Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей

М.И. Митягина, О.Ю. Лаврова

Институт космических исследований РАН 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 E-mail: mityag@iki.rssi.ru

В работе обобщаются результаты радиолокационных наблюдений морской поверхности, проводимых в российском секторе Черного моря с целью выявления загрязнений морской поверхности нефтью и нефтепродуктами, а также проявлений биогенных и антропогенных пленок поверхностно-активных веществ. Основу исследования составили радиолокационные данные высокого разрешения, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), установленных на искусственных спутниках земли Envisat и ERS-2 европейского космического агентства. Проанализированы пространственные и временные изменчивости проявлений различных типов пленочных загрязнений на радиолокационных изображениях морской поверхности. Выявлены районы, подверженные наиболее частому загрязнению нефтепродуктами. Сделаны выводы о связи динамики пленок биогенного происхождения в прибрежной зоне с прибрежной циркуляцией и интенсивностью речных выносов.

Введение

Побережье Краснодарского края является уникальным природным комплексом, являющимся в настоящее время единственной курортной зоной России на Черном море. В то же время этот район испытывает чудовищное антропогенное воздействие, обусловленное наличием крупных портов, обширными сельскохозяйственными угодьями, увеличением территорий застройки. Большой вклад в загрязнение прибрежной зоны вносят отслужившие свой срок очистные сооружения, построены на Черноморском побережье. Основными зонами риска являются районы, прилегающие к городам Новороссийск, Геленджик, Туапсе и Сочи, места якорных стоянок, где сбрасываются в море балластные воды. Таким образом, назрела жизненно важная необходимость оперативного мониторинга всей российской части прибрежной зоны Черного и Азовского морей. Вследствие больших размеров акваторий данная задача может быть решена только методами дистанционного зондирования из космоса [1].

В период с апреля по октябрь 2006 г. лабораторией аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН совместно с ГУ «НИЦ «Планета» был выполнен пилотный проект по космическому мониторингу состояния вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей.

Постановка задачи и средства получения информации

Следует отметить, что задачи по контролю состояния и выявлению загрязнения морской среды необходимо решать в тесной взаимосвязи, поскольку загрязнения, попадая в морскую среду, становятся частью этой среды и развиваются по тем же законам, по которым развивается и сама морская среда.

В ходе выполнения мониторинга состояния и загрязнения морской поверхности в тестовом районе методами спутниковой радиолокации выявлялись пленочные загрязнения трех основных типов, обусловленные:

- о сбросами с судов вод, содержащих нефтепродукты;
- о выносом речных вод, содержащих пленочные загрязнения смешанного антропогенного и естественного происхождения;

о повышенной биологической продуктивностью, в том числе с жизненными циклами хлорофилла и активным цветением водорослей.

Основным средством спутникового контроля состояния морской поверхности и оценки степени загрязненности, являлись радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), установленные на ИСЗ *ERS-2* и *Envisat*, обладающие следующими физическими и техническими особенностями:

- о возможность круглосуточной работы благодаря использованию активного зондирования, причём характеристики изображения от времени суток не зависят;
- о возможность всепогодной съёмки, т.к. атмосфера практически прозрачна для используемого PCA микроволнового излучения;
- о диэлектрические свойства воды в микроволновом диапазоне однородны, что позволяет считать вариации рассеянного сигнала связанными только с геометрическими параметрами возмущений и тем самым облегчает интерпретацию снимков;
- о высокое пространственное разрешение современных космических PCA позволяет с необходимой точностью детектировать пленочные загрязнения даже относительно небольшого размера и оценивать их параметры.

Пленочное загрязнение, присутствующее на морской поверхности, резко меняет поверхностное натяжение воды, что приводит к гашению поверхностного волнения сантиметрового диапазона [2, 3]. В результате пленочные загрязнения проявляются на РЛИ в виде тёмных пятен на более светлом фоне [4].

Следует отметить, что применительно к данной проблеме PCA обладают также и рядом недостатков, главный из которых состоит в том, что видимое на радиолокационном изображении (РЛИ) выглаживание поверхностного волнения может быть вызвано как пленочными загрязнениями различной природы, так и другими причинами (резкое ослабление приповерхностного ветра, цветение водорослей с образованием плёнки на поверхности, поверхностные проявления различных атмосферных и океанических процессов и т.д.) [5]. Поэтому для интерпретации радиолокационных данных необходимо привлекать различные сопутствующие измерения (ветер, течения, температура, содержание биомассы и др.), а также широко использовать косвенные признаки, позволяющие конкретизировать происхождение того или иного пятна (форма, размеры, вид границы, текстура, близость возможных источников загрязнения и др.).

Еще одним недостатком РСА для задачи выявления пленочных загрязнений является ограничение по погодным условиям — пленочные загрязнения можно наблюдать в диапазоне скорости ветра от 2 до 10 м/с [6, 7]. При более слабом ветре мощность фонового рассеянного радиосигнала от чистой поверхности недостаточна для того, чтобы отличить его от ещё более слабого сигнала от поверхности, покрытой плёнкой. При более сильном ветре волнение сантиметрового диапазона усиливается настолько, что плёнка, покрывающая морскую поверхность, или быстро разрушается или уже не в состоянии оказать сколько-нибудь заметное для радиолокатора воздействие на шероховатость поверхности.

Проявление на РЛИ сбросов нефтепродуктов с судов

Подавляющее большинство антропогенных загрязнений морской поверхности, выявленных в ходе спутникового мониторинга прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей, представляют собой утечки и сбросы с судов нефтепродуктов и содержащих их жидкостей [8]. Катастрофические разливы нефтепродуктов, прежде всего, при авариях танкеров, происходят, к счастью, довольно редко, и, как правило, не остаются без внимания прессы и общественности. Гораздо чаще загрязнение поверхности моря происходит при рутинных операциях на судах [9]. Основными источниками загрязнений, поступающих с судов, являются промывочные, балластные, а также льяльные воды из помещений грузовых

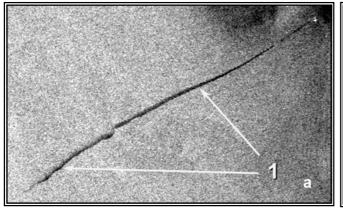
насосов. Как выяснилось, подобные незаконные сбросы настолько распространены, что в совокупности наносят гораздо больший ущерб экосистеме Черного моря, чем отдельные катастрофические разливы нефти.

Одним из главных характерных признаков, помогающих выявить нефтяное пятно на РЛИ, является его геометрическая форма. С этой точки зрения, сбросы с кораблей можно условно разделить на два класса — сбросы с судов во время их движения и сбросы с неподвижных судов. В обоих случаях на РЛИ пятна выглядят «инородными телами» на фоне общей структуры изображения.

При сбросе с судна, находящегося в движении, пятно нефтепродуктов в отсутствие сильного ветра и волнения, проявляется на РЛИ в виде узкой полосы понижения сигнала, повторяющей маршрут движения корабля. Чаще всего, это узкая прямая полоса или полоса с изломом. Если сброс происходил во время радиолокационной съемки или непосредственно перед ней, то полоса сужается в сторону более свежей её части, и зачастую удается идентифицировать и судно-виновника сброса. Суда могут сбрасывать нефтепродукты на протяжении нескольких десятков километров своего пути.

На рис. 1а приведен пример «идеального» свежего сброса. Радиолокационная съемка проводилась в условиях умеренного ветра и небольшого волнения. Сужение полосы к северовостоку свидетельствует о том, что судно, сбрасывающее нефтепродукты, движется в этом направлении. Яркая точка на северо-восточном конце полосы показывает текущее положение судна. Полоса загрязнений тянется на 32 км.

Нередко суда производят многократные сбросы загрязненных вод в движении. На рис. 16 представлен пример такого явления. Прерывистый след за судном, движущимся на югозапад, тянется на 30 км, очевидно, сброс осуществлялся в несколько этапов. Общая площадь загрязнений на момент радиолокационной съемки составляет порядка 2,5 км².



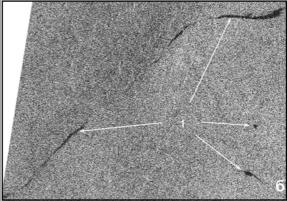


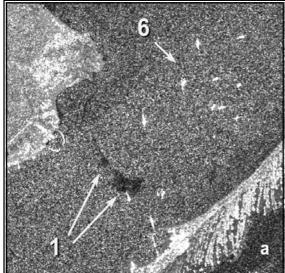
Рис. 1. Фрагменты Envisat ASAR изображений выявляющих следы сбросов с кораблей вод, содержащих нефтепродукты. Изображения получены: а) 19.09.2006 19:19 GMT, б) 17.04.2006. 07:32 GMT

При сбросе с неподвижного судна, в отсутствие ветра и волнения, растекание нефти происходит более или менее равномерно во все стороны, поэтому пятно принимает округлую форму (См. рис. 2a).

Ветер существенно влияет на внутреннюю структуру нефтяного разлива, как напрямую, так и опосредованно. Под непосредственным воздействием ветра пленка нефти перемещается, а нефть аккумулируется на подветренной стороне пятна. Кроме того, приповерхностный ветер возбуждает динамические процессы в верхнем слое воды. Наиболее распространенный из таких процессов – циркуляция Ленгмюра – вытянутые по ветру вихри перемежающихся направлений. Движение воды в вихрях происходит в плоскости, перпендикулярной направлению скорости ветра, что приводит к возникновению на

поверхности моря перемежающихся зон дивергенции и конвергенции. В зонах конвергенции концентрируются загрязнения. Пятно приобретает характерный вид «гребенки». Пример

такой трансформации полосы сброса с движущегося судна приведен на рис. 2б (11.07.2006).



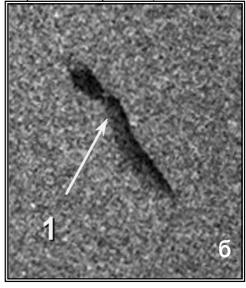


Рис.2. Фрагменты Envisat ASAR изображений выявляющих трансформацию пятен нефтяных загрязнений. Изображения получены: a) 02.08.2006 19:28 GMT. б) 11.07.2006. 19:19 GMT

За период наблюдений с апреля по октябрь было выявлено около 50 случаев нефтяных загрязнений морской поверхности в результате судовых сбросов, при этом индивидуальная площадь пятен варьировалась в пределах от 0,1 до 13 км². Совокупная площадь выявленных за весь период наблюдения загрязнений, содержащих нефтепродукты, составила примерно 119 км². Анализ пространственного распределения нефтяных загрязнений показал, что сбросы с судов, идентифицированных по радиолокационным данным, концентрируются вдоль основных судоходных трасс.

По скоплению пятен выявлены районы наиболее частого сброса загрязненных нефтепродуктами балластных вод и перегрузки нефтепродуктов. Частые нефтяные загрязнения наблюдались в окрестностях трех крупных нефтяных терминалов, расположенных в портах Новороссийск и Туапсе, а также у мыса Железный Рог.

Радиолокационные проявления биогенных пленок на морской поверхности

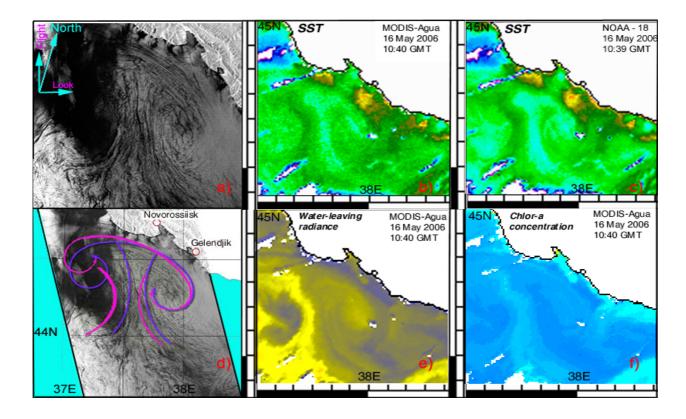
Биогенные пленки - результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом, фито и зоопланктона, а также бактерий. Эти пленки образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов, и не могут считаться загрязнениями в прямом смысле слова, однако их наличие в прибрежных акваториях является крайне неблагоприятным фактором для индустрии туризма и отдыха. Количество пленок биогенного происхождения существенно возрастает в «вспышек» цветения фитопланктона. Органические результате локальных сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 6-7 м/с. После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики [10]. При интерпретации радиолокационных изображений главная трудность заключается в различении пятен нефтяных пленок и пленок биогенных поверхностно активных веществ на морской поверхности.

Регулярные радиолокационные наблюдения показали, что органические пленки естественного происхождения повсеместно встречаются на обширных площадях морской поверхности, преимущественно в теплое время года и в областях повышенной биологической активности, особенно в прибрежной зоне. Пленки естественного происхождения очень чувствительны к взаимодействию с поверхностными течениями и принимают геометрическую форму, отвечающую локальной структуре циркуляции. Благодаря этому их можно идентифицировать на радиолокационных изображениях. Под влиянием динамики вод пленки биогенного происхождения располагаются вдоль линий тока поверхностных течений, описывая на поверхности моря вихревые структуры, фронты, кильватерные следы судов и др. В частности, благодаря присутствию на поверхности пленок поверхностно активных веществ, средства радиолокации позволяют регистрировать вихревые структуры. Вовлекаясь в орбитальные движения жидкости, пленки естественного происхождения бы «прорисовывают» вихри на радиолокационных изображениях, особенно в условиях слабого приповерхностного ветра. Иллюстрацией может служить следующий пример.

На РЛИ, полученном 15.05.06 в 19:10 GMT при помощи сенсора *ASAR* ИСЗ *Envisat* была идентифицирована дипольная пара, состоящая из антициклонического и циклонического вихрей и завершающей их струи, находящаяся в ранней стадии формирования На момент получения РЛИ центр дипольной пары имел примерные координаты 37°35'E, 44°15'N. Струя, завершающая диполь, имела длину 110-120 км и была отклонена от меридионального направления примерно на 10° к востоку. Радиолокационная съемка проведена в условиях слабого юго-западного ветра, имевшего скорость 2-3 м/сек, и при слабом поверхностном волнении. Относительная пространственная равномерность поля ветра и его небольшая амплитуда, а также наличие на морской поверхности биогенных пленок способствовали отображению структуры конвергентно-дивергентных зон на РЛИ. На ИК-изображениях *AVHRR* ИСЗ серии *NOAA* и на цветосинтезированных изображениях аппаратуры *MODIS* ИСЗ *Aqua*, полученных в тот же день, 15.05.06, этот диполь был слабо различим, однако более отчетливо проявился на следующие сутки - 16.05.06 (Рис. 3).

Грибовидные структуры, совпадающие по форме с диполем, выявленными на РЛИ от 15.05.06, имеют высокие температурные контрасты, зарегистрированными ИК-датчиками сенсоров AVHRR and MODIS. Контрасты в полях концентрации хлорофилла-А и диффузного ослабления солнечного излучения оказались более размытыми и слабо выраженными. Можно предположить, что наблюдаемая вихревая структура является существенно трехмерной. Подобные динамические вихревые структуры вызывают не только горизонтальное, но и вертикальное перемешивание вод, осуществляя перенос между более глубокими водами открытого моря и прибрежной зоной. Как можно видеть, максимальные концентрации хлорофилла примерно соответствуют конвергентным зонам грибовидных структур, выраженным на радиолокационном изображении в виде темных нитевидных полос, в которых происходит подавление ряби из-за концентрации пленок биогенных поверхностно-активных веществ.

В описанном примере разнородные спутниковые данные оказались коррелированными сложным образом, но в достаточно сильной степени. Рассмотренную ситуации можно расценивать как достаточно характерную с точки зрения решения задачи интерпретации спутниковой информации и получения практически значимых результатов и выводов.



Puc. 3.

- а) Грибовидное течение, визуализируемое сликами поверхностно-активных веществ. Изображение, полученное 15.05.06 на VV-поляризации $Envisat\ ASAR$;
- b) поле поверхностной температуры, восстановленное из данных MODIS Aqua; c) поле поверхностной температуры, восстановленное из данных AVHRR NOAA от 16.05.06; d) Схематическое изображение развития вихревого диполя (сиреневый ASAR Envisat; розовый MODIS Aqua; e) карта WLR, восстановленная из данных MODIS Aqua от 16 мая 2006; f) Концентрация хлорофилла—а восстановленная из данных MODIS Aqua от 16 мая 2006

Радиолокационные проявления выносов рек

Следует отметить, что на прибрежном участке акватории динамика загрязнений нередко определяется прибрежной циркуляцией и интенсивностью канализационных стоков и выносов рек. Основными источниками загрязнения здесь являются нефтесодержащие смеси, хозяйственные, бытовые и канализационные стоки курортных городов, поверхностный сток с территории, а также относительно частые аварии на хозяйственных объектах, расположенных в пределах водосборных бассейнов рек [11].

Совместный анализ радиолокационных данных и цветосинтезированных изображений спектрорадиометров MODIS ИСЗ Aqua/Terra показал, что сток рек, увеличивающийся после интенсивных осадков на юго-западном склоне Северного Кавказа, значительно влияет на концентрацию и распределение пленочных загрязнений в прибрежной полосе моря. Относительно небольшие реки - как Псоу, Мзымта, Сочи, Шахе, Дагомыс, Туапсе, Вулан и другие, помимо взвешенного вещества, мусора и объёмных загрязнений, выносят в море большое количество нефтепродуктов и синтетических поверхностно-активных веществ. Концентрируясь в зонах конвергенции, эти пленочные загрязнения, отмечают границу наибольшего распространения речных вод в прибрежной полосе, отчетливо различимую на спутниковых изображениях (см. рис. 4).

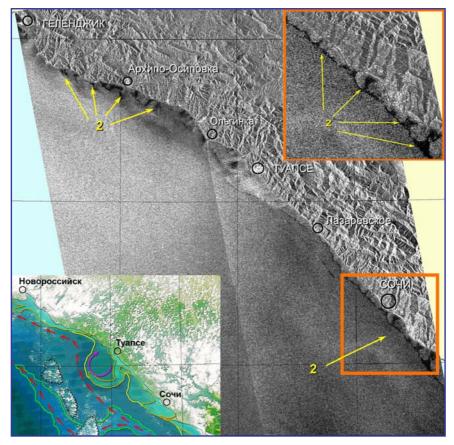


Рис.4. Радиолокационное изображение прибрежной полосы северо-восточной части черного моря, полученное 11.07.2006 в 19:19 GMT. Отчетливо выделяются выносы рек и ручьев. На врезке показана карта состояния и циркуляции водной среды, совмещенная с цветосинтезированным изображением MODIS Aqua

Заключение

Построенные на основе данных спутниковой радиолокации морской поверхности карты распределения различных типов пленочных загрязнений в прибрежной зоне являются полноценным информационным продуктом. Они позволяют получить пространственные распределение загрязнений, восстановить их параметры, а также выявить связь между загрязнениями и их источниками.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 06-05-65177-а и 06-05-08072-офи), а также международных проектов INTAS 06-1000025-9091 и Black Sea Scientific Network (Contract # 022868). Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством (ЕКА) в рамках проекта Bear 2775.

Литература

- 1. *Булатов М.Г., Ю.А. Кравцов, А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов*, Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик, 1999-2002) // М.: Книжный дом "Университет", 2004. 135 с.
- 2. *Ermakov S.A., Salashin S.G., Panchenko A.R.* Film slicks on the sea surface and some mechanisms of their formation // Dyn. Atmos. Oceans. 1992. V.16(3-4). P. 279-304.
- 3. *Jenkins A., Jakobs S.* Wave damping by a thin layer of viscous fluid // Phys. Fluids. 1997. V.9(5). P. 1256-1254.
- 4. Булатов М.Г., Ю.А. Кравцов, О.Ю. Лаврова, К.Ц. Литовченко, М.И. Митягина, М.Д. Раев, К.Д. Сабинин, Ю.Г. Трохимовский, А.Н. Чурюмов, И.В. Шуган, Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук, 2003. 173 (1). С. 69-87.
- 5. *Espedal, H.* Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne SAR // Proc. IGARSS'99. 1999. V.3. P.1478– 1480.
- 6. *Gade, M., Scholz, J., & von Viebahn, C.* On the detectability of marine oil pollution in European marginal waters by means of ERS SAR imagery // Proc. IGARSS'00. 2000. V.6. P.2510–2512.
- 7. *Girard-Ardhuin F., G. Mercier and R. Garello.* Oil slick detection by SAR imagery: potential and limitation // OCEANS 2003. Proceedings. 2003. V.1. P.164 169.
- 8. *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.
- 9. Fingas, M. The basics of oil spill cleanup. 2001. Lewis Publishers.
- 10. *Alpers, W. and H. Huhnerfuss,* The damping of ocean waves by surface films: A new look at an old problem // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94(C). P. 6251–6265.
- 11. Синицына Н.Н., Субботин А.А., Савоськин В.М. и др., Влияние загрязняющих стоков на морские экологические системы Черного моря и поиск методов их расчета и контроля // Сб. трудов научн. конф. «Диагноз состояния экосистемы Чёрного моря и зоны сопряжения суши и моря». 1997. С.81-85.