

Оперативный спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения юго-восточной части Балтийского моря

А.Г. Костяной¹, К.Ц. Литовченко², О.Ю. Лаврова³, М.И. Митягина³,
Т.Ю. Бочарова³, С.В. Станичный⁴, Д.М. Соловьев⁴, С.А. Лебедев⁵, А.М. Сирота⁶

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

117997 Москва, Нахимовский пр., 36

E-mail: kostianoy@online.ru

² *Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения*

³ *Институт космических исследований РАН*

⁴ *Морской гидрофизический институт НАНУ*

⁵ *Геофизический центр РАН*

⁶ *Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии*

В июне 2003 года ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» инициировало пилотный проект, направленный на организацию комплексного мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики в связи с предстоящим началом (в марте 2004 г.) добычи нефти на месторождении «Кравцовское» (Д-6), расположенном на континентальном шельфе Российской Федерации. В июне 2004 года был организован оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики в качестве важной компоненты контроля экологического состояния окружающей среды. Он основан на ежедневном приеме и анализе разнообразной спутниковой информации (AVHRR NOAA, MODIS, TOPEX/Poseidon, Jason-1, ENVISAT ASAR и RADARSAT SAR) о температуре поверхности моря (ТПМ), уровне моря, концентрации хлорофилла, мезомасштабной динамике вод, ветре и волнах, а также о нефтяном загрязнении поверхности моря. На 230 радиолокационных изображениях (РЛИ) ASAR ENVISAT разрешением 75 м и 17 изображениях SAR RADARSAT разрешением 25 м, полученных в оперативном режиме за 18 месяцев, обнаружено 274 нефтяных пятна. Интерактивная численная модель Seatrack Web SMHI Шведского института метеорологии и гидрологии использовалась для прогноза дрейфа (1) всех больших нефтяных пятен, обнаруженных на РЛИ юго-восточной части Балтийского моря, и (2) виртуальных (модельных) нефтяных пятен с платформы Д-6.

Введение

В последние годы в Балтийском море был построен ряд новых нефтяных терминалов, что сопровождается ростом транспортировки нефти судами и, соответственно, риском аварий. По статистике, в Мировом океане транспортировка является причиной 45% нефтяного загрязнения океана, в то время как добыча нефти на шельфе - только 2%. Ежедневно в Балтийском море находится около 2000 больших кораблей и танкеров. Таким образом, судоходство, включая транспортировку и перевалку нефти на терминалах, оказывает основное негативное влияние на морскую окружающую среду и береговую зону Балтийского моря. Сброс нефти и нефтепродуктов с судов представляет собой значительную угрозу для морских экосистем. Такие сбросы и утечки могут возникать при штатной эксплуатации, во время аварий или быть умышленными. По оценке Финского института окружающей среды (2004, <http://www.ymparisto.fi/>), общее ежегодное количество нефтяных пятен в Балтийском море, возникших в результате эксплуатации судов, составляет около десяти тысяч.

Одной из основных задач экологического мониторинга Балтийского моря является оперативное обнаружения нефтяных загрязнений на поверхности моря воздушными или спутниковыми средствами, определение характеристик нефтяных пятен, установление источников загрязнения и прогноз вероятных траекторий дрейфа пятен. Мониторинг нефтяных загрязнений в Средиземном, Северном и Балтийском морях обычно ведется с помощью специально оборудованных самолетов, кораблей и спутников. Морские и авиационные средства наблюдений малочисленны и достаточно дорогостоящи, кроме того, они обычно

ограничены световым днем и требуют хороших погодных условий. Радиолокационные спутниковые изображения водной поверхности могут существенно помочь в обнаружении нефтяных пятен на большой акватории и нацелить воздушные или морские средства на конкретные районы для детальных исследований.

Нефтяные пленки подавляют короткие гравитационно-капиллярные волны и локально видоизменяют шероховатость морской поверхности. Различия в обратно рассеянном сигнале от поверхностей покрытых пленкой и чистых акваторий позволяют радиолокатору определять нефтяные пятна. Радары с синтезированной апертурой имеют преимущества перед оптическими приборами, установленными на самолетах, поскольку дают данные по большой акватории, вне зависимости от облачности и освещенности (день/ночь). Этот тип приборов в настоящее время находится на спутниках ENVISAT и ERS-2 Европейского космического агентства и RADARSAT Канадского космического агентства.

Спутник ENVISAT был запущен Европейским космическим агентством в марте 2002 года. Оперативные системы, которые включают 10 приборов, разрабатывались для мониторинга океанов, льда, суши и атмосферы. ENVISAT имеет 35-ти суточный цикл повторяемости пролетов по своим трассам, но благодаря широкой полосе захвата многих его приборов, он имеет возможность наблюдать любую точку на поверхности Земли с периодичностью от нескольких часов до нескольких суток. Радиолокатор ASAR (Advanced Synthetic-Aperture Radar) используется для мониторинга нефтяных пятен и льда на поверхности моря, измерений различных океанских явлений (течений, фронтов, вихрей, внутренних волн), определения местоположения судов, поиска нефтегазовых месторождений и других целей. Пользователями этой спутниковой информации являются береговая охрана, национальные агентства по охране окружающей среды, нефтяные, судоходные, рыболовные и страховые компании, а также другие организации.

Спутниковый мониторинг

С 1993 года в российском секторе юго-восточной Балтики и в Финском заливе не выполнялись регулярные авиационные наблюдения нефтяных пятен. В 2003 году ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» инициировало пилотный проект комплексного мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики в связи с предстоящим началом (в марте 2004 г.) добычи нефти на месторождении «Кравцовское» (Д-6), расположенном на континентальном шельфе Российской Федерации. В июне 2004 года был организован оперативный спутниковый мониторинг юго-восточной Балтики в качестве важной компоненты контроля экологического состояния окружающей среды.

Перед мониторингом ставились следующие цели:

1. Обнаружение нефтяных пятен вблизи платформы Д-6 и на акватории всей юго-восточной части Балтийского моря;
2. Идентификация источников загрязнения;
3. Прогноз дрейфа обнаруженных нефтяных пятен;
4. Систематизация и архивация данных.

Спутниковый мониторинг включает в себя:

- оперативный мониторинг нефтяных загрязнений на поверхности моря по спутниковым радиолокационным изображениям ASAR ENVISAT (ESA) и SAR RADARSAT (CSA);
- анализ метеорологической и спутниковой информации о скорости ветра (QuikSCAT) и высоте ветровых волн (Jason-1), необходимой для интерпретации радиолокационных изображений и оценки скорости и направления дрейфа нефтяных пятен;
- ежедневный мониторинг поверхности моря по данным спутниковых изображений в инфракрасном и оптическом диапазонах спектра (AVHRR NOAA, MODIS Terra и Aqua);
- восстановление поля поверхностных течений по последовательности спутниковых инфракрасных и оптических изображений;

➤ прогноз скорости и направления поверхностных течений и траектории дрейфа обнаруженных и виртуальных (с платформы Д-6) нефтяных пятен, выполненный по оперативной численной модели Шведского института метеорологии и гидрологии.

В результате ежедневно собиралась, обрабатывалась и анализировалась оперативная комплексная информация о нефтяном загрязнении морской среды, поле температуры поверхности моря (ТПМ) (Рис. 2), распределении взвешенного вещества, концентрации хлорофилла (Рис. 3), поле поверхностных течений и разнообразная метеорологическая информация [1-6].

Оперативный мониторинг нефтяного загрязнения поверхности моря основывался на обработке и анализе радиолокационных изображений ASAR ENVISAT со всех пролетов спутника над акваторией юго-восточной части Балтийского моря (периодичность пролетов составляет 12-72 часа, размер снимка – 400 x 400 км, пространственное разрешение – 75 м на пиксел) и SAR RADARSAT (выборочно, в тех случаях, когда между снимками ENVISAT интервал достигал 72 часов, 300 x 300 км, 25 м/пиксел). Цифровые изображения получались в оперативном режиме, т.е. через 1-2 часа после пролета спутника, из Конгсбергских спутниковых служб (станция KSAT, Тромсе, Норвегия).



Рис. 1. Нефтяная платформа Д-6

Для интерпретации радиолокационных изображений и прогноза дрейфа нефтяных пятен был организован прием, обработка и анализ всех информативных (безоблачных) инфра-красных (ИК) и оптических изображений со всех пролетов спутников серии NOAA, а также Terra и Aqua (MODIS). Пространственное разрешение этой информации составляет 250 м – 1 км. Кроме того, использовались данные скаттерометра QuikSCAT и альтиметра JASON-1 для получения информации о скорости приводного ветра и высоте ветровых волн на акватории моря. Спутниковая приемная станция Морского гидрофизического института в Севастополе использовалась для оперативного приема данных с AVHRR NOAA 24 часа в сутки, 7 дней в неделю. Эти данные обрабатывались и на их основе строились карты ТПМ, оптических характеристик поверхности моря и поверхностных течений. Карты ТПМ (Рис. 2), взвеси, концентрации хлорофилла и цветения вод (высокая концентрация сине-зеленых водорослей в поверхностном слое в летний период) (Рис. 3) позволяют выявить особенности мезо- и мелкомасштабной структуры и динамики вод Балтики, такие как: течения, вихри, диполи и мультиполю, струи, филаменты,

речные плумы и вытоки из Вислинского и Куршского заливов. Последовательность ежедневных ИК и оптических изображений MODIS позволяет реконструировать реальные поля поверхностных течений (направление и скорость) с разрешением 0.25-1 км, что чрезвычайно важно для прогноза направления и скорости дрейфа нефтяных пятен. Комбинация радиолокационных изображений ASAR ENVISAT и изображений MODIS позволяет понимать почему пятна имеют ту или иную форму, а также прогнозировать их перенос мезомасштабными течениями.

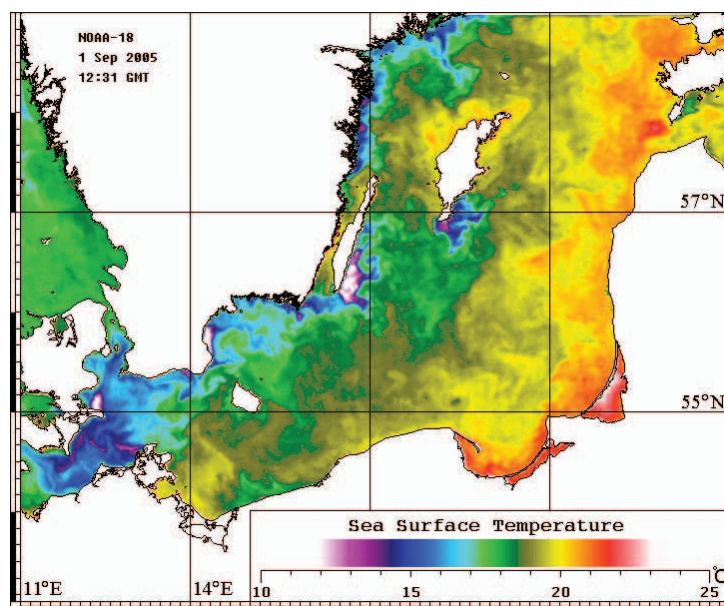


Рис. 2. Поле температуры поверхности Балтийского моря 1 сентября 2005 г. (NOAA-18)

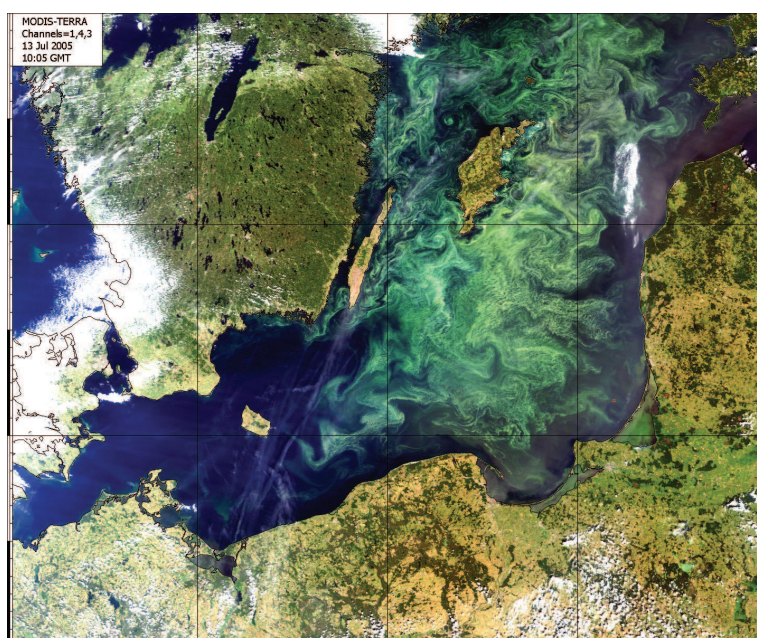


Рис. 3. Цветение вод Балтийского моря 13 июля 2005 г. (MODIS-Terra)

Поля приводного ветра строились на основе анализа данных скаттерометра с каждого пролета спутника QuikSCAT над Балтийским морем (дважды в день). Эти данные комбинировались с данными

береговых метеостанций в России, Литве, Латвии, Эстонии, Швеции, Дании, Германии и Польши, а также с данными атмосферных моделей. Спутниковые альтиметрические данные по каждому треку спутника Jason-1 использовались для составления карт высоты волн, которые включали и информацию, полученную по модели FNMOC WW3 (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center). Все эти данные использовались для анализа РЛИ и оценки направления и скорости дрейфа нефтяных пятен.

На 230 радиолокационных изображениях ASAR ENVISAT и 17 изображениях SAR RADARSAT, полученных в июне 2004 г. – ноябре 2005 г., было обнаружено 274 нефтяных пятна. Несколько примеров РЛИ из галереи нефтяных пятен представлено на Рис.4-6. Карта всех нефтяных пятен, обнаруженных с 12 июня 2004 г. по 30 ноября 2005 г., показана на Рис. 7. На рисунке приведены реальные размеры и форма пятен. Зеленый квадрат указывает местоположение Д-6. Не обнаружено ни одного пятна, исходящего от платформы Д-6, что подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности на платформе. Массив пятен четко вырисовывает основные морские пути движения судов в юго-восточной части Балтийского моря, направленные к Вентспилсу, Лиенае, Клайпеде, Калининграду и вдоль Готланда. Поэтому, основными источниками нефтяных загрязнений являются морские суда.

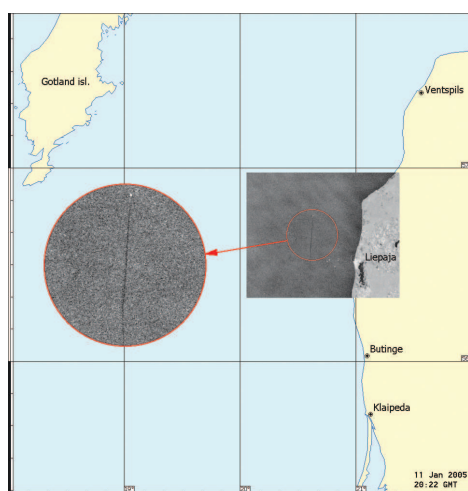


Рис. 4. Сброс нефтепродуктов с судна (белая точка), идущего на север вдоль побережья Латвии 11 января 2005 г. (ASAR Envisat). Длина пятна – 31 км, площадь – 9,6 км²

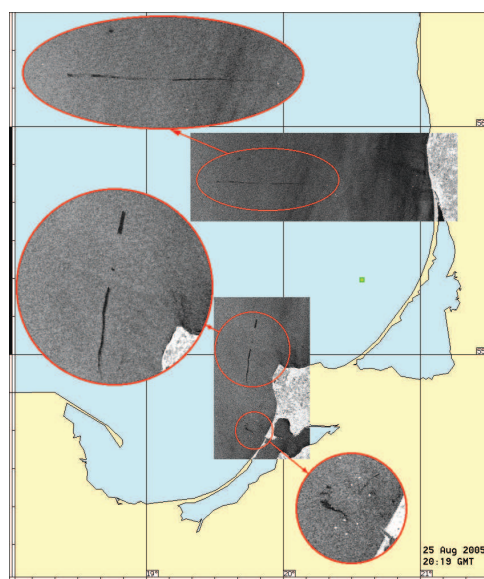


Рис. 5. Нефтяные пятна, оставленные тремя судами 25 августа 2005 г. (ASAR Envisat). Длина пятна на широте Клайпеды – 33,6 км, поверхность – 8,6 км². Длина цепочки пятен у оконечности Самбийского полуострова – 22 км

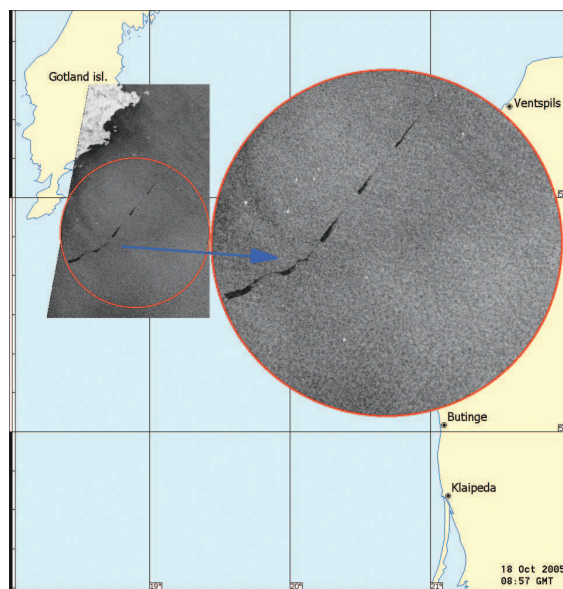


Рис. 6. Прерывистый нефтяной след за судном, идущим вдоль Готланда 18 октября 2005 г. (ASAR Envisat). Длина цепочки пятен – 50 км, общая поверхность – 33 км²

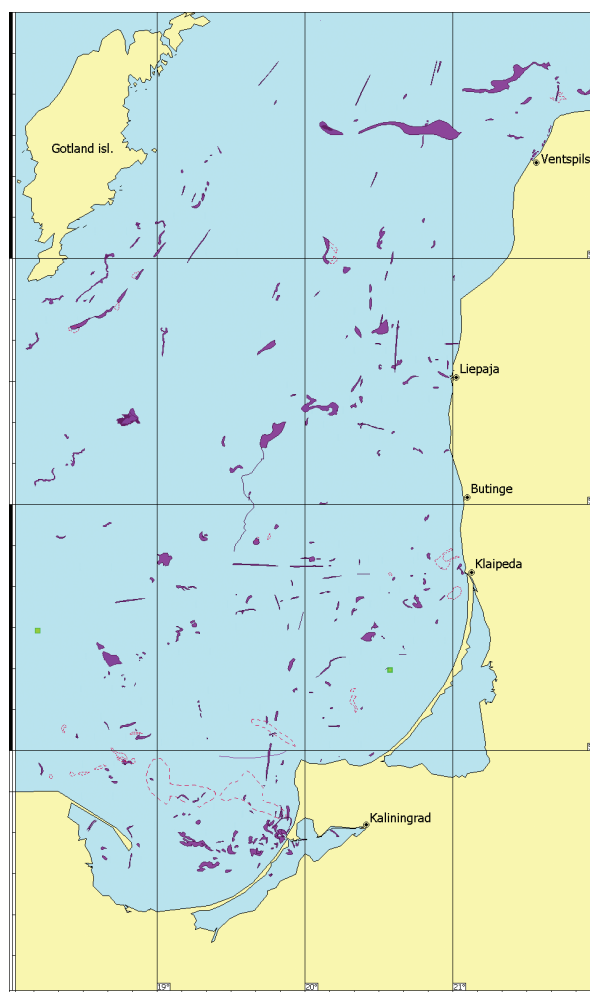


Рис. 7. Карта всех нефтяных пятен, обнаруженных в результате анализа радиолокационных изображений ASAR ENVISAT и SAR RADARSAT с июня 2004 г. по ноябрь 2005 г.

Численное моделирование

На основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI) рассчитывается прогноз дрейфа: (1) всех крупных нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках ASAR ENVISAT в юго-восточной Балтике (Рис.8), и (2) виртуальных (модельных) пятен с платформы Д-6 (Рис.9). Этот ежедневный прогноз позволяет планировать и корректировать действия по ликвидации нефтяного загрязнения в результате потенциально возможной аварии на Д-6 и делать оценки экологических рисков, связанных с загрязнением нефтью акватории моря и побережья Куршской косы. Модель Seatrack Web - это уникальная европейская модель, позволяющая рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф (и трансформацию) пятен различных нефтепродуктов на 48 часов с пространственным разрешением 3 мили (в настоящее время 1 мили), с учетом обновляющегося прогноза поля ветра (и ряда других метеорологических параметров) и течений каждые 3 часа (европейские оперативные моделиHIRLAM и HIROMB). Модель рассчитывает на каждый шаг по времени состояние пятна (координаты, размеры, скорость и направление дрейфа и др.). Она также позволяет восстанавливать историю дрейфа пятен до 10 суток назад. Эта модель сегодня активно используется в Швеции, Дании, Финляндии, Польше, Эстонии, Латвии, Литве и России [7].

Статистика ежедневных прогнозов дрейфа нефтяных пятен с платформы Д-6 за июль-декабрь 2004 г. показывает потенциальную вероятность (%) нахождения пятна в любой точке акватории или направления его дрейфа в течение 48 часов после аварийного разлива нефти объемом 10 м^3 (Рис.10). На сектор (150°), направленный на Куршскую косу, приходится 67% вероятных дрейфов пятен, причем только в половине этих случаев пятна достигали береговой линии, что объясняется интенсивным вдольбереговым течением.

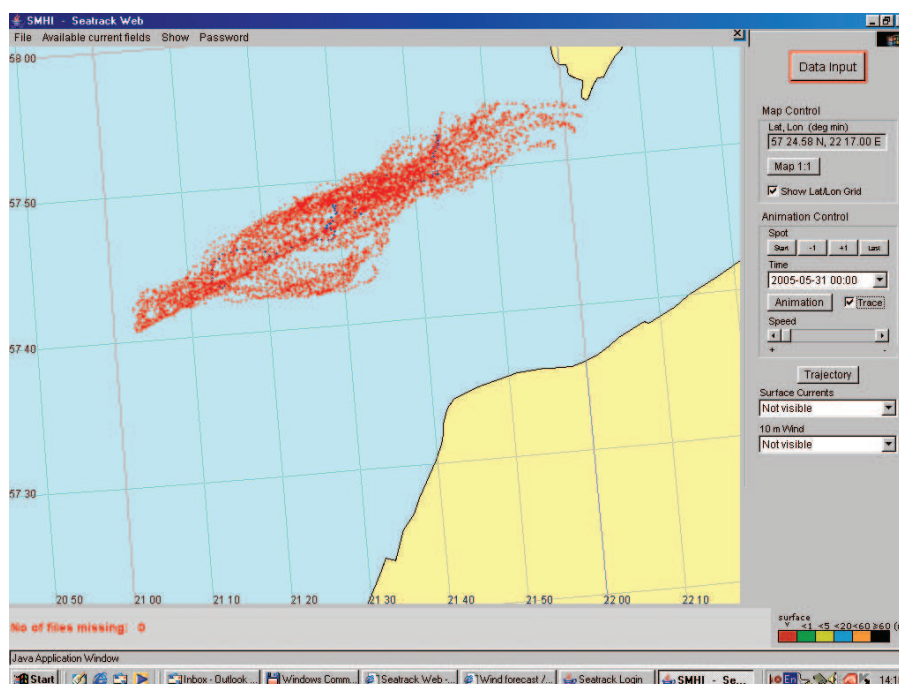
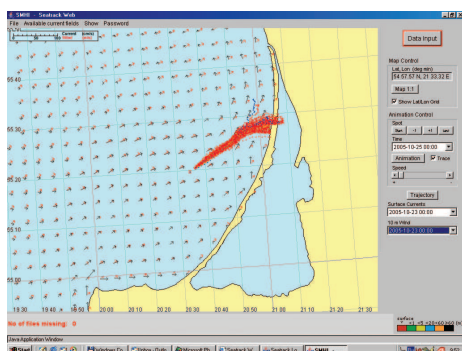


Рис. 8. Численное моделирование дрейфа (с 28 по 30 мая 2005 г.) нефтяного пятна, обнаруженного к северу от Вентспилса 28 мая 2005 г.

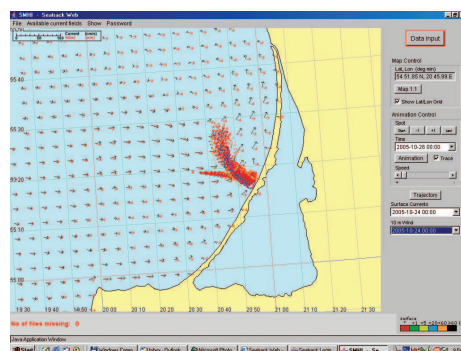
23 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



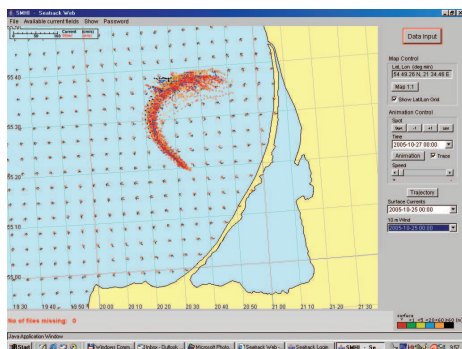
24 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



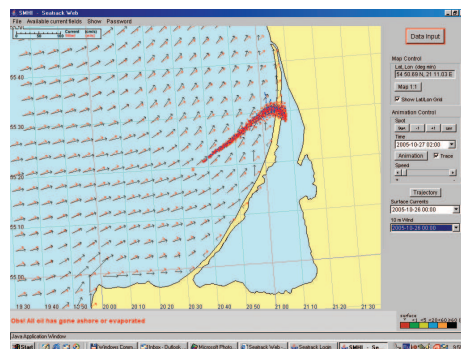
25 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



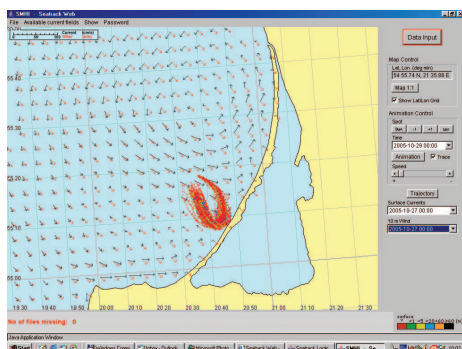
26 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



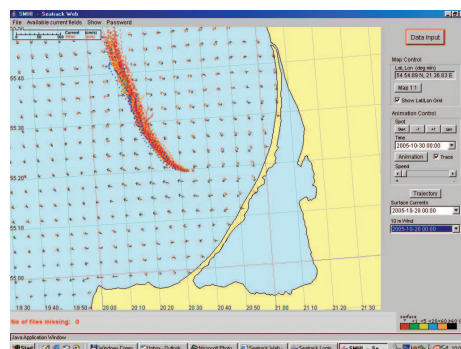
27 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



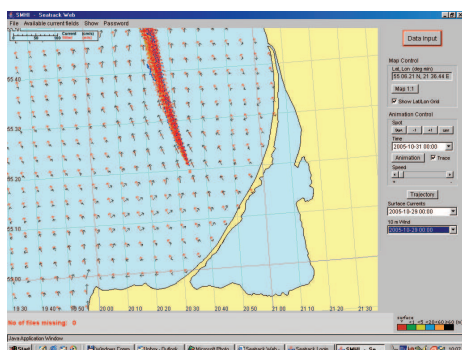
28 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



29 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack



30 октября 2005
Web, SMHI

© Seatrack

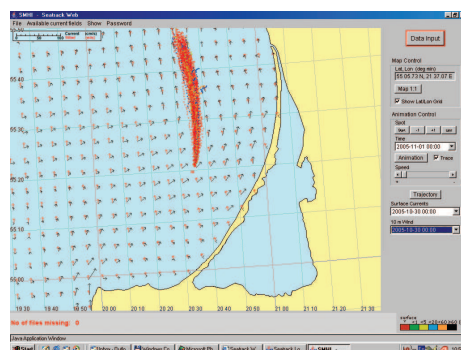


Рис. 9. Пример ежедневного моделирования дрейфа виртуального пятна с платформы Д-6 за 23-30 октября 2005 г.

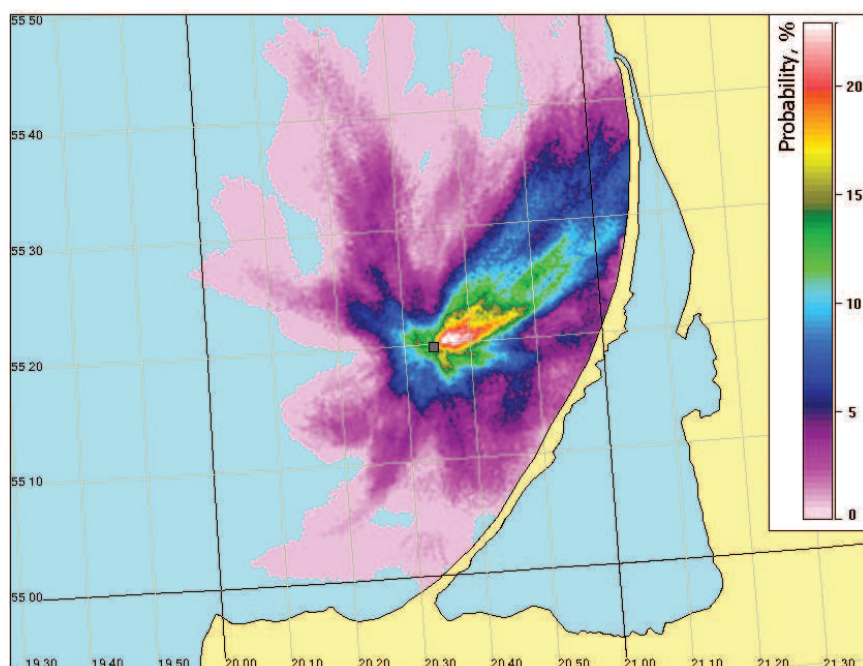


Рис. 10. Вероятность распространения в течение 48 часов потенциального нефтяного загрязнения с платформы Д-6

Выводы

На 230 радиолокационных изображениях ASAR ENVISAT и 17 изображениях SAR RADARSAT, полученных в июне 2004 г. – ноябре 2005 г., было обнаружено 274 нефтяных пятна. Не обнаружено ни одного пятна, исходящего от платформы Д-6, что подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности на платформе. Основными источниками нефтяных загрязнений являются морские суда. Для вспомогательных целей было получено, обработано и проанализировано около 1600 инфракрасных и оптических изображений AVHRR (NOAA) и MODIS (Terra и Aqua), построено около 240 карт поля приводного ветра по данным скаттерометра (QuikSCAT) и 73 карты высоты ветровых волн по данным альтиметра (JASON-1). На основе численной модели Шведского института метеорологии и гидрологии выполнено около 550 оперативных прогнозов дрейфа реальных и виртуальных (с платформы) нефтяных пятен. Результаты, полученные в 2004-2005 гг., показали эффективность комплексного спутникового мониторинга экологического состояния юго-восточной Балтики. Разработанная технология и приобретенный опыт могут быть легко перенесены на другие моря Российской Федерации, так же как и районы Мирового океана.

Благодарности

Эта работа была инициирована и поддержана компанией ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть. Авторы выражают благодарность Европейскому космическому агентству (ESA, <http://www.esa.int/esaCP/index.html>) и Конгсбергским спутниковым службам (KSAT, Тромсе, Норвегия, www.ksat.no/) за получение радиолокационных данных ASAR ENVISAT (контракт 04-10095-A-C); NOAA (<http://www.noaa.gov/>) и Лаборатории информационной поддержки космического мониторинга ИКИ РАН (<http://smis.iki.rssi.ru/>) за предоставление данных радиометра AVHRR; Годдардскому центру космических полетов НАСА (NASA Goddard Space Flight Center) за предоставление данных радиометра MODIS (спутники Terra и Aqua) (<http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>); Центру данных по физической океанографии

Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (PODAAC, JPL NASA, <ftp://podaac.jpl.nasa.gov>) за предоставление данных спутников QuikSCAT и JASON-1; Шведскому институту метеорологии и гидрологии (SMHI, www.smhi.se/) за предоставление оперативного доступа к численной модели дрейфа нефтяных пятен (Seatrack Web model).

Литература

1. *Kostianoy, A.G.* Satellite monitoring of oil pollution in the Black, Azov, Caspian and Baltic seas // Proceedings, “Black Sea and Caspian Ecology 2005” 3^d International Caspian and Black Sea Ecology Summit and Showcase, 24-25 November 2005, Istanbul, Turkey, 2005: E27-E28.
2. *Kostianoy, A.G., Lebedev, S.A., Litovchenko, K.Ts., Stanichny, S.V., and O.E. Pichuzhkina.* Satellite remote sensing of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea // *Gayana*. 2004 (V.68, N 2, Part 2): 327-332.
3. *Kostianoy, A.G., Lebedev, S.A., Litovchenko, K.Ts., Stanichny, S.V., and O.E. Pichuzhkina.* Oil spill monitoring in the Southeastern Baltic Sea // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2005 (3): 73-79.
4. *Kostianoy, A.G., Lebedev, S.A., Soloviev, D.M., and O.E. Pichuzhkina.* Satellite monitoring of the Southeastern Baltic Sea. Annual Report 2004. Lukoil-Kaliningradmorneft, Kaliningrad, 2005.
5. *Kostianoy, A.G., Litovchenko, K.Ts., Lebedev, S.A., Stanichny, S.V., Soloviev, D.M., and O.E. Pichuzhkina.* Operational satellite monitoring of oil spill pollution in the southeastern Baltic Sea. *Oceans 2005 – Europe*, Volume 1, 20-23 June 2005:182-183. DOI: 10.1109/OCEANSE.2005.1511706.
6. *Lavrova, O., Bocharova, T., and A. Kostianoy.* Satellite radar imagery of the coastal zone: slicks and oil spills // *EARSel eProceedings*, 2006 (2).
7. *Ambjörn, C.* Forecasts of the trajectory and fate of spills, using Internet as the calculation platform // *USA-Baltic International Symposium “Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies”*, Klaipeda, Lithuania, 15-17 June 2004.