

Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна

В.А. Кровотынцев ¹, О.Ю. Лаврова ², М.И. Митягина ², А.Г. Островский ³

¹*НИЦ "Планета"*

123242, Москва, Большой Предтеченский пер., д. 7

²*Институт космических исследований РАН*

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

³*Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова*

117851, Москва, Нахимовский проспект, 36

В докладе обобщаются результаты комплексного спутникового мониторинга состояния вод прибрежной полосы российского сектора Азовского и Черного морей. Описывается технология спутникового контроля загрязнений в прибрежной зоне, базирующаяся на совместном использовании разнородных данных спутникового зондирования морской поверхности, получаемых в квазиреальном режиме времени в различных частотных диапазонах и с разных носителей и позволяющая получать оперативные оценки экологической обстановки на основе регионального космического мониторинга. Обсуждаются методы обработки спутниковых данных и технологии их использования, которые необходимо создать для повышения эффективности работ по оперативной оценке экологического состояния прибрежной зоны российских морей. На основе опыта успешного функционирования системы оперативного спутникового мониторинга проводится анализ роли информации, полученной методами дистанционного зондирования морской поверхности из космоса.

Введение

Мониторинг поверхности океана является одной из важнейших задач выявления антропогенного воздействия на природную среду. В последние годы резко возросло загрязнение прибрежной зоны российских морей нефтепродуктами, что вызвано, прежде всего, увеличением объемов перевозок морским транспортом (в частности перевозка экспортируемой нефти водным путем), вводом в эксплуатацию новых нефтяных терминалов и морских буровых установок, выносом реками вредных веществ, сбрасываемых промышленными предприятиями, бурным развитием неконтролируемого туристического бизнеса, с которым не справляется сложившаяся инфраструктура. Вследствие больших размеров акваторий, над которыми должен осуществляться постоянный мониторинг, данная задача может быть решена только методами дистанционного зондирования из космоса.

С появлением в последние годы спутниковых систем, имеющих достаточно высокое пространственное разрешение и обеспечивающих ежедневное поступление данных по любому району наблюдения, создание принципиально новых технологий мониторинга состояния и загрязнения морской поверхности превратилось в важную первоочередную задачу.

Задачи комплексного спутникового мониторинга морской поверхности в зонах потенциальных загрязнений

В апреле - октябре 2006 г. были проведены работы по дистанционному контролю состояния природной среды и выявлению антропогенных и биогенных загрязнений в российском секторе Азовского и Черного морей. Постоянно действующий комплексный спутниковый мониторинг выбранных районов интереса был направлен на решение следующих задач:

1. Оперативное картирование параметров состояния и загрязнений (береговых, судовых и биогенных) водной среды; обобщение полученных результатов еженедельно и за месяц;
2. анализ метеорологической обстановки и ее влияния на распространение загрязнений;

3. изучение закономерностей прибрежной циркуляции и их влияния на распространение загрязнений;
4. выявление различных ситуаций распределения загрязнений в прибрежных водах.

Задачи 2-4 находятся в тесной взаимосвязи, так как загрязнения, попадая в морскую среду, становятся частью этой среды и развиваются вместе с ней под воздействием метеорологических и гидрологических факторов.

Сенсоры, используемые для оперативной оценки экологической обстановки на основе регионального космического мониторинга

Успешное решение перечисленных выше задач базировалось на оперативном приеме, обработке и совместном анализе космических изображений в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра, полученных с помощью различных приборов дистанционной диагностики, установленных на различных спутниках, специализированных на дистанционном зондировании Земли. Ключевым моментом являлось комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и размерности. Список сенсоров и носителей приводится ниже:

- Радиолокаторы с синтезированной апертурой ASAR ИСЗ *Envisat*, SAR ИСЗ *ERS-2*, SAR ИСЗ *RADARSAT*, пространственное разрешение 12,5-75 м;
- ИК-радиометров AVHRR ИСЗ серии *NOAA*; спектральный канал 10,3 -11,3 мкм, разрешение на местности около 1 км;
- Сканирующие спектрорадиометры MODIS ИСЗ *Terra/Aqua*; спектральные каналы: 0,622-0,672 мкм, 0,546-0,556 мкм и 0,438 -0, 448 мкм, разрешение на местности 250 м;
- Альтиметр-высотометр ИСЗ *TOPEX/Poseidon*, *ERS-2*;
- СВЧ-скаттерометр ИСЗ *QuikSCAT*.

Краткая характеристика методов функционирования системы оперативного спутникового мониторинга

Адекватная тематическая обработка и последующий совместный анализ всей совокупности доступных данных дистанционного зондирования морской поверхности позволяли проводить регулярные следующие регулярные наблюдения:

- за циркуляцией, динамикой ОЧТ, образованием, положением, перемещением ПАВ и других вихревых структур, в основном, в прибрежной зоне Черного моря (по данным ИСЗ *Монитор-Э*, *Aqua*, *Terra* и *NOAA*, *TOPEX/Poseidon*, *ERS-2*);
- за распространением речного стока в прибрежной зоне Черного и Азовского морей, с которым в прибрежную зону поступает большое количество взвеси, бытовых и промышленных отходов и загрязнений (по данным ИСЗ *Монитор-Э*, *Aqua* и *Terra*);
- за загрязнениями морской поверхности нефтью и нефтепродуктами и прочими антропогенными загрязнениями в Черном море (по данным ИСЗ *ERS-2* и *Envisat*);
- за появлением биогенных пленок поверхностно-активных веществ, вследствие цветения фитопланктона в Черном и Азовском морях (по данным ИСЗ *ERS-2* и *Envisat*);
- за явлениями, проявляющимися на морской поверхности в поле цвета или температуры моря и влияющими на перенос взвеси и загрязнений, например, за температурными фронтами и апвеллингами (по данным ИСЗ *Монитор-Э*, *Aqua*, *Terra* и *NOAA*);
- за распределением хлорофилла-А (по данным ИСЗ *Aqua*);
- за скоростью приводного ветра (по данным ИСЗ *QuickScat*);
- за колебаниями уровня моря (по данным ИСЗ *TOPEX/Poseidon* и *JASON*).

В ходе мониторинга состояния природной среды российского сектора Азовского и Черного морей в 2006 г. было получено, обработано и проанализировано **более 1100** космических изображений в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра с 9 спутников, специализированных на дистанционном зондировании Земли. При анализе гидрометеорологической обстановки использовались данные наземных наблюдений с метеорологических станций Сочи, Туапсе, Новороссийск, Анапа, Керчь и Ростов-на-Дону, а

также результаты обработки спутниковых данных, полученные в предшествующие периоды наблюдений. На основе совместного анализа данных, полученных сенсорами с различных носителей в различном спектральном диапазоне, и гидрометеорологической информации регулярно выпускались 13 видов оперативной спутниковой информационной продукции, включая карты загрязнения моря пленками поверхностно-активных веществ, распределения фитопланктона и водорослей, концентрации хлорофилла-а, температуры поверхности моря и др., а также обобщенные карты-схемы состояния и загрязнения морской среды (см. рис. 1-2).

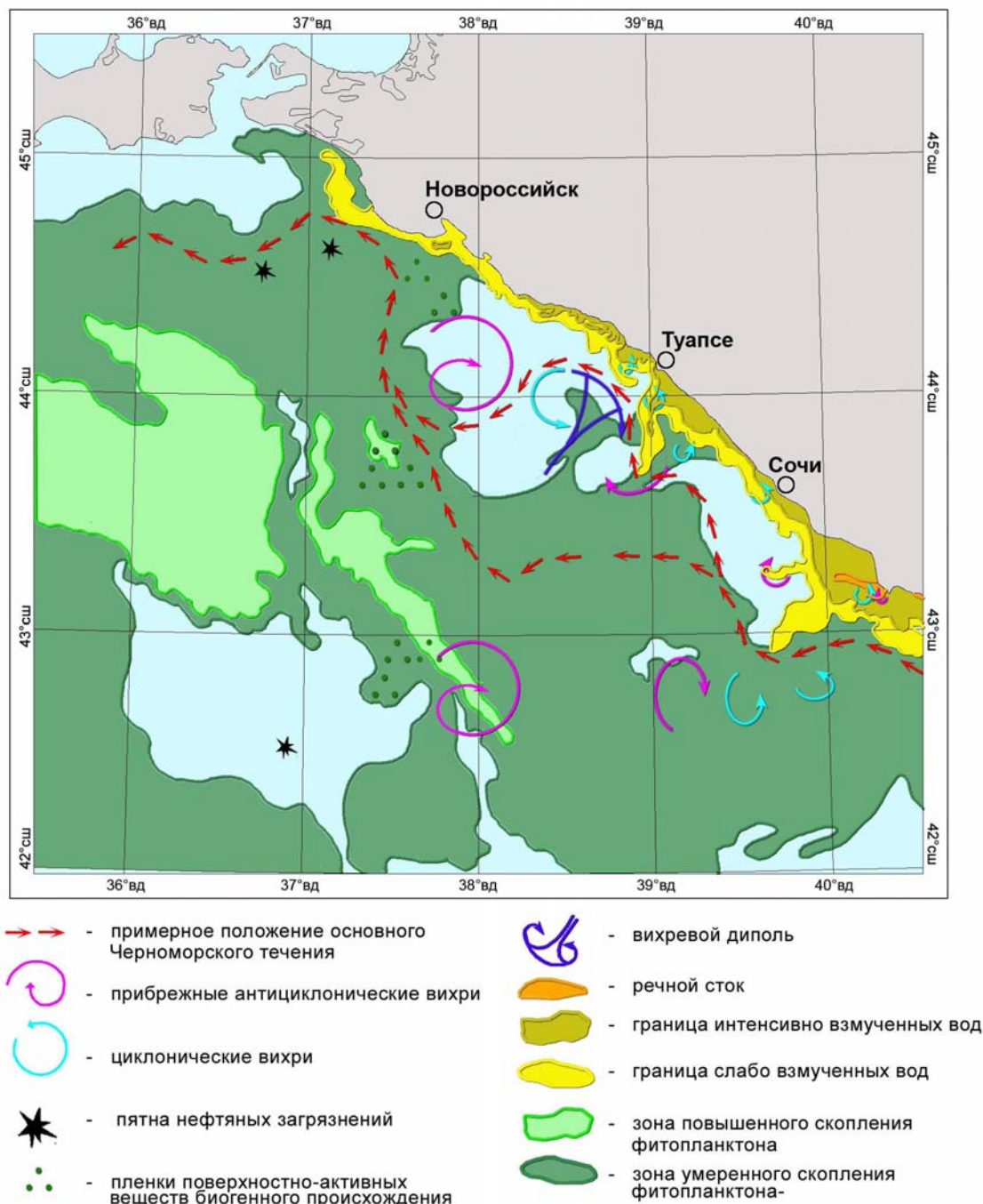


Рис. 1. Карта циркуляции и состояния водной среды, совмещенная с цветосинтезированным изображением. ИСЗ AQUA MODIS северо-восточной части Черного моря. 16.05.06. 10:40, разрешение 250 м. Спектральные каналы R: 0,620-0,670 мкм (1); G: 0,545-0,565 мкм (4); B: 0,459-0,479 мкм (3)

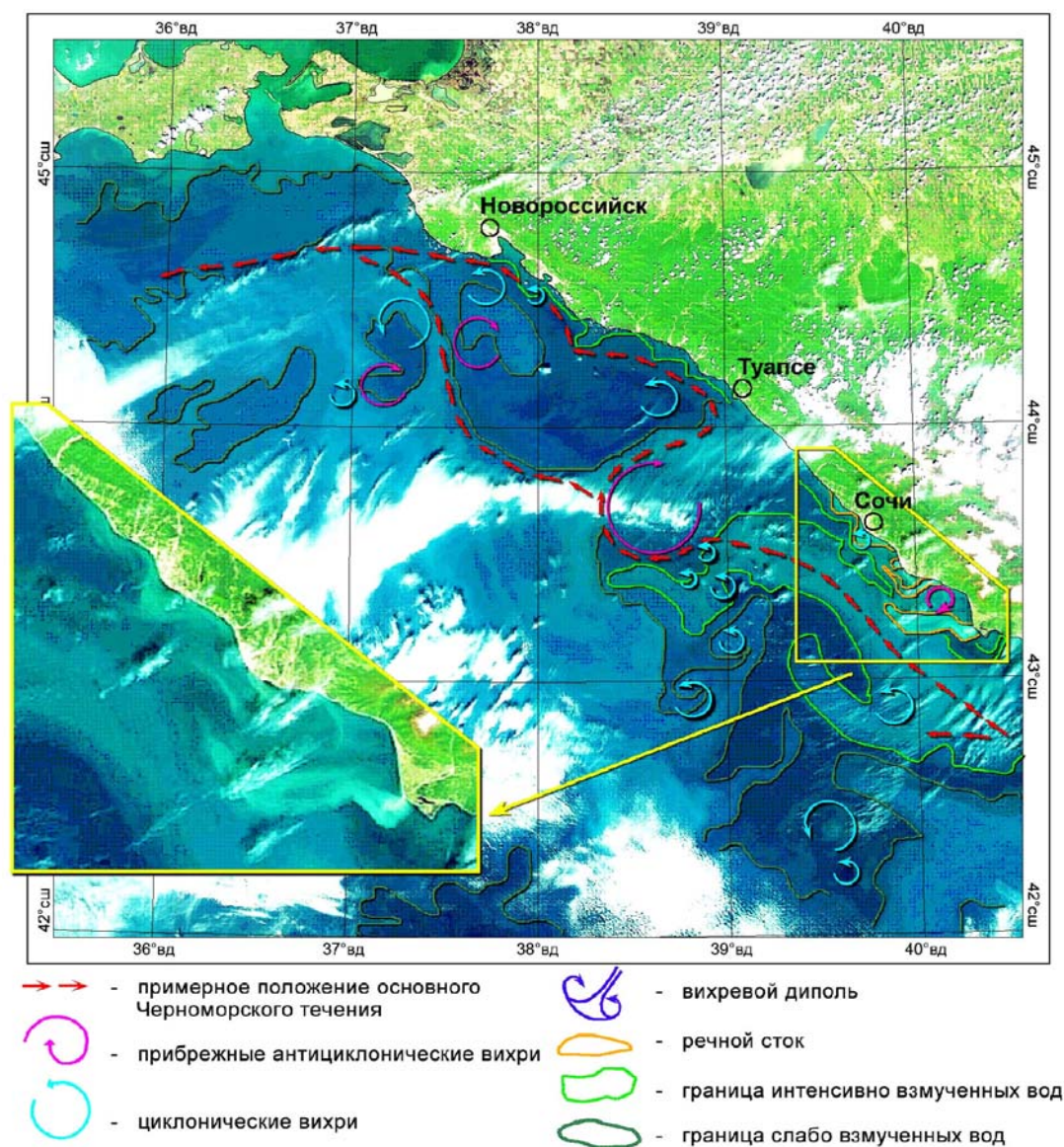


Рис. 2. Обобщенная карта схема состояния и загрязнения водной среды в российском секторе Черного моря в первой декаде июня 2006 г.

Основные результаты работ по спутниковому мониторингу загрязнений (биогенных, судовых и береговых) прибрежных акваторий российского сектора Черного и Азовского морей

Типы распределения загрязнений

Показано, что в российском секторе Черного моря имеют место три типа распределения загрязнений в прибрежных водах, определяемых циркуляцией водной среды.

Первый тип: Формируется при интенсивных ветрах северных направлений, основное Черноморское течение (ОЧТ) *устойчиво* и прижато к берегу. В прибрежной акватории российского сектора Черного моря происходит *накопление* и вдольбереговой *перенос* загрязняющих веществ.

Второй тип: Формируется вследствие ослабления скорости или изменения направления ветра, ОЧТ *неустойчиво*, удалено от берега, может распадаться на несколько ветвей, меандрирует, образуются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ). Загрязняющие вещества в прибрежной акватории распределены *неравномерно*. Часть их переносится поперек ОЧТ, за счет вентиляции ПАВ, другая часть аккумулируется внутри ПАВ.

Третий тип: Формируется после продолжительных периодов слабых ветров (штилей), ОЧТ *ослаблено*, прибрежная ветвь ОЧТ отсутствует на протяженных участках кавказского побережья, вблизи берега образуются крупные ПАВ, *блокирующие* вдольбереговой перенос, на шельфе появляются субмезомасштабные циклонические вихри, способствующие *очищению* прибрежных вод.

Сведения о преобладании различных типов циркуляции вод за период наблюдения 2006 г. представлены в таблице 1.

Таблица 1. Типы циркуляции вод прибрежной зоны Черного моря

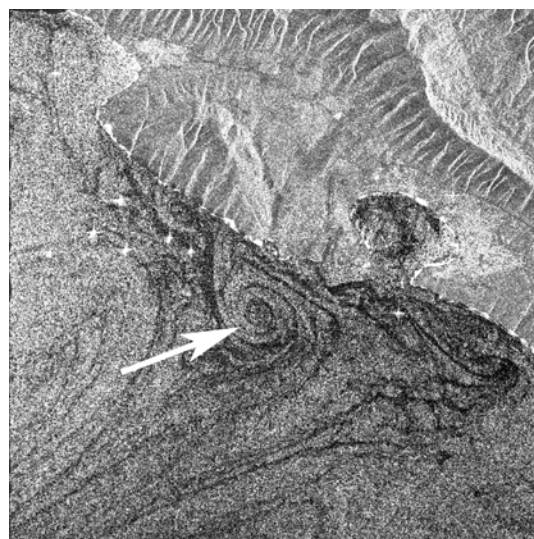
Месяц/декада	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
1 декада	2	2	2	1	1	3	2
2 декада	2	2	2	2	2	1	1
3 декада	3	3	2	1	3	3	2

Мелкомасштабная циркуляция

Установлено, что в периоды ослабления ОЧТ в прибрежной зоне Черного моря появляется множество *мелких вихрей* с размерами менее 10 км и временем жизни от нескольких *часов* до нескольких *суток*. Они образуются в зоне сильных сдвигов скорости на периферии прибрежного вдольберегового течения, при резкой перемене ветрового воздействия, после кратковременного усиления речного стока в устьях рек. Суммарный вклад этих вихрей в перенос загрязняющих веществ и очищение вод *соизмерим* с вкладом, вносимым ОЧТ и крупными ПАВ. Данный вид циркуляции вод можно определить только по данным спутниковой радиолокации. На рис. 3 а,б приведены фрагменты *ASAR Envisat* изображений, на которых отчетливо выделяются два циклонические вихри размерами менее 5 км.



а)



б)

Рис. 3. а) Фрагмент *ASAR Envisat* изображения (25х25 км), полученного 15.08.06. Два циклонических вихря с диаметрами 3,75 км (А) и 3 км (В)
 б) Фрагмент *ASAR Envisat* изображения (25х25 км), полученного от 03.08.06. Циклонический вихрь с диаметром 2,5 км

Экстремальные гидрометеорологические явления

По результатам совместного анализа спутниковых и наземных данных был обнаружен ряд экстремальных гидрометеорологических явлений, которые повлияли на динамику вод, распространение загрязнений и на курортологическую обстановку в целом. Определен масштаб экстремальных явлений. Было отмечено 5 случаев проявления новороссийской бory, два из которых стали причиной возникновения стонных явлений в северо-восточной части российского сектора Черного моря. В конце июня интенсивный апвеллинг (подъем холодных глубинных вод к поверхности моря) у кавказского побережья, привел к резкому до 16-17°C понижению температуры поверхности моря, последствия которого сказывались до конца июня в прибрежной зоне от г. Туапсе до южной морской границы России. В результате ливневых дождей существенно ухудшилась экологическая обстановка в прибрежной зоне Черного моря в конце мая, в первой половине июля, в начале сентября и в октябре 2006 г.

Биогенные загрязнения

Обобщая результаты анализа спутниковых данных, можно утверждать, что форма, концентрация и местоположение биогенных поверхностных загрязнений существенно зависят от динамики водной среды:

- В зонах конвергенции под действием течений, приводного ветра и волн концентрируются плавающий мусор, пены и пленки загрязнений.
- В циклонических вихрях поверхностные загрязнения проявляются на периферии вихря.
- В вихревых диполях помимо полосы загрязнений полосы загрязнений по внешнему периметру головки диполя наблюдается скопление загрязняющих веществ по краям ножи.
- В прибрежных антициклонических вихрях наблюдаются скопления загрязняющих веществ в его спиралевидных затылках.

Анализ спутниковых снимков позволяет выделить основные мезомасштабные структуры, определяющие поле течений в изучаемом районе. Отображение конвергентных позволяет выделить сложную структуру вихревых образований и струй.

19.06.06 две съемки сенсором *ASAR* ИСЗ *Envisat* были проведены с интервалом 11 часов. На радиолокационном изображении, зарегистрированном в 07: 52 GMT зафиксирована ранняя стадия развития вихревого диполя (рис. 4а). Линейные размеры диполя составляют 66 км (ширина) на 62 км (длина). На момент получения второго изображения, 19:10 GMT грибовидный вихрь, отмеченный на утреннем снимке, заметно увеличился в размерах до 92 км (ширина) на 78 км (длина), его ось совершила небольшой поворот по часовой стрелке (рис. 4б). Анализ последовательных снимков позволяет построить пространственное распределение скоростей течений и прогнозировать возможное перемещение загрязнений (рис. 4в). Рассчитанная скорость перемещения циклонической составляющей диполя составляет 0.05-0.1 м/сек на, антициклонической – 0,2-0,3 м/сек в юго-восточном направлении.

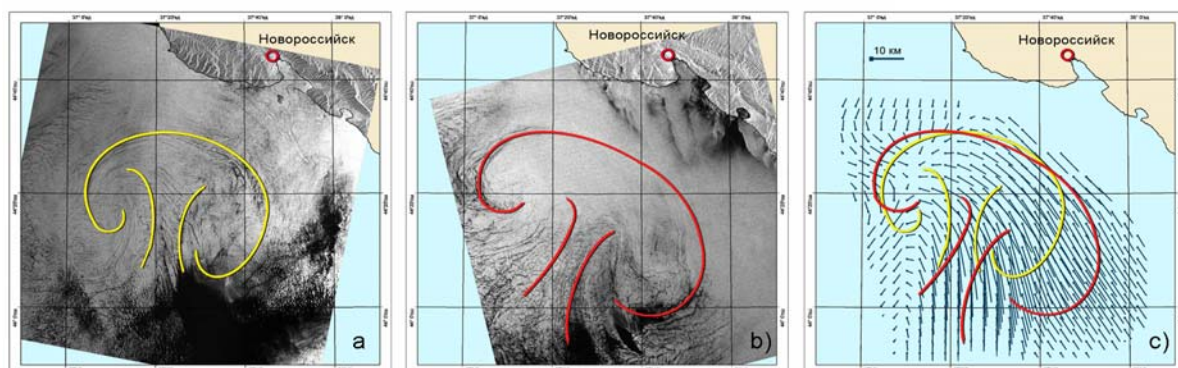


Рис. 4. Пример определения скорости и направления перемещения биогенных загрязнений под действием вихревого диполя (по данным двух радиолокационных изображений, полученных с интервалом 11 часов)
а) ИСЗ *Envisat*, *ASAR* 19.06.2006. 07:52 GMT;
б) ИСЗ *Envisat*, *ASAR* 19.06.2006. 19:10 GMT;
в) карта-схема перемещения вихревого диполя

Судовые загрязнения

Систематизация спутниковых данных по загрязнению моря нефтепродуктами, сброшенными с проходящих судов, позволила выявить **районы** наиболее частого **сброса** вдоль судоходных трасс в п. Новороссийск и п. Туапсе, а также на подходе к нефтяному терминалу мыс Железный Рог. На рис. 5 приведен радиолокационного изображения ИСЗ *Envisat*, *ASAR* участка прибрежной акватории Феодосия – Керчь – Анапа – Геленджик и результат его дешифрирования.

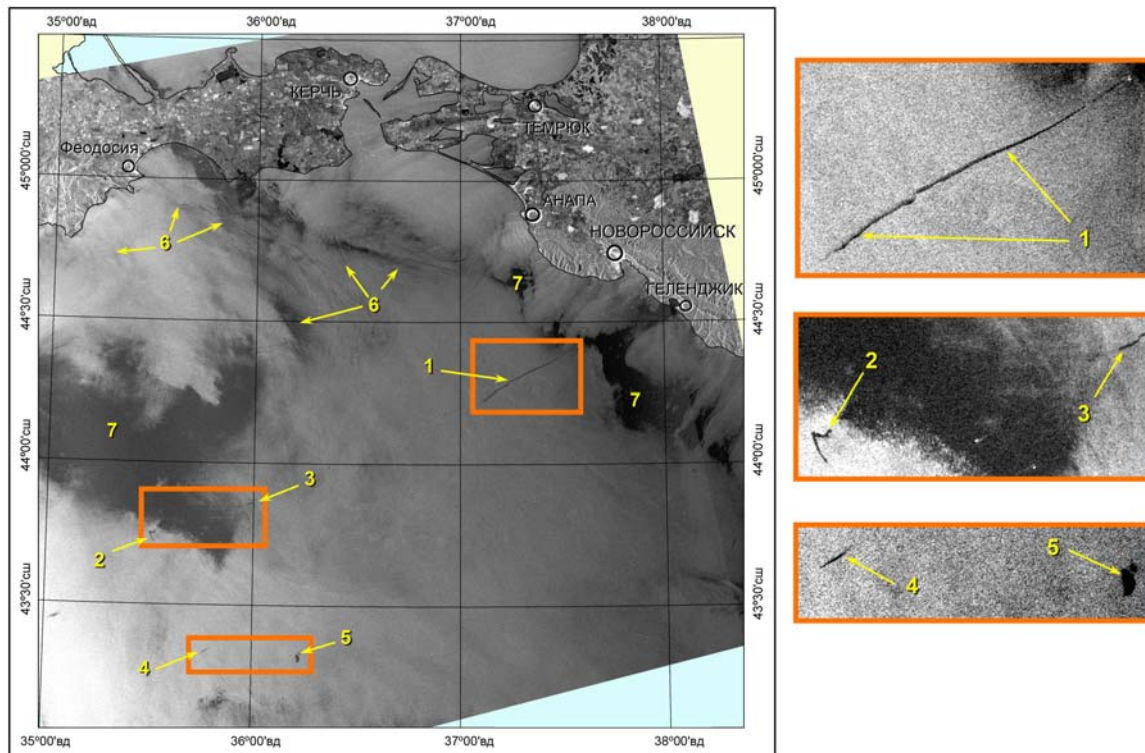


Рис. 5. ИСЗ *Envisat*, *ASAR*, разрешение 75 м. 19.09.2006 19:19 GMT.

1, 2, 3, 4, 5 – пленки нефтяных загрязнений с судов площади нефтяных загрязнений: 1 – 9,2 км²; 2 – 1,6 км²; 3 – 1,2 км²; 4 – 0,5 км²; 5 – 3,5 км²

6 – пленки биогенных загрязнений вдоль линий тока поверхностных течений,

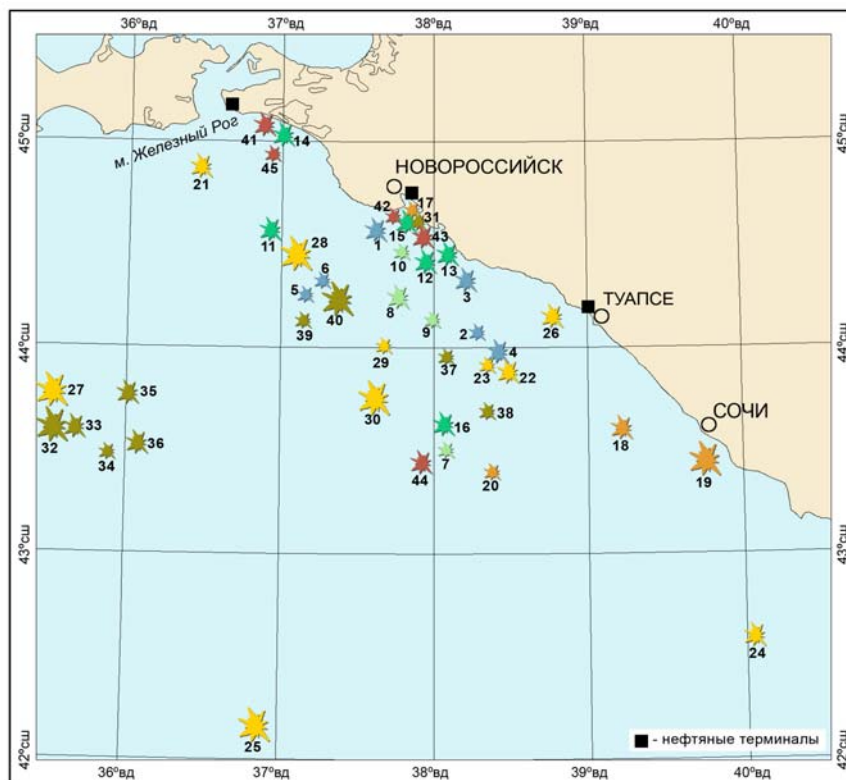
7 – области ветрового затишья

Самые крупные нефтяные разливы были обнаружены в августе, а самое большое их количество – в сентябре 2006 г.

Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования данных спутниковой радиолокации высокого разрешения, представлена на рис. 6.

Загрязнения береговыми стоками

Установлено, что, в период выпадения **ливневых** осадков в предгорьях Кавказа, антропогенные загрязнения (бытовые и промышленные отходы, нефтепродукты, удобрения и др.), поступающие со всего водосбора в море с речным стоком, **многократно** возрастают. Антропогенные загрязнения усиливаются потоками грязи, с подтапливаемых площадей. Особенно это касается горных рек с **незарегулированным** стоком (Мзымта, Шахе и др.). В этот период в прибрежных акваториях, примыкающих к устьям рек, по спутниковым данным наблюдается существенное увеличение зон распространения внутриводной взвеси, появление локальных вспышек цветения фитопланктона, увеличение количества плавающего мусора, пены, поверхностно-активных веществ (включая пленки нефтепродуктов). Усиление речного стока горных рек носит **кратковременный** характер (2-3 суток), но именно в этот период происходят самые **масштабные** загрязнения моря.



Даты нефтяных разливов - с указанием их площади (в кв.км):

апрель (10)*		август (14)*	
★	1 - 07.04.06 - 2,0	★	21 - 02.08.06 - 1,1
★	2 - 07.04.06 - 1,0	★	22 - 03.08.06 - 2,0
★	3 - 13.04.06 - 2,0	★	23 - 03.08.06 - 0,5
★	4 - 17.04.06 - 2,3	★	24 - 03.08.06 - 2,8
★	5 - 23.04.06 - 0,1	★	25 - 06.08.06 - 13,0
★	6 - 23.04.06 - 0,2	★	26 - 09.08.06 - 4,4
май (12)*		★	27 - 12.08.06 - 5,2
★	7 - 09.05.06 - 0,6	★	28 - 22.08.06 - 12,0
★	8 - 12.05.06 - 1,3	★	29 - 22.08.06 - 1,0
★	9 - 25.05.06 - 0,7	★	30 - 28.08.06 - 6,4
★	10 - 31.05.06 - 0,8	сентябрь (11)*	
июнь (17)*		★	31 - 04.09.06 - 0,8
★	11 - 03.06.06 - 3,3	★	32 - 16.09.06 - 6,5
★	12 - 07.06.06 - 1,5	★	33 - 19.09.06 - 1,6
★	13 - 16.06.06 - 1,2	★	34 - 19.09.06 - 0,5
★	14 - 19.06.06 - 2,8	★	35 - 19.09.06 - 1,2
★	15 - 19.06.06 - 1,4	★	36 - 19.09.06 - 3,5
★	16 - 29.06.06 - 1,4	★	37 - 19.09.06 - 0,7
июль (16)*		★	38 - 19.09.06 - 0,8
★	17 - 02.07.06 - 0,2	★	39 - 19.09.06 - 0,2
★	18 - 11.07.06 - 4,0	★	40 - 19.09.06 - 9,2
★	19 - 11.07.06 - 9,0	октябрь (8)*	
★	20 - 14.07.06 - 0,1	★	41 - 02.10.06 - 2,7
		★	42 - 09.10.06 - 0,1
		★	43 - 09.10.06 - 2,7
		★	44 - 09.10.06 - 2,9
		★	45 - 30.10.06 - 1,0

* - в скобках указано количество радиолокационных снимков, обработанных за месяц

Рис. 6. Обобщенная карта-схема нефтяных загрязнений российского сектора Черного моря, составленная на основе дешифрирования спутниковых данных

Особенности загрязнения Азовского моря

В Азовском море по данным спутниковых наблюдений были определены районы **повышенного** содержания загрязняющих веществ, к которым относятся северо-восточная часть Таганрогского залива, а также Ейский и Бейсугский лиманы. Было также установлено, что более **чистые воды** находятся в южной и юго-восточной части Азовского моря, что объясняется поступлением в этот район, в результате водообмена через Керченский пролив, относительно чистых черноморских вод.

Выводы

1. **Оперативный** спутниковый мониторинг позволяет осуществлять картографирование динамических характеристик и параметров загрязнения водной среды, определять типы и масштабы загрязнений, отслеживать пути их миграции, наблюдать механизмы самоочищения вод.

2. **Многолетний** спутниковый мониторинг позволит выявлять и анализировать **типовые ситуации** распределения загрязнений в прибрежных водах, определять **новые** элементы циркуляции вод, осуществляющие перенос загрязнений и очищение от них водной среды. Выявленные **закономерности** динамики распределения загрязнений способствуют повышению достоверности картографирования экологической обстановки, в том числе прогнозирования динамики распространения загрязнений. Однако накопленные к настоящему времени ряды спутниковых данных еще не достаточны для исчерпывающего изучения проблемы загрязнения моря, в том числе в условиях сложной гидрометеорологической обстановки.

Благодарности

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.