

# РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКИХ МОРЕЙ

О.Ю. Лаврова<sup>1</sup>, М.И. Митягина<sup>1</sup>, А.Г. Костяной<sup>2</sup>, К.Ц. Литовченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт космических исследований РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная 84/32  
E-mails: olavrova@iki.rssi.ru, mityag@iki.rssi.ru ;*

<sup>2</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117851 Москва, Нахимовский проспект, 36  
E-mail: kostianoy@sio.rssi.ru*

В работе представлен опыт мониторинга нефтяных загрязнений прибрежных зон Черного (Новороссийск-Геленджик), Каспийского (Нефтяные камни) и Балтийского (Куршская коса – Гданьский залив) морей. Использовались данные радиолокаторов, установленных на спутниках Envisat и ERS-2, как высокого, так среднего разрешения. Для повышения достоверности идентификации нефтяных пятен, а также для определения вероятной траектории их дрейфа привлекались все доступные спутниковые данные о состоянии водной поверхности и приземного слоя атмосферы. В работе высказываются предложения по организации космического радиолокационного мониторинга, которые могут быть использованы для любой акватории, где возникает такая необходимость.

## Введение

В последние годы резко возросло загрязнение нефтепродуктами прибрежной зоны российских морей. Это вызвано, прежде всего, увеличением объемов перевозок морским транспортом, в частности перевозки экспортируемой нефти водным путем, вводом в эксплуатацию новых нефтяных терминалов и морских буровых установок, выносом реками загрязненных вод. Одной из важнейших экологических задач является мониторинг прибрежной зоны. Вследствие больших размеров акваторий, над которыми должен осуществляться постоянный мониторинг, данная задача может быть решена только с помощью спутниковых систем дистанционного зондирования.

Особое место в ряду средств космического дистанционного зондирования морской поверхности и приземного слоя атмосферы над ней принадлежит микроволновым приборам, использующим электромагнитное излучение с длинами волн от нескольких миллиметров до нескольких дециметров. Такие волны слабо поглощаются атмосферой и облаками и потому позволяют осуществлять круглосуточный мониторинг поверхности Земли практически при любых метеорологических условиях. Пространственное разрешение космических микроволновых приборов, составляет от десятка метров (для микроволновых радиолокаторов с синтезированной апертурой) до единиц километров (для пассивных измерителей — радиометров с реальной антенной апертурой) при полосе обзора, соответственно, от ста до полутора тысяч километров. Указанные характеристики делают микроволновые приборы незаменимыми в задачах изучения Мирового океана [1].

Наиболее перспективными для обнаружения любого вида загрязнений на морской поверхности являются данные спутникового радиолокационного зондирования. Однако, существует ряд объективных причин, затрудняющих интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений и уверенное выделение на них, нефтяных загрязнений, поскольку их радиолокационные образы, особенно при слабом ветре, нелегко отличить от других явлений и объектов. Среди них следует отметить: поверхностные проявления локальных ослаблений ветра, ПАВ естественного происхождения, дождевые ячейки, поверхностные проявления внутренних волн в атмосфере, зоны апвеллинга и т.п. [2, 3].

Задача обнаружения и прогнозирования распространения нефтяных загрязнений на морской поверхности должна решаться на основе совместного использования разнородных данных спутникового зондирования. При том, что основу исследования должны составлять изображения морской поверхности, полученные при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой, необходимо одновременное привлечение всей доступной информации спутникового зондирования в инфракрасном и оптическом диапазонах - MODIS Terra/Aqua, NOAA, QuickScat и т.п. Ключевым вопросом является комплексное использование данных, различных по своей физической природе (активное и пассивное микроволновое зондирование, оптические и ИК данные), пространственному разрешению и размерности, т.е. необходимо проводить комплексный спутниковый мониторинг прибрежной зоны Российских морей.

В статье представлены результаты спутникового радиолокационного мониторинга нефтяных загрязнений в Черном море (Новороссийск – Геленджик), Каспийском море (Нефтяные камни) и Балтийском

море (Куршская коса – Гданьский залив). Эти три района были выбраны не случайно. Они играют большую роль в экономике страны и в то же время испытывают огромные антропологические нагрузки.

### Мониторинг нефтяных загрязнений в Черном море

Сложная экологическая обстановка сложилась в районе г. Новороссийска, крупнейшего российского порта на Черном море, через который ежегодно водным путем экспортируется около 32 млн. т нефти, а в ближайшие 10 лет объем перекачки с учетом увеличения экспорта с каспийских месторождений может увеличиться втрое. В то же время район Новороссийск-Геленджик является одним из крупнейших российских туристических центров на Черном море. Ввод в эксплуатацию нового нефтяного терминала в г. Новороссийске осенью 2001 года и запуск газопровода Россия-Турция «Голубой поток» в декабре 2002 года делают задачу постоянного мониторинга состояния морской поверхности крайне необходимой.

Начиная с 1999 года лаборатория аэрокосмической радиолокации Института космических исследований РАН проводит регулярный мониторинг прибрежной зоны Черного моря в районе Новороссийск - Геленджик. Данный мониторинг базируется в первую очередь на изображениях, получаемых с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, установленных на спутниках ERS-2 и Envisat. Подспутниковые наблюдения, которые проводятся в летне-осенний период на базе Южного отделения Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова, включают в себя оптическую съемку с высокого берега и измерения всех необходимых гидрометеорологических параметров [4]. В августе-сентябре 2004 года подспутниковые наблюдения были дополнены оптическими наблюдениями с вертолета, осуществлявшиеся ГУ «Специализированный центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей».

Анализ спутниковых данных показал, что в летне-осенний период в данном районе регулярно происходит загрязнение морской поверхности нефтепродуктами, что в свою очередь приводит к загрязнению береговой зоны и пляжей одного из крупнейших курортов России на Черном море. Данные, накопленные за 6 лет наблюдений, свидетельствуют о том, что источниками загрязнений являются сбросовые воды с судов, которые следуют в порт Новороссийск или ожидают погрузки на якорной стоянке в районе мыса Дооб. На диаграмме 1 для каждого месяца в летне-осенние периоды с 1999 по 2004 год представлено общее количество нефтяных пятен, обнаруженных на основе анализа радиолокационных изображений, и количество пятен, находившихся на расстоянии менее 20 км от берега. Как видно из диаграммы, наиболее неблагоприятным в экологическом плане месяцем является август, причем наибольшее количество нефтяных пятен обнаружено в 2003 году. Отметим, что при построении диаграммы выбирались только те пятна пониженного рассеяния, которые бесспорно можно отнести к загрязнениям нефтепродуктами. Исходными данными служили не только имеющиеся в нашем распоряжении радиолокационные данные высокого разрешения, но и все радиолокационные данные, имеющиеся в архиве EoliSa Европейского космического агентства (<http://eoli.esa.int/geteolisa/index.html>). Общее число нефтяных пятен могло бы быть гораздо больше, если бы учитывались все подозрительные пятна. Как правило, пятна пониженного рассеяния, связанные с нефтяными загрязнениями локализованы в Цемесской бухте и на подходе к ней.

Примеры нефтяных пятен, обнаруженных на радиолокационных снимках, представлены на рис. 1. На рис. 1а свежее нефтяное пятно обозначено буквой А, буквами В и С обозначены области штиля. На рис. 1б в левом верхнем углу отчетливо различимо пятно, образованное сбросом с корабля сбросовых вод. Радиолокационные контрасты, соответствующие нефтяному пятну и сбросовым водам, различны. Как видно из разрезов, выполненных для каждого из этих двух пятен, в районе нефтяного пятна обратно-рассеянный сигнал практически полностью подавляется, а в области сбросовых вод вариации обратно-рассеянного сигнала сохраняются, хотя и с заметно меньшей амплитудой. Подобная картина может наблюдаться и при рассеянии на «старом» нефтяном пятне, т.е. когда между моментом сброса и радиолокационной съемкой прошло несколько часов. Но, во-первых, в предыдущие сутки загрязнения в этом районе якорной стоянки не были обнаружены, а во-вторых, подобного размера нефтяное пятно (его площадь составляет 37 км<sup>2</sup>) в такой непосредственной близости от береговой черты привело бы к сильному загрязнению берега, которое не наблюдалось.

Основная трудность при идентификации пятен пониженного рассеяния состоит в различении нефтяных пятен от пятен или полос выглаживания, вызванных наличием в воде ПАВ естественного происхождения. Как правило, большое количество ПАВ присутствует в бухтах (в частности, в нашем случае в Цемесской и Геленджикской бухтах) или в непосредственной близости от берега, где раннее обнаружение нефтяных загрязнений особенно важно. Иногда бывает практически невозможно однозначно определить происхождение пятна, основываясь только на радиолокационных данных, особенно при слабом ветре и отсутствии волнения. Примером может служить случай с аварией на греческом танкере "Georgios III", которая произошла в Цемесской бухте 7 августа 2004 года. На радиолокационном изображении, полученном с помощью Envisat ASAR в этот день (рис.2, а) присутствует большое количество вытянутых сликов и тем-

ных пятен нехарактерных для нефтяных загрязнений. Однако оптические наблюдения с вертолета (рис.2 б) не оставляют никаких сомнений в природе наблюдаемых на морской поверхности сликовых зон.

а) Свежее нефтяное пятно, отмечено буквой А, области ветровых выглаживаний – В, С.

б) сбросовые воды.

Разрезы, выполненные для каждого случая, показывают различия в модуляции обратно рассеянных сигналов. Желтые стрелки показывают направление, по которому сделаны разрезы.

К сожалению, оптическая съемка с вертолета не всегда дает возможность выявить характерный для пятен, содержащих нефтепродукты, радужный след: это зависит от освещенности, параметров самой съемки и степени развитости поверхностного волнения. Кроме того, оптическая съемка с вертолета захватывает область не более 2 км от берега, в то время как представленная диаграмма свидетельствует о том, что разливы случаются, как правило, на большем удалении от береговой черты.

### **Нефтяные загрязнения в Каспийском море**

Каспийское море является первым крупным водоемом в мире, который начал подвергаться масштабному нефтяному загрязнению. По расчетам специалистов, с эпохи открытия Бакинской нефти в Южный Каспий поступило (при добыче и транспортировке) 2,5 млн. т сырой нефти, что в корне изменило условия среды на западном шельфе. Изношенность оборудования на старейших морских буровых платформах только ухудшает ситуацию, приводя практически к ежедневным выбросам нефтепродуктов в море.

Регулярный спутниковый мониторинг Каспийского моря нами не проводился, однако анализу подвергся целый ряд снимков, полученные в разные годы и в разные сезоны в районе «Нефтяные камни» (современное название «Нефт дашлары»). Дополнительно был произведен ретроспективный анализ радиолокационных изображений, находящихся в базе данных EoliSA. Практически на всех радиолокационных изображениях этого района присутствуют нефтяные пятна вокруг буровых платформ, что соответствует регулярному ежедневному загрязнению морской поверхности значительными количествами нефти. На рис. 3 представлено радиолокационное изображение, полученное с помощью Envisat ASAR Wide Swath 10 сентября 2004 года. Общая площадь нефтяных загрязнений, выявленных только на этом фрагменте, составляет порядка 200 км<sup>2</sup>. Если исходить из оценки средней поверхностной плотности сырой нефти 62т/ км<sup>2</sup> [5], то общий объем нефти вылитой на морскую поверхность составит порядка 12 тыс. т. В данном случае можно говорить уже о катастрофическом разливе.

Нефтяные пятна, образованные тяжелой Бакинской нефтью, практически не растекаются со временем, а опускаются на дно, поэтому для данного района вопрос о различении собственно нефтяных пятен и сликов ПАВ не является первостепенным. Образуя толстую пленку на морской поверхности, нефтяные загрязнения в Каспийском море хорошо идентифицируются на радиолокационных изображениях даже при наличии таких затрудняющих факторов, как конвективные процессы в придном слое атмосферы или наличие большого количества сликовых полос при слабом ветре.

### **Нефтяные загрязнения в Балтийском море**

Активное судоходство, в частности и перевозка нефти, а также разработка нефтяных месторождений негативно влияют на экологическую ситуацию в прибрежной зоне Балтийского моря.

Регулярный мониторинг юго-восточной части Балтийского моря проводится начиная с июня 2004 года. Мониторинг базируется на анализе всех радиолокационных изображений, получаемых радиолокатором с синтезированной апертурой, установленном на Европейском спутнике ENVISAT в широкополосном режиме съемки (размер кадра 400x400 км, разрешение 75м x 75 м), захватывающих регион интереса [6, 7]. Это исследование инициировано компанией ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть в связи с началом разработки нефтяного месторождения "Кравцовское" (платформа Д-6) на Российском шельфе в марте 2004 года. Ввод месторождения в эксплуатацию послужил толчком к развитию комплексных экологических исследований в этом регионе, включающих в себя как спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений так и восстановление из данных дистанционного зондирования параметров морской поверхности и динамики морских мезомасштабных процессов.

На 140 радиолокационных изображениях ASAR ENVISAT, полученных за период наблюдений с июня 2004 г. по март 2005 г., было выявлено 110 нефтяных пятен. При этом за указанный период времени при практически ежедневном спутниковом мониторинге не обнаружено ни одного пятна в радиусе 30 км вокруг платформы Д-6. (рис. 4).

В качестве примера приводится описание случая крупного нефтяного загрязнения, выявленного в Гданьском заливе на основе ASAR ENVISAT- изображения 30 июля 2004 г. (20:08 GMT) (рис. 5, 6). На радиолокационном изображении отчетливо выделяется большое нефтяное загрязнение, представляющее со-

бой цепочку из пяти пятен (Рис.5). Изображение получено в благоприятных для выявления нефтяных загрязнений условиях: скорость приводного ветра составляла 5-6 м/с. Площадь нефтяных пятен составляет соответственно 6.42, 3.80, 0.89, 1.69, и 7.53 км<sup>2</sup> (слева направо). Таким образом, нефтяной пленкой оказалось покрыто около 20.33 км<sup>2</sup>, при этом цепь нефтяных пятен имела протяженность около 26 км.

Специфическая форма рассматриваемого нефтяного загрязнения (протяженная цепочка пятен) позволяет предположить, что первоначально крупное нефтяное загрязнение вытянутой формы было локализовано восточнее, а затем под влиянием течений дрейфовало в западном направлении и распалось на отдельные пятна. Эту стадию деградации первоначально нефтяного пятна и зарегистрировало радиолокационное изображение. Сопоставление радиолокационного изображения с оптическими изображениями спутника MODIS различных каналов, полученных утром того же дня (09:40 GMT), выявило, что цепочка загрязнений вытянута в западном направлении по периферии антициклонической части диполя, или грибовидного течения, которое является комбинацией узкой струи с парой вихрей противоположного знака на конце. Это грибовидное течение расположено в центре Гданьского залива (рис. 6). На рис. 5 можно выделить еще одно пятно, расположенное непосредственно в центре интенсивной циклонической части диполя (рис. 6). Возможно, это результат захвата нефтяных и других загрязнений с большой площади поверхности моря под действием конвергентного циклонического вращения в вихре. Предположительно, что 30-го июля перемещение этих нефтяных сликов могло определяться интенсивностью вихревых движений в диполе, движением самого диполя, который за период с 28-го по 30-е июля повернулся по часовой стрелке на 90°, а также скоростью и направлением ветра. К сожалению, проследить дальнейшие перемещения и эволюцию сликов не удалось, поскольку следующий по времени снимок ASAR, захватывающий Гданьский залив, был получен лишь 2-го августа (20:14 GMT). На этом изображении слики отсутствовали, что можно объяснить сильным перемешиванием в приповерхностном слое воды в течение суток 2-го августа, когда скорость ветра возросла до 8-10 м/с. В этот и предшествующие дни район залива был затянут облачностью, которая не позволила проследить мезомасштабную динамику по данным ИК и оптического диапазонов спутников NOAA и MODIS.

В данных условиях осуществлялся прогноз дрейфа, который рассчитывался на основе интерактивной численной модели Seatrack Web Шведского института метеорологии и гидрологии (SMHI) [8]. Эта модель сегодня активно используется в Швеции, Дании, Финляндии, Польше, Эстонии, Латвии, Литве и России. Эта уникальная европейская модель позволяет рассчитывать на всей акватории Балтики дрейф и трансформацию пятен различных нефтепродуктов на 48 часов вперед с пространственным разрешением 3 морские мили, с учетом обновляющегося прогноза поля ветра и течений каждые 3 часа. Модель позволяет также восстанавливать историю дрейфа пятен до 10 суток назад по всему Балтийскому морю.

Согласно прогнозу, цепочка нефтяных пятен должна была перемещаться в южном направлении под воздействием полей ветра и течения и в течение двух дней достичь Висловской косы. Отклонение прогнозных данных от данных наблюдений объясняется тем, что численная модель не всегда способна учитывать наличие таких мезо- и мелкомасштабных динамических особенностей, как вихри, диполи, струи, филаменты, меандры и т.д. На рис. 6 видно, что нефтяные слики перемещаются практически вдоль линий тока антициклонического вихря. Небольшое смещение объясняется разницей в 10 часов между моментами съемки MODIS (утро) и ASAR Envisat (вечер). В условиях облачности, обычных для Балтийского моря, интерактивная численная модель Seatrack Web (SMHI) служит единственным источником информации о дрейфе и эволюции сликов.

## Заключение

Рост объема нефти, перевозимого морским путем, а также ввод в эксплуатацию все новых нефтяных платформ в непосредственной близости от берега делает задачу регулярного контроля состояния прибрежной зоны все более актуальной. Единственным эффективным методом такого контроля является комплексный спутниковый мониторинг. Он должен базироваться на ежедневном приеме, обработке и анализе различных спутниковых данных, в первую очередь на данных радиолокационного зондирования из космоса (Envisat ASAR, ERS-2 SAR, Radarsat). Для адекватной интерпретации радиолокационных изображений необходимо получать комплементарную информацию о состоянии морской поверхности и пограничного слоя океан-атмосфера, полях температуры воды, взвешенного вещества, содержания хлорофилла, мезомасштабной динамике вод, полях приповерхностного ветра и поверхностного волнения. Эта информация может быть получена посредством интернет-технологий с сенсоров AVHRR NOAA, MODIS Terra/Aqua, TOPEX/Poseidon, Jason-1 QuickSCAT. Прогноз дрейфа и эволюции обнаруженных нефтяных пятен должен осуществляться с помощью соответствующих численных моделей, аналогичных Seatrack Web (SMHI)

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 04-02-16629 и INTAS 03-51-4987 и программы «Комплексный спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря», поддержанной компанией ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть. Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европей-

ским космическим агентством (ESA) в рамках проектов C1P.1027, AO3.224 и Bear 2775. Радиолокационные данные по Балтийскому морю предоставлены норвежской станцией KSAT Station.

### Литература

1. 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.
2. Mityagina M., A. Churyumov, O. Lavrova. Problems in detecting oil pollution in Black Sea coastal zone by satellite radar means // *Proceedings of the 2004 ERS&Envisat Symposium*, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.
3. Hovland H. A., J.A. Johannessen and J. Digranes, : Slick detection in SAR images// In:*Proc. IGARSS'94*, 1994, P. 2038-2040.
4. Булатов, М.Г., Ю.А. Кравцов, А.В. Кузьмин, О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов, Д.В. Александров. Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999-2000)// М., КДУ, 2003, 143 с.
5. Боев А.Г., А.Я. Матвеев. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла “Нефтяные камни” по данным многочастотного радиолокационного зондирования // *Радиофизика и Радиоастрономия*. 2005. Т.11. № 2. С. 178- 188.
6. Костяной А.Г., Лебедев С.А., Соловьев Д.М., Пичужкина О.Е. Спутниковый мониторинг юго-восточной части Балтийского моря. Отчет 2004 г. ООО «Лукойл-Калининградморнефть» 2005, 34 с.
7. Litovchenko K. Ts., A.G. Kostianoy, O.Yu. Lavrova. Operational monitoring of oil spills in Baltic Sea using ENVISAT ASAR. *Proceedings of 31<sup>st</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment*. 20-24 June 2005, Saint Petersburg, Russia. (CD-ROM)
8. Ambjörn C. Forecasts of the trajectory and fate of spills, using Internet as the calculation platform // In: *USA-Baltic International Symposium “Advances in Marine Environmental Research, Monitoring and Technologies”*, Klaipeda, Lithuania, 15-17 June 2004. 2004.

Диаграмма 1

Number of detected oil spills in Novorossiisk-Gelendzhik area

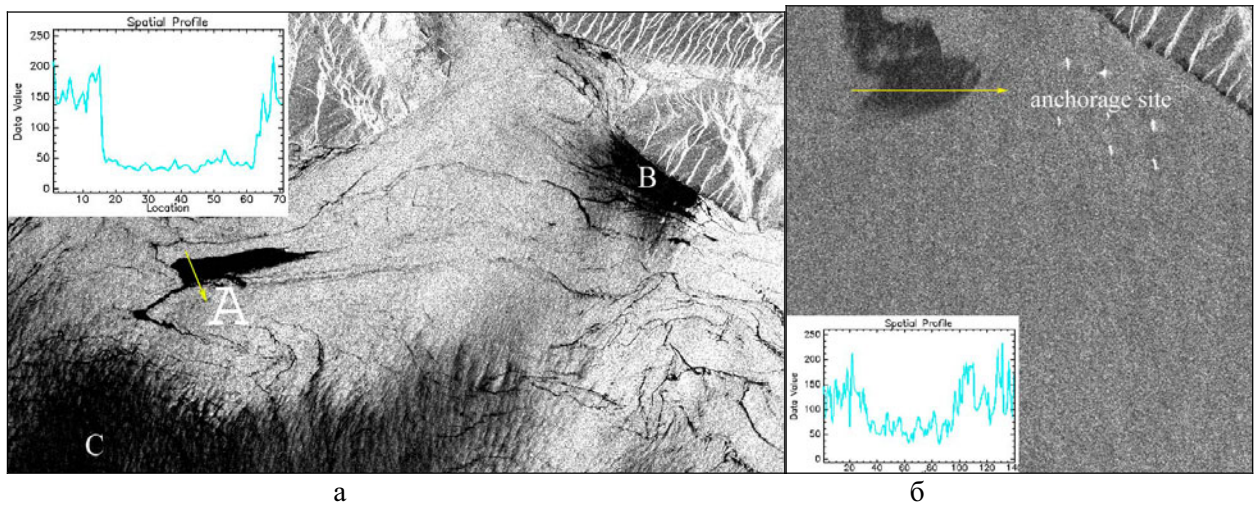
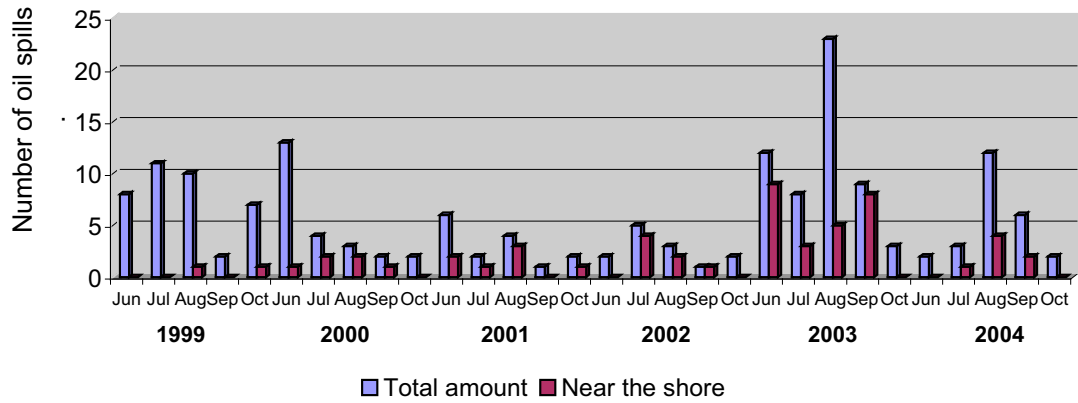


Рис. 1. ERS-2 SAR изображения, полученные в районе г. Новороссийск.

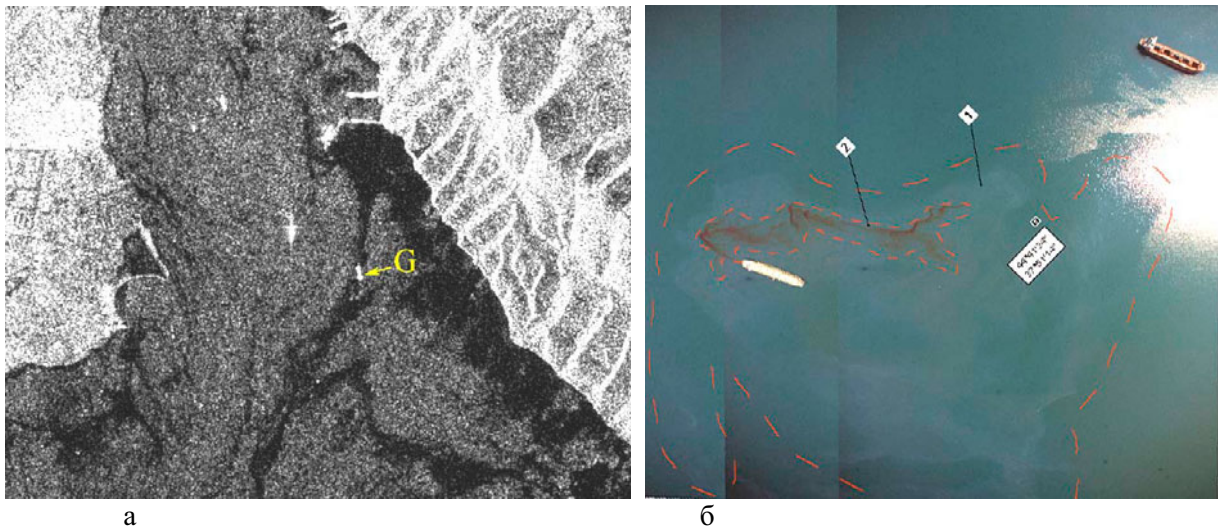


Рис.2. Разлив нефтепродуктов с танкера «The Georgios III» 7 августа 2004.

Envisat ASAR изображение (а) Цемесской бухты получено через 12 часов после оптической съемки с вертолета (б).

G – положение танкера «The Georgios III»;

1 – зона распространения пленок нефтепродуктов интенсивностью 3-4 балла;

2 - зона распространения пленок нефтепродуктов интенсивностью 5 баллов

Оптическое изображение с вертолета любезно предоставлено Специализированным центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей.

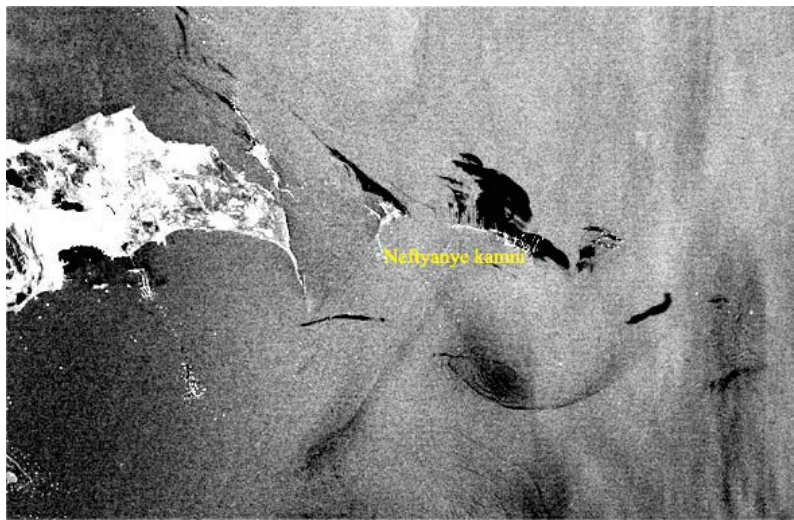


Рис. 3. Катастрофические разливы нефти в районе «Нефтяных камней». Фрагмент изображения (45x30 км), полученного Envisat ASAR 10 сентября 2004. Общая площадь нефтяных загрязнений составляет 200 км<sup>2</sup>

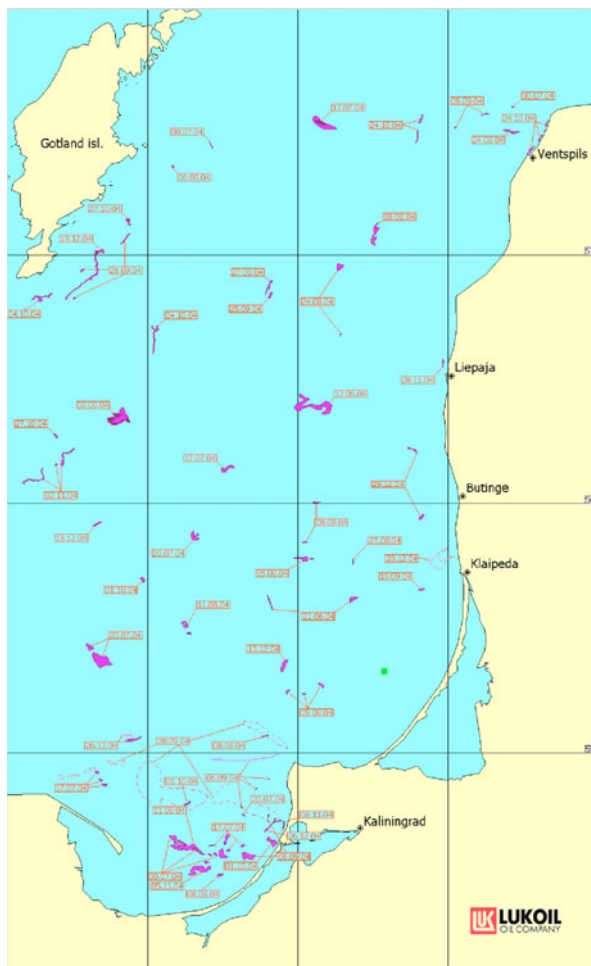


Рис. 4. Схема нефтяных пятен, выявленных при анализе радиолокационных изображений ASAR ENVISAT, полученных в июне-декабре 2004 г. Платформа Д-6 отмечена зеленым квадратиком

Рис. 6. Мезомасштабная динамика в Гданьском заливе, выявленная на оптическом изображении MODIS-Terra (разрешение 250 m), полученном 30 июля 2004, 09:40 GMT. Черные пятна соответствуют положению нефтяных загрязнений обнаруженных на радиолокационном изображении (рис.5)

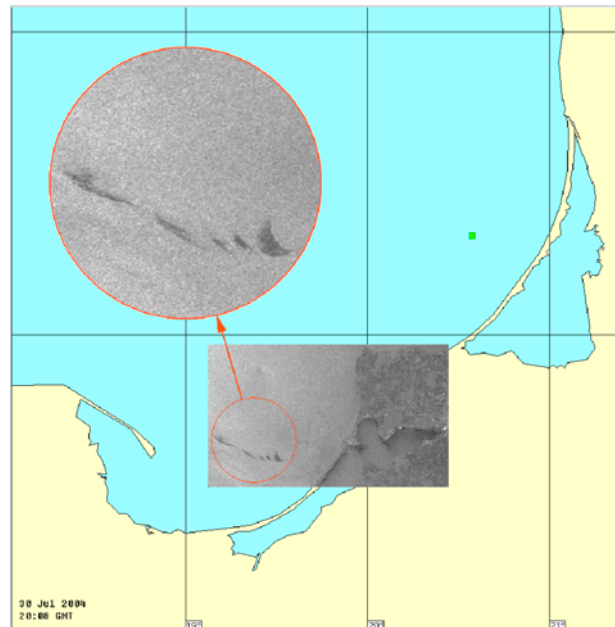


Рис. 5. ASAR ENVISAT изображение юго-восточной части Балтики, полученное 30 июля 2004, 20:08 GMT. Стрелка указывает на цепочку нефтяных пятен в Гданьском заливе

