

УДК 551.46

ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОНТРАСТА НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ДЛИННЫХ ВОЛН

В. В. Пустовойтенко¹, Е. В. Плотников¹, А. А. Алескерова¹

М. И. Ожиганова², И. П. Шумейко²

¹ Морской гидрофизический институт, г. Севастополь

² Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Статья получена 12 февраля 2015 г., после доработки – 17 марта 2015 г.

Аннотация. В рамках модели резонансного рассеяния радиоволн морской поверхностью анализируется формирование радиолокационного контраста между чистой и загрязненной нефтепродуктами областями. Показано, что присутствие длинных (по сравнению с брегговскими составляющими) волн приводит к снижению радиолокационного контраста.

Ключевые слова: морская поверхность, нефтяное загрязнение, радиолокационный контраст.

Abstract. The appearance of the radar contrast between clean and oily areas is analyzed in the framework of the model of resonant scattering of radio waves by sea surface. It is shown that the presence of long (compared to bragg components) waves leads to an reduction of the radar contrast.

Key words: sea surface, oil pollution, radar contrast.

Введение

В настоящее время загрязнение Мирового океана нефтепродуктами является одной из основных угроз нарушения его экологического состояния. Наиболее распространенными источниками загрязнения являются: вынос нефтепродуктов со стоком рек, сбросы судовых балластных и льяльных вод, поступление с атмосферными осадками. Весьма опасны аварии на танкерах и морских

нефтедобывающих платформах, когда в море в течение короткого промежутка времени на ограниченную по площади акваторию поступает большое количество нефтепродуктов, что может привести к катастрофическим последствиям (см., например, [1]).

Для принятия мер по предотвращению экологической катастрофы в случае разлива нефти необходимо знать объем загрязнения, в каком направлении и с какой скоростью оно будет распространяться в море. Особенно важно иметь информацию о начальном этапе загрязнения [2], когда применение защитных мер наиболее эффективно.

В основе дистанционного обнаружения загрязнения морской поверхности лежит контроль уровня ее шероховатости, формируемой короткими поверхностными волнами [3]. При попадании на морскую поверхность поверхностно-активных веществ (например, нефти и нефтепродуктов) меняются характеристики коротких волн (высота, уклон), образуются области с низким уровнем шероховатости, получившие название «слики» [4, 5]. Короткие поверхностные волны являются основными элементами границы раздела вода-воздух, которые определяют рассеяние радиоволн СВЧ-диапазона и световых волн. Изменения их характеристик позволяют осуществлять контроль загрязнения средствами дистанционного зондирования [6, 7].

Проблема выявления нефтяного загрязнения заключается в том, что на морской поверхности существуют структуры естественного происхождения, в которых короткие волны частично или полностью подавлены [8]. В последние десятилетия прилагаются интенсивные усилия по созданию систем обнаружения и распознавания нефтяных загрязнений морской поверхности по ее радиолокационным изображениям [6, 10]. Для выделения нефтяного загрязнения на фоне естественных неоднородностей используются около 30 параметров, характеризующих пятна на радиолокационном изображении [11].

По разным оценкам точность автоматизированной классификации нефтяного загрязнения по радиолокационным изображениям морской поверхности составляет от 82% до 94% [12]. Повысить вероятность выявления и

классификации загрязнения можно, расширяя круг используемых для распознавания параметров [13], а также совершенствуя наши представления о физических механизмах подавления ветровых волн пленкой поверхностно-активных веществ [14] и механизмах формирования радиолокационного контраста на границе ряби и слика, созданного загрязнением [15].

Целью настоящей работы является анализ влияния длинных волн на уровень радиолокационного контраста между чистой и загрязненной нефтепродуктами поверхностью моря.

При этом, с целью упрощения рассуждений, рассмотрим только случай, когда характерные размеры слика значительно превышают размеры элемента разрешения РЛС. Это позволит нам не учитывать зависимость контраста от величины элемента разрешения радиолокационных станций (РЛС) – на наш взгляд это вполне возможно при типичном пространственном разрешении РЛС с синтезированием апертуры приемной антенны (РСА), составляющем единицы-десятки метров (см., например, [16, 17]). По этой же причине мы не будем рассматривать эффекты ухудшения пространственного разрешения РСА (дефокусировка синтезируемой антенны, снижение эффективности сжатия импульса по дальности), обусловленные фазовой модуляцией радиолокационного (траекторного) сигнала, вызываемой полем орбитальных скоростей крупных морских волн.

1. Формирование радиолокационного контраста между чистой и загрязненной поверхностью

Наиболее эффективными средствами контроля загрязнений морской поверхности нефтепродуктами являются установленные на самолетах или космических аппаратах радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой приемной антенны (РСА). Высокое пространственное разрешение и широкая полоса обзора делают их эффективным инструментом экологического мониторинга.

Сигнал РСА при зондировании морской поверхности формирует механизм резонансного (брегговского) рассеяния. В первом приближении условие резонанса имеет вид

$$K_B = 2k \sin \theta \quad (1)$$

где $K_B = 2\pi/L_B$ – волновое число брегговской составляющей поверхностных волн длиной L_B , удовлетворяющей условию резонанса; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число радиоволны составляющей длиной λ ; θ – угол падения [18].

Если брегговские составляющие распространяются по плоской поверхности, т.е. влиянием длинных волн можно пренебречь, нормированное сечение обратного рассеяния описывается выражением

$$\sigma^s(k, \theta) = 8 k^4 \left| \Gamma_{pp}(\theta) \right|^2 \Psi(\vec{K}_B), \quad (2)$$

где $\left| \Gamma_{pp}(\theta) \right|^2$ – геометрический коэффициент, зависящий от вида поляризации излучаемого и принимаемого радиолокационного сигнала; p – вид поляризации, первый индекс соответствует поляризации излучаемого сигнала, второй – принимаемого; Ψ – двумерный спектр возвышений морской поверхности. Верхний индекс s означает, что данный параметр соответствует ситуации, когда влиянием длинных волн можно пренебречь.

Введем параметр

$$R^s(k, \theta) = \sigma_c^s(k, \theta) / \sigma_o^s(k, \theta), \quad (3)$$

где нижние индексы o и c соответствуют загрязненной и чистой поверхности. Данный параметр определяет различие в уровнях радиосигналов, отраженных от чистой и покрытой пленкой загрязнения поверхности. Указанное различие вызвано тем, что в области загрязнения короткие ветровые волны подавлены. Поэтому в диапазонах коротких гравитационных, гравитационно-капиллярных и капиллярных волн имеет место неравенство

$$\Psi_o(\vec{K}) < \Psi_c(\vec{K}). \quad (4)$$

Здесь и далее индекс o соответствует загрязненной поверхности, индекс c соответствует чистой поверхности.

Существует еще один фактор, который может оказывать влияние на величину отношения $R^s(k, \theta)$. Это различие диэлектрической проницаемости нефтяной пленки и морской воды. В общем виде коэффициент $|\Gamma_{pp}(\epsilon_p, \theta)|^2$ в случае, когда излучение и прием осуществляются на одной и той же поляризации, описывается выражениями

$$\Gamma_{vv}(\theta) = \cos^4 \theta \frac{(\epsilon_v - 1)[\epsilon_v(1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\epsilon_v \cos \theta + \sqrt{\epsilon_v - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (5)$$

$$\Gamma_{hh}(\theta) = \cos^4 \theta \frac{(\epsilon_h - 1)}{[\epsilon_h \cos \theta + \sqrt{\epsilon_h - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (6)$$

Однако, для реальных пленок, которые, как правило, имеют толщину $h \approx 10^{-5} - 10^{-7}$ см, выполняется условие

$$kh\sqrt{|\epsilon_p|} \ll 1, \quad (7)$$

где ϵ_p – диэлектрическая проницаемость вещества, образующего пленку, и влиянием изменения диэлектрической проницаемости можно пренебречь [19]: иными словами, радиоволна «не замечает» присутствие на морской поверхности пленки нефтепродукта, проникая сквозь нее непосредственно до поверхности морской воды. Таким образом, для загрязненной и чистой поверхности можно использовать выражения (5) и (6), в которых параметры ϵ_v и ϵ_h соответствуют значениям диэлектрической проницаемости морской воды.

Получаем, что в случае, когда влиянием длинных волн можно пренебречь, величина радиолокационного контраста чистой и загрязненной поверхности не зависит от угла падения и определяется только уровнем подавления коротких ветровых волн в области загрязнения

$$R^s(k) = \Psi_c(\vec{K}_B) / \Psi_o(\vec{K}_B). \quad (8)$$

Преобразуем двумерный спектр волновых векторов $\Psi(\vec{K})$ в спектр волновых чисел и направлений $\psi(K, \beta)$. Учитывая, что волновой вектор \vec{K} имеет компоненты

$$K_x = K \cos \beta, \quad K_y = K \sin \beta, \quad (9)$$

где $K = |\vec{K}|$; β – азимутальный угол, определяющий направление вектора \vec{K} , получаем

$$\psi(K, \beta) = \Psi(K_x, K_y) \frac{\partial(K_x, K_y)}{\partial(K, \beta)}, \quad (10)$$

где Якобиан $\frac{\partial(K_x, K_y)}{\partial(K, \beta)} = K$. Далее представим спектр $\psi(K, \beta)$ в форме,

$$\psi(K, \beta) = S(K) \Theta(K, \beta), \quad (11)$$

где $S(K)$ – одномерный спектр волновых чисел; $\Theta(K, \beta)$ – функция углового распределения волновой энергии, удовлетворяющая условию нормировки,

$$\int_{-\pi}^{\pi} \Theta(K, \beta) d\beta = 1. \quad (12)$$

Нефтяная пленка одинаково подавляет короткие волны независимо от направления распространения, отсюда $\Theta_o(K_B, \beta) = \Theta_c(K_B, \beta)$. В результате получаем

$$R^s(k) = S_c(K_B) / S_o(K_B). \quad (13)$$

2. Влияние длинных волн на береговое рассеяние

Рассмотрим ситуацию, когда на поверхности присутствуют длинные волны. Здесь и далее под длинными мы подразумеваем волны, длина которых много больше длины береговых составляющих L_B , удовлетворяющих условию (1). Будем полагать, что длинные волны распространяются по глубокой воде, т.е. влиянием дна можно пренебречь, и подчиняются дисперсионному уравнению для гравитационных волн

$$\omega^2 = gK, \quad (14)$$

где g – гравитационное ускорение.

Присутствие длинных волн приводит к тому, что меняется угол α наклона поверхности, по которой распространяются береговые составляющие морс-

кого волнения. В отсутствии длинных волн $\alpha = 0$. Появление наклона поверхности приводит к изменению угла падения, который определяется относительно нормали к плоскости, по которой распространяются брегговские составляющие. Схематично изменение геометрии зондирования морской поверхностью в случае присутствия на ней длинных волн показано на рис. 1. Левый фрагмент рисунка соответствует ситуации, когда влиянием длинных волн можно пренебречь. На правом фрагменте брегговские составляющие распространяются по участку поверхности, наклоненному на угол α . Соответственно наклоненной оказывается и нормаль к морской поверхности N' , при этом локальный угол падения радиоволн определяется как $\theta' = \theta - \alpha$.

Изменение угла падения приводит к изменению длины брегговской составляющей, а также к изменению величины геометрического коэффициента. Чтобы учесть этот эффект в выражениях, описывающих эти характеристики необходимо провести замену θ на θ' .

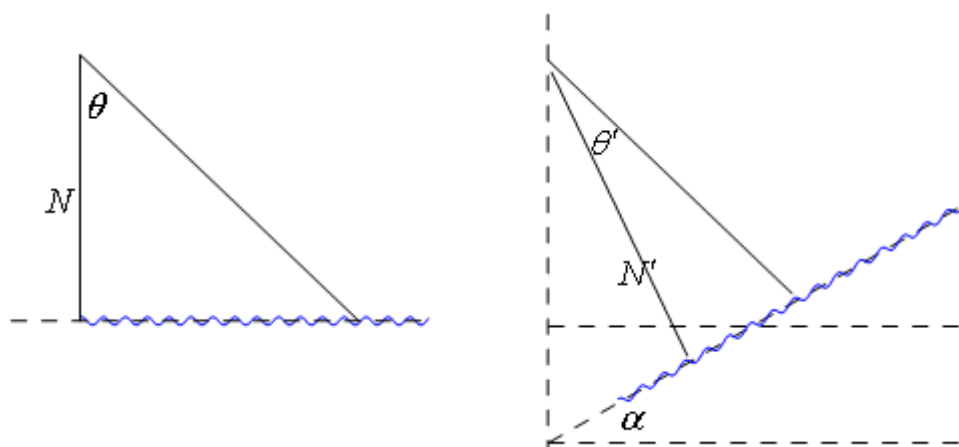


Рис. 1. Изменение угла падения в присутствии длинных волн.

В присутствии длинных волн выражение (2) приобретает вид

$$\sigma^L(K, \theta, \alpha) = 8 K^4 \left| \Gamma_{pp}(\theta - \alpha) \right|^2 \Psi(\vec{k}_B(K, \theta - \alpha)), \quad (15)$$

где α – угол создаваемого длинными волнами наклона морской поверхности в направлении падения радиоволн. Влияние длинных волн на величину нормированного сечения обратного рассеяния, можно учесть, усреднив выражение

(15) по всему диапазону углов α [20]. Усреднение осуществляется с весом, определяющим вероятность появления разных значений угла α .

Тогда,

$$\overline{\sigma^L} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma^L(\theta - \alpha) P(\alpha) d\alpha, \quad (16)$$

где $P(\alpha)$ – плотность вероятностей углов наклонов α .

Из (15) и (16) следует, что радиолокационный контраст между чистой и загрязненной поверхностью в присутствии длинных волн можно представить как

$$R_{pp}^L = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \Psi_c(\vec{k}_B(K, \theta - \alpha)) P(\alpha) d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \Psi_o(\vec{k}_B(K, \theta - \alpha)) P(\alpha) d\alpha}. \quad (17)$$

Здесь мы полагаем, что в области загрязнения трансформируются только короткие волны, а плотность вероятностей уклонов $P(\alpha)$, создаваемых длинными волнами, не меняется. Отметим, что в отличие от величины контраста, определенного в отсутствие длинных волн (см. (13)), в данном случае радиолокационный контраст зависит от поляризации.

Поле морских поверхностных волн является слабо нелинейным, что приводит к отклонениям статистических моментов распределения уклонов морской поверхности от значений, соответствующих распределению Гаусса [21]. Но, поскольку, нелинейность мала и малы отклонения, то в первом приближении в приложениях, связанных с рассеянием радиоволн, можно использовать распределение Гаусса.

При моделировании эффектов, вызванных присутствием длинных волн, возникает проблема вычисления углов α , а также определения их зависимости от скорости ветра. Она вызвана тем, что при экспериментальных исследованиях контактными и дистанционными методами структуры поверхностных волн, как правило, измеряют не углы α , а пространственные производные возвышений

морской поверхности – уклоны ξ [22]. Соответственно практически все экспериментальные данные и модели получены для уклонов. Между собой эти параметры связаны соотношением

$$\xi = \operatorname{tg} \alpha. \quad (18)$$

Разложим выражение в правой части (13) в ряд Маклорена

$$\xi = \alpha + \frac{\alpha^3}{3} + \frac{2\alpha^5}{15} + \dots \quad (19)$$

Уклоны морской поверхности, создаваемые волнами, малы, что позволяет использовать аппроксимацию

$$\xi \approx \alpha. \quad (20)$$

В работе [23] на основе данных прямых измерений уклонов морской поверхности показано, что расхождение значений дисперсий параметров ξ и α не превышает 8 %. Этот результат был получен при сравнении дисперсий, измеренных для уклонов, создаваемых волнами от капиллярных до энергонесущих гравитационных. Основной вклад в дисперсию уклонов дают капиллярные и гравитационно-капиллярные волны, т.е. уклоны создаваемые энергонесущими гравитационными волнами значительно меньше, чем уклоны, создаваемые более короткими волнами. Все это делает обоснованным использование соотношения (20) при анализе влияния длинных поверхностных волн на рассеяние радиоволн.

По данным прямых измерений, выполненных с помощью волнографического буя [24], дисперсия создаваемых длинными волнами уклонов морской поверхности при скорости ветра менее 10 м/с не превосходит уровня 0.015. Данному значению дисперсии уклонов соответствуют среднеквадратические значения углов $\sqrt{\alpha^2} < 7^\circ$.

Численные расчеты проведем для случая, когда зондирование морской поверхности происходит на длинах волн $\lambda \approx 3$ см. В этом случае для геометрических коэффициентов на вертикальной и горизонтальной поляризациях можно использовать аппроксимации [25]

$$|\Gamma_{vv}|^2 = \frac{\cos^4 \theta (1 + \sin^2 \theta)^2}{(\cos \theta + 0.111)^4}, \quad (21)$$

$$|\Gamma_{hh}|^2 = \frac{\cos^4 \theta}{(0.111 \cos \theta + 1)^4}. \quad (22)$$

3. Численное моделирование изменения радиолокационного контраста

Чтобы осуществить процедуру усреднения эффективного сечения обратного рассеяния по углам наклонов морской поверхности, необходимо выражение (2) преобразовать к виду, где нормированное сечение обратного рассеяния является явной функцией угла падения. Данное преобразование подробно описано в работе [20], поэтому здесь приведем только конечное выражение

$$\sigma^s = 2k^2 \left| \Gamma_{pp}(\theta) \right|^2 \frac{S(k 2 \sin \theta)}{\sin \theta \cos \theta} \Theta(k 2 \sin \theta, \beta_B). \quad (23)$$

Рассеяние назад радиоволн длиной $\lambda \approx 3$ см, как следует из (1) определяют гравитационно-капиллярные волны. В этом диапазоне спектр морских волн на чистой воде аппроксимируется зависимостью

$$S_c(K) = A_c K^{-n}, \quad (24)$$

где A_c – размерный коэффициент $n=3$ [4].

Пленка нефтепродуктов по-разному воздействует на волны разной длины, чем меньше длина волны тем сильнее она подавляется. Соответственно меняется наклон спектра $-n$. Введем параметр δ , который определяет это изменение.

Получаем

$$S_o(K) = A_o K^{-(n+\delta)}. \quad (25)$$

Естественно также предположить, что в окрестности волнового числа K_B изменения функции Θ с изменением волнового числа K малы, и ими можно пренебречь.

Учитывая (17), (23)-(25) получаем

$$R_{pp}^L = \frac{A_c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \frac{[2k \sin(\theta - \alpha)]^3}{\sin(\theta - \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\alpha^2}\right) d\alpha}{A_o \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \frac{[2k \sin(\theta - \alpha)]^{3-\delta}}{\sin(\theta - \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\alpha^2}\right) d\alpha}. \quad (26)$$

Отметим следующее.

Из (26) следует, что при $\delta = 0$ длинные волны не оказывают влияния на величину радиолокационного контраста между чистой и покрытой нефтяным загрязнением поверхностью.

Рассмотрим относительные изменения радиолокационного контраста в присутствии длинных волн $X_{pp} = R_{pp}^L / R^s$, которые можно описать выражением

$$X_{pp} = [2k \sin(\theta)]^{-\delta} \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \frac{[2k \sin(\theta - \alpha)]^3}{\sin(\theta - \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\alpha^2}\right) d\alpha}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} |\Gamma_{pp}(\theta - \alpha)|^2 \frac{[2k \sin(\theta - \alpha)]^{3-\delta}}{\sin(\theta - \alpha) \cos(\theta - \alpha)} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\alpha^2}\right) d\alpha}. \quad (27)$$

Относительные изменения радиолокационного контраста, рассчитанные при трех значениях дисперсии уклонов длинных волн, показаны на рис. 2. Видно, что с ростом дисперсии уклонов контраст между чистой и загрязненной поверхностью уменьшается. Более заметно этот эффект проявляется при меньших углах падения. При зондировании морской поверхности на горизонтальной поляризации изменения контраста более сильные, чем при зондировании на вертикальной поляризации.

Выше было отмечено, что длинные волны оказывают влияние на радиолокационный контраст только тогда, когда в области загрязнения происходит изменение наклона спектра коротких волн.

Рис. 3 показывает, насколько чувствительны изменения X_{hh} и X_{vv} к изменениям наклона спектра при разных углах падения.

Представленные на рис. 3 результаты расчетов X_{hh} и X_{vv} получены при $\sqrt{\alpha^2} = 5^\circ$.

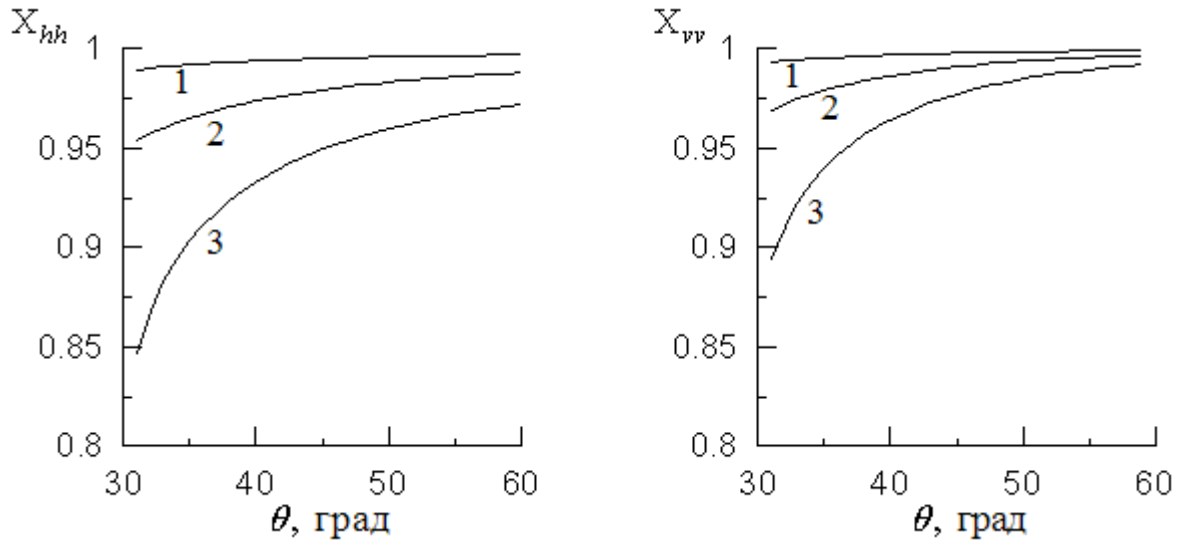


Рис. 2. Зависимости X_{hh} и X_{vv} от угла падения θ :

кривая 1 – $\sqrt{\alpha^2} = 2^\circ$; кривая 2 – $\sqrt{\alpha^2} = 4^\circ$; кривая 3 – $\sqrt{\alpha^2} = 5^\circ$.

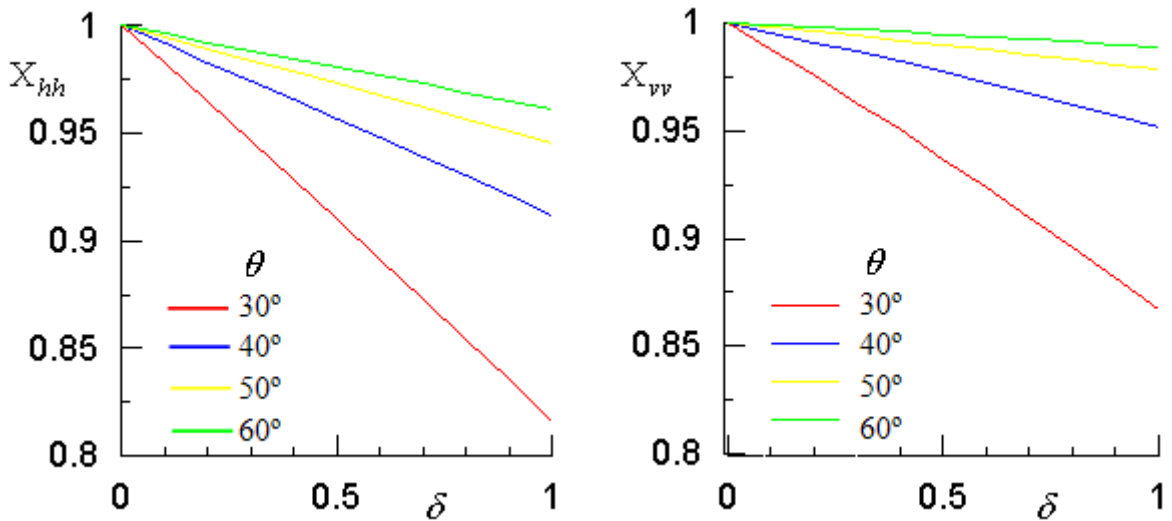


Рис. 3. Зависимости X_{hh} и X_{vv} от наклона спектра

коротких поверхностных волн δ

4. Моделирование эффектов, вызванных анизотропией уклонов морской поверхности

Азимутальное распределение уклонов длинных поверхностных не является изотропным [26]. Уклоны в направлении распространения длинных волн, которое при ветровом волнении совпадает с направлением ветра, выше, чем в поперечном направлении. Как следствие, влияние длинных волн на радио-

локационный контраст при зондировании под разными углами относительно направления ветра будет отличаться.

Согласно данным прямых измерений уклонов морской поверхности (уклон определялся как отношение разности возвышений морской поверхности в двух точках к расстоянию между этими точками) анизотропия уклонов

$$\gamma = \overline{\alpha_c^2} / \overline{\alpha_u^2} = 0.44 , \quad (28)$$

где индексы c и u соответствуют уклонам поперек и вдоль направления ветра. Суммарная дисперсия продольной и поперечной компонент уклонов связана со скоростью ветра V на высоте 10 м над уровнем моря соотношением

$$\overline{\alpha_c^2} + \overline{\alpha_u^2} = 0.0021V . \quad (29)$$

Значения статистических характеристик получены для уклонов морской поверхности, которые создают дециметровые и более длинные волны [27].

Чтобы оценить влияние анизотропии уклонов морской поверхности на величину радиолокационного контраста рассмотрим параметр $\Psi_{pp} = R_{pp}^L(\overline{\alpha_c^2}) / R_{pp}^L(\overline{\alpha_u^2})$, равный отношению контраста при зондировании поперек и вдоль направления ветра. Изменения значений параметра Ψ_{pp} в зависимости от скорости ветра представлены на рис. 4.

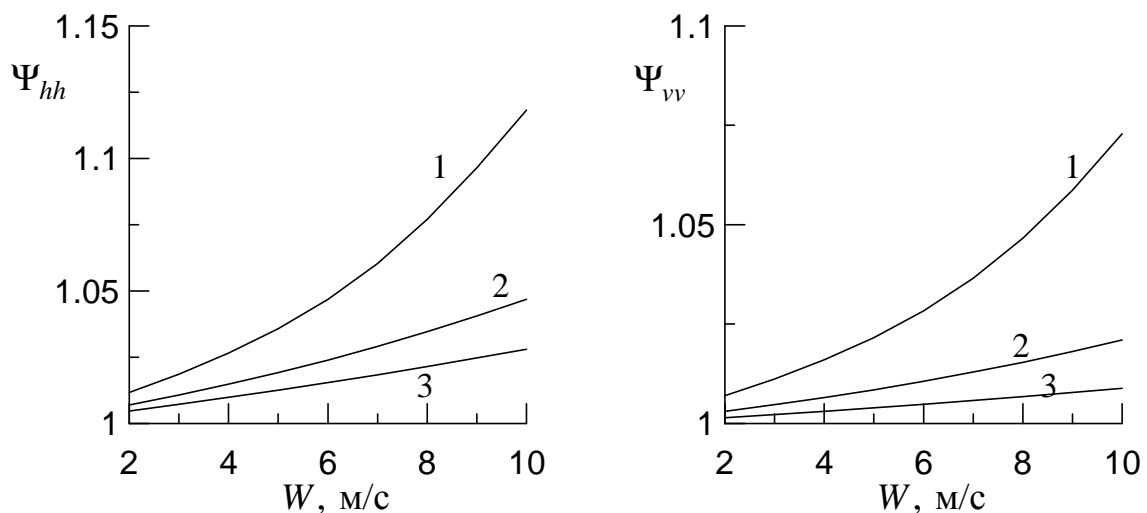


Рис. 4. Зависимость отношения контраста при зондировании поперек и вдоль направления Ψ_{pp} ветра от скорости ветра W :

1 – $\theta = 35^\circ$; 2 – $\theta = 45^\circ$; 3 – $\theta = 55^\circ$.

Из рис. 4 следует, что контраст между чистой и загрязненной нефтепродуктами поверхностью выше при зондировании поперек направления ветра, чем при зондировании вдоль его направления. С увеличением угла падения θ различие в уровне контрастов при зондировании под разными углами, относительно направления ветра, уменьшается.

Выводы

Проведенный анализ показал, что присутствие длинных волн приводит к снижению контраста на радиолокационных изображениях между чистой поверхностью и поверхностью, покрытой нефтяной пленкой. Данный эффект уменьшается с увеличением угла падения.

Литература

1. Осичанский П.И. Спасите нас на суше. (серия: Капитаны). – Владивосток: Осичанский П.И., 2010. – 396 с.
2. Литовченко К.Ц., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Иванов А.Ю., Юренко Ю.И. Нефтяные загрязнения восточной части Черного моря: космический мониторинг и подспутниковая верификация // Исследование Земли из космоса. – 2007, № 1. – С. 81-94.
3. Галаев Ю.М., Калмыков А.И., Курекин А.С., Лементы Ю.А., Нелепо Б.А., Островский И.Е., Пичугин А.П., Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В. Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 1977. – Т.13, №4. – С. 406 - 414.
4. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 375 с.
5. Лебедев Н.Е. Определение толщины нефтяной пленки на морской поверхности по контрасту яркости в ближнем ИК-диапазоне // Процессы в геосредах. – 2014, № 1(1). – С. 79 - 84.

6. Иванов А.Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» // Исследования Земли из космоса. – 1997. – № 6. – С. 73 - 84.
7. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В. Формирование радиолокационного контраста при квазивертикальном зондировании в зоне загрязнения морской поверхности. Влияние нелинейных эффектов в поле поверхностных волн // Исследования Земли из космоса. – 2010. – № 4. – С. 23 - 31.
8. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В., Показеев К.В. Обнаружения нефтяных загрязнений радиолокационными средствами космического базирования. Проблемы и пути их решения // "Физические проблемы экологии (Экологическая физика)" М.: Физический факультет МГУ, 2009. – № 16. – С. 150 - 166.
9. Espedal H. A., Wahl T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information // Int. J. Remote Sensing. – 1999. – v. 20, № 1. – P. 49 - 65.
10. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Rem. Sens. Environ. – 2005. – № 95. – P. 1 - 13.
11. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследования Земли из космоса. – 2007, № 3. – С. 73 - 96.
12. Kanaa T.F.N., Tonye E., Mercier G. et al. Detection of oil slick signatures in SAR images by fusion of hysteresis thresholding responses // Proc. IGARSS'03. – 2003. – v. 4. – P. 2750 - 2752.
13. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В., Показеев К.В. Информативные признаки для распознавания нефтяного загрязнения морской поверхности // "Физические проблемы экологии (Экологическая физика)" М.: Физический факультет МГУ. – 2011. – №. 18. – С. 146 - 150.
14. Мельникова О.Н., Показеев К.В. Усиление нелинейных ветровых волн на чистой воде и при наличии масляной пленки // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2009. – т. 45, № 3. – С. 420 - 425.
15. Боев А.Г., Матвеев А.Я. Квазивертикальное радиолокационное зондирование пленок поверхностно-активных веществ конечной толщины на морской

- поверхности // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – т. 14, № 2. – С. 197 - 203.
16. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
17. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
18. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. – 1975. – т. 116. – С. 741 - 743.
19. Боев А.Г., Карвицкий Г.Э. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – т. 2, № 3. – С. 281 - 287.
20. Запевалов А.С. Моделирование берегового рассеяния электромагнитного излучения сантиметрового диапазона морской поверхностью. Влияние волн более длинных, чем береговые составляющие // Изв. РАН: Физика атмосферы и океана. – 2009. – т. 45, № 2. – С. 266 - 275.
21. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Изв. ВУЗов: Радиофизика. – 2010. – т. 53, № 2. – С. 110 - 121.
22. Bréon F.M., Henriot N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions // J. Geoph. Res.: Oceans. – 2006. – v. 111, № С6. DOI: 10.1029/2005JC003343.
23. Запевалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – т. 27, № 1. – С. 28 - 33.

24. Longuet-Higgins M.S., Cartwright D.E., Smith N.D. Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of the floating buoy // Pro. Conf. Ocean Wave Spectra. Englewood Cliffs. N. Y.: Prentice Hall, 1963. – P. 111 - 132.
25. Plant W.J. A two-scale model of short wind generated waves and scatterometry // J. Geophys. Res. – 1986. – v. 91, № C9. – P. 10735 - 10749.
26. Запевалов А.С. Об оценке функции углового распределения энергии морских доминантных волн // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. –1995. – Т. 31, № 6. – С. 835-841.
27. Калинин С.А., Лейкин И.А. Измерение уклонов ветровых волн в Каспийском море // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 1988. – Т. 21, № 2. – С. 1210 - 1217.