

УДК: 551.501.8(551.46)

О КЛАССИФИКАЦИИ ПЛЕНОЧНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРЯ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКА TERRASAR-X

© 2017 г. Д.В. Ивонин, А.Ю. Иванов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: ivonin@ocean.ru

Поступила в редакцию 6.10.2016 г.

Представлены результаты применения нового поляризационного метода, предложенного в [28], для определения типа поверхностного загрязнения и различения пленок минеральной нефти (сырая нефть, ее эмульсии и нефтепродукты) от пленок прочего происхождения на радиолокационных изображениях (РЛИ) морской поверхности. Метод базируется на вычислении количественных характеристик для соотношений подавления или усиления рассеянных радиосигналов различной физической природы, а именно: вызванных капиллярной рябью длиной несколько сантиметров или обрушениями волн. Используются соосно-поляризованные (VV/HH) РЛИ радиолокатора с синтезированной апертурой на космическом аппарате TerraSAR-X. Данные для анализа собраны в районах, где регулярно наблюдаются пятна-слики известного происхождения, а именно: разливы нефти и естественные нефтепроявления в Мексиканском заливе и Каспийском море, а также биогенные пленки в Каспийском море. Для сравнения привлекались результаты анализа РЛИ спутника TerraSAR-X с контролируемыми экспериментальными разливами нефтяной эмульсии в Северном море. На основании анализа 10 поляризационных РЛИ спутника TerraSAR-X с углами зондирования поверхности более 30° показано, что предложенный метод позволяет вне зависимости от района наблюдения с достоверностью более 80% отличать на них нефтяные разливы от сликов, образованных естественными нефтепроявлениями и биогенными пленками.

DOI: 10.7868/S003015741705015X

1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный микрослой океана играет значительную роль в балансе потоков вещества, тепла и импульса между океаном и атмосферой, в протекании ряда гидробиологических и биохимических процессов на поверхности моря [15, 41]. В свою очередь, различные маслянистые вещества, создающие пленки на поверхности моря (т.н. пленочные образования), значительно влияют на микрослой. Основными источниками поверхностных пленок являются легальные и нелегальные судовые сбросы нефтепродуктов и других маслянистых веществ, аварийные выбросы нефти, естественные источники нефти (грязевые вулканы, грифоны и сипы на дне), а также биогенные углеводороды и другие источники [8, 16]. Их толщины могут варьироваться от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Помимо указанных выше эффектов, поверхностные пленки влияют на общую экологическую обстановку, а также несут важную информацию о залежах углеводородного сырья в океане [8, 10, 11, 12, 16]. По этим причинам вопросам генезиса, идентификации и динамики пленок уделяется большое внимание в современной океанологии [15, 41].

С начала 90-х гг. XX века данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) успешно применяются для обнаружения и мониторинга пленочных образований на поверхности моря [7, 9, 12, 18, 25]. Преимущество использования РСА заключается в том, что радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности моря могут быть получены в любое время суток и в любую погоду, в отличие от данных оптических датчиков. Пленки проявляются на поверхности моря в виде областей выглаживания мелкомасштабного волнения или сликов, которые образуются из-за гашения коротких гравитационно-капиллярных волн (КГКВ, ряби) этими пленками. Радиолокационный (РЛ) сигнал чувствителен к интенсивности ряби, поэтому обусловленные пленками области ослабления рассеяния сигнала проявляются на РЛИ в виде хорошо различимых темных пятен [7, 8, 18]. Опыт и радиолокационные эксперименты показывают, что нефте-содержащие пленки наблюдаются в широком диапазоне условий окружающей среды: при скорости ветра 3–10 м/с, высоте волн до 2 м и состоянии поверхности моря до 3–4 баллов [3, 12, 25]. В оптимальных условиях (ветер 3–5 м/с, волны

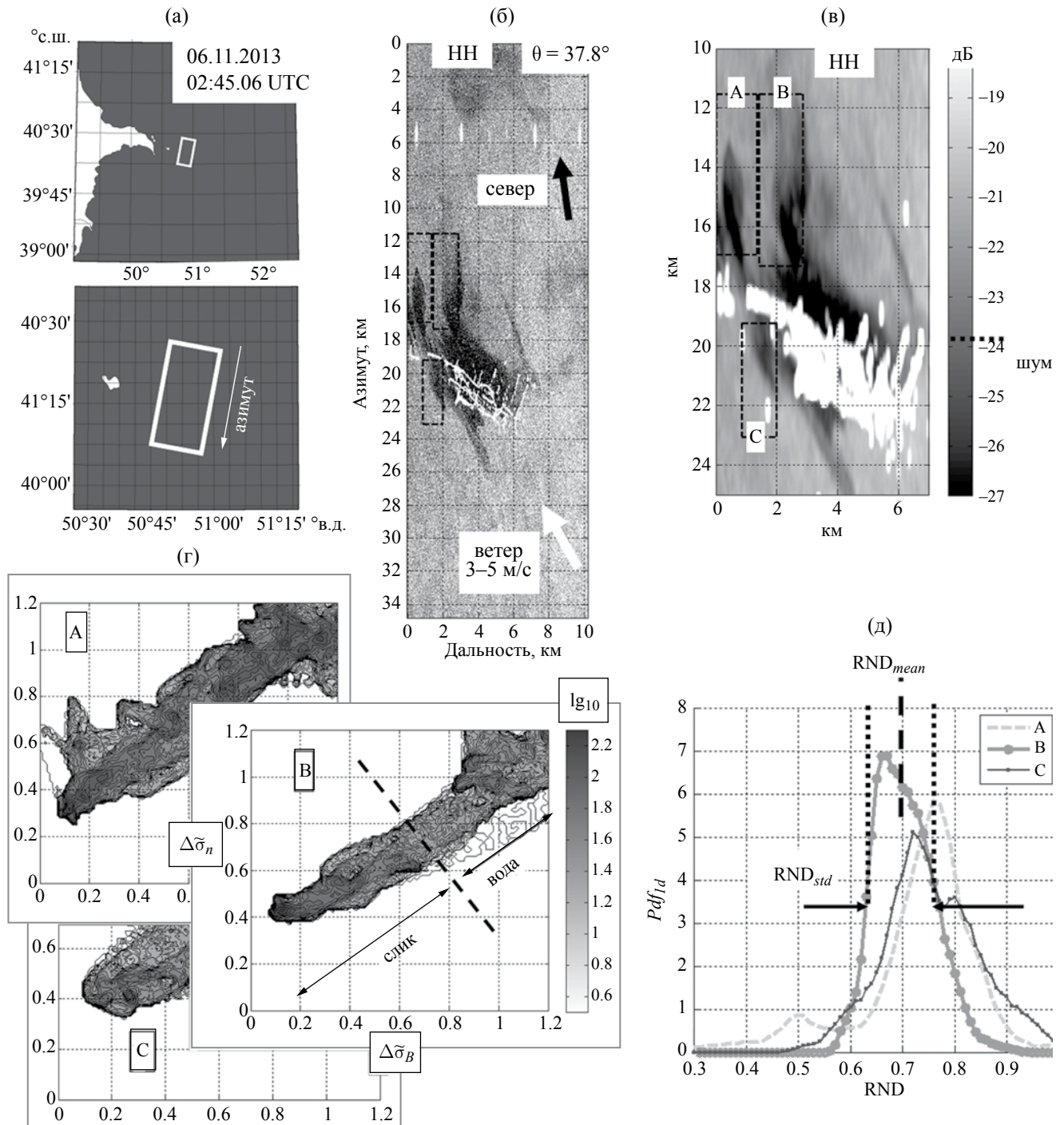


Рис. 1. (а) – Положение радиолокационного изображения района нефтепромыслов «Нефтяные Камни» в Каспийском море; (б) – РЛИ спутника TerraSAR-X (НН-поляризация) от 6.11.2013 г. (02:45 UTC); © DLR; (в) – Фрагмент РЛИ, сглаженный окном 90 x 480 м по дальности и азимуту; прямоугольниками показаны участки РЛИ, выбранные для обработки; (г) – Распределения, в единицах количества (плотности) пикселей изображения рис. 1в на элементарный участок плоскости ($\Delta\sigma_B$, $\Delta\sigma_n$), относительных затуханий береговой ряби, $\Delta\sigma_B$, и обрушений волн, $\Delta\sigma_n$, для каждого из трех участков, показанных прямоугольниками на рис. 1б и 1в; стрелками указан диапазон значений для слика и чистой воды; шкала справа в градациях серого соответствует десятичному логарифму от плотности пикселей; (д) – Соответствующие распределения плотности вероятности поляризационного параметра RND для районов, показанных прямоугольниками «А», «В» и «С».

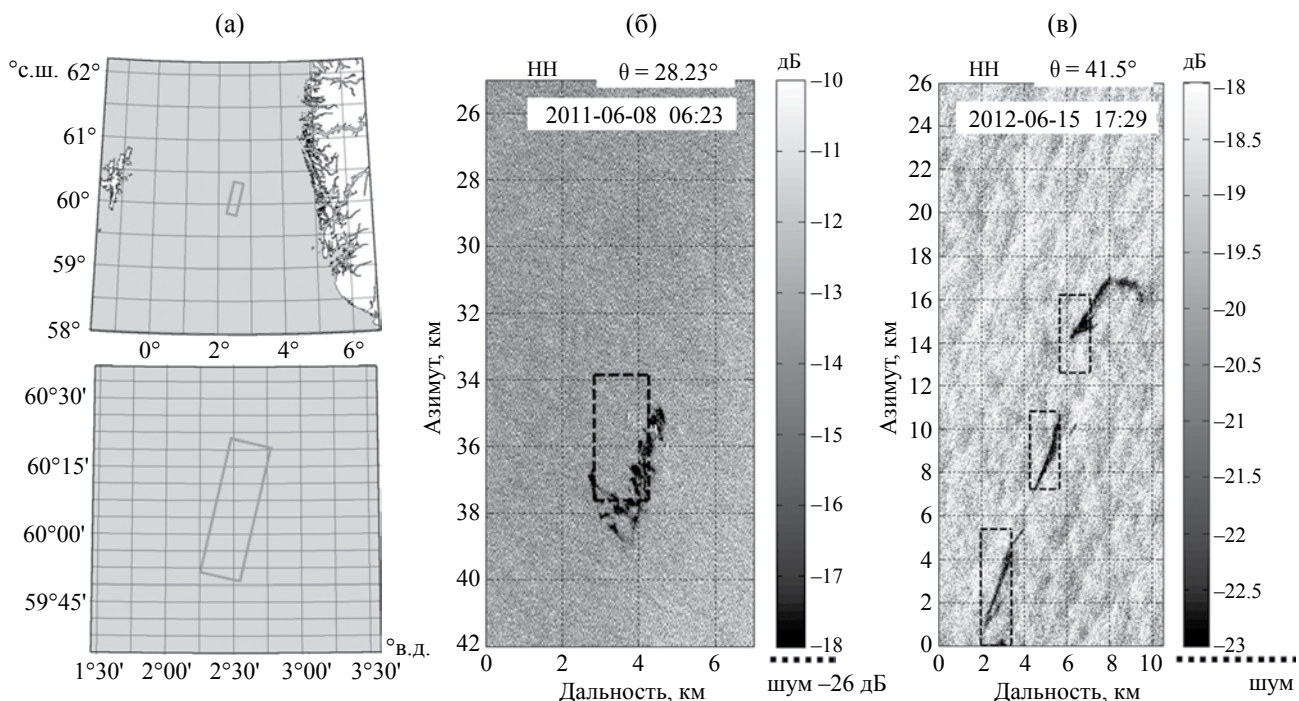


Рис. 2. (а) – Район контролируемых экспериментальных разливов нефти и нефтяной эмульсии в Северном море и положение радиолокационных изображений. (б, в) – РЛИ спутника TerraSAR-X (НН поляризация) в 2011 г. и 2012 г. © DLR. Прямоугольниками показаны области РЛИ, выбранные для обработки.

до 1 м) пятна нефти, нефтепродуктов и прочих маслянистых веществ (растительные масла и животные жиры) выглядят на РЛИ так, как видно на рис. 1–3. При известном веществе пленки, для определения ее толщины и других характеристик по РЛ-данным был предложен ряд различных методов (см., например, [2, 5, 25]).

Однако в большинстве случаев сигнатуры, создаваемые на РЛИ нефтяными пятнами в поле удельной эффективной площади рассеяния, малоотличимы от зон пониженного радиолокационного сигнала, вызванных другими причинами – например, локальным ослаблением ветра, внутренними волнами, апвеллингом, гидрологическими фронтами, дождевыми ячейками, начальными формами льда, другими аэрогидродинамическими явлениями, а также биогенными плёнками (образуются в результате жизнедеятельности планктона и рыб), которые могут проявляться похожим образом на РЛИ в виде так называемых сликовых образований [7, 12, 23, 44]. По этой причине идентификация и последующая классификация пленочных образований (сликов) на РЛИ является сложной и нетривиальной задачей. Поэтому до сих пор не существует полностью автоматизированных методов обработки и анализа РСА-изображений, которые бы позволяли с высокой степенью вероятности (низким уровнем ложных тревог) установить, является ли

видимое на РЛИ темное пятно нефтяным разливом или нет.

Одним из шагов в решении данной проблемы стало появление поляризационных РСА, в которых РЛ-сигнал посылается и принимается на различных поляризациях – вертикальной (V) и горизонтальной (H). В зависимости от этого различают сигналы, переданные и принятые на соосной поляризации: VV – переданная вертикальная и принятая вертикальная и, соответственно, НН, а также РЛИ, принятые на перекрестной поляризации: VH – вертикальная/горизонтальная, HV – горизонтальная/вертикальная. Такие поляризационные РСА и их РЛИ с успехом используются для задач исследования земных покровов, в том числе ледяных и водных. Для этого вычисляются такие поляризационные параметры, как энтропия, анизотропия и угол поворота плоскости поляризации, на основании которых проводится классификация типов подстилающей поверхности [17, 18]. Неоднократно предпринимались попытки применить аналогичный подход для идентификации пятен пленочных загрязнений моря (см., например, [11]). Однако до сих пор не удалось найти единого подхода к обработке и анализу поляризационных РЛИ морской поверхности. При различных условиях наблюдения (углах зондирования, погодных условиях и типах сликов) энтропия, анизотропия, угол поворота

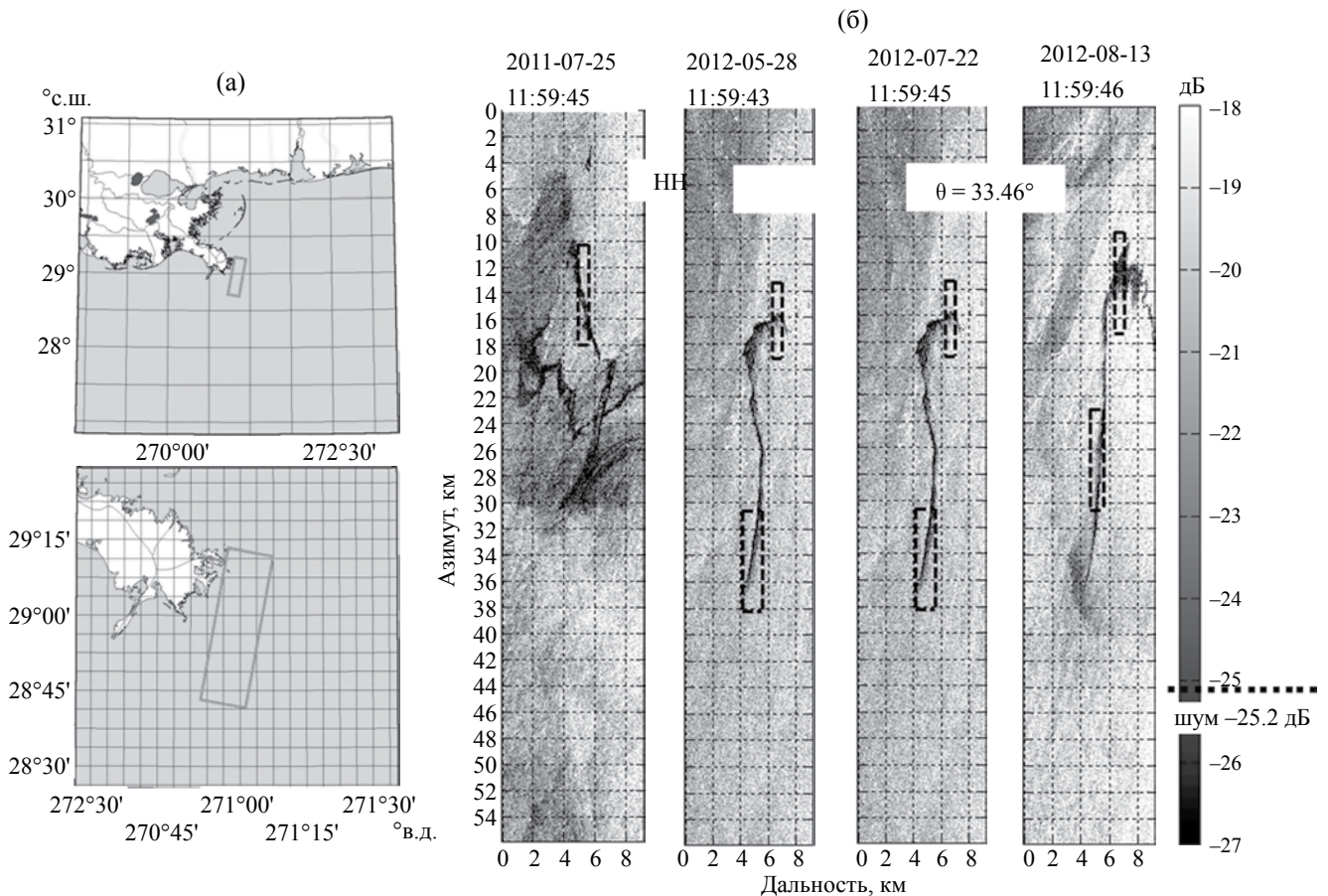


Рис. 3. (а) – Положение РЛИ на карте в северной части Мексиканского залива; (б) – Серия РЛИ спутника TerraSAR-X (НН поляризация), полученная в 2011–2012 гг., с разливами нефти, поступающей из аварийных скважин; прямоугольниками показаны области РЛИ, выбранные для обработки; угол падения и уровень шума для всех РЛИ одинаковый. © DLR

плоскости поляризации, разность фаз и др. поляризационные характеристики (см. [39]) меняются в широком диапазоне значений [17, 42].

Недавно Ивоными и др. [27, 28] был предложен метод идентификации типа снимков как нефтяных, ветровых, так и прочих, видимых на поляризационных РЛИ, по комбинации вариантов подавления или увеличения сигналов различной физической природы: вызванных капиллярной рябью длиной несколько сантиметров или обрушениями волн. Известно, что капиллярная рябь определяет так называемое резонансное (брегговское) рассеяние сигнала, а обрушения волн – нерезонансное, которые по-разному проявляются в радиолокационных каналах VV и HH [31]. Кроме того, капиллярная рябь и обрушения волн по-разному реагируют на пленки, образованные различными маслянистыми веществами [30]. В качестве количественной меры, которая должна обладать максимальной чувствительностью к природному происхождению пятен-снимков, регистрируемых

на РЛИ, и минимально зависеть от геометрии зондирования и ряда других факторов, в [28] был предложен специальный поляризационный параметр RND (англ. relative Resonant to Nonresonant signal Damping). В результате проверки методики на поляризационных РЛИ Radarsat-2, полученных в 2011 и 2012 гг. для районов с контролируемой разливами сырой нефти, нефтяной эмульсии и биогеноподобных веществ в Северном море [39], было установлено, что параметр RND позволяет достаточно уверенно различать пятна сырой нефти и ее эмульсий от биогеноподобных пленок.

Ниже приводятся результаты верификации методики, предложенной в [28], путем обработки и анализа поляризационных данных немецкого РЛ спутника TerraSAR-X, собранных в районах, где регулярно наблюдаются пятна-снимки известного происхождения, а именно: разливы нефти и естественные нефтепроявления (ЕН) в Мексиканском заливе и Каспийском море, а также биогенные пленки в Каспийском

море. Для сравнения также привлекались данные TerraSAR-X, полученные в Северном море во время экспериментов с контролируемыми разливами нефтэмульсий [40]. В тексте, для различения ЕН от разливов нефти, связанных с добычей, транспортировкой нефти, нефтепродуктов и нефтяных эмульсий, для всех последних применяется общепринятое название «минеральные» [39, 40] нефтяные пленки, т.е. пленки минерального происхождения.

2. МЕТОД ОБРАБОТКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РЛИ

Кудрявцевым и др. [31] была предложена форма вычисления интенсивности рассеяния или удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР), σ^p , для морской поверхности, в которой механизм рассеяния учитывает три составляющих: 1) резонансное (брегговское) рассеяние сигнала на КГКВ (ряби), σ_B^p ; 2) нерезонансное (кирхгофовское, «зеркальное») рассеяние на уклонах длинных поверхностных гравитационных волн, σ_{sp} ; 3) нерезонансное (кирхгофовское или «зеркальное») рассеяние на неоднородностях, вызванных обрушениями волн, σ_n . Соответственно,

$$\sigma^p = \sigma_B^p + \sigma_{sp} + \sigma_n. \quad (1)$$

Верхний индекс « p » у σ^p и σ_B^p означает, что они зависят от поляризации сигнала (VV или HH). Формулы для вертикальной и горизонтальной поляризации, σ_B^V и σ_B^H , были получены в рамках так называемого двухмасштабного приближения [1, 45]:

$$\begin{aligned} \sigma_B^V &= \sigma_B(\theta, \varepsilon, k_b, \zeta_i^2), \\ \sigma_B^H &= P_B(\theta, \varepsilon) \sigma_B(\theta, \varepsilon, k_b, \zeta_i^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь

$$\sigma_B = 16\pi k_r^4 |G_V(\theta, \varepsilon)|^2 F(k_b) (1 + g_V \zeta_i^2) - \quad (3)$$

УЭПР для вертикальной поляризации. $k_b = 2k_r \sin \theta$ – брегговское волновое число для рассеивающей резонансной ряби, θ – угол зондирования морской поверхности, или угол падения радиолуча (отсчитываемый от вертикали), $k_r = 2\pi / \lambda_r$ – волновое число падающей радиоволны (λ_r – длина радиоволны), $F(k_b)$ – спектр КГКВ, ζ_i^2 – среднеквадратичные уклоны длинных волн, ε – диэлектрическая константа воды; $G_V(\theta, \varepsilon)$ и g_V – некоторые геометрические коэффициенты [31], зависящие от угла падения и диэлектрической константы воды. Коэффициент $P_B(\theta, \varepsilon)$ отражает факт зависимости интенсивности рассеяния сигнала от его поляризации. Он

также зависит от угла падения и диэлектрической константы воды [31].

Нерезонансные слагаемые σ_{sp} и σ_n от поляризации не зависят. Последнее слагаемое, σ_n , зависит от обрушений волн (см. формулу (55) в [31]), а согласно данным работы [18], также относится к так называемым «микрообрушениям» [3, 20, 21], или, в другой формулировке, участкам морской поверхности, обладающим экстремально высокой степенью кривизны [26]. Слагаемое σ_{sp} экспоненциальным образом зависит от угла падения θ [1, 30].

Для углов падения более 29° – 30° отражения σ_{sp} от уклонов волн дают относительно небольшой вклад по сравнению с остальными слагаемыми [30, 31]. Ниже будет рассматриваться именно эта ситуация, поскольку она по двум вычисляемым из РЛ-данных величинам, σ^V и σ^H , полученным на соосных поляризациях, позволяет однозначно определить характеристики, связанные с интенсивностью ряби, σ_B , и интенсивностью обрушений волн, σ_n :

$$\sigma_B \approx \frac{\sigma^V - \sigma^H}{1 - P_B}, \quad \sigma_n \approx \frac{\sigma^H - P_B \sigma^V}{1 - P_B}. \quad (4)$$

На основе контраста значений величин σ_B и σ_n в чистой воде и в слике можно определить относительные коэффициенты $\tilde{\sigma}_B$ и $\tilde{\sigma}_n$ подавления резонансных и нерезонансных механизмов рассеяния в пленках:

$$\tilde{\sigma}_B = \frac{\sigma_{B, slick}}{\sigma_{B, water}}, \quad \tilde{\sigma}_n = \frac{\sigma_{n, slick}}{\sigma_{n, water}}. \quad (5)$$

Здесь $\sigma_{B, slick}$ и $\sigma_{n, slick}$ – значения резонансной и нерезонансной частей УЭПР в слике; $\sigma_{B, water}$ и $\sigma_{n, water}$ – аналогично для чистой воды.

Параметр RND был введен в [28] как отношение *относительного* изменения интенсивности обрушений волн, $\Delta \tilde{\sigma}_n = 1 - \tilde{\sigma}_n$, к *относительно* му изменению интенсивности ряби, $\Delta \tilde{\sigma}_B = 1 - \tilde{\sigma}_B$, в сликах:

$$RND = \Delta \tilde{\sigma}_n / \Delta \tilde{\sigma}_B. \quad (6)$$

Физически данное отношение означает, что абсолютные величины подавления интенсивности обрушений волн или ряби в сликах играют второстепенную роль в формировании величины параметра RND. Это приводит к таким важнейшим особенностям параметра RND, как его слабая чувствительность к толщине пленки, которая является заранее не известной и может варьироваться в широких пределах даже для одного и того же пятна [5, 6], и одновременно повышенная чувствительность к разнице декрементов

затухания обрушений волн и ряби в слайках [28]. При этом сами относительные затухания сигналов $\Delta\tilde{\sigma}_n$ и $\Delta\tilde{\sigma}_B$, конечно, зависят от толщины пленки. Благодаря нормировкам (4) и (5) в параметре RND, также значительным образом уменьшена его зависимость от угла падения θ , который для разных РЛИ разный. Для радиодиапазонов X (~3 см) и C (~5 см) при толщине пленок менее одного миллиметра диэлектрическая константа воды вещества пленок также не влияет на результат [24, 28].

В силу случайного характера величин σ^V и σ^H пиксели РЛИ для области слайка образуют некоторое распределение двумерной плотности вероятности $Pdf_{2d}(RND, s)$, зависящей от двух аргументов: RND и $s = (\Delta\tilde{\sigma}_n^2 + \Delta\tilde{\sigma}_B^2)^{1/2}$. Как упоминалось ранее, первый слабо зависит от толщины пленки, второй – зависит сильно. Для чистой воды $s = 0$, для области толстой пленки $s \rightarrow 1$. Интегрированием (в численной реализации – соответствующим суммированием) двумерной плотности вероятности Pdf_{2d} можно получить одномерную плотность вероятности Pdf_{1d} в виде

$$Pdf_{1d}(RND) = \int_{s_{water}}^1 Pdf_{2d}(RND, s) ds, \quad (7)$$

в которой уже исключены возможные вариации, обусловленные толщиной пленки (нижний предел интегрирования s_{water} , который отсекает область чистой воды, на основании различных тестовых расчетов в [28] принимается равным 0.3). Далее для одномерной плотности вероятности Pdf_{1d} , которая по виду напоминает распределение Гаусса, вычисляются среднее значение параметра RND, RND_{mean} , и его стандартное отклонение, RND_{std} . Для соосно-поляризационных РЛИ спутника Radarsat-2, полученных при углах падения 30° и 38° , для пятен сырой нефти и ее эмульсий RND_{mean} составляет около 0.85, для пленки растительного масла ~0.7, их стандартные отклонения RND_{std} ~0.04 [28].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Описанная выше методика применялась для обработки соосно-поляризационных (VV и HH поляризации) РЛИ спутника TerraSAR-X (немецкий спутник дистанционного зондирования Земли, предназначенный для радиолокационной съемки земной поверхности; запущен 15 июня 2007 г. с космодрома Байконур), полученных в режиме маршрутной съемки (англ. Stripmap mode [43]). PCA (X-диапазон, несущая частота радиосигнала 9.65 ГГц) на спутнике TerraSAR-X позволяют получать в этом режиме РЛИ шириной 15 км

(вдоль направления дальности – перпендикулярно направлению полета) и длиной 50 км (вдоль азимута – направления полета) при пространственном разрешении 2 м по наземной дальности и 6 м по азимуту [14, 43]. В качестве стандартных продуктов такие РЛИ TerraSAR-X поставляются с размерами пикселя ~1 м по наземной дальности и ~3 м по азимуту (что вдвое лучше физического разрешения). Уровень шума РЛ-данных TerraSAR-X составляет около –23 дБ.

Пример обработки: нефтяные разливы

Процесс обработки и определения искомым параметров рассмотрим на примере анализа РЛИ TerraSAR-X, полученного 6 ноября 2013 г. в 02:45 UTC для района нефтепромыслов «Нефтяные Камни» в Каспийском море (рис. 1а и 1б). Перед началом поляризационной обработки производилось сглаживание (низкочастотная фильтрация) и усиление контраста РЛИ. Для улучшения визуального восприятия РЛИ (понижения уровня биений спекл-шума [13]) РЛИ усреднялись (сжимались) в пропорции 16×16 по отношению к размеру первоначального РЛИ. В данной работе на всех рисунках РЛИ представлены с таким осреднением (т.е. реальный размер пикселя на рисунках соответствует 15 м по дальности и 40 м по азимуту) (рис. 1б). Результаты тестовых расчетов [28] показали, что для эффективного применения методики необходимо использовать дополнительное сглаживание РЛИ. В условиях наблюдения пятен, вытянутых по азимуту (вдоль направления полета спутника; см. рис. 1а) наиболее эффективным с точки зрения результативности методики являлось сглаживание предварительно уже усредненного РЛИ двумерным окном Ханнинга [35] размером 25×13 пикселей (по азимуту и дальности соответственно). Применительно к РЛИ TerraSAR-X это означает итоговое сглаживание изображения на ~480 м по азимуту и ~90 м по дальности (рис. 1в). При наблюдении пятен, вытянутых в других направлениях, применялось сглаживание с другими размерами окна Ханнинга. Для соблюдения условия одинаковой радиометрической обработки всех РЛИ, двумерное окно Ханнинга, независимо от соотношения сторон, в сумме имело одинаковое количество усредняемых пикселей, равное ~325. Описанные в этом параграфе характеристики усреднения исходного РЛИ были получены эмпирическим путем при работе с данными TerraSAR-X, а также Radarsat-2 [28]. Без такого предварительного контрастирования и осреднения исходных РЛИ результаты дальнейшей обработки содержали значительные разброс и погрешность.

Средние значения и погрешности определения RND для различных типов пятен-сликов

Тип пленки	Местоположение РЛИ, дата, время UTC; средний угол падения; изначальный размер пикселя, дальность × азимут; масштаб сглаживания, дальность × азимут; скорость ветра	$RND_{mean} \pm RND_{std}$
Эмульсия	Северное море; 60.09° с.ш., 02.51° в.д.; 08.06.2011, 06:23; 28.23°; 0.9 м × 2.4 м; 207 м × 150 м; 1.5–3.5 м/с	0.82 ± 0.03
Эмульсия № 1	Северное море; 59.81° с.ш., 02.50° в.д.; 15.06.2012, 17:29; 41.5°; 0.9 м × 2.3 м; 149 м × 198 м; 4 м/с	0.74 ± 0.03
Эмульсия № 2		0.71 ± 0.04
Эмульсия № 3		0.69 ± 0.04
Сырая нефть / эмульсия № 1	«Нефтяные Камни»; 06.11.2013, 02:45; 37.8°; 0.9 м × 2.4 м; 93 м × 480 м; 3–5 м/с	0.76 ± 0.05
Сырая нефть / эмульсия № 2		0.70 ± 0.05
Сырая нефть / эмульсия № 3		0.75 ± 0.07
Сырая нефть / эмульсия	Мексиканский залив; 29.02° с.ш., 88.94° з.д., 25.07.2011, 11:59; 33.76°; 0.9 м × 2.4 м; 150 м × 210 м; 3–4 м/с	0.74 ± 0.04
Сырая нефть / эмульсия	Мексиканский залив; 29.02° с.ш., 88.94° з.д., 28.05.2012, 11:59; 33.76°; 0.9 м × 2.4 м; 150 м × 210 м; 3–4 м/с	0.70 ± 0.04
		0.72 ± 0.04
Сырая нефть / эмульсия	Мексиканский залив; 29.02° с.ш., 88.94° з.д., 22.07.2012, 11:59; 33.76°; 0.9 м × 2.4 м; 150 м × 210 м; 3–4 м/с	0.72 ± 0.04
		0.70 ± 0.04
Сырая нефть / эмульсия	Мексиканский залив; 29.02° с.ш., 88.94° з.д., 13.08.2012, 11:59; 33.76°; 0.9 м × 2.4 м; 150 м × 210 м; 5–6 м/с	0.73 ± 0.03
		0.71 ± 0.05
Пленки естественных выходов нефти	Каспийское море; 37.12° с.ш., 50.42° в.д.; 08.08.2012, 14:30; 34.49°; 0.76 м × 2.7 м; 126 м × 234 м	0.56 ± 0.06
		0.54 ± 0.04
Пленки естественных выходов нефти	Мексиканский залив; 27.12° с.ш., 92.13° з.д., 06.08.2011, 00:05:41; 32.67°; 0.89 м × 2.4 м; 149 м × 223 м	1.06 ± 0.06
		1.08 ± 0.08
Биогенные пленки	Каспийское море; 44.77° с.ш., 48.66° в.д.; 24.07.2009, 14:32; 34.8°; 0.89 м × 2.5 м; 149 м × 208 м	0.29 ± 0.06
		0.36 ± 0.10
		0.34 ± 0.12

В процессе обработки на РЛИ вручную или автоматически выделялись области, содержащие темные пятна (или его части), а также чистую воду (рис. 1б и 1в). Затем применялся алгоритм (4)–(7) автоматической обработки данного участка изображения морской поверхности. В процессе обработки рассчитывались параметры, характеризующие относительные затухания в области пленочного выглаживания береговой ряби и обрушений волн. На рис. 1г на плоскости $(\Delta\tilde{\sigma}_B, \Delta\tilde{\sigma}_n)$ показаны примеры распределений

относительных затуханий береговой ряби и обрушений волн для каждого из трех выбранных участков. По ним (по рис. 1г) определялось распределение плотности вероятности $Pdf_{2d}(RND, s)$, где $RND = \Delta\tilde{\sigma}_n / \Delta\tilde{\sigma}_B$ и $s = (\Delta\tilde{\sigma}_n^2 + \Delta\tilde{\sigma}_B^2)^{1/2}$. По существу, поляризационный параметр RND является углом наклона массива точек, расположенных на плоскости «береговая рябь – обрушения волн» (рис. 1г). Согласно (7), происходил расчет одномерной плотности вероятности $Pdf_{1d}(RND)$,

по положению центра масс пика которой (рис. 1д) определялось среднее значение, RND_{mean} , для данного пятна. По ширине пика на уровне половины его высоты (рис. 1д) вычислялся средний разброс значений RND для слайка, RND_{std} , который указывал на точность определения характерного значения RND_{mean} для данного слайка.

На примере трех различных участков пятна (рис. 1б и 1в) около кластера нефтедобывающих платформ видно, что все три распределения RND (рис. 1д) расположены таким образом, что провести различие между ними в терминах среднего, RND_{mean} , и его отклонения, RND_{std} , практически невозможно – распределения значительно перекрываются друг с другом. При этом пятна для обработки выбирались у разных сторон эстакад – наветренной и подветренной. Таким образом, потенциально возможный эффект изменения скорости ветра перед и за эстакадами не оказал заметного влияния на средние значения RND .

Параметр RND_{mean} при определении данных пятен в X-диапазоне находится в пределах от 0.70 до 0.76 при разбросе RND_{std} около 0.06 (см. табл.). Т.е., при наблюдении данных нефтяных пленок в X-диапазоне КГКВ подавляются в них на 30% эффективнее, чем обрушения (см. формулу (6)). Согласно данным работ [27, 28], параметр RND_{mean} для нефтяных пленок, видимых в C-диапазоне, находится в диапазоне 0.83 до 0.90. Таким образом, это означает, что в X-диапазоне (который реагирует на более короткие КГКВ, чем C-диапазон) сильнее проявляется эффект гашения КГКВ в пленках нефти, чем в C-диапазоне, что согласуется с данными работы [12].

Аналогичным образом методика применялась для анализа поляризационных РЛ-данных спутника TerraSAR-X, полученных над Северным и Каспийским морями, Мексиканским заливом с разными типами пленочных загрязнений, а именно: разливами нефти, нефтесодержащими эмульсиями, выходами нефти из естественных источников и биогенными пленками.

Нефтяные разливы и эмульсии

Северное море. На рис. 2 показаны два РЛИ TerraSAR-X для контролируемых экспериментальных разливов нефтяной эмульсии в Северном море в 2011 и 2012 гг. [39, 40], которые ежегодно, начиная с 2011 г., в июне проводятся на месте бывших нефтяных промыслов в водах Норвегии.

На РЛИ 2011 г. (рис. 2б) видно пятно нефтяной эмульсии, которая была создана на основе сырой нефти марки «Oseberg» и воды с добавкой 5% эмульгатора в виде промежуточного продукта марки IFO380. Перед разливом эмульсия

содержала около 69% воды [39]. К моменту съемки эмульсия находилась в море 18 час. С катеров, которые находились вблизи пятна, толщина пленки была оценена в 0.1–1.5 мм. Скорость ветра во время экспериментов изменялась от 1.5 до 3.5 м/с.

В экспериментах 2012 г. [40] эмульсии были составлены аналогичным образом из тех же компонентов. Перед разливом содержание воды в них составляло 58%. Три пятна, видимые на РЛИ (рис. 2в), соответствуют эмульсиям, разлитым в разное время и имеющим в момент съемки возраст 12, 25 и 29 час соответственно. Скорость ветра во время съемки была около 4 м/с.

Для эмульсий на снимке 2012 г., полученном при угле зондирования поверхности 41.5° , величины параметра RND_{mean} для всех трех эмульсий находились близко друг к другу в пределах от 0.69 до 0.74 (см. табл.), что хорошо согласуется с данными для «Нефтяных камней». Для эмульсии на РЛИ 2011 г., полученном для 28.23° , параметр RND_{mean} составил несколько большую величину, равную 0.82. Разница в величинах параметра RND_{mean} для одного типа эмульсии, но изображенной на снимках со столь разными углами зондирования поверхности, может свидетельствовать о влиянии на результат угла зондирования поверхности θ .

Мексиканский залив. На рис. 3 приведены РЛИ TerraSAR-X для Мексиканского залива, собранные в 2011–2012 гг. в районе аварийных нефтедобывающих платформ и содержащие разливы нефти. Съемка происходила в одном и том же районе, координаты центра снимков (29.02° с.ш., 271.06° в.д.) и углы падения (33.76°) для них были идентичными. Также погодные условия получения всех четырех РЛИ были достаточно близкими: скорость ветра, согласно геофизической модели XMOD2 [32], варьировалась в пределах 3–6 м/с. На всех РЛИ прямоугольниками показаны области, выбранные для обработки и идентификации типа разлива.

Необходимо заметить, что изначально было неизвестно, какой тип маслянистого вещества образует пятна на РЛИ Мексиканского залива, однако можно однозначно утверждать, что это нефть, поступающая из аварийных скважин (пятна примыкают к конструкциям, четко детектируемым на РЛИ), и частично нефтяная эмульсия с относительно большим содержанием воды. Как показывают оценки работ [36, 39], при скоростях ветра 3–6 м/с и нескольких часах нахождения сырой нефти в воде, нефть образует эмульсию с содержанием воды в десятки процентов.

Для всех пятен в Мексиканском заливе, наблюдавшихся на протяжении 2011–2012 гг. в одном и том же районе, были получены очень близкие значения параметра RND_{mean} в пределах от 0.70 до

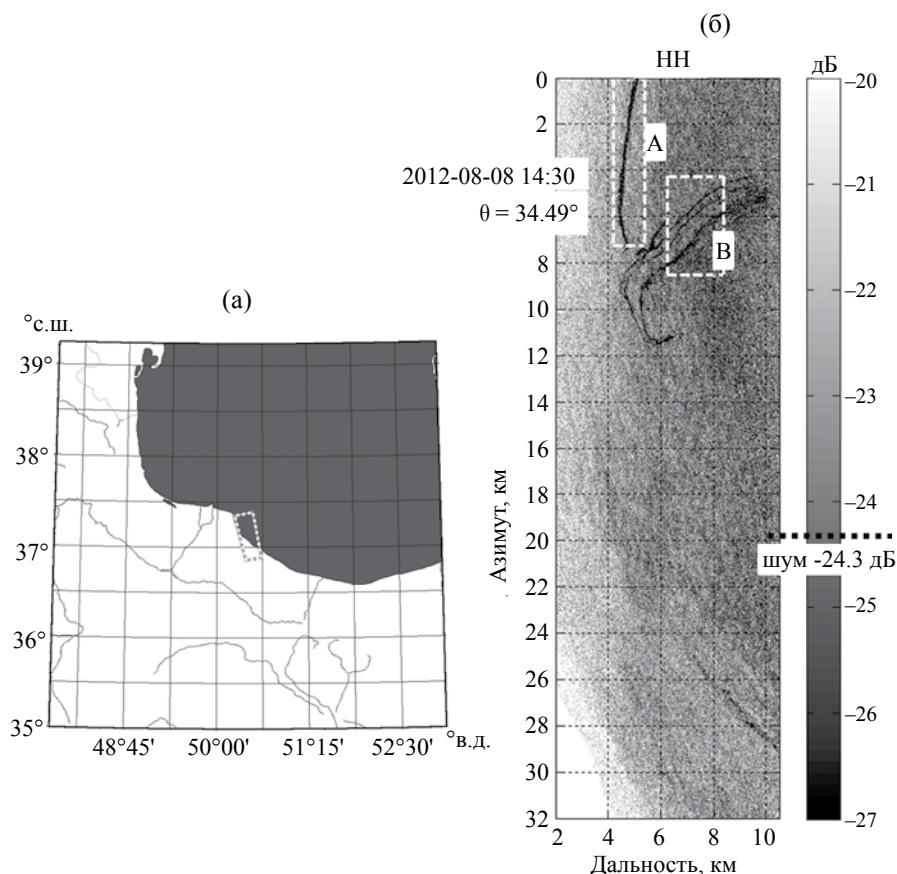


Рис. 4. (а) – Положение РЛИ на карте в южной части Каспийского моря; (б) – Фрагмент радиолокационного изображения спутника TerraSAR-X от 8.08.2012 г. (14:30 UTC), где имеется установленный естественный выход нефти. © DLR

0.73 (см. табл.), что хорошо согласуется с данными для «Нефтяных камней».

Каспийское море. Ранее на рис. 1 было приведено РЛИ района нефтепромыслов «Нефтяные Камни» в Каспийском море. Хорошо известно, что поверхность моря в этом районе постоянно покрыта нефтяной пленкой. Типичные оценки ее толщины по цветовой гамме, согласно наблюдениям, находятся в диапазоне от десятков микрон до десятых долей миллиметра [4]. Согласно последним данным, наиболее вероятным механизмом происхождения обширных пленочных образований в этом месте, помимо техногенных утечек, являются эффекты просачивания легких фракций нефти, усиленные интенсивным антропогенным воздействием – бурением скважин и добычей нефти и газа [4]. Кроме того, в последнее время в Среднем Каспии отмечено появление новых грифонов и сипов, источающих нефть, чье образование можно объяснить техногенной дестабилизацией недр [11] и сейсмической активностью. Поскольку при этом на поверхность моря чаще всего попадают относительно легкие

фракции нефти, которые по сравнению с сырой нефтью практически не эмульгируют, то, скорее всего, около «Нефтяных Камней» наблюдались нефтяные пленки, а не пятна нефтяной эмульсии, что также подтверждается съемками в оптическом диапазоне спектра.

Естественные нефтепроявления

Каспийское море. На рис. 4 показано РЛИ TerraSAR-X южной части Каспийского моря, где хорошо известны естественные выходы нефти (грязевые вулканы и сопутствующие им грифоны на морском дне). Хорошо также известно, что южная часть Каспийского моря характеризуется многочисленными поверхностными нефтепроявлениями, обусловленными выбросами нефти естественным образом, и которые часто наблюдаются на РСА-изображениях [9, 10]. Кроме того, слики на рис. 4 имеют характерную для ЕН форму, размеры, контрасты, а также пространственную группировку и повторяемость. Для обработки были выбраны два участка, соответствующие различным сликам с наиболее резким контрастом

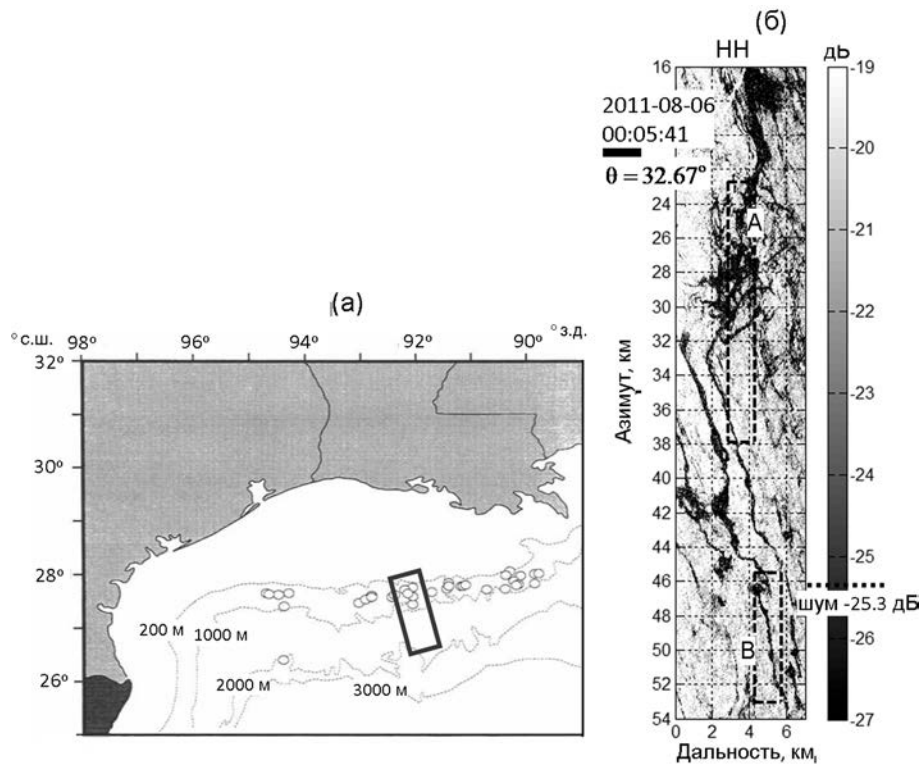


Рис. 5. (а) – Положение РЛИ на карте естественных выходов нефти 1996 г. [29] в северной части Мексиканского залива; (б) – Фрагмент РЛИ спутника TerraSAR-X от 6.08.2011 г., где обнаружены естественные нефтепроявления; прямоугольниками показаны области, выбранные для обработки. © DLR

«пятно-чистая вода» (показаны прямоугольниками). Для них параметр RND_{mean} составил величину $0.54 \div 0.56$ при разбросе RND_{std} около 0.06 (см. табл.). Данные величины значительно отличаются (в терминах RND_{std}) от значений ~ 0.75 , полученных выше для нефтяных пленок. Это означает, что в пленках естественных выходов нефти (юга Каспийского моря), по сравнению с минеральными нефтяными пленками, КГКВ подавляются в среднем на 27% эффективнее, чем обрушения. Данный факт может свидетельствовать о том, что пленки ЕН, являясь очень тонкими по толщине (много меньше 0.1 мм), по своему воздействию на КГКВ проявляют себя как мономолекулярные пленки с небольшим коэффициентом упругости пленки [13], занимая, таким образом, промежуточное положение между пленками нефти с толщиной более 0.1 мм и мономолекулярными (биогенными) пленками с большим коэффициентом упругости [12].

Мексиканский залив. Аналогичный район с естественными выходами нефти был выбран в северной части Мексиканского залива (рис. 5), где, согласно данным [33] пленки естественных выходов нефти толщиной 0.1 мкм покрывают от 1% до 4% площади морской поверхности. На

рисунке справа показана карта документированных естественных выходов нефти в данном районе, которые расположены на глубинах 200–1000 м [34]. На РЛИ от 6 августа 2011 г. показано характерное для данного района РЛ- изображение, на котором видно большое количество длинных и относительно широких полос-сликов. Можно отметить, что текстура пленок естественных выходов нефти, видимая на рис. 5б для Мексиканского залива, сильно отличается от текстуры аналогичных по происхождению пленок на рис. 4б для Каспийского моря. В работах [33, 37] для близких по расположению РЛИ Мексиканского залива (26.64° с.ш., 92.05° з.д.) приводятся примеры пленок естественных выходов нефти, совпадающие как с их типичным видом тонкого «серпа», как на рис. 4б, так и широких полос с «ветвистыми» участками, как на рис. 5б. Существенным фактом является то, что 100% гарантии природы происхождения этих пленок нельзя дать, поскольку соответствующих подспутниковых измерений не проводилось.

Для обработки были выбраны два участка морской поверхности, содержащие пятна различного контраста. Согласно вычисленному параметру RND_{mean} , который равнялся 1.06–1.08,

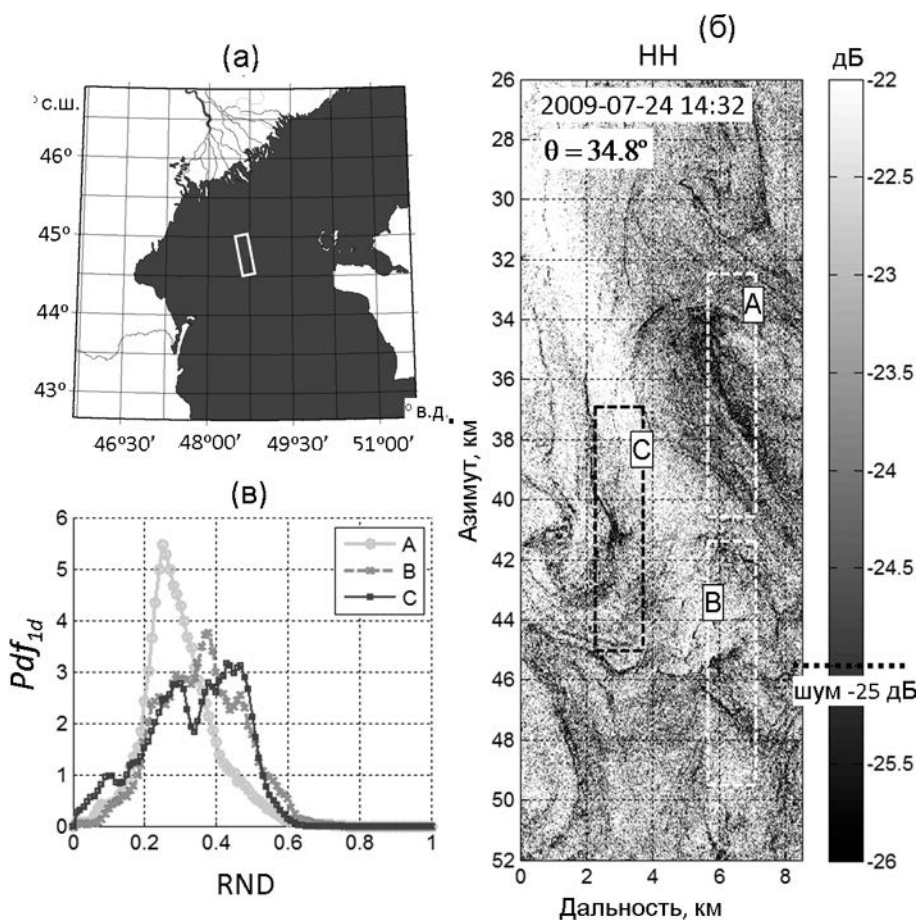


Рис. 6. (а) – Положение РЛИ на карте в северной части Каспийского моря; (б) – Фрагмент РЛИ спутника TerraSAR-X, на котором отобразились биогенные пленки; (в) – Распределения плотности вероятности параметра RND для районов, показанных прямоугольниками «А» и «В» на рис. 1б. © DLR

пятна ЕН Каспийского моря и Мексиканского залива сильно отличаются друг от друга. Процессы подавления обрушений и капиллярной ряби в них, по-видимому, происходят по-разному, что может говорить о различных свойствах этих пленок или сопутствующих гидрометеорологических условиях. Также, поскольку сопутствующих подспутниковых измерений в данном случае (и ряде других) не проводилось, существует вероятность, что эти пятна на РЛИ и не являются пленками ЕН, хотя на это и указывает район наблюдений.

Биогенные пленки

Каспийское море. Северная часть Каспийского моря хорошо известна своей мелководностью, процессами смешения пресноводных и морских вод, а также биологической активностью, а вот мощных естественных источников нефтеуглеводородов в ней пока не обнаружено. На рис. 6 показаны слики, обнаруженные на РЛИ TerraSAR-X Северного Каспия, которые имеют характерный

для биогенных пленок вид узких и длинных филаментов.

Для обработки специально были выбраны три различных участка поверхности моря, обозначенные «А», «В» и «С», которые содержат филаменты немного отличной формы и различного контраста с фоном (чистой водой). Более глубокий контраст филаментов в зоне «А» по сравнению с «В» и «С» (рис. 6) связан с процедурой первоначального осреднения снимка (15 м по дальности и 40 м по азимуту). Т.е. более узкие филаменты, как в зоне «В», размывались достаточно сильно и их контраст заметно уменьшался, а достаточно широкие участки пленок, как в зоне «А», размывались процедурой осреднения меньше, соответственно, меньше изменялся их контраст.

На рис. 6в показаны соответствующие распределения плотности вероятности параметра RND. Для них параметр RND_{mean} составил величину 0.29–0.36. Вследствие слабого контраста пятен в районах «В» и «С», распределения плотности

вероятности параметра RND для них имеют зашумленный (не «гауссов») вид. Из-за зашумленности разброс, RND_{std} , данных достигает величины 0.12, что в несколько раз больше, чем для других пленок (см. табл.). Такое низкое значение RND_{mean} свидетельствует о том, что в данных биогенных пленках, по сравнению с минеральными нефтяными пленками, КГКВ подавляются в среднем на в 2–3 раза эффективнее, чем обрушения. Это находится в качественном согласии с результатами сравнения коэффициентов затухания волн в мономолекулярных и нефтяных пленках, выполненного в работе [12], в которой указывается на резонансный (выборочный) характер подавления только одного диапазона КГКВ, с длиной около 6–10 см (см. также [25]), и относительно слабого подавления волн в остальном диапазоне.

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарные результаты обработки всех представленных и проанализированных РЛИ приведены на рис. 7 и в таблице. Формой представления была выбрана зависимость поляризационного параметра RND_{mean} от берегового волнового числа $k_b = 2k_r \sin \theta$. Видно, что в терминах параметра RND_{mean} данные для пленок нефти и ее эмульсий, собранные в разных районах Мирового океана и при различных условиях зондирования, хорошо коррелируют между собой, располагаясь вдоль одной линии. Это, по мнению авторов, свидетельствует о том, что методика достаточно универсальным образом может работать для идентификации пленочных загрязнений моря

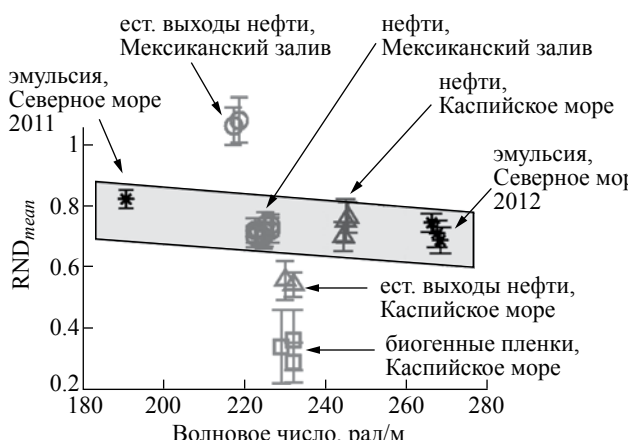


Рис. 7. Зависимость поляризационного параметра RND_{mean} от волнового числа и типа слика; вертикальными столбиками показаны соответствующие стандартные отклонения, RND_{std} . Затемненный четырехугольник обозначает границы наиболее вероятного нахождения параметра RND_{mean} для минеральных пленок (сырая нефть и ее эмульсии) при идентификации типа пленок вслепую

в широком диапазоне углов зондирования поверхности в различных районах Мирового океана. При этом влияние угла зондирования поверхности моря на результат заметным образом уменьшено: при изменении k_b от 190 рад/м до 270 рад/м (т.е. на 50%) параметр RND_{mean} изменяется только на 14% (в сторону уменьшения), т.е. меньше, чем в 3.5 раза. Это свидетельствует об эффективности нормировки (4)–(6), построенной на основании модели УЭПР морской поверхности [31].

Как уже говорилось, величина параметра RND определяет соотношение подавления обрушений и капиллярной ряби в пленочных сликах. В этом смысле биогенные пленки и слики ЕН в Каспийском море (рис. 7) ведут себя достаточно предсказуемо по сравнению с нефтяными пятнами. Согласно данным, показанным на рис. 7, в биогенных пленках (которые, как считается, образуют тонкий мономолекулярный слой) и грифонных пленках (которые образуются, главным образом, легкими фракциями нефти) происходит менее интенсивное подавление обрушений (по сравнению с рябью), чем в более толстых нефтяных пленках. Для пленок нефти и ее эмульсий была получена зависимость относительного подавления ряби и обрушений от длины волны: более короткая рябь более интенсивно подавляется в таких толстых пленках по сравнению с подавлением обрушений волн (для k_b от 190 до 270 рад/м). Это согласуется с результатами работы [28], где использовались РЛИ RadarSat-2 для контролируемых разливов нефтяных пленок и биогенно-подобных пленок.

Выпадающим из этой физически согласованной картины является поведение обрушений и капиллярной ряби в пленках ЕН Мексиканского залива (рис. 7). В данном случае оказалось, что в них обрушения и капиллярная рябь гасятся в одинаковых пропорциях. Данный факт может свидетельствовать как о различных свойствах этих пленок, так и влиянии на параметр RND сопутствующих гидрометеорологических условиях наблюдений (например, направление ветра, которое в данном случае не учитывалось). Также, без сопутствующих подспутниковых измерений, невозможно дать 100% гарантию, что эти пятна на РЛИ являются пленками ЕН.

Практически важным результатом является вывод о том, что слики в местах, соответствующих естественным выходам нефти и биогенным пленкам, достаточно хорошо (в терминах параметра RND) отличаются от минеральных нефтяных пятен. Мерой такого расхождения служит стандартное отклонение (или полуширина пика), которое рассчитывается согласно полуширине распределения RND. Согласно текущим данным,

было получено, что, в терминах среднего и стандартного отклонения параметра RND, возможно отличать как пятна нефти и ее эмульсии от прочих пленок, так и биогенные слики от естественных выходов нефти. На диаграмме на рис. 7 обозначены границы зоны, где, согласно полученным данным, должны находиться нефтяные загрязнения независимо от угла падения и независимо от района происхождения нефтяной пленки. Данные границы зоны должны помогать идентифицировать и классифицировать пленки «вслепую», когда ничего не известно о самой пленке. Согласно диаграмме на рис. 7, если консервативно принять, что минеральным пленкам нефти должны соответствовать все значения RND_{mean} выше толстой пунктирной кривой, то из 14 пятен минеральной нефти и 2 пятен вероятных естественных выходов нефти, которые были взяты из 10 РЛИ TerraSAR-X (с углом и более 30°), ошибочно к минеральной нефти будут отнесены только 2 пятна вероятных естественных выходов нефти. Таким образом, уровень достоверности определения пятен минеральной нефти по диаграмме рис. 7 вслепую можно ожидать на уровне 87% (14/16).

Для сравнения с существующими системами детектирования типа пленочных загрязнений моря по спутниковым РЛИ можно привести пример результатов деятельности организации CleanSeaNet. В случае Швеции CleanSeaNet была интегрирована в надзор шведской береговой охраны. Швеция получила от CleanSeaNet 246 спутниковых снимков в 2008 г., на которых было выявлено 133 предупреждений; 55 (41%) предупреждений было проверено, из последних только для 13 (24%) случаев были подтверждены разливы нефти [38]. Для всего Европейского союза за 2008 г. на 1767 РЛ-снимках было выявлено 2712 предупреждений, из которых 689 было проверено береговыми службами; из последних 202 (30%) случая разливов нефти были подтверждены [38]. По всей Европе за период 2007–2011 гг. всего было выявлено 8866 предупреждений, из них 2828 проверено и 745 подтверждено (26%) [19, 29]. Т.е. не более 30% полученных предупреждений подтверждается при проверке. Необходимо отметить, что в настоящее время организация CleanSeaNet использует неполяризационные спутниковые РЛИ и, таким образом, предупреждение о потенциальном разливе можно сделать, в основном, в результате анализа текстуры темного пятна на РЛИ. Согласно результатам нашей работы, при использовании поляризационных РЛИ совместно с настоящей методикой можно ожидать повышения уровня достоверности предупреждений в несколько раз (2–3 раза).

Дополнительным практическим результатом данной работы является то, что в терминах параметра RND оказалось возможным отличить

пленки минеральной нефти толщиной более 0.1 мм от пленок легких фракций нефти, которые образуют очень тонкие, близкие к мономолекулярным, пленки (как, например, пленки от естественных нефтепроявлений). В этом случае такие распространенные явления, как судовые сбросы отработанных масел, состоящих из легких фракций нефти, потенциально возможно будет отличать от грифонных пленок, если они сформируют пленку толщиной более 0.1 мм.

Безусловно, в работе наибольшая статистика приводится для минеральных нефтяных пленок (пленки сырой нефти и ее эмульсии), в то время как для других пленок (биогенного происхождения и естественных выходов нефти) приводятся единичные примеры, поэтому окончательно обобщить результаты и подтвердить надежность полученных 87% уровня достоверности можно будет только после набора достаточного количества статистических данных.

Таким образом, следует надеяться, что разработанный подход к проблеме выявления и классификации пленочных загрязнений (главным образом, нефтяных) в данных космической радиолокации, полученных на соосных поляризациях, независимо протестированный на основе данных спутника TerraSAR-X в данной работе, позволит усовершенствовать методы идентификации и классификации пленочных загрязнений моря и в итоге существенно улучшить методы их мониторинга. С другой стороны, необходимы дополнительные исследования, направленные на более тщательную верификацию методики путем набора статистики и анализа радиолокационных изображений с разнообразными пленочными загрязнениями, полученными в разных частях Мирового океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-50-00095). Радиолокационные данные спутника TerraSAR-X были предоставлены Немецким аэрокосмическим агентством (DLR) в рамках исследовательских проектов COA-1115 и COA-1538.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. *Боев А.Г., Матвеев А.Я.* Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиоп физика и радиоастрономия. 2005. Т. 10. № 2. С. 178–188.
3. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др.* Физические механизмы формирования

- аэрокосмических радиолокационных изображений океана // *Успехи физических наук*. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
4. *Гюль А. К.* Проблема загрязнения Каспийского моря. Баку: Муаллим Нешриййаты, 2003. 71 с.
 5. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
 6. *Ермаков С. А., Зуйкова Э. М., Салашин С. Г.* Трансформация спектров коротких ветровых волн в пленочных сликах // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*. 1987. Т. 23. № 7. С. 707–715.
 7. *Иванов А. Ю.* Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» // *Исслед. Земли из космоса*. 1997. № 6. С. 70–80.
 8. *Иванов А. Ю.* Слики и плёночные образования на космических радиолокационных изображениях // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 3. С. 73–96.
 9. *Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Затягалова В. В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // *Исслед. Земли из космоса*. 2007. № 2. С. 62–81.
 10. *Иванов А. Ю., Голубов Б. Н., Терлеева Н. В.* Сравнительный анализ распределения естественных нефтепроявлений в юго-западной части Каспийского моря по данным космической радиолокации с оценкой нефтегазоносности недр // *Исслед. Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 47–61.
 11. *Иванов А. Ю., Достовалов М. Ю., Синева А. А.* Определение параметров нефтяных загрязнений по данным космической поляризационной радиолокационной съемки в районе нефтепромыслов «Нефтяные Камни» в Каспийском море // *Исслед. Земли из космоса*. 2011. № 5. С. 31–44.
 12. *Кудрявцев В. Н., Иванова Н. А., Гушин Л. А., Ермаков С. А.* Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками / Препринт № 765 Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008. 34 с.
 13. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России // М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
 14. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Каримова С. С. и др.* Применение радиолокаторов RADARSAT-2 и TerraSAR-X для исследования гидродинамических процессов в океане // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 312–323.
 15. *Михайлов В. И.* Поверхностный микрослой Мирового океана: (гидрохимические и физические особенности). М.: Гидрометеиздат, 1992. 227 с.
 16. *Немировская И. А.* Нефть в океане. Загрязнение и природные потоки. М.: Научный мир, 2013. 428 с.
 17. *Синёва А. А.* Поляризационная радиолокация для обнаружения и идентификации пленочных загрязнений моря // *Тр. МФТИ*. 2014. Т. 6. № 3. С. 129–141.
 18. *Brekke C., Solberg A.* Oil spill detection by satellite remote sensing // *Remote Sens. Environ.* 2005. V. 95. № 1. P. 1–13.
 19. *Carpenter A.* European Maritime Safety Agency CleanSeaNet Activities Oil Pollution in the North Sea // *Oil Pollution in the North Sea / Ed. Carpenter A., The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer. 2015. P. 33–48. doi: 10.1007/698_2015_429.
 20. *Caulliez G., Guérin C. A.* Higher-order statistical analysis of short wind wave fields // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № C6. P. 1–14.
 21. *Churyumov A. N., Kravtsov Y. A., Lavrova O. Y. et al.* Signatures of resonant and non-resonant scattering mechanisms on radar images of internal waves // *Int. J. Remote Sens.* 2002. V. 23. № 20. P. 4341–4355.
 22. *Dreuillet Ph., Cantalloube H., Colin E. et al.* The ONERA RAMSES SAR: latest significant results and future developments // 2006 IEEE Radar Conference, IEEE2006. P. 1–7.
 23. *Espedal H. A., Johannessen O. M.* Detection of oil spills near offshore installations using Synthetic Aperture Radar (SAR) // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. № 11. P. 2141–2144.
 24. *Franceschetti G., Iodice A., Riccio D. et al.* SAR raw signal simulation of oil slicks in ocean environments // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40. № 9. P. 1935–1949.
 25. *Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. et al.* Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № C9. P. 18851–18866.
 26. *Guerin C.-A., Soriano G., Chapron B.* The weighted curvature approximation in scattering from sea surfaces // *Waves Random Media*. 2010. V. 20. № 3. P. 364–384.
 27. *Ivonin D. V., Ivanov A. Yu., Brekke C., Skrunes S.* Calibrated method for discriminating sea surface slicks using Radarsat-2 co-polarized SAR images. In *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. 2015. P. 3739–3742. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326636
 28. *Ivonin D. V., Skrunes S., Brekke C., Ivanov A. Y.* Interpreting sea surface slicks on the basis of the normalized radar cross-section model using Radarsat-2 copolarization dual-channel SAR images // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 6. P. 2748–2757.
 29. *Journal M.* CleanSeaNet. Unit C3. Satellite Based Monitoring Services // 17ème journée d'information

- du Cedre: La Détection des Pollutions accidentelles et des Rejets Illicites. Paris, 20 Mars 2012. URL: <http://wwz.cedre.fr/en/content/download/1661/16513/file/7-ensa-clean-sea-net-eng.pdf>
30. *Kudryavtsev V.N., Chapron B., Myasoedov A. G. et al.* On dual co-polarized SAR Measurements of the ocean surface // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2013. V. 10. № 4. P. 761–765.
 31. *Kudryavtsev V.N., Hauser D., Caudal G. et al.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface: 1. Background model // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C3. P. 2–24.
 32. *Li X. M., Lehner S.* Algorithm for sea surface wind retrieval from TerraSAR-X and TanDEM-X data // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2014. V. 52. № 5. C. 2928–2939.
 33. *MacDonald I.R., Garcia-Pineda O., Beet A. et al.* Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 2015. V. 120. P. 8364–8380. doi: 10.1002/2015JC011062.
 34. *MacDonald I.R., Redly J.F. Jr., Best S.E. et al.* Remote sensing inventory of active oil seeps and chemosynthetic communities in the northern Gulf of Mexico // *Hydrocarbon Migration and its Near-Surface Expression*, 1996. P. 27–37.
 35. *Marple L.S.* Digital Spectral Analysis: With Applications // Prentice Hall Signal Processing Series. 1987. 384 p.
 36. *Moldestad M.Ø., Schrader T.* ESSO BJR9: Ringhorne, Forseti og Balder; Egenskaper og Forvitring på Sjøen Relatert til Beredskap. SINTEF, Trondheim, Norway. Tech. Rep. STF66 A01137, 2002.
 37. *Nunziata F., Migliaccio M., Li X.* Sea Oil Slick Observation Using Hybrid-Polarity SAR Architecture // *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* 2015. V. 40. № 2. P. 426–439. doi: 10.1109/JOE.2014.2329424.
 38. *Rodrigues A.P.R.D.S.* CleanSeaNet: surveillance of sea-based oil spills by radar satellite images // Technical report no. SK-09/26. Department of Shipping and Marine Technology Chalmers University of Technology. SE-412 96 Gothenburg Sweden.— 2009. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/141265.pdf>.
 39. *Skrunes S., Brekke C., Eltoft T.* Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2014. V. 52. № 9. P. 5302–5319.
 40. *Skrunes S., Brekke C., Eltoft T. et al.* Comparing near coincident C- and X-band SAR acquisitions of marine oil spills // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2015. V. 53. № 4. P. 1958–1975.
 41. *Soloviev A., Lukas R.* The near-surface layer of the ocean: structure, dynamics and applications. Springer Science & Business Media, 2013. V. 48. P. 71–80.
 42. *Staples G., Touzi R.* The application of Radarsat-2 quad-polarized data for oil slick characterization // *In Proc. Int. Oil Spill Conference-2014.* V. 2014. № 1. P. 2242–2252.
 43. *TerraSAR-X Image Product Guide, Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery // Airbus Defense and Space: Issue 2.0, August 2014.* 24 p.
 44. *Topouzelis K., Karathanassi V., Pavlakis P., Rokos D.* Detection and discrimination between oil spills and look-alike phenomena through neural networks // *ISPRS J. Photogramm.* 2007. V. 62. № 4. P. 264–270.
 45. *Valenzuela G.* Scattering of electromagnetic waves from a tilted slightly rough surface // *Radio Sci.* 1968. V. 3. P. 1057–1066.

On Sea Surface Oil Film Classification Using TerraSar-X Radar Polarization Data

D.V. Ivonin, A. Yu. Ivanov

The results of application of the new polarization method proposed by Ivonin et al. (2016) for discrimination between mineral oil films (crude oil, its emulsion and petroleum products) and other films on the synthetic aperture radar (SAR) images of the sea surface are presented. The method is based on the calculation of the quantitative characteristic parameter for suppressing or increasing of the ratio of radio scattering signals of different physical nature: capillary waves of several centimeters, or breaking waves. TerraSAR-X co-polarized (VV/HH) SAR images are used. The data were collected in areas where there are regular slicks of known origin, namely, crude oil spills and oil seep slicks in the Gulf of Mexico and the Caspian Sea, and biogenic films in the Caspian Sea. The results of analysis of the TerraSAR-X SAR images with controlled spills of crude oil and emulsion in the North Sea were used for comparison. On the base of the analysis of 10 TerraSAR-X polarization images collected at incidence angles greater than 30° it is shown that the proposed allows using co-polarized SAR images to distinguishing slicks formed by mineral oils versus biogenic and other films, regardless of the area of observation and in a wide range of incidence angles.