

Международный проект MOPED: «Мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности: синтез разнородных данных многих сенсоров и спутников»

**Т. Бочарова¹, V. Byfield², M. Gade³, J. da Silva⁴, С. Ермаков⁵, А. Костяной⁶,
О. Лаврова¹, Р. Мамедов⁷, С. Станичный⁸**

¹*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, e-mail: olavrova@iki.rssi.ru*

²*University of Southampton, National Oceanography Centre*

³*University of Hamburg, Institute of Oceanography*

⁴*University of Lisbon, Institute of Oceanography*

⁵*Институт прикладной физики РАН*

⁶*Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова*

⁷*Институт географии ААН*

⁸*Морской гидрофизический институт НАНУ*

Представлены первые результаты международного проекта MOPED (“Monitoring of Oil Pollution using Earth observation Data: a multi-sensor, multi-platform approach”), осуществляемого при поддержке INTAS и Европейского космического агентства. Проект направлен на разработку методов комбинированного использования спутниковых данных для мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности в результате утечек из нефтепроводов, сбросов отработанных вод предприятиями, сбросов льяльных вод судами, утечек нефтепродуктов при морских погрузочных работах. Работа проводится по пяти основным направлениям: 1) сбор, предварительный просмотр, архивирование и анализ данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) и оптических данных высокого разрешения с использованием данных других сенсоров и из независимых источников; 2) выявление геофизических параметров, влияющих на перемещение, эволюцию и проявление нефтяных загрязнений на данных РСА и оптических данных; 3) отбор образцов и экспериментальные исследования пленок загрязнений, их физических характеристик, математическое моделирование подавления морского волнения пленками и рассеяния электромагнитных волн на пленках; 4) изучение факторов, влияющих на перемещение нефтяных пятен в различных условиях, совершенствование методов восстановления и прогноза перемещения пятен; 5) разработка алгоритмов детектирования нефтяных пятен по данным РСА и данным оптических сенсоров, выработка рекомендаций для их использования с привлечением данных других сенсоров и традиционных данных контактных измерений. Проект объединяет исследователей из Азербайджана, Великобритании, Германии, Португалии, России и Украины.

Введение

Разливы и утечки нефти и нефтепродуктов в мировом океане происходят постоянно и наносят серьёзный ущерб окружающей среде. Задача мониторинга таких событий и их последствий является приоритетной, и усилия в этом направлении предпринимаются многими научными коллективами во всем мире. Консорциум ученых шести стран: Азербайджана, Великобритании, Германии, Португалии, России и Украины, объединенных проектом MOPED “Monitoring of Oil Pollution using Earth Observation Data: a multisensor, multiplatform approach”, стартовавшим в марте 2007 г., разрабатывает подходы к решению задачи на базе использования спутниковых данных дистанционного зондирования. Проект MOPED поддерживается Программой INTAS совместно с Европейским космическим агентством.

Из всего объема разнородных спутниковых данных, доступных в настоящее время, данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) признаны наиболее подходящими на роль базовых для целей мониторинга нефтяных загрязнений. Это связано с физическими принципами работы РСА, позволяющими выделять изменения шероховатости морской поверхности с высоким разрешением, вне зависимости от степени облачности и освещенности поверхности. Однако, вы-

явление нефтяных загрязнений только лишь на основе анализа данных РСА проблематично. Величина радиолокационного контраста между нефтяным пятном и окружающей морской поверхностью, а, значит, вероятность обнаружения загрязнения, зависит, помимо объема и типа разлитых нефтепродуктов, от ряда параметров окружающей среды, таких как скорость ветра, высота волн, температура морской поверхности, поле течения и наличие зон сдвига течения. Кроме того, на снимках РСА встречаются многочисленные подобию нефтяных пятен, обусловленные присутствием на поверхности воды пленок биогенного происхождения, «ветровыми теньями» у береговой черты, осадками, зонами апвеллинга, проявлениями внутренних волн, океанических и атмосферных фронтов.

Вывод из многолетних исследований состоит в том, эффективное выявление нефтяных загрязнений возможно только в рамках мультисенсорного подхода. В его основе лежит анализ спутниковых радиолокационных данных с привлечением всей доступной информации, как спутниковой, так и наземной, о состоянии окружающей среды.

Загрязнения малого и среднего масштаба выявлять и наблюдать сложнее, чем крупномасштабные разливы, когда местонахождение источника сброса, тип и объем разлитых нефтепродуктов, как правило, известны. Поэтому для адекватной интерпретации данных РСА необходимо изучение пленок различной природы, влияния ветра и волн на их образование и проявление на поверхности, изучение рассеяния электромагнитных волн на пленках.

Согласно теории, основными характеристиками пленок, определяющими степень гашения поверхностных волн, является вязкоупругость для мономолекулярных пленок и вязкоупругость и толщина для немомолекулярных («толстых») пленок. Между тем, свойство вязкоупругости остается малоизученным у биогенных пленок и почти неизученным у пленок нефти и нефтепродуктов. Это обстоятельство существенно снижает достоверность выявления нефтяных загрязнений по данным РСА. Таким образом, детальное изучение вязкоупругости пленок является крайне необходимым.

В настоящее время не существует надежной модели рассеяния радиолокационного сигнала на морской поверхности в присутствии пленок, в частности, нефти. Традиционно затухание рассеяния объясняется выборочным гашением резонансной компоненты волнения. Однако такой подход не объясняет экспериментально выявленных зависимостей сечения обратного рассеяния от угла обзора и поляризации. Участниками проекта проводились эксперименты по выявлению изменения характера модуляции радиолокационного сигнала длинными волнами в присутствии поверхностных пленок. Было обнаружено изменение доплеровского сдвига (значительные увеличения и уменьшения на пленках), усиление радиолокационного сигнала на краях пленок. Исследование механизмов рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью, покрытой пленками, неизбежно должно затрагивать эти проблемы.

Сочетание РСА и оптических сенсоров в мониторинге нефтяных и загрязнений – относительно новое, но перспективное направление. Данные РСА выявляют эффекты гашения волнения пленками, оптические самолетные сенсоры позволяют получить информацию об относительной толщине пленок, размерах пятен и присутствии диспергированной нефти. До последнего времени спутниковые оптические данные мало использовались из-за низкого разрешения первых оптических сенсоров, проблем, связанных с облачностью и т.п. Появление таких инструментов, как MODIS, MERIS и PROBA CHRIS с улучшенными спектральными и пространственными разрешениями, а также возможность получения одномоментных РСА и оптических данных со спутника Envisat позволяет рассчитывать на существенные результаты их совместной обработки и анализа. Это в особенности касается районов Черного, Каспийского и Средиземного морей, где условия облачности благоприятствуют оптической съемке морской поверхности.

Моделирование и прогнозирование гидродинамических процессов, в частности влияющих на эволюцию и распространение загрязнений, является важной составляющей надежной системы мониторинга. Модельные данные могут давать дополнительную информацию для интерпретации спутниковых данных. Данные последних, в свою очередь, могут служить для оценки ряда пара-

метров в целях совершенствования модели. Модели, существующие в настоящее время, в том числе разработанные участниками проекта, имеют невысокое пространственное разрешение и дают значительные ошибки в ряде случаев, например, при сильной вихревой активности в море. Модели, безусловно, нуждаются в доработке путем ассимиляции новейших спутниковых данных различных сенсоров.

Из всего вышеизложенного вытекают задачи, стоящие перед участниками проекта MOPED.

Задачи проекта

Программа проекта предполагает пять основных направлений работы.

Задача 1. Сбор, предварительный анализ, архивирование и сопоставление данных спутниковых сенсоров дистанционного зондирования. Основу должны составлять радиолокационные (ERS-2 SAR, Envisat ASAR, Terra-SAR-X) и оптические данные (Envisat MERIS, Terra/Aqua MODIS, PROBA CHRIS), содержащие нефтяные пятна или их подобию. Дополнительно подбираются все возможные близкие по времени сопутствующие данные. Создается база данных.

Задача 2. Восстановление геофизических параметров, влияющих на эволюцию и проявление нефтяных пятен. Задача предполагает:

а) разработку методов восстановления поля течения (направления и скорости) с пространственным разрешением 250-500 м по оптическим и ИК данным MODIS и MERIS; б) анализ мезомасштабной динамики вод и взаимодействия системы океан-атмосфера на основе данных ТПО AVHRR, MODIS, AATSR;

в) привлечение данных QuikSCAT для описания поля ветра, данных Topex-Poseidon, Jason, RA-2 для описания высоты волнения.

Задача 3. Экспериментальные исследования и разработка усовершенствованной модели радиолокационного зондирования пленочных загрязнений. В рамках этой задачи планируется:

а) изучение физических свойств морских органических пленок, в том числе загрязнений; б) разработка модели гашения волн поверхностными волнами с учетом физических характеристик пленок;

в) развитие модели рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности, покрытой пленками загрязнений.

Задача 4. Развитие методов прогноза распространения и эволюции нефтяных загрязнений. Предусматривается:

а) исследование факторов (скорость ветра, ТПО, тип и количество нефтепродуктов, и т.п.), влияющих на распространение и перемещение нефтяных пятен;

б) развитие современных представлений о распространении и перемещении нефтяных пятен в различных метеорологических условиях и при различных состояниях моря;

в) совершенствование существующих моделей прогноза.

Задача 5. Развитие методов мультисенсорного мониторинга нефтяных загрязнений на основе спутниковых данных. В рамках этой задачи предполагается проведение следующих работ:

а) отработка существующих алгоритмов различения нефтяных пленок и их подобию по данным РСА на основе результатов исследований поведения пленок и их свойств рассеяния, модельных расчетов и данных других спутниковых сенсоров;

б) развитие алгоритмов обработки оптических данных, направленной на детализацию местоположения и занимаемой площади поверхностной и диспергированной нефтью в результате сбросов, утечек и разливов нефтепродуктов;

в) выработка рекомендаций по сбору данных в выбранных районах, необходимых для надежной идентификации нефтяных загрязнений;

г) оценка разработанных алгоритмов с точки зрения возможности использования спутниковых данных многих сенсоров для мониторинга сбросов вод, загрязненных нефтепродуктами (нефть в воде);

д) выработка рекомендаций по использованию спутниковых данных в моделях расчета траекторий крупномасштабных разливов для управления мероприятиями по очистке акватории.

Остановимся теперь на первых результатах работы проекта.

Тематический анализ и систематизация данных

На основе анализа всего комплекса имеющихся у консорциума, а также других доступных спутниковых и сопутствующих данных определены области наиболее интенсивного загрязнения нефтепродуктами в северо-восточной акватории Черного моря. Это судовые трассы к портам Новороссийска, Туапсе, Железного Рога и к Керченскому проливу. Составлены сводные карты нефтяных загрязнений региона в весенне-осенний период 2006 и 2007 гг. Определены основные типы распространения загрязнений в зависимости от состояния циркуляции воды и ветровых условий.

На рисунке 1 приведен пример проявлений нефтяных загрязнений на радиолокационном и инфракрасном изображениях, полученных в разнице в 2,5 часа. Их совместный анализ с привлечением сопутствующих данных позволит оценить локальное поле скоростей поверхностных течений и скорость дрейфа и растекания загрязнений.

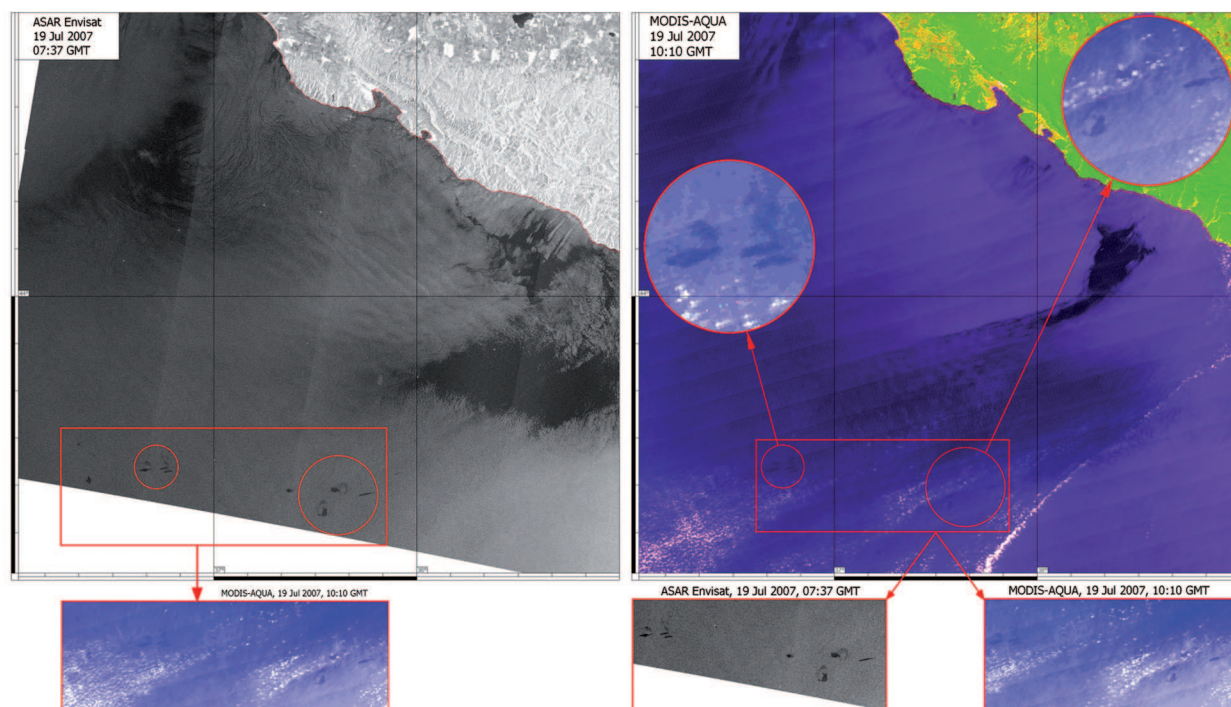


Рис. 1. Проявления нефтяных загрязнений на изображениях Envisat ASAR и Aqua MODIS, полученных 19.07.07 в 7:37 и 10:10 GMT, соответственно. Восточная часть Черного моря

Для акваторий Черного и Каспийского морей на постоянной основе составляются карты поверхностной температуры, биологической продуктивности, концентрации хлорофилла на основе данных MODIS и AVHRR. Поля приповерхностного ветра рассчитываются методами ре-анализа SKIRON и ALADIN. Для Черного моря поля ветра рассчитывается с разрешением 10-25 км на базе данных QuikSCAT по модели MM5. По данным альтиметрии составляются карты высоты волнения по модели WAM с использованием результатов ре-анализа SKIRON и ALADIN (рис. 2).

Анализ данных по Балтийскому морю позволил выявить основные факторы, влияющие на распространение нефтяных загрязнений и их взаимодействие при различных условиях. Оценены качество и доступность спутниковых данных различных сенсоров с точки зрения их применимости для прогноза распространения загрязнений.

Разработана структура каталога спутниковых данных по нефтяным загрязнениям морской поверхности и их подобиям. Каталог содержит более 150 записей. Наиболее информативные и яркие случаи представлены на специально разработанном сайте <http://moped.iki.rssi.ru/>.

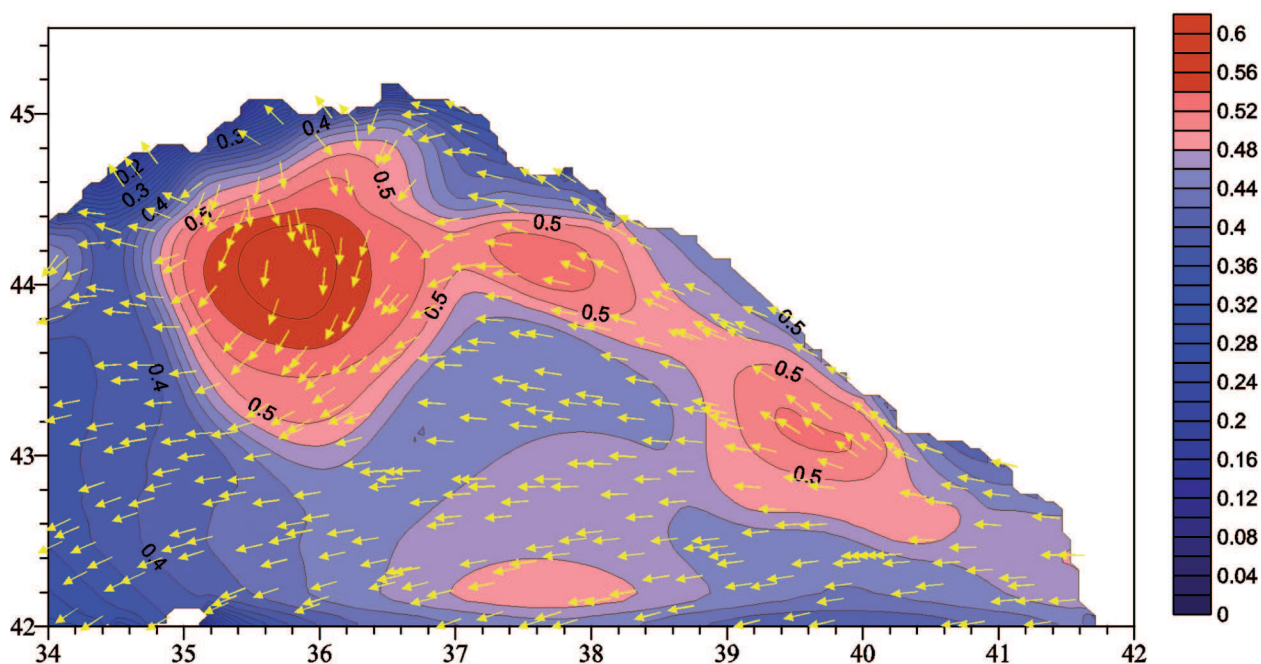


Рис. 2. Высота и направление волн, рассчитанные по модели WAM с использованием результатов ре-анализа SKIRON (10x10км). Северо-восточная часть Черного моря, 6:00 GMT 19.07.07

Оперативный мониторинг состояния морской поверхности

В мае 2007 начались работы по оперативному спутниковому мониторингу северной части Каспийского моря. Особое внимание уделяется нефтяным загрязнениям в районе морской нефтедобывающей платформы «Астра» на месторождении им. Ю.Корчагина в российской части акватории. Базовыми данными являются радиолокационные снимки спутников RADARSAT и ASAR Envisat. Радиолокационные снимки доставляются и обрабатываются 2-5 раз в неделю с привлечением данных других спутниковых сенсоров и данных контактных измерений.

С апреля по октябрь 2007 г., а также с апреля 2008 г. по настоящее время проводится оперативный спутниковый мониторинг состояния и загрязнения российской акватории Черного и Азовского морей и Керченского пролива. Основой для анализа служат все радиолокационные данные района интереса, получаемые со спутников Envisat и ERS-2, данные оптического и инфракрасного спектров Envisat MERIS, NOAA AVHRR, Terra/Aqua MODIS, скаттерометра QuikSCAT SeaWinds, альтиметра JASON. Привлекаются также данные наземных измерений.

Работы по оперативному мониторингу различных морских акваторий предоставляют исключительные возможности для разработки и совершенствования методик обнаружения и идентификации загрязнений различных типов и отслеживания их распространения с использованием всех возможных спутниковых и сопутствующих данных.

Важным случаем для отладки методов мультисенсорного оперативного мониторинга загрязнений морской поверхности является катастрофический разлив нефтепродуктов с танкера «Волго-нефть-139», авария на котором произошла 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе. Мониторинг последствий катастрофы проводится ежедневно по настоящее время. Как известно, носовая часть танкера с остатками нефтепродуктов осталась на месте катастрофы, при этом официальные источники утверждали, что экологической опасности эта ситуация не представляет. На рисунке 3 показан фрагмент Envisat ASAR изображения Керченского пролива, полученного 17.06.08, через

8 месяцев после катастрофы. Темная сликовая полоса тянется от места катастрофы на 9 км вплоть до тузлинской дамбы. Как и предполагали экологи, весенне-летний прогрев морской воды привел к всплытию осевших на дно нефтепродуктов и вторичному загрязнению моря. В течение июня – августа 2008 г. была получена целая серия подобных изображений, они представлены на сайте http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_moni.htm.

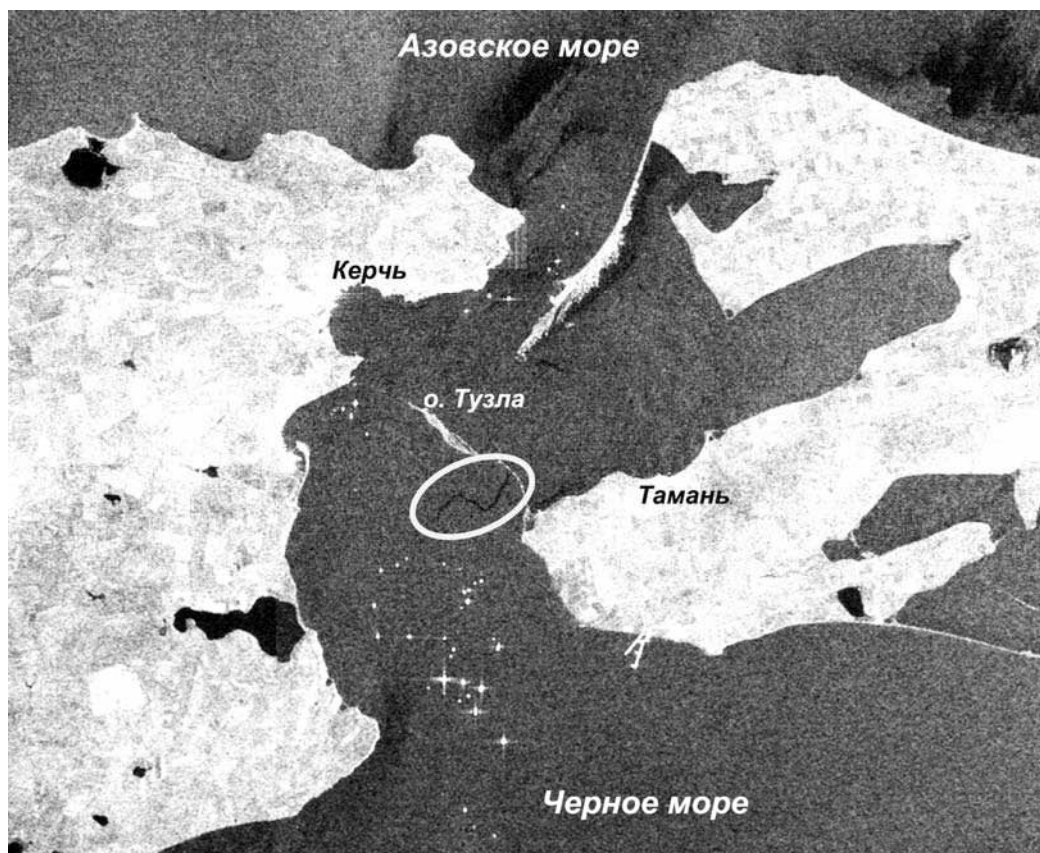


Рис. 3. Фрагмент Envisat ASAR изображения Керченского пролива, полученного 17.06.08. Белый овал выделяет темную сликовую полосу вторичного нефтяного загрязнения от места катастрофы танкера «Волгонефть-139», которая произошла 11.11.07. Длина полосы загрязнений – 9 км

Экспериментальные исследования

В рамках проекта проведены две серии натурных экспериментов на Черном море (Геленджик, июнь 2007, Кацивели, сентябрь 2007), а также лабораторные эксперименты в исследовательском бассейне ИПФ РАН (июль-август 2007).

Натурные эксперименты по дистанционному зондированию искусственных и природных органических slickов и гашения волн в следе судна проводились в широком диапазоне длин волн поверхностных ветровых волн (0.5-30 см) с использованием радаров Ka/X диапазона, оптического спектроанализатора (ОСА) и камеры. Предварительные результаты обработки данных показывают хорошее соответствие между контрастами, полученными камерой и ОСА, а также их сопоставимость с длинами ветровых волн. По данным фотосъемки морской поверхности контрасты (гашение волн) в судовых следах находятся в диапазоне 10-100, что сравнимо с контрастами пленочных slickов. Таким образом, судовые следы также могут считаться подобиями пленок. Взяты пробы пленок в естественных slickах и судовых следах, проведен их анализ параметрическим волновым методом, разработанным в Институте прикладной физики РАН.

Лабораторные исследования показали значительный гистерезис образцов поверхностных пленок, а также большую разницу между slickами и свободной водой при сжатии.

Алгоритмы и модели

Проанализированы существующие методы прогноза распространения загрязнений. Проведены численные эксперименты с использованием модели SMHI Seatrack Web, направленные на изучение влияния скорости ветра и течения и типа разлитой нефти (различные вязкость и плотность) на распространение загрязнений и исследование временной изменчивости физико-химических характеристик нефти за 48 часов распространения.

Усовершенствованные MCC (maximum cross-correlation) алгоритмы обработки спутниковых данных протестированы на инфракрасных и оптических изображениях Черного моря. Также протестирован вариационный метод ассимиляции инфракрасных спутниковых данных (рис. 4).

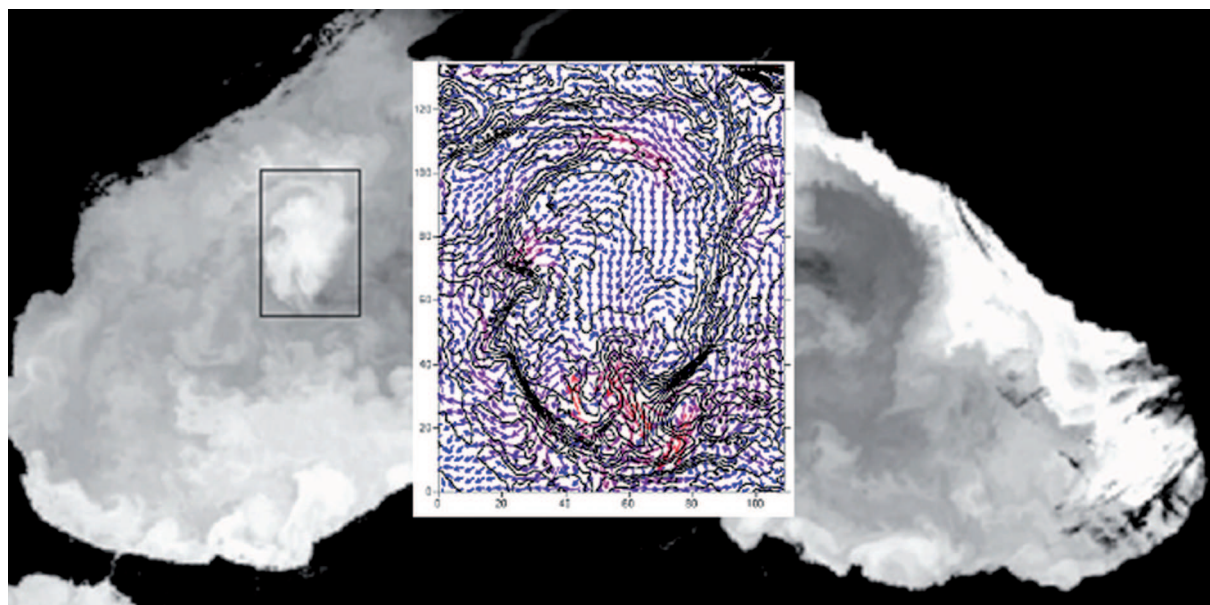


Рис. 4. Реконструкция поля скоростей течений с использованием вариационного метода ассимиляции инфракрасных спутниковых данных. Четко отображаются все особенности антициклонического вихря. Западная часть Черного моря

Проведен теоретический анализ механизма гашения дециметровых ветровых волн вследствие модуляции сантиметровой ряби. Выяснилось, что значительное подавление ряби в присутствии поверхностно-активных веществ приводит к уменьшению коэффициента гашения дециметровых волн. В настоящее время разрабатывается модель усиления дециметровых волн в области пленочных сликов.

Завершена разработка 3D гибридной потоково-транспортной модели для предсказания распространения нефти в прибрежной зоне. Модель учитывает все стадии «жизни» нефтяного пятна: дрейф, растекание, выпаривание, диспергирование, эмульсификацию, оседание, биохимическую деградацию. Модель протестирована на данных по Каспийскому морю.

Заключение

Работа международного консорциума ученых в рамках проекта MOPED идет в полном соответствии с рабочим планом проекта.

Проведены тематический анализ и систематизация спутниковых и сопутствующих данных. Выявлены основные факторы, влияющие на распространение нефтяных загрязнений и их взаимодействие при различных условиях. Составлен и постоянно пополняется каталог данных, коллекция наиболее интересных случаев представлена в Интернете. Определены приоритетные районы интереса для тестирования разрабатываемых методик. Проводится постоянный оперативный

спутниковый мониторинг состояния морской поверхности в двух таких районах. Проведены серии натурных и лабораторных экспериментов по дистанционному зондированию пленок и изучению их свойств, влияющих на результаты зондирования. Проанализированы методы прогноза распространения загрязнений и проведены численные эксперименты с использованием модели SMHI Seatrack Web. Протестированы усовершенствованные методы обработки и ассимиляции спутниковых данных. Разрабатываются и тестируются модели гашения/усиления дециметровых волн в зоне пленочных загрязнений. Завершена разработка и проведено тестирование 3D модели предсказания распространения нефти в прибрежной зоне.

Полученные результаты закладывают хорошую основу успешного продвижения к намеченной цели выработки методов комбинированного использования спутниковых данных для мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности.

Результаты работы по проекту MOPEД опубликованы в работах [1-17].

Данная работа выполняется при финансовой поддержке международного проекта INTAS 06-1000025-9091. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов С1Р.1027 и Bear 2775.

Литература

1. Korotaev, G.K., E. Huot, F.-X. Le Dimet, I. Herlin, S.V. Stanichny, D.M. Solovyev, L. Wu, Retrieving ocean surface current by 4-D variational assimilation of sea surface temperature images // Remote Sensing of Environment (in press).
2. Shcherbak, S.S., Lavrova, O.Y., Mytyagina, M.I., Bocharova, T.Y., Krovotyntsev, V.A., and Ostrovskiy, A.G. Multisensor satellite monitoring of seawater state and oil pollution in the north-eastern coastal zone of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing (in press).
3. Lavrova Olga, Marina Mityagina, Tatiana Bocharova, Andrey Kostianoy, Vladimir Krovotyntsev. Multisensor approach to operational oil pollution monitoring in coastal zones // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'08) 2008, Boston, USA, 7-11 July 2008 (CD-ROM).
4. Litovchenko K., Ivanov A. Monitoring of oil spills in the north Caspian sea using sar imagery and multi-sensor satellite data // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'08) 2008, Boston, USA, 7-11 July 2008 (CD-ROM).
5. Kosarev, A.N., Kostianoy, A.G., Introduction // Kostianoy A.G., Kosarev A.N. (Eds.). The Black Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol.5: Water Pollution, Part 5Q. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2008. p.1-10.
6. Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый мониторинг антропогенных загрязнений прибрежной зоны // Земля и Вселенная, 2008. №1. С. 26-34.
7. Lavrova, O., M. Mityagina, T. Bocharova, and M. Gade, Multisensor observation of eddies and mesoscale features in coastal zones // Remote Sensing of the European Seas. Springer. 2008. P. 463-474.
8. Mityagina, M., Lavrova, O., Bocharova, T. Detection and Discrimination of Sea Surface Films in the Coastal Zone of Northeastern Black Sea Using SAR Data // ESA-ed., vol.1: ESA-SP-636, 2007.
9. Бедрицкий А.И., В.В. Асмус, В.А. Кровотынцев, О.Ю. Лаврова, А.Г. Островский. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003-2007 гг. // Метеорология и гидрология, 2007. №11. С.5-13.
10. Mamedov, R.M., Aliyev, C.S., Feyzullayev, A.A., Role of the rivers in pollution of Caspian Sea // Proceedings of Earth Sciences, Azerbaijan National Academy of Sciences, N4, 2007, p. 67-74.
11. Mamedov, R.M., Mansimov, M.R., Osmanov, T.O., Influence of atmospheric processes on fluctuations of level of Caspian Sea // Proceedings Geographical Society Azerbaijan, 2007, p. 417-420.
12. Mamedov, R.M., Berkeliyev, T., Iskenderov, E., The basic environmental problems of Caspian Sea // Modern problems of applied ecology, Almati 2007, p.58-78.

13. *Ермаков С.А.* О механизме усиления ветровых волн дециметрового диапазона в пленочных сликах // Препринт ИПФ РАН № 746, Н. Новгород: ИПФ РАН, 2007, 12 с.
14. *Mamedov R.*, Caspian Sea: Hydrometeorological variability and ecogeographical problems // Editor B. Budaqov, BAKI, ELM, Baku, Azerbaijan, 434 pp., 2007.
15. *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.
16. *Митягина М.И., О.Ю. Лаврова.* Радиолокационные наблюдения поверхностных пленочных загрязнений в прибрежной зоне Черного и Азовского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Том 1. с. 317-324.
17. *Кровотынцев В.А., О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, А.Г. Островский.* Космический мониторинг состояния природной среды Азово-Черноморского бассейна // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. М.: «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Том 1. С.295-303.