

СТАТИСТИКА ПРОЯВЛЕНИЙ ПЛЕНОК ПАВ В АЗИАТСКИХ ОКРАИННЫХ МОРЯХ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ РСА СО СПУТНИКОВ ERS-1/2 И ENVISAT

Даркин Д.В., Митник Л.М., Дубина В.А.

*Тихоокеанский океанологический институт им В.И. Ильичева, ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
Тел.: +7 (4232) 312-854, E-mail: dvdarkin@poi.dvo.ru*

Проявление пленок поверхностно активных веществ (ПАВ) на изображениях, полученных РЛС с синтезированной апертурой (РСА) со спутников ERS-1/2 и Envisat, представляет большой интерес как для решения прикладных задач (мониторинг открытых районов океана и прибрежной зоны для обнаружения нефтяного загрязнения и вредоносного цветения водорослей - красных приливов), так и для исследований динамических явлений в океане (вихревые образования, внутренние волны, течения и др.). Вероятность проявления пленок на изображениях спутниковых РСА зависит как от природных факторов (скорость и направление ветра, наличие течений, фронтальных разделов и т.д.), так и от характеристик РСА и геометрии зондирования (частота, поляризация, уровень шумов прибора, угол и направление зондирования и др.).

В работе проводится статистический анализ характеристик пленок ПАВ на изображениях РСА азиатских окраинных морей. Наибольшее число изображений получено над Японским, Охотским и Желтым морями в рамках проектов ТОИ с Европейским космическим агентством. База изображений РСА включает более 300 прецизионных и сглаженных изображений ERS-1/2 SAR и Envisat ASAR с пространственным разрешением 12,5, 50, 100 и 150 м и более 3000 изображений с уменьшенным пространственным и радиометрическим разрешением (так называемых Quick Look - QL) изображений. Для детального анализа отобрано несколько изображений, на выделенных фрагментах которых зарегистрированы проявления антропогенных и природных пленок ПАВ. Структурные особенности проявлений пленок ПАВ на выбранных изображениях изучаются с помощью статистических методов. Сформулированы направления дальнейших исследований.

Введение

Интенсивное развитие экономики стран Азиатско-тихоокеанского региона сопровождается ростом потребления нефти и нефтепродуктов, увеличением объемов танкерных перевозок нефтепродуктов и, как следствие, - повышением вероятности экологических катастроф, к которым могут привести разливы нефти. Освоение новых районов добычи нефти на шельфе Сахалина, прокладка подводных нефтепроводов также увеличивают риск загрязнения окружающей среды сырой нефтью и нефтепродуктами.

В настоящее время дистанционное зондирование обладает необходимым арсеналом средств для мониторинга открытых районов океана и прибрежной зоны, в частности, для обнаружения нефтяного загрязнения. Спутниковые РЛС с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать изображения морской поверхности с высоким пространственным разрешением независимо от времени суток и облачности, и в последние годы все шире используется в задачах мониторинга океана и индикации нефтяного загрязнения. Кроме нефтяных разливов, на изображениях РСА морской поверхности регистрируются пленки ПАВ, связанные с повышенной продуктивностью вод, включая вредоносное цветение водорослей (красные приливы), промышленными прибрежными и речными стоками [1]. Пленки ПАВ способствуют также визуализации динамических явлений в океане: вихревых образований, внутренних волн, течений и др. Радиолокационные (РЛ) образы пленок ПАВ зависят от параметров океана и атмосферы и сильно изменчивы. Изучение изменчивости пленок ПАВ с помощью статистического анализа их численных характеристик позволило проводить классификацию пленок на натурные (биогенные) и антропогенные [2], что указывает на целесообразность использования и развития подобного подхода. В данной работе изучаются геометрические и структурные свойства проявлений пленок ПАВ на изображениях РСА. Изучение структурных особенностей пленок ПАВ проводится на основе статистических свойств элементарных структурных составляющих, которые образуют контуры проявлений пленок на изображениях РСА.

Исследования пленок ПАВ в европейских морях дистанционными методами осуществлялось в рамках нескольких международных программ, таких как Oceanides (<http://oceanides.jrc.cec.eu.int/>), DISMAR (<http://www.nersc.no/Projects/dismar/>), HABILE (<http://www.nersc.no/HABILE/>) при финансовой поддержке организаций Европейского союза. Основная направленность подобных проектов – мониторинг окружающей среды, контроль и наблюдение за нефтяным загрязнением акваторий. Данные дистанционного зондирования со спутников ERS-1/2, Envisat и RADARSAT использовались для экспертной оценки и алгоритмического анализа нефтяного загрязнения и получения статистических данных о местах и характере загрязнения. Валидация результатов работы алгоритмических приложений, создаваемых на основе спутниковых изображений РСА, проводилась с использованием данных самолетного зондирования.

Создание системы спутникового мониторинга азиатских окраинных морей, где риск нефтяного загрязнения возрастает, является требованием времени. Подготовительная работа по созданию такой системы проводится,

в частности, рабочей группой 4, созданной при центре действий NOWPAP, объединяющей исследовательские организации дальневосточного региона России, Японии, Кореи и Китая (<http://cearac.poi.dvo.ru>).

1. География и данные

В ходе проектов, выполняемых в лаборатории средств и методов спутниковой океанологии ТОИ ДВО РАН, был накоплен большой архив спутниковых изображений РСА, полученных над азиатскими окраинными морями (рис. 1). В архиве имеются более 300 прецизионных и сглаженных изображений ERS-1/2 SAR и Envisat ASAR с пространственным разрешением 12,5, 50, 100 и 150 м и более 3000 QL-изображений.



Рис. 1. География данных ПОИ по пленкам ПАВ для азиатских окраинных морей

Имеющийся архив позволил отобрать для исследования спутниковые изображения, на которых, по мнению экспертов, обнаружены пленки ПАВ как антропогенного, так и биогенного происхождения. Фрагменты этих изображений, выделенные для последующего анализа, приведены на рис. 2.

Фрагмент «а» (рис. 2 а) размером 25,6 x 25,6 км отображает биогенные пленки ПАВ в заливе Анива. Изображение РСА было получено 2 июня 2002 г. в 01:17 Гр со спутника ERS-2. Пространственное разрешение фрагмента 100 x 100 м.

Фрагмент «б» (рис. 2 б) размером 12,8 x 12,8 км отображает нефтяное загрязнение в заливе Петра Великого, Японское море. Изображение РСА было получено 23 марта 1999 г. в 13:26 Гр со спутника ERS-2. Пространственное разрешение фрагмента 50 x 50 м.

Фрагмент «в» (рис. 2 в) размером 12,8 x 12,8 км отображает биогенные пленки ПАВ в Восточно-Корейском заливе, Японское море. Изображение РСА было получено 18 августа 2002 г. в 02:11 Гр со спутника ERS-2. Пространственное разрешение фрагмента 50 x 50 м.

Между фрагментами «а» и «в» (биогенные пленки) и фрагментом «б» (нефтяное загрязнение) можно отметить существенную разницу в сложности структуры пленок.

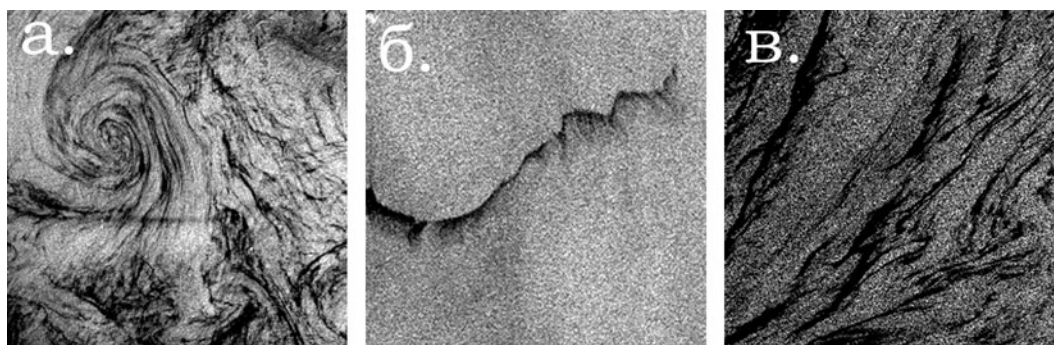


Рис. 2. Фрагменты изображений РСА, иллюстрирующие структурные особенности естественных и антропогенных пленок ПАВ.

Обработка информации

Статистические подходы в изучении пленок ПАВ (и в частности, нефтяного загрязнения) можно условно разделить на классические и современные. Цель классического подхода состоит в получении статистических оценок площадей, объемов, форм и других характеристик пленок, зарегистрированных в определенных районах исследуемой акватории, и в оценке вероятности обнаружения этих пленок в зависимости от сезона, погодных условий и др. (см., например, [1, 3, 4]). Такие исследования необходимы для организации мониторинга загрязнения и, например, были получены для Балтийского и Северного морей в проекте Clean Seas (<http://www.satobsys.co.uk/CSeas/>), а также для Средиземного моря (<http://ramses.esrin.esa.it/>). Статистические оценки входят составной частью и в алгоритмы, разрабатываемые для автоматического и полуавтоматического обнаружения загрязнений [1, 5]. В современных подходах под статистикой и статистическими оценками понимается статистика различных численных характеристик изучаемого явления (фрагмента изображения). Подобный подход, наряду с классическим, использован в алгоритме, реализованном для обнаружения нефтяного загрязнения на изображениях РСА [2].

В наших исследованиях при изучении структурных особенностей поверхностных пленок мы также ориентировались на вычисление и статистический анализ (в классическом понимании этого слова) их численных характеристик. На рис. 3. изображены принципиальные блоки алгоритма, который предназначен для вычисления структурных характеристик. Все блоки были реализованы в среде Matlab, кроме блока векторизации, который является условно бесплатной программой AlgoLab Raster to Vector Conversion Toolkit (<http://www.algolab.com>).

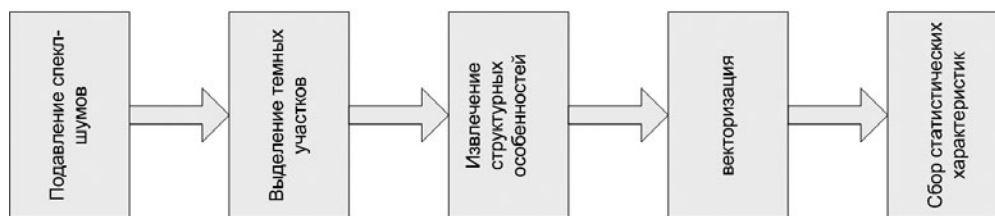


Рис. 3. Принципиальная схема сбора статистических характеристик структуры пленок ПАВ.

Предложенный алгоритм был применен к фрагментам изображений РСА, на которых выделяются различные структуры (пятна, прямые и криволинейные полосы и системы полос темного тона), характеризующиеся отрицательным РЛ-контрастом относительно фона. Предварительная обработка включала в себя фильтрацию для снижения уровня спекл-шумов. В частности, к фрагментам применялись мультифрактальное подавление шумов [6] и мягкая пороговая классификация в вейвлет-спектре [7]. На следующем этапе происходило выделение темных участков. Поверхностные пленки характеризуются пониженным уровнем рассеянного назад РЛ-сигнала, так как подавляют мелкомаштабное волнение, ответственное за обратное рассеяние. Эта процедура используется практически во всех предложенных ранее алгоритмах (см., например, [2, 5, 8]). В рассматриваемой схеме темные зоны выделялись путем квантования амплитуды сигнала на несколько уровней. Наличие нескольких уровней квантования позволяет выделить области пониженного РЛ-рассеяния для последующего изучения их структуры. Квантованные уровни, содержащие наименьшую амплитуду сигнала, которые в дальнейшем используются в алгоритме, представляют собой бинарную маску. Структурные особенности участков пониженного РЛ-рассеяния находятся с помощью морфологических операций извлечения периметра и скелетизации, в результате чего выделяются периметр и скелет структуры каждого участка. Периметр характеризует границу структуры темных участков, а скелет структуры характеризует в некотором роде «каркас», вокруг которого можно расположить структуру. Полученные в ходе вычислений периметр и скелет, толщиной в один пиксель, подаются на вход блока векторизации. Векторизация позволяет представить периметр и скелет в виде набора контуров, каждый из которых состоит из элементарных векторов. Элементарный вектор определяется двумя парами координат, соответствующих начальной и конечной точкам вектора. В точках пересечения нескольких линий скелета или периметра алгоритм векторизации создает два отдельных контура.

В результате векторизации, структура РЛ-контраста трансформировалась в набор точек на двумерной плоскости, сгруппированных в множества. На рис. 4 визуализированы контуры скелета проявлений пленок ПАВ на плоскости.

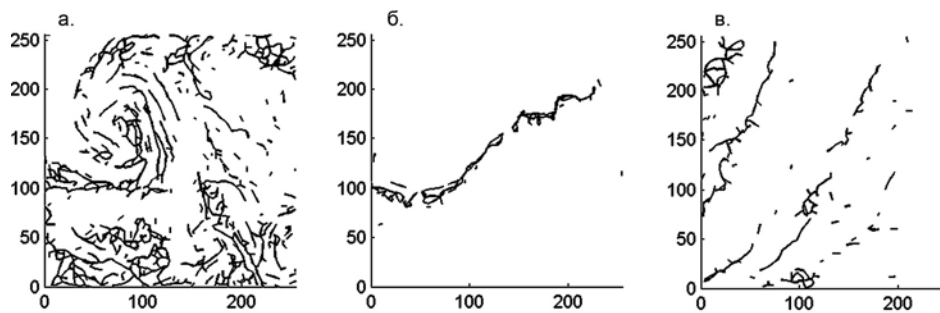


Рис. 4. Скелет структуры пленок ПАВ.

2. Экспериментальные результаты

Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмами текстурного анализа выходит за рамки данной работы. Тем не менее, следует подчеркнуть, что и развиваемый подход позволяет анализировать структуру с использованием методов аналитической геометрии, в том числе измерять длины и направления векторов, углы между векторами и т.п. Оценка эффективности такого подхода требует специального рассмотрения, однако уже в ходе предварительных исследований изображений РСА с помощью предложенного алгоритма были извлечены такие численные характеристики как количество элементарных векторов в контуре, средняя длина контура, полная длина контура, вариация длин, среднее направление контура и угол поворота контура вокруг своей оси. Так, структура на рис. 4а состоит из 569 контуров, структура на рис. 4б - из 99 контуров, а структура на рис. 4в - из 171 контура. Среднее количество элементарных векторов в контурах структур изображено на рис 5. Как видно из гистограмм, среднее количество элементарных векторов для всех трех фрагментов примерно одинаково и составляет 2 точки. Не исключено, что столь малая величина обусловлена, по крайней мере, частично спекл-помехами, а также дефектами векторизации, откуда следует необходимость разработки специализированных алгоритмов векторизации.

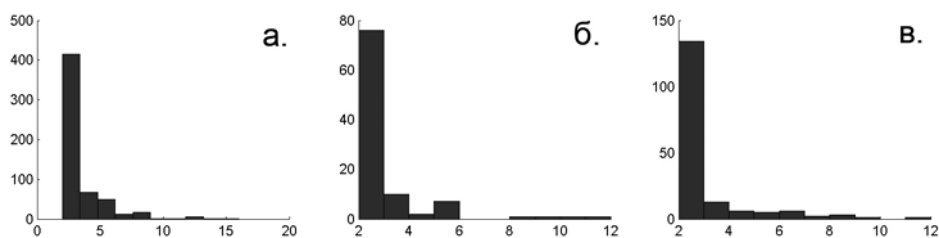


Рис 5. Среднее количество элементарных векторов в контурах, описывающих структуру пленок на рис 4.

Еще одним численным показателем, изучаемым в ходе эксперимента, была средняя длина элементарного вектора. Показатели средней длины элементарных векторов представлены на рис. 6. Средние длины элементарных векторов достаточно изменчивы. Длина наибольшего количества векторов варьирует в диапазоне от 3 до 6 пикселей, что, учитывая размер пикселей выбранных фрагментов изображений, составляет 300-600 м для фрагмента «а» (рис. 6а) и 150–300 м для фрагментов «б» и «в» (рис. 6 б и в, соответственно).

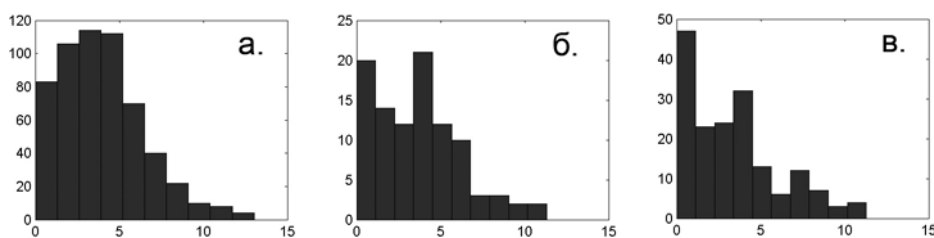


Рис. 6. Средняя длина элементарных векторов в контурах, описывающих структуру пленок на рис 4.

Среднее направление для каждого контура, представленное на рис. 7, вычислялось следующим образом. Для каждого элементарного вектора определялся угол, который он образует с вертикальной осью координат. Среднее направление контура вычислялось как математическое ожидание направлений всех векторов, составляющих контур.

Соответствующие гистограммы дают представление о среднем направлении изучаемой структуры. Так, например, на рис. 7а пик приходится на направления от -27° до 27° , то-есть самое большее количество элементов структуры имеют вертикальную направленность. Наибольшее количество элементарных элементов структуры фрагмента «б» имеет ориентацию в диапазоне от 0° до 50° , что может быть визуально подтверждено на изображении пленки ПАВ, представленной на рис. 2б. Для фрагмента «в» наибольшее коли-

чество векторов имеют ориентацию от -9° до 27° , что с одной стороны, прослеживается на рис. 2в, но, с другой стороны, может быть обусловлено дефектами векторизации.

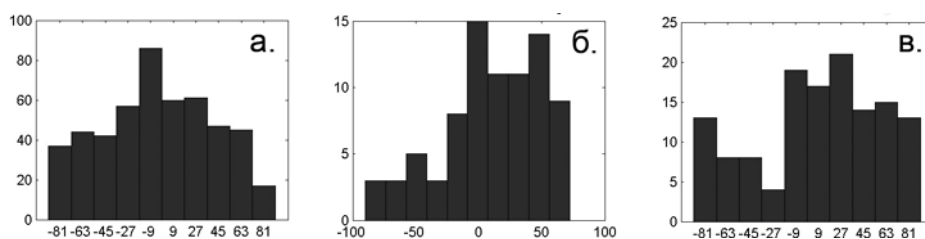


Рис. 7. Среднее направление контуров, описывающих структуру пленок на рис 4.

Выводы

Из результатов данного предварительного исследования следует, что предложенная схема позволяет изучать статистические особенности структуры пленок ПАВ на основе таких характеристик как длина и направление. На примере выбранных фрагментов можно видеть, как сложность структуры пленок ПАВ может быть охарактеризована численными показателями такими как: количество контуров, среднее количество векторов в контуре, средняя длина и среднее направление контуров. В дальнейшем целесообразно рассмотреть и более сложные характеристики такие, как, например, взаимное расположение.

Изменчивость численных характеристик структуры должна быть изучена на репрезентативном множестве фрагментов изображений, содержащих пленки ПАВ. Для уверенной классификации пленок на природные и антропогенные следует использовать данные лидарного самолетного зондирования.

Некоторые из блоков алгоритма, представленного на рис. 3, требуют модификации и/или замены. В частности, из анализа гистограмм (рис. 6) следует, что наличие большого количества небольших по протяженности элементов структуры, связано, весьма вероятно, с влиянием спекл-шума, вклад которых в изображения должен быть снижен.

Использованный в работе пакет векторизации AlgoLab (<http://www.algolab.com>) ориентирован на векторизацию изображений, имеющих более регулярные и простые структуры в виде прямых линий, окружностей и т.п. (чертежи, карты и т.п.). Его применение к изображениям РСА привело к тому, что шкала ориентации направлений векторов имеет очень большую дискретность (рис. 7). Отсюда очевидна необходимость разработки специальных алгоритмов векторизации, учитывающих специфику, как изображений РСА, так и изучаемых явлений.

Следует также подчеркнуть необходимость привлечения данные о направлении и силе ветра. Это, в частности, позволит корректно идентифицировать природу темных областей на изображениях РСА.

Данная работа выполнена в рамках международного проекта INTAS No 03-51-4987 и международного проекта OBE.2775, поддержанного Европейским космическим агентством и Международной Астрономической Федерацией. Исследование было частично поддержано грантами ДВО РАН в 2004 и 2005 гг.

Литература

1. *Gade M.* Satellite remote sensing of coastal discharge plumes in Europe // Proc. First Intern. Confer. Studying Land Use Effects in Coastal Zones with Remote Sensing and GIS. 13-16 August 2003, Kemer/Antalya, Turkey. P. 128-135.
2. *Solberg A., Dokken S., Solberg R.* Automatic detection of oil spills in Envisat, Radarsat and ERS SAR images // Proceedings of IGARSS. 2003. Vol. IV. p. 2747-2749
3. *Gade M., Redondo J.M., Platonov A.* The Clean Seas Project - Final Report, with support of EC DG XII/D contract ENV4-CT96-0334, 1999, 75 pp.
4. *Gade M., Scholz J., von Viebahn C.* On the detectability of marine oil pollution in European marginal waters by means of ERS SAR imagery // Proceedings of IGARSS. 2000. P. 2510-2512.
5. *Espedal H., Wahl T.* Satellite SAR oil spill detection using wind history information. // Intern. J. Remote Sensing. 1999. Vol. 20. No. 1. P. 49-65.
6. *Vehel J., Guiheneuf B.* Multifractal Image Denoising // Proc. of Scandinavian Conference on Image Analysis. Lappeenranta, Finland. 1997.
7. *Donoho D.* Denoising by soft thresholding. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1994. Vol. 41. No.3. P. 613-627.
8. *Samad R., Mansor S.* Detection of oil spill pollution using Radarsat SAR imagery. // Proc. Asian Conference on Remote Sensing. Katmandu, Nepal. 2002.