

# Разработка системы космического мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности

А.А. Феоктистов, Н.Н. Новикова, Л.А. Пахомов, П.В. Люшвин, А.И. Захаров,  
С.И. Мартынов, О.Б. Федичев, А.А. Мирошин

<sup>1</sup>*Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ),  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНСТВО  
127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл.51, корп. 25.  
E-mail: feoktistov@ntsomz.ru*

Научный центр оперативного мониторинга Земли Федерального космического агентства участвовал в выполнении работ по проектам OSCSAR и ERUNET совместно с рядом научных организаций стран-членов ЕКА, России и Украины. В рамках этих проектов НЦ ОМЗ начал работы по созданию системы мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности. При выполнении работ основное внимание уделено анализу возможностей синергического анализа данных SAR и данных видимой и ИК области спектра.

## Введение

Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Федерального космического агентства (ФКА), Россия, Москва участвует в выполнении работ по проектам OSCSAR и ERUNET совместно с рядом научных организаций стран-членов ЕКА, России и Украины. В соответствии с программой работ по проекту ERUNET НЦ ОМЗ проводит работы по акватории Черного и Азовского морей, по проекту OSCSAR – по акватории Карского и юго-восточной части Баренцева морей. В рамках этих проектов НЦ ОМЗ начал работы по созданию системы мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности. Необходимость создания такой системы вызвана тем, что существующая в России система трубопроводов для транспортировки нефти из Восточной Сибири достигла своей максимальной пропускной способности и дальнейший рост нефтедобычи ведет к увеличению объемов ее транспортировки посредством танкерных перевозок, что неизбежно влечет за собой возрастание рисков разливов сырой нефти и нефтепродуктов на морской поверхности, нанося серьезный ущерб окружающей среде [1, 2].

## Общие принципы построения системы обработки данных

Создаваемая система ориентирована на использование данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR), характеризующихся высоким пространственным разрешением, всепогодностью, независимостью от условий освещения. Важную вспомогательную роль играют данные видимого и ИК диапазонов спектра.

Автоматические методы идентификации нефтяных загрязнений морской поверхности на основе анализа данных SAR в настоящее время только разрабатываются [3]. В этом направлении достигнуты определенные успехи [4-6]. Подход дает хорошие результаты в случае уединенных пятен среди однородно взволнованного моря, однако, если пятно находится среди или вблизи областей ветровой тени (орография береговой зоны) или ветрового затишья, резко возрастает вероятность ошибок [7]. Поэтому на этом этапе создания системы мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности в качестве основного метода идентификации в НЦ ОМЗ используется метод экспертной оценки в среде ГИС. Решение относительно природы каждого слайка (выглаженного по сравнению с окружением участка морской поверхности, выглядящего на изображении SAR как темное пятно) принимается экспертом-дешифровщиком на основании анализа всей имеющейся информации. Форма, размер, текстура, четкость границы, яркостные характеристики слайков – основные признаки, которые используются при дешифрировании. При этом анализируются

информация о поле поверхностных течений, дислокации возможных источников загрязнения, характеристиках приводного ветра.

В отсутствие возможностей верификации результатов тематической обработки с использованием квазисинхронных подспутниковых наблюдений и в целях повышения вероятности правильного распознавания снимков техногенного и естественного генезиса основное внимание было уделено развитию возможностей синергического анализа данных SAR и данных видимой и ИК области спектра. При проведении анализа использовались известные признаки нефтяных загрязнений на морской поверхности в каналах видимой и ИК области спектра [8].

## Синергический анализ данных SAR и данных видимой и ИК области спектра

### Результаты обработки данных по акватории Каспийского моря

Экспериментальная обработка метода синергического анализа данных SAR и данных видимой и ИК области спектра проводилась с использованием материалов космической съемки акватории Каспийского моря в районе Апшеронского полуострова, характеризующейся высокой вероятностью наличия в районе съемки необходимых безоблачных условий и нефтяных загрязнений морской поверхности.

При проведении исследований параллельно рассматривалась и решалась вторая задача – установление возможной взаимосвязи между крупными нефтяными загрязнениями поверхности Каспийского моря площадью свыше 10 кв. км и периодами активизации литосферных процессов (в связи с предстоящими землетрясениями). Ценность этой части исследований в том, что установление указанной взаимосвязи позволит повысить надежность идентификации природы наблюдаемых снимков. Работы по второй задаче только начаты и проводятся в связи с подготовкой к запуску Российского спутника VULCAN (его основная задача – обнаружение предвестников землетрясений). Необходимо отметить, что район морских нефтепромыслов у Апшеронского полуострова находится в зоне повышенной сейсмической активности, где в год происходит около 10 землетрясений с магнитудой более 3 баллов



Рис. 1. а - фрагмент изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT (режим GM) для юго-западной части Каспийского моря; б - стандартная карта альbedo на длине волны 0,8 мкм, в %, по данным аппаратуры AVHRR/NOAA

Синергический анализ данных SAR и данных видимой и ИК области спектра проводился с использованием квиклюков ASAR/ENVISAT из архива ЕКА и данных AVHRR/NOAA из архива НЦ ОМЗ. Был проведен экспресс-анализ данных за 2004 г. Крупные размеры анализируемых снимков позволили использовать получаемые с помощью программы EOLISA изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT в режиме GM (размер пиксела 1 км). Было выявлено и проанализировано 2 ситуации. В качестве примера ниже представлены изображения (и результаты их обработки) для ситуации 1 (27.05.2004 г.).

На рис. 1а представлен фрагмент изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT (режим GM) для юго-западной части Каспийского моря. Отчетливо видны крупные слики правее Апшеронского полуострова. Наличие облачности оценивалось с использованием стандартной карты альбедо на длине волны 0,8 мкм, в %, рис. 1б (по данным аппаратуры AVHRR/NOAA). Область слика правее Апшеронского полуострова безоблачна. Линейные облачные структуры, наблюдавшиеся вдоль юго-западного побережья, “трассировали” активные разломы литосфер. Эти облака являлись предвестниками землетрясения, которое произошло на следующий день, 28.05.2004 г. Его эпицентр показан стрелкой на рис. 1б. Отметим, что облака-трассеры, в основном, состоят из безводных аэрозолей. Для этих облаков (и областей вокруг них) характерны почти нулевые значения разницы радиационных температур на длинах волн 11 и 12 мкм.

При проведении синергического анализа по данным аппаратуры AVHRR/NOAA строились карта температуры поверхности воды (ТПВ), рис. 2а (значимый прогрев водной поверхности в области слика не наблюдается), прецизионная карта альбедо солнечной радиации, рис. 2б, на длине волны 0,8 мкм, в %, построенная с использованием программы атмосферной коррекции и коррекции искажений, вызванных изменением зенитных и азимутальных углов Солнца и спутника (локальный минимум альбедо обозначен стрелкой; находится примерно в том же месте, что и слик на изображении аппаратуры ASAR/ENVISAT) и карта альбедо гидрозоля на длине волне 0,6 мкм, в %, рис. 2с (повышенные, по сравнению с окружающим фоном, значения альбедо гидрозоля не наблюдаются).

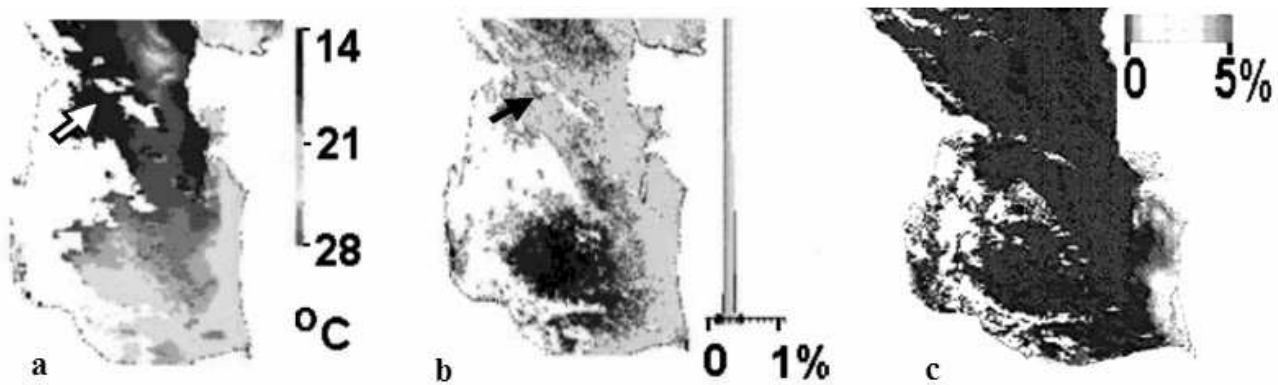


Рис. 2. а - карта температуры поверхности воды; б - прецизионная карта альбедо солнечной радиации на длине волны 0,8 мкм, в %; с - карта альбедо гидрозоля на длине волне 0,6 мкм, в %

Дополнительно использовалась информация о: (1) средних суточных значениях модуля скорости ветра, (2) скорости ветра по данным утренних и вечерних витков аппаратуры SSM/I, (3) концентрации хлорофилла по данным аппаратуры SEAWIFS/SEASTAR и (4) по данным аппаратуры MODIS/AQUA/TERRA.

Результаты проведенного синергического анализа позволили сделать вывод о том, что в обеих рассмотренных ситуациях в районе Апшеронского полуострова имело место обширное нефтяное загрязнение морской поверхности, причем в каждом случае уже наблюдалась активизация литосферных процессов в связи с предстоящими землетрясениями. Следовательно, выявляется тенденция, связанная с повышенной вероятностью появления крупных нефтяных сликов в периоды активизации литосферных процессов в регионе. Возможно, это связано либо с активизацией естественных грифонов, либо с разрывом нефтепроводов, проложенных в районе разломов земной коры на Апшеронском пороге. При активизации литосферных процессов возникают утечки углеводородов, приводящие к возникновению нефтяных загрязнений морской поверхности.

На рис. 3 представлены 3 изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT (квиклуки) по одной и той же территории в юго-восточной части акватории Каспийского моря, удаленной от навигационных маршрутов и районов нефтедобычи. Даты съемки - 05.07.2003 г., 09.08.2003 г., 15.05.2004 г. [9]. Положение нефтяных

сликов очень часто совпадает, что подтверждает гипотезу о том, что генезис нефтяных загрязнений связан с грифонами.

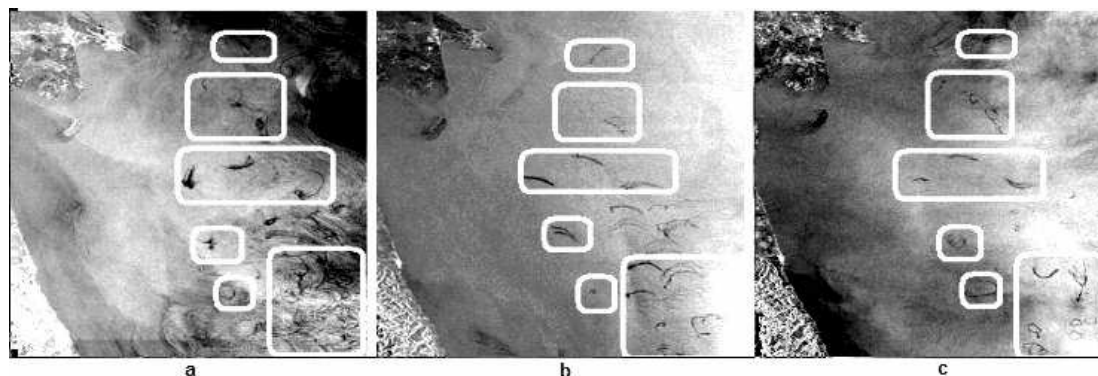


Рис. 3. 3 изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT (кvikлуки) по одной и той же территории в юго-восточной части акватории Каспийского моря. Даты съемки - 05.07.2003 г. (a), 09.08.2003 г. (b), 15.05.2004 г. (c)

Разумеется, считать, что все крупные нефтяные загрязнения морской поверхности в районе Апшеронского полуострова вызваны исключительно активизацией литосферной деятельности, было бы некорректно. В [10] представлены результаты анализа еще одной ситуации, связанной с обнаружением крупного нефтяного загрязнения в районе Апшеронского полуострова, для которой обнаружить явные признаки активизации литосферной деятельности не удалось.

### Результаты обработки данных по акватории Черного и Азовского морей

Проведен анализ SAR изображений по акватории Черного и Азовского морей, полученных с помощью аппаратуры SAR/ERS-2 и ASAR/ENVISAT с 1999 по 2004 г.г., в результате проведения которого были сформированы наборы эталонных объектов двух основных классов объектов: сликов естественного генезиса и сликов техногенного генезиса. Идентификация проводилась методом экспертной оценки. Создаваемая библиотека эталонных объектов будет использоваться экспертом-дешифровщиком при принятии решения о генезисе анализируемых сликов. Кроме того, эталонные объекты будут использованы на этапе обучения супервизируемых классификаторов.

В ходе выполнения работ были созданы две вспомогательные процедуры – для проведения визуального анализа и оценки скорости судна. Необходимость создания первой процедуры связана с тем, что при возникновении на морской поверхности сложной конфигурации сликов естественного генезиса (при наличии зон ветровой тени и ветрового затишья, возникновении приливных волн и проявлении эффектов типа апвеллинга) в “децибельном” формате структура сликов на морской поверхности просматривается лучше. Известно, что данные SAR представлены в виде двухбайтового целого числа, кодирующего значение амплитуды принятого радиолокационного сигнала. Используя известное значение калибровочной константы, в процедуре рассчитывается соответствующее значение удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР)  $\sigma_0$  и делается переход к децибелам с последующим квантованием на 256 уровней.

В некоторых случаях при проведении комплексного анализа ситуации может понадобиться знание величины скорости судна (например, осуществляющего несанкционированный сброс нефтепродуктов). Для расчета этой величины была создана еще одна вспомогательная процедура, алгоритм которой использует известные соотношения между параметрами геометрии съемки, величиной скорости судна и величиной бокового смещения изображения судна от его следа на морской поверхности.

При проведении отработки метода синергического анализа данных SAR и данных видимой и ИК области спектра использовались данные аппаратуры SAR/ERS-2 и ASAR/ENVISAT из архивов Европейского

космического агентства (ЕКА), а также данные аппаратуры AVHRR/NOAA и MODIS/TERRA из архива НЦ ОМЗ. Для проведения анализа было отобрано несколько ситуаций с разным генезисом снимков.

3.2.1. В рамках одной из них были проанализированы 2 изображения аппаратуры SAR/ERS-2 акватории Азовского моря, полученные утром 27 сентября 2004 г. Предварительный анализ общей ситуации с использованием изображения аппаратуры TM/LANDSAT и карты альbedo на длине волны 0,6 мкм по данным аппаратуры AVHRR/NOAA показал, что над акваторией Азовского моря облачность отсутствует. Особое внимание было уделено выяснению генезиса “линейного” снимка, по форме напоминающего снимки, образующиеся при несанкционированном сбросе нефтепродуктов с движущегося судна. При проведении синергического анализа на основе данных аппаратуры AVHRR/NOAA были созданы карта ТПВ, карта альbedo гидрозоля и карта альbedo отраженной солнечной радиации на длине волны 0,8 мкм. В области снимка был зафиксирован локальный минимум ТПВ. Поэтому был сделан вывод о том, что вполне возможен естественный генезис снимка, связанный с локальным уменьшением шероховатости морской поверхности, вызванным в том числе и из-за увеличения вязкости в зоне более холодной воды. Более однозначный вывод сделать сложно ввиду несовпадения времени съемки в микроволновой области и ИК тепловой области спектра, а также низким пространственным разрешением данных ИК тепловой области спектра, см. раздел 4.

3.2.2. В рамках другой ситуации анализировался генезис снимка в юго-восточной части Цемесской бухты в районе порта Новороссийск, зафиксированного на изображении аппаратуры ASAR/ENVISAT, полученном утром 15 сентября 2004 г. Отсутствие облачности установлено с помощью карты альbedo солнечной радиации на длине волны 0,6 мкм (по данным аппаратуры AVHRR/NOAA). Наличие локального максимума в районе дислокации снимка на карте ТПВ свидетельствовало об ослаблении ветрового перемешивания. Локальный минимум на карте альbedo на длине волны 3,7 мкм, свидетельствующий о снижении шероховатости водной поверхности, также подтверждал ослабление ветрового перемешивания. Локальный максимум альbedo гидрозоля исключал возможность нефтяного загрязнения морской поверхности. Общий вывод – генезис снимка связан с локальным уменьшением скорости ветра. Этот вывод подтверждался и информацией о скорости ветра (по данным утренних витков аппаратуры SSM/I).

3.2.3. В рамках еще одной ситуации был проведен анализ генезиса крупного снимка на изображении аппаратуры SAR/ERS-2 юго-западной части Черного моря, полученном утром 26 июня 2004 г. Карта альbedo на длине волны 0,6 мкм (по данным аппаратуры AVHRR/NOAA) свидетельствовала об отсутствии облачности в районе снимка. На карте ТПВ и карте альbedo гидрозоля положительные аномалии отсутствовали. На карте альbedo на длине волны 3,7 мкм в области снимка зафиксирован локальный минимум, свидетельствующий о снижении шероховатости водной поверхности. Таким образом, налицо все признаки нефтяного генезиса снимка, находящегося на судоходной трассе вдали от берега (отсутствует ветровая тень) на глубокой воде (эффекты типа апвеллинга или влияния орографии подводного рельефа отсутствуют).

### **Результаты обработки данных по акватории Карского и Баренцева морей**

Проведен синергический анализ данных по юго-восточной части Баренцева моря, в которой Российская нефтяная компания ЛУКОЙЛ проводит буровые работы. Ввиду высокой вероятности облачности для северных широт всего удалось отобрать только 3 такие ситуации (ситуация 1 – акватория Обской губы, ситуации 2 и 3 – акватория к северу и к югу от пролива Югорский шар, отделяющего остров Вайгач от материка).

3.3.1. Изображения акватории Печорской губы получены в утренние часы 04.07.2003 г. аппаратурой SAR/ERS-2, MERIS/ENVISAT, SEAWIFS/SEASTAR, MODIS/TERRA и AVHRR/NOAA. Предварительный анализ информации показал, что акватория Печорской губы в основном безоблачна, частично закрыта облаками только гряда островов, отделяющих Печорскую губу от Баренцева моря. Снимки на изображении аппаратуры SAR/ERS-2 наблюдались вдоль этой гряды островов и в заливах западнее и восточнее дельты р. Печоры. Синергический анализ позволил сделать вывод о том, что наблюдаемые на изображении аппара-



туры SAR/ERS-2 слики западнее и восточнее дельты р. Печоры возникают вследствие влияния береговой орографии; возможно, определенную роль играют контрасты ТПВ и связанные с ними различия влаго и тепло обмена между приводной атмосферой и поверхностью воды, а также изменения молекулярной вязкости воды. Об отсутствии нефтяных загрязнений свидетельствовало наличие локального максимума гидрозоля в этом месте. Слики вдоль гряды островов, отделяющих Печорскую губу от Баренцева моря, по видимому, приурочены к зонам ветровой тени. Ввиду наличия облачности синергический анализ не проводился.

3.3.2. Изображение южной части острова Вайгач и прилегающей территории получено с помощью аппаратуры ASAR/ENVISAT 02.08.2004 г. утром. Наблюдались слики с севера и с юга от пролива Югорский шар, отделяющего остров Вайгач от материка. Весь анализируемый район открыт от облаков – предварительный анализ проводился с использованием данных аппаратуры MODIS/TERRA и AVHRR/NOAA. Результаты проведенного синергического анализа показали, что слики с севера от пролива Югорский шар связаны с квазиштилевыми условиями, о чем свидетельствовало наличие локальных максимумов ТПВ и альbedo гидрозоля. Слики к югу от пролива - следствие причин, не связанных с наличием нефтяных загрязнений; возможно, определенную роль играет и локальное уменьшение ТПВ (соответствующее увеличению молекулярной вязкости воды, о чем уже шла речь выше). Об отсутствии больших по площади нефтяных загрязнений свидетельствовало наличие локальных максимумов гидрозоля в этих местах.

3.3.3. Вечером того же дня, 2.08.2004 г., с помощью аппаратуры ASAR/ENVISAT было получено еще одно изображение данной территории. Слик, распространявшийся утром на десятки км к северу от острова Вайгач вечером занимал более узкую прибрежную полосу. Слик продолжался через пролив Югорский Шар и далее в юго-западном направлении относительно узкой полосой. Положение полос сликов, идущих от пролива Югорский Шар в юго-западном направлении в целом коррелирует с положением потоков более холодных вод из Карского моря (контрасты температур, возможно, являются одной из причин различия шероховатости; связано это как с различием влаго и тепло обмена между приводной атмосферой и поверхностью воды, так и с изменением молекулярной вязкости воды). Использувавшиеся данные о скорости ветра свидетельствовали о том, что скорости ветра в этом районе недостаточно велики для того, чтобы ветровое перемешивание стало основным фактором, определяющим состояние водной поверхности. Признаки нефтяного загрязнения морской поверхности выявить не удалось.

Итак, в рамках всех трех рассмотренных ситуаций был установлен естественный генезис наблюдаемых сликов. Возможно, это подтверждает эффективность экологической и промышленной безопасности в районе проведения буровых работ Российской нефтяной компании ЛУКОЙЛ.

## Заключение

Полученные результаты позволили оценить реальные возможности синергического анализа данных SAR и данных видимой и ИК области спектра применительно к погодно-климатическим условиям южных морей Российской Федерации. Основные трудности были обусловлены: (1) несовпадением времени съемки, поскольку использовавшаяся информация была получена с разных спутников (в микроволновой области - ENVISAT и ERS-2; в видимой и ИК области спектра – NOAA и TERRA) и (2) низким пространственным разрешением данных аппаратуры AVHRR/NOAA и MODIS/TERRA в каналах ИК тепловой области спектра. Представляется целесообразным одновременное включение в состав информационного комплекса будущих спутниковых систем аппаратуры SAR и аппаратуры видимой и ИК области спектра, включая ИК тепловую.

Крайне неблагоприятные погодно-климатические условия северных широт (высокая вероятность облачности, полярная ночь) резко ограничивают возможности практического использования метода синергического анализа для акватории Карского и Баренцева морей. Кроме того, сложные процессы взаимодействия приливных и ветровых волн приводят к возникновению на морской поверхности сложной, достаточно быстро меняющейся конфигурации сликов естественного генезиса, обладающих сильным маскирующим эффектом и ограничивающих возможности эксперта-дешифровщика при принятии окончательного решения о техногенном генезисе сликов. В качестве примера на рис. 4а – 4с представлены

изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT по акватории Обской губы, полученные 12, 28 и 31 июля 2004 г. Скорость приводного ветра составляла 4-12 м/с, что выше пороговых значений (3 м/с) для образования штилевых сликов на водной поверхности, тем не менее слики на морской поверхности наблюдаются повсеместно. Другие особенности в структуре изображений морской поверхности видны на изображениях аппаратуры ASAR/ENVISAT по акватории Байдарацкой губы, полученных 21 и 24 июля 2004 г., рис 4d-4e.

Для повышения эффективности создаваемой системы мониторинга нефтяных загрязнений поверхности Карского моря предполагается интегрировать в создаваемую технологию обработки программные средства автоматической идентификации нефтяных загрязнений морской поверхности на основе анализа данных SAR. Результаты классификации окажутся важной вспомогательной информацией, которая будет использована экспертом-дешифровщиком при анализе сложных ситуаций.

Данная работа выполнена в рамках международных проектов OSCSAR и ERUNET, поддержанных Европейским космическим агентством (ESA) и Международной Астронавтической Федерацией (IAF). Спутниковые радиолокационные данные предоставлены Европейским космическим агентством в рамках проектов OSCSAR и ERUNET.

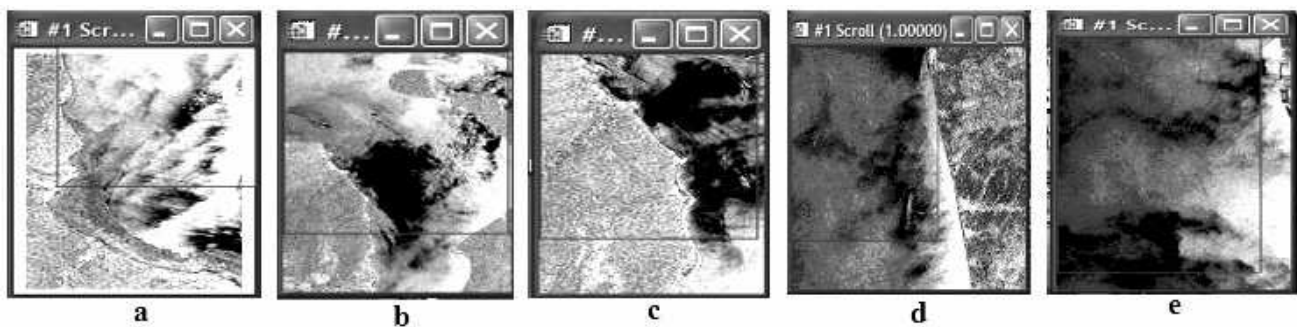


Рис. 4. a,b,c - изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT по акватории Обской губы, полученные 12, 28 и 31 июля 2004 г.; d,e - изображения аппаратуры ASAR/ENVISAT по акватории Байдарацкой губы, полученных 21 и 24 июля 2004 г.

## Литература

1. Sandven S., Kudryavtsev V. Marine oil spill control: SAR monitoring and model prediction (OSCSAR), ESA-IAF Call for Proposals, GMES Networking with Russia and Ukraine in 2004 // Bergen, NERSC, 2004. 35 p.
2. Morris S. ERUNET [European-Russian-Ukrainian GMES NETwork for monitoring of Oil Spills and Oil&Gas Pipelines] Ispra, JRC, 2004, 57 p.
3. Ivanov A. Yu., Vostokov S.V., Ermoshkin I.S. Mapping of oil films in the Caspian Sea using spaceborne synthetic aperture radar imagery // Earth Res. Space, 2004, N4. P. 82-92.
4. Solberg A.H.S., Storvik G., Solberg R., Volden E. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999. 7(4). P. 1916-1924.
5. Fiscela B., Giancaspro A., Nirchio F., Pavese P., Trivero P. Oil spill detection using marine SAR images // Int. J. Remote Sens., 2000. 21(18). P. 3561-3566.
6. Frate F.D., Petrocchi A., Lichtenegger J., Calabresi G. Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2000. 38(5). P. 2282-2287.
7. Ivanov A. Yu., Ermoshkin I.S., Fang M., He M.-X., Krovotyntsev V.A. Use of the wide-swath synthetic aperture radar images for mapping oil pollution in the sea // Earth Res. Space, 2005. N5. P. 78-95.
8. Пахомов Л.А., Люшвин П.В., Чернявский Е.Б., Учет искажающего влияния атмосферы по оценке альbedo и температуры поверхности Каспийского моря по данным аппаратуры AVHRR спутников NOAA // Исслед. Земли из космоса, 2004. №3. С.67-72.
9. Люшвин П.В., Егоров С.Н., Сапожников В.В. Каспийский казан // ARCREVIEW, 2006. №1 (36). С. 20.
10. Новикова Н.Н., Феоктистов А.А., Пахомов Л.А., Люшвин П.В., Федичев О.Б., Мартынов С.И., Захаров А.И. Формирование первых наборов данных для Карского моря; формирование дополнительных наборов данных для Карского моря; анализ изображений Карского моря, полученных с помощью аппаратуры SAR/ПЛСБО; оценка возможности обнаружения нефтяных разливов: Карское море // Отчет по проекту OSCSAR. М.: НЦ ОМЗ, 2005. 81 с.