов



*Рис. 1. Фрагмент осредненного радиолокационного изображения, полученного 17 сентября 2015 г. Цветовая гамма изображений соответствует УЭПР сигнала в дБ, значение которой приведено на шкале справа. Стрелками 1, 2 отмечены соответственно зоны морской поверхности, покрытой пленкой растительного масла и ветровая тень от платформы. Светлые полосы в левой части изображения связаны с отражениями от систем поверхностных буев устричной плантации*

наблюдения морской поверхности  $84,3^\circ$ ,  $85,7^\circ$ ,  $86,7^\circ$ , полученные вдоль траекторий, отмеченных черными дугами на *рис. 1*. Как следует из этих данных, снижение УЭПР в зоне слика незначительно, а при максимальном угле падения данные измерений показывают даже увеличение УЭПР в слике. Отметим, что разброс РЛ сигнала на порядок превышает перепад средних значений сигнала в слике, что, очевидно, является следствием влияния случайной структуры РЛ изображения (спекл-структура). Для получения статистически обеспеченных оценок требуется более длительный интервал осреднения. Однако увеличение времени накопления данных приведет к размытию границы пятна за счет его дрейфа и растекания, что скажется на точности определения контура слика и последующем анализе радиолокационных данных.

Полученные значения радиолокационного контраста  $K = \overline{\sigma_f} / \overline{\sigma_s}$  сортировались по



*Рис. 2. Зависимости УЭПР морской поверхности от азимута для углов наблюдения морской поверхности  $84,3^\circ$ ,  $85,7^\circ$ ,  $86,7^\circ$  соответственно. Символом ( $\diamond$ ) отмечены значения УЭПР на чистой морской поверхности, ( $\times$ ) – в зоне искусственного слика. Сплошными линиями – средние значения УЭПР как для фона, так и для зоны слика. Пунктирная линия – УЭПР шума*

трем группам относительно азимута наблюдения: «на ветер» ( $-30^\circ \leq d\varphi = \varphi_{slicк} - \varphi_{\bar{U}} \leq 30^\circ$ ); «перпендикулярно ветру» ( $60^\circ \leq d\varphi \leq 120^\circ$ ); «по ветру» ( $150^\circ \leq d\varphi \leq 210^\circ$ ), где  $\varphi_{slicк}$  – средний азимут разреза в слике. Величина  $\overline{\sigma_f}$  рассчитывалась как среднее значение сигнала до слика и после него. Зависимость  $K$  от скорости ветра для диапазонов углов  $82^\circ$ – $84^\circ$ ,  $84^\circ$ – $86^\circ$ ,  $86^\circ$ – $89^\circ$  представлена на *рис. 3а–в*. Как следует из *рис. 3*, явной зависимости величины  $K$  от азимута наблюдения, скорости ветра и угла обзора не наблюдается. Полученные оценки РЛ-контрастов слика (при анализе данных в линейных единицах) крайне неустойчивы. Величина  $K$  изменяется в пределах от -10 дБ до 12 дБ. Также наблюдаются и значения  $K \leq 0$ , которые не имеют «физического» смысла.

Как отмечалось выше, причиной этого является спекл-структура РЛ изображения, которая не подавляется в области слика. Величина отраженного сигнала от взволнованной поверхности моря флуктуирует в больших пределах (до 40 дБ). Это значительно затрудняет анализ средних характеристик рассеянного сигнала в зоне слика, поскольку появления даже нескольких всплесков с большими отражающими свойствами в значительной степени поднимет средний уровень сигнала. Подобная ситуация показана на *рис. 2в*, где нали-

чие в среднем сигнале двух точек со значением УЭПР  $\sigma_s \sim 6 \cdot 10^{-4}$  привела к завышению значения  $\overline{\sigma_s}$ , и в результате среднее значение УЭПР в зоне слика оказалось больше, чем на чистой воде. Большой вклад всплесков в среднее значение УЭПР приводит к существенным ошибкам в оценке радиолокационного контраста «чистая поверхность – слик» и, следовательно, менее надежному обнаружению поверхностных загрязнений.

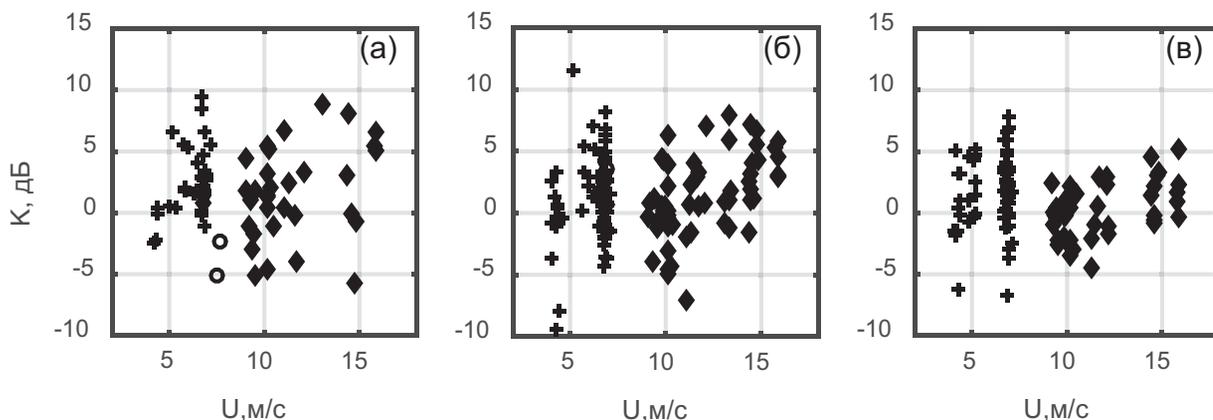


Рис. 3. Зависимость значений радиолокационного контраста  $K$  от скорости ветра при углах падения  $82^\circ\text{--}84^\circ$  (а),  $84^\circ\text{--}86^\circ$  (б),  $86^\circ\text{--}89^\circ$  (в). Символами (+), (o), (♦) обозначены соответственно радиолокационные измерения поверхностного слика «на ветер», «перпендикулярно ветру» и «по ветру»

#### Подавление эффекта спекл-структуры

При внимательном анализе структуры слика на РЛ изображении (см., например, рис. 1) можно обнаружить падение РЛ сигнала в областях слика между «индивидуальными» спеклами. Это показывает, что мелкомасштабные обрушения (с размером намного меньше пятна разрешения) подавляются в сликах, как это было обнаружено в экспериментах (Malinovsky et al., 2007, Hansen et al., 2016). Поэтому эффект проявления слика в РЛ изображении может быть значительно усилен после удаления/подавления вклада спеклов в УЭПР.

В качестве варианта мы предлагаем уменьшить влияние спеклов в УЭПР путем логарифмирования РЛ сигнала в каждом пикселе изображения и последующем осреднении кадров, что эквивалентно расчету среднего геометрического значения  $\overline{\sigma_{dB}}$ :

$$\overline{\sigma_{dB}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 10 \times \lg \sigma_0 = 10 \times \lg \left( \prod_{k=1}^n \sigma_0 \right)^{\frac{1}{n}},$$

где  $n$  – число обрабатываемых РЛ изображений. По сути, это эквивалентно обработке РЛ изображений представленных в дБ единицах измерения.

Рассмотрим данные, представленные выше, но уже после осреднения логарифмического сигнала. На рис. 4 демонстрируется зависимость  $K_{dB} = \overline{\sigma_{dB}^f} - \overline{\sigma_{dB}^s}$  от скорости ветра. С одной стороны, как следует из рис. 4, явной зависимости значения  $K_{dB}$  от азимута зондирования поверхностного слика и скорости ветра не наблюдается. При этом разброс значений  $K_{dB}$  существенно ниже, чем у величины  $K$  (см. рис. 3). С другой стороны, наблюдается

уменьшение значений радиолокационного контраста с ростом угла падения (рис. 4а-в): ~6 дБ, ~4 дБ и ~2,5 дБ для углов 82°–84°, 84°–86°, 86°–89° соответственно. Такое снижение величины  $K_{dB}$  можно объяснить тем, что с ростом угла падения связанный с обрушениями малого масштаба РЛ сигнал достигает уровня шума (или чувствительности РЛ системы) и не вносит существенный вклад в суммарную УЭПР. В области слика обрушения такого же малого масштаба гасятся пленкой. Таким образом, как на чистой воде, так и в области пленки РЛ рассеяние в основном формируется крупными обрушениями ветровых волн, и разность величин  $\overline{\sigma_{dB}^f}$  и  $\overline{\sigma_{dB}^s}$  сигнала уменьшается.

Сопоставим РЛ изображения, полученные при различных способах обработки дан-

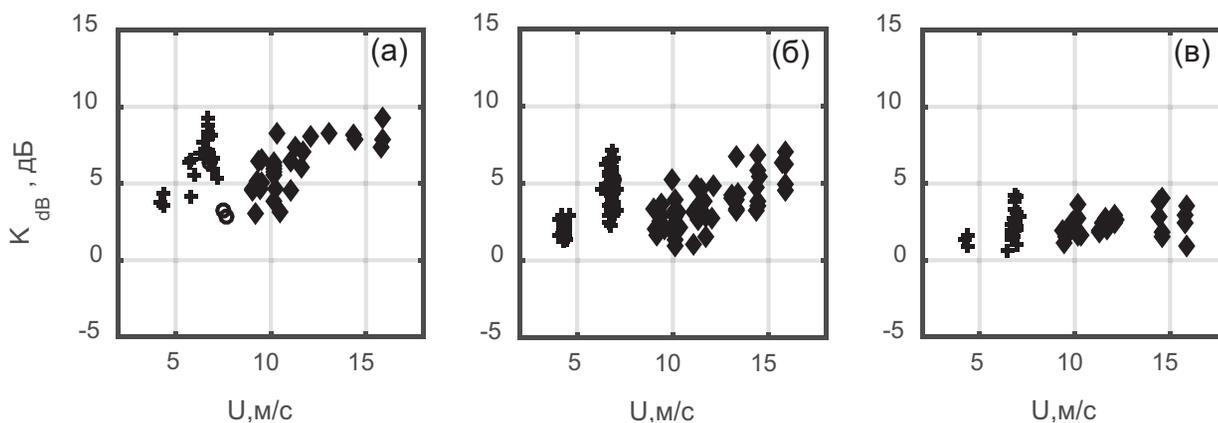


Рис. 4. Зависимость значений радиолокационного контраста от скорости ветра при углах падения 82°–84° (а), 84°–86° (б), 86°–89° (в). Символами (+), (o), (♦) обозначены соответственно радиолокационные измерения поверхностного слика «на ветер», «перпендикулярно ветру» и «по ветру»

ных. На рис. 5а показан фрагмент РЛ изображения, приведенный на рис. 1. Результаты обработки тех же исходных РЛ данных, но при расчете значений  $\overline{\sigma_{dB}}$  приведены на рис. 5б. На рис. 5а видны яркие всплески как на фоне, так и в области слика, связанные с рассеянием сигнала на крупных обрушениях. В результате граница слика размывается. Изображение на рис. 5б менее зашумленное. Это связано с тем, что при осреднении логарифмического сигнала как крупные, так и небольшие обрушения вносят сопоставимый вклад в  $\overline{\sigma_{dB}}$ . В результате этого граница слика проявляется более отчетливо по сравнению с рис. 5а.

### Статистические характеристики сигнала

Поскольку сигнал при скользящих углах состоит из отражений-всплесков, проанализируем всплески сигнала на чистой поверхности и в слике для каждого скана РЛ станции. На рис. 6 приводятся гистограммы распределения УЭПР всплесков для скоростей ветра 6 м/с (а), и 10 м/с (б), где  $N$  – число РЛ всплесков в единицу времени на единице поверхности. С учетом большого диапазона наблюдаемых  $\sigma_0$  (максимальные значения ~ -7 дБ) на рис. 6 ось абсцисс ограничена значениями УЭПР -25 дБ, что позволяет более детально

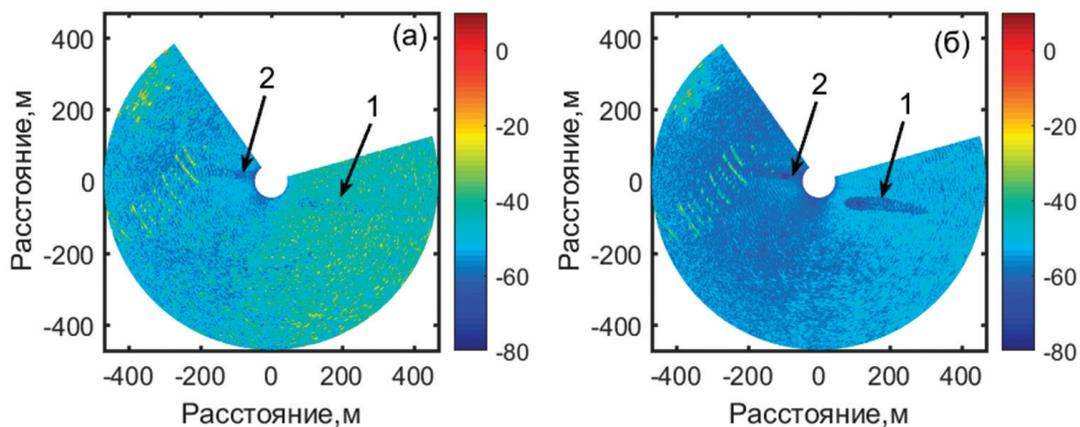


Рис. 5. Фрагмент радиолокационного изображения, полученного при осреднении линейного сигнала (а) и логарифмического (б). Стрелками 1, 2 отмечены соответственно зоны морской поверхности, покрытой пленкой растительного масла, и ветровая тень от платформы. Светлые полосы в левой части изображения связаны с отражениями от систем поверхностных буев устричной плантации

рассмотреть отличия величин  $N$  в области поверхностной пленки по отношению к чистой воде. Как видно из графика, в зоне слика уменьшается количество всплесков со значениями УЭПР меньше  $\sim -30$  дБ –  $-33$  дБ. Если предположить, что величина РЛ всплеска пропорциональна масштабу обрушения, то этот результат подтверждает данные работы (Malinovsky et al., 2007), где было обнаружено уменьшение интенсивности обрушений коротких ветровых волн в слике.

На рис. 7 представлена зависимость  $K_N = N_f/N_s$  от скорости ветра, где  $N_f, N_s$  –

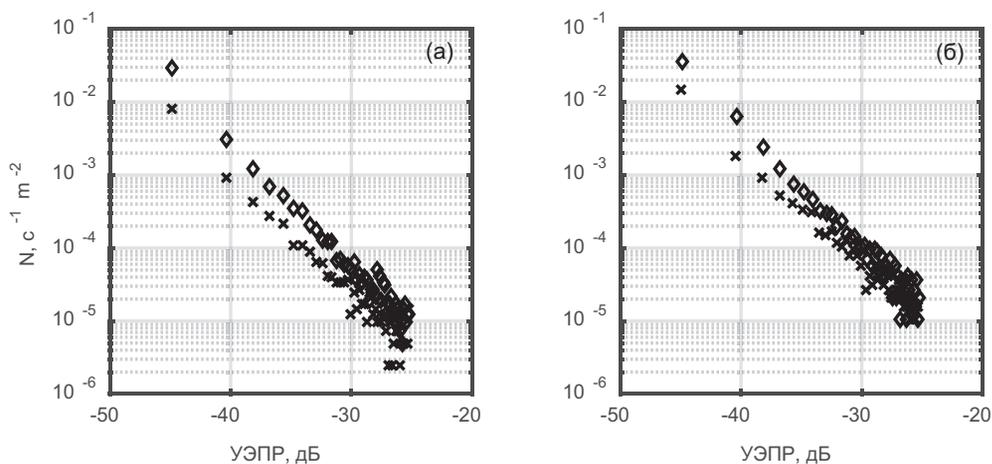


Рис. 6. Распределение УЭПР всплесков для скоростей ветра 6 м/с (а), и 10 м/с (б). Символами (◇) и (×) обозначены данные для фона и слика соответственно

число всплесков РЛ сигнала на чистой воде и области пленки. В зоне слика происходит заметное уменьшение количества РЛ рассеивателей (обрушений волн). Величина контраста падает с увеличением скорости ветра; зависимости  $K_N$  от азимута РЛ зондирования не наблюдается.

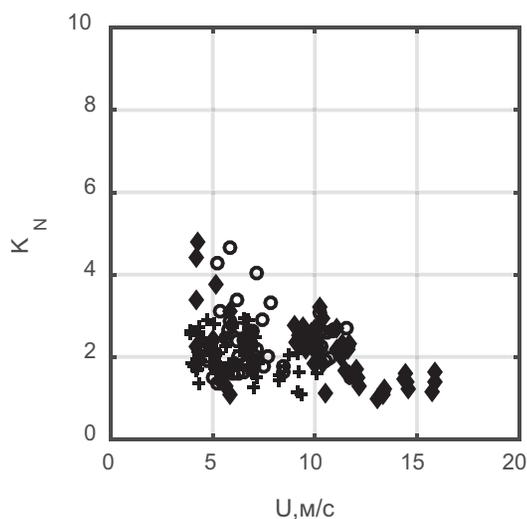


Рис. 7. Зависимость  $K_N$  от скорости ветра. Символами (+), (o), (♦) обозначены соответственно радиолокационные измерения поверхностного слика «на ветер», «перпендикулярно ветру» и «по ветру»

### Выводы

При скользких углах облучения РЛ сигнал формируется за счет отражений радиоволн от крутых нелинейных особенностей морской поверхности, связанных с обрушениями волн. Спектральный диапазон ветровых волн, чьи обрушения формируют обратные отражения, соответствует интервалу длин волн от значений, на порядок превышающих длину радиоволны, до волн спектрального пика. Обрушения относительно коротких волн, с масштабами много меньше пятна разрешения, приводят к увеличению среднего значения УЭПР в пятне разрешения. Наиболее крупные волны, с масштабами порядка пятна разрешения радиолокатора, приводят к формированию спекл-структуры РЛ изображения. Обрушения крупных волн не подвержены гасящему воздействию поверхностных пленок, поэтому спекл-структура «статистически идентична» для чистой поверхности и слика. Это затрудняет как четкое выделение зоны поверхностного пятна на РЛ изображении, так и определение РЛ контраста «чистая поверхность – слик». При осреднении последовательности РЛ изображений (получаемых при вращении антенны) спекл-структура оказывает доминирующий вклад в осредненный сигнал, поэтому средние значения УЭПР в области слика и на чистой поверхности фактически одинаковы.

Для уменьшения вклада спеклов в среднее значение мы применили логарифмирование РЛ сигнала в каждом пикселе с последующим осреднением кадров, что эквивалентно расчету среднего геометрического по ансамблю данных. В результате вклад ЭПР больших всплесков в среднее существенно снижается. Применение этой процедуры позволяет надежно выделять слики и определять их границы.

Анализ статистических характеристик РЛ сигнала показал, что в зоне слика число максимумов РЛ изображения уменьшается по отношению к чистой воде. При этом наибольшее уменьшение приходится на локальные максимумы РЛ сигнала, имеющие наи-

меньшие значения. Это результат является индикатором уменьшения числа обрушений ветровых волн наименьшего пространственного масштаба.

Результаты работы показывают, что РЛ измерения с использованием судовой РЛС могут являться эффективным инструментом мониторинга поверхностных загрязнений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.577.21.0056, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0056).

## Литература

1. *Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А.* Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 86–98.
2. *Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гуцин Л.А., Ермаков С.А.* Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт №. 765. ИПФРАН, Нижний Новгород, 2008. 34 с.
3. *Dankert H., Rosenthal W.* Ocean surface determination from X-band radar-image sequences // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. C04016. DOI: 10.1029/2003JC002130.
4. *Ermakov S.A., Zujkova A.M., Panchenko A.R., Salashin S.G., Talipova T.G., Titov V.I.* Surface film effect on short wind waves // Dyn. Atmos. Oceans. 1986. Vol. 10. P. 31–50.
5. *Gade M., Alpers W., Huëhnerfuss H., Wismann V., Lange P.* On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66, No. 1. P. 52–70.
6. *Hansen M.W., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J.A.* Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2587840.
7. *Jessup A.T., Melville W.K., Keller W.C.* Breaking waves affecting microwave backscatter. 1: Detection and verification // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96. P. 20547–20559.
8. *Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B.* On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C07017. DOI: 10.1029/2004JC002802.
9. *Kudryavtsev V.N., Akimov D., Johannessen J.A., Chapron B.* On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C07016. DOI: 10.1029/2004JC002505.
10. *Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108. No. C3. 8054. DOI: 10.1029/2001JC001003.
11. *Liu Y., Frasier S.J., McIntosh R.E.* Measurement and classification of low-grazing-angle radar sea spikes // IEEE Trans. Antennas Propag. 1998. Vol. 46. No. 1. P. 27–40.
12. *Longuet-Higgins M.S.* The instabilities of gravity waves on deep water. I. Superharmonics // Proc. R. Soc. London. A. 1978. Vol. 360. P. 471–486.
13. *Malinovsky V.V., Sandven S., Mironov A.S., Korinenko A.E.* Identification of oil spills based on ratio of alternating polarization images from ENVISAT // Proceedings of IGARSS'2007. Barcelona. 2007. P. 1326–1329.
14. *Phillips O.M.* Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves // J. Phys. Oceanogr. 1988. Vol. 18. P. 1063–1074.
15. *Senet C., Seemann J., Ziemer F.* The near-surface current velocity determined from image sequences of the sea surface // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. Vol. 39. No. 3. P. 492–505.

# Radar contrast of artificial slicks at small grazing angles

A.E. Korinenko<sup>1</sup>, V.V. Malinovsky<sup>1</sup>, V.N. Kudryavtsev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

E-mail: korinenko.alex@gmail.com

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg 195196, Russia

Results of field studies of radar backscatter from the sea surface covered by artificial slicks at small grazing angles are presented. The experiments were carried out in 2014–2015 at the southern coast of the Crimea near Katsiveli in the area of the Stationary oceanographic platform. A nautical X-band radar operating at horizontal polarization in transmit and receive was used. Radar was mounted on the oceanographic platform at a height of 15 m above the mean sea level. Investigations were performed for grazing angles between 6 and 1 degrees. To simulate surface contamination vegetable oil was used. It was found that specific spike-structure of radar signals at grazing angles caused by strong radar returns from large-scale breaking waves prevents discrimination of the surface slicks from the ambient area. After suppression of the speckle structure, surface slicks become well distinguishable in radar images. Analysis of statistical characteristics of the radar signal indicates that manifestation of surface slicks in radar images results from suppression of the shortest breaking waves providing radar returns. Dependencies of radar contrasts of the slick on wind speed and radar-look direction are suggested.

**Keywords:** radar measurements, grazing angles, breaking wind waves, surface pollution, wind waves, sea surface

Accepted: 21.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-185-194

## References

1. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Guschin L.A., Plenki na morskoy poverhnosti i ih distantsionnoe zondirovanie (Film slicks on the sea surface and their remote sensing), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 86–98.
2. Kudryavtsev V.N., Ivanova N.A., Guschin L.A., Ermakov S.A., *Otsenka kontrastov spektra vetrovyih voln v slikah, vyizvannyih biogennyimi i neftyanyimi plenkami* (An estimate of wind waves damping by biogenic and oil surface films): Preprint No. 765, IAP RAS, Nizhny Novgorod, 2008, 34 p.
3. Dankert H., Rosenthal W., Ocean surface determination from X-band radar-image sequences, *J. Geophys. Res.*, 2004, Vol. 109, C04016. DOI: 10.1029/2003JC002130.
4. Ermakov S.A., Zujkova A.M., Panchenko A.R., Salashin S.G., Talipova T.G., Titov V.I., Surface film effect on short wind waves, *Dyn. Atmos. Oceans*, 1986, Vol. 10, pp. 31–50.
5. Gade M., Alpers W., Huëhnerfuss H., Wismann V., Lange P., On the reduction of the radar backscatter by oceanic surface films: Scatterometer measurements and their theoretical interpretation, *Remote Sens. Environ.*, 1998, Vol. 66, No. 1, pp. 52–70.
6. Hansen M.W., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J.A. Wave Breaking in Slicks: Impacts on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements, *IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2587840.
7. Jessup A.T., Melville W.K., Keller W.C., Breaking waves affecting microwave backscatter. 1: Detection and verification, *J. Geophys. Res.*, 1991, Vol. 96, pp. 20547–20559.
8. Johannessen J.A., Kudryavtsev V., Akimov D., Eldevik T., Winther N., Chapron B., On radar imaging of current features: 2. Mesoscale eddy and current front detection, *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, C07017. DOI: 10.1029/2004JC002802.
9. Kudryavtsev V.N., Akimov D., Johannessen J.A., Chapron B., On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations, *J. Geophys. Res.*, 2005, Vol. 110, C07016. DOI: 10.1029/2004JC002505.
10. Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface 1. Background model, *J. Geophys. Res.*, 2003, Vol. 108, No. C3, 8054. DOI: 10.1029/2001JC001003.
11. Liu Y., Frasier S.J., McIntosh R.E., Measurement and classification of low-grazing-angle radar sea spikes, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1998, Vol. 46, No. 1, pp. 27–40.
12. Longuet-Higgins M.S., The instabilities of gravity waves on deep water. I. Superharmonics, *Proc. R. Soc. London. A*, 1978, Vol. 360, pp. 471–486.
13. Malinovsky V.V., Sandven S., Mironov A.S., Korinenko A.E., Identification of oil spills based on ratio of alternating polarization images from ENVISAT, *Proceedings of IGARSS'2007*, Barcelona, 2007, pp. 1326–1329.
14. Phillips O.M., Radar returns from the sea surface – Bragg scattering and breaking waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, Vol. 18, pp. 1063–1074.
15. Senet C., Seemann J., Ziemer F., The near-surface current velocity determined from image sequences of the sea surface, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, Vol. 39, No. 3, pp. 492–505.