

*В.Г. Бондур, В.В. Замшин*

### **4.3. Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов**

#### **Введение**

Нефть и газ являются важнейшими видами природных ресурсов. В Российской Федерации находятся одни из крупнейших запасов углеводородов. При этом значительная часть разведанных запасов находится на морских шельфах Сахалина, Баренцева и Карского морей. Освоение шельфовых месторождений неразрывно связано с решением таких задач, как развертывание и эксплуатация добывающих платформ, транспортировка углеводородов по подводным трубопроводам и морскими танкерами. Для решения этих задач необходимо наличие большого количества разнородной геопространственной информации, адекватно описывающей текущую ситуацию на различных уровнях детальности. Предоставление такой информации наиболее эффективно осуществляется с использованием современных аэрокосмических средств дистанционного зондирования Земли (Бондур, 2004, 2008, 2010, 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Аковецкий, 2008; Лаврова и др., 2011; Bondur, 2006, 2011).

Одними из наиболее перспективных средств дистанционного зондирования являются космические радиолокаторы, позволяющие обеспечить регулярное и надежное получение достоверной информации для осуществления мониторинга районов добычи и транспортировки углеводородов в любых труднодоступных районах практически независимо от метеоусловий. Космическая радиолокационная съемка обладает рядом уникальных свойств, обуславливающих высокую эффективность ее применения для решения задач мониторинга морских акваторий при добыче и транспортировке углеводородов. Основными из них являются всепогодность, независимость от условий естественной подсветки, особые механизмы рассеяния радиоволн морской поверхностью, а также возможность получения данных на различных масштабных уровнях с пространственным разрешением от единиц до сотен метров (Бондур, 2004, 2010, 2012; Иванов, 2010; Лаврова и др., 2011; Bondur, 2006, 2011; Bondur, Starchenkov, 2006).

В настоящем разделе рассматриваются основные особенности космического радиолокационного мониторинга морских акваторий, примеры его применения для обнаружения нефтепроявлений, нефтяных загрязнений и регистрации полей приповерхностного ветра и спектров волнения по радиолокационным изображениям.

#### **Особенности применения космических радиолокаторов для мониторинга акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов**

В настоящее время орбитальная группировка спутников ДЗЗ, оснащенных радиолокационной аппаратурой, информация с которых может быть использована для мониторинга акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов, насчитывает более 10 космических аппаратов. При этом в ближайшее время к запуску готовятся еще несколько подобных спутников.

Примеры некоторых современных спутников, оборудованных радиолокаторами с синтезированием апертуры, приведены в таблице 4.3.1. Как видно из этой таблицы, за последние несколько лет на орбиту были выведены радиолокационные спутники, позволяющие вести съемку с высокой разрешающей способностью — 1 метр, что соизмеримо с оптическими спутниками.

Основными особенностями космических радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли, обуславливающими их высокую эффективность для решения задач мониторинга морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов, являются (Бондур 2004, 2010, 2012; Bondur 2006, 2011):

- слабая зависимость от погодных условий и наличия облачности;
- независимость от условий естественной освещенности;
- высокая частота съемки одного и того же участка земной поверхности (до нескольких раз в сутки);
- высокое пространственное разрешение на местности (до 1 метра);
- возможность выбора уровня детализации и размера полосы съемки;
- возможность обеспечения большой полосы захвата;
- возможность использования различных поляризаций (VV, HH, HV, VH);
- регулярность получения информации;
- когерентность излучения, обеспечивающая возможность учета фазовой информации, интерферометрической обработки и др;
- высокое радиометрическое разрешение (высокая информативность данных);
- возможность исследования как геометрических, так и диэлектрических характеристик объектов;
- резонансные механизмы взаимодействия радиолокационного сигнала с водной поверхностью;
- возможность реализации многодиапазонных режимов съемки.

Все действующие радиолокационные спутники находятся на околополярных орбитах.

Следует отметить, что спутники RADARSAT-2, TerraSAR-X, TanDEM-X и спутники типа Cosmo-SkyMed обладают возможностью быстрой смены направления зондирования (см. таблица 4.3.1). Съемка по левую и правую сторону от траектории полета спутника осуществляется в одинаковых режимах, при этом геометрия съемки претерпевает зеркальное отражение относительно подспутниковой траектории. В данном случае частота съемки одного и того же участка местности увеличивается за счет того, что одна и та же область может быть отснята с большего количества орбитальных витков.

Космические радиолокаторы позволяют решать многие задачи, связанные с мониторингом морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов. Основными из них являются (Бондур, 2010, 2012, 2008; Аковецкий, 2008):

- прогноз нефтегазоносности, выявление зон нефтегазонакопления;
- контроль ледовой обстановки в областях добычи и транспортировки углеводородов;
- информационное обеспечение безопасности нефтяных платформ от айсбергов;
- выявление нефтяных пятен естественного происхождения (сипов);

**Таблица 4.3.1**  
**Характеристики некоторых современных радиолокационных спутников дистанционного зондирования Земли**  
 (<http://www.eoportal.org/>; <http://www.vniiem.ru/ru/>)

Характеристика	Наименование КА, страна/агентство						
	RADARSAT-1, Канада	Envisat, ESA <sup>1</sup>	TerraSAR-X/ TanDEM-X, Германия	RADARSAT-2, Канада	Cosmo-SkyMed 1/2/3/4, Италия	Метеор-М-1, Россия	Кондор-Э, Россия
Дата запуска	04.11.1995	01.03.2002	15.06.2007/ 21.06.2010	14.12.2007	7.06.2007/ 8.12.2007/ 25.10.2008/ 06.11.2010	17.09.2009	Планируется
Высота орбиты (км)	798	784	514	798	619	832	500
Наклонение орбиты (°)	98,6	98,6	97,44	98,6	98	98,85	98
Разрешение на местности (м)	8–100	27, 150	1–16	3–100	1–100	400–1000	1–30
Длина волны (см)	5,6	5,6	3,1	5,5	3,1	3,1	9,6
Полоса захвата на местности (км)	50–500	100, 405	10–100	20–170	10–200	450–600	10–15
Диапазон углов зондирования (°)	10–59	14,1–45,2	20–55 <sup>2</sup>	10–60 <sup>2</sup>	20–50 <sup>2</sup>	25–48	20–55 <sup>2</sup>
Поляризация	НН	НН, VV, HV, VH	НН, VV, HV, VH	НН, VV, HV, VH	НН, VV, HV, VH	VV	НН, VV

<sup>1</sup> – Европейское космическое агентство.

<sup>2</sup> – зондирование возможно по обе стороны от траектории полета.

- выявление разливов нефти;
- дистанционное определение скорости и направления приповерхностного ветра на больших площадях;
- подготовка и оптимизация маршрутов прокладки трубопроводов и контроль их состояния в прибрежной зоне;
- экологический мониторинг районов добычи, транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов;
- информационное обеспечение прокладки маршрутов судов, используемых для транспортировки углеводородов.

Возможность эффективного применения космических радиолокационных данных для решения столь широкого спектра задач мониторинга морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов определяется их высокой информативностью, а также значимым экономическим эффектом.

### **Особенности формирования радиолокационных изображений морской поверхности**

Важнейшей особенностью, характеризующей взаимодействие электромагнитного излучения радиодиапазона с водной поверхностью, является резонансный механизм рассеяния (Басс, Фукс, 1972; Бондур, 2004, 2008, 2010, 2012; Булатов и др., 2003). Условие Вульфа-Брэгга определяет так называемую резонансную длину волны водной поверхности  $\Lambda$ .

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \Theta} ,$$

где  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения радиодиапазона,  
 $\Theta$  – угол падения электромагнитного излучения к вертикали.

В рамках резонансного механизма рассеяния радиоволн, поверхностные волны только этой длины оказываются ответственными за формирование сигнала, рассеиваемого водной поверхностью в обратном направлении, то есть в направлении антенны радиолокатора.

Несмотря на важную роль, механизм резонансного рассеяния не дает полного описания взаимодействия радиоизлучения с водной поверхностью. Более полной системой описания данного процесса является двухмасштабная модель, которую иногда называют композитной моделью (Басс, Фукс, 1972; Бондур, 2004; Булатов и др., 2003). В рамках данной модели рассматривается пространственная модуляция мелких волн, обуславливающих рассеяние Вульфа-Брэгга, на более крупных волнах. Это позволяет учесть три следующих эффекта: изменение угла зондирования по отношению к мелким резонансным волнам на склонах крупных волн; влияние на резонансные волны локальных течений, индуцированных крупными волнами; появление так называемых связанных брэгговских волн на вершинах крупных волн. Недостатки двухмасштабной модели начинают проявляться на настильных углах зондирования, в то время как при средних углах зондирования, характерных для космических радиолокаторов, данная модель действует вполне адекватно.

Для описания взаимодействия электромагнитного излучения радиодиапазона с водной поверхностью используется также трехмасштабная модель. Эта модель является усовершенствованной двухмасштабной моделью, в которой производится учет рассеяния радиосигнала на крутых обрушающихся мезомасштабных волнах. Механизм рассеяния радиосигнала на таких волнах не имеет связи с резонансным рассеянием, а реализуется за счет зеркального отражения. В связи с этим можно говорить о введении не третьего масштаба в двухмасштабную модель, а третьей компоненты. Поэтому трехмасштабная модель называется еще трехкомпонентной моделью (Булатов и др., 2003).

Трехкомпонентная модель учитывает наиболее значимые факторы переизлучения радиосигнала водной поверхностью. Очевидно, что существует еще множество явлений, способных влиять на отраженный радиолокационный сигнал. К числу таких явлений относятся гидробиологические явления, пенные образования на водной поверхности, капли воды в приводном слое атмосферы.

Известны и другие физические механизмы, также оказывающие влияние на формирование радиолокационных изображений акваторий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Среди них следует отметить изменение уровня отраженного радиолокационного сигнала за счет изменения диэлектрической проницаемости водной поверхности (диэлектрическая проницаемость загрязненной нефтепродуктами водной поверхности может быть в десятки раз меньше, чем у чистой воды) (Бондур, 2004, 2010, 2012).

Следует отметить, что при мониторинге водной среды существенную роль играет поляризация излучения радиолокатора. В некоторых случаях, особенно при наличии малораспространенных явлений на водной поверхности, радиолокационные изображения одного и того же участка на разных поляризациях оказываются различными (Бондур, 2004, 2008).

Эти особенности рассеяния радиоволн морской поверхностью необходимо учитывать при организации аэрокосмического мониторинга морских акваторий в районах освоения, добычи и транспортировки углеводородов.

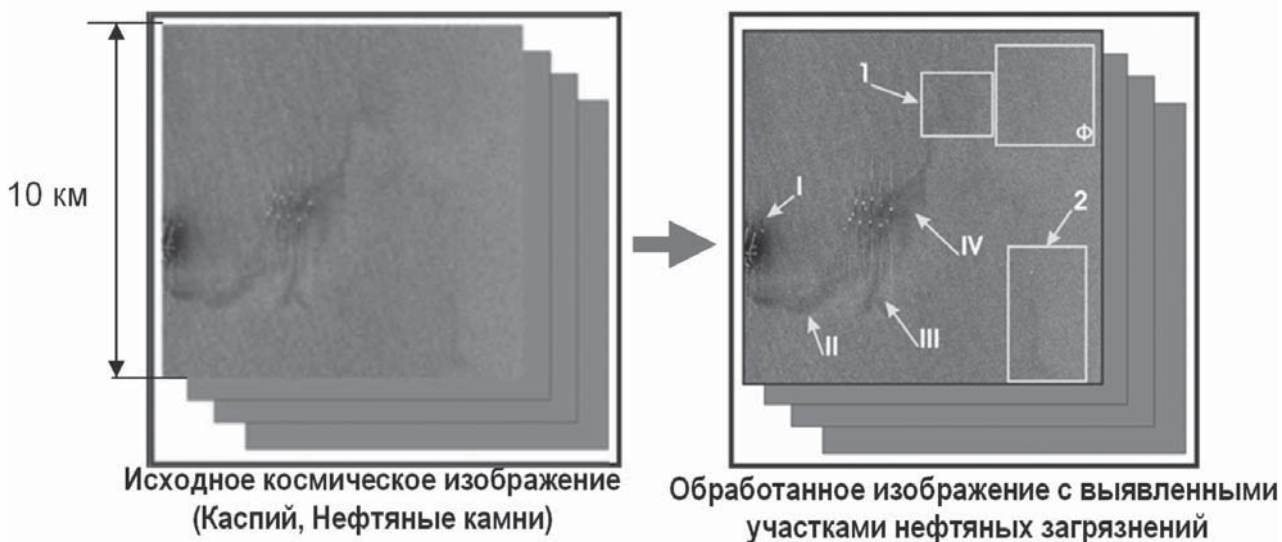
### **Примеры обнаружения нефтяных загрязнений акваторий по космическим радиолокационным изображениям**

В большинстве случаев нефтяные загрязнения морской поверхности проявляются на космических радиолокационных изображениях в виде участков с ярко выраженным отрицательным контрастом, на которых уровень отраженного сигнала меньше уровня сигнала от фона. Это обусловлено снижением интенсивности гравитационно-капиллярных волн в результате изменения сил поверхностного натяжения на загрязненных нефтью или нефтепродуктами участках водной поверхности (Бондур, 1987, 2004, 2010, 2012; Бондур, Гребенюк, 2001). Таким образом, происходит уменьшение амплитуды длин резонансных волн, ответственных за формирование отраженного радиолокационного сигнала, что вызывает ослабление сигнала, принятого радиолокатором. Такая ситуация будет наблюдаться при морском волнении больше 0,5–1 балла и углах визирования поверхности радиолокатором  $>35^\circ$  (Бондур, 2004, 2010, 2012). Больше число космических радиолокационных съемок морской поверхности соответствуют указанным условиям.

Анализ космических радиолокационных изображений с целью выделения аномалий, имеющих отрицательный контраст, вызванных загрязнением морской поверхности нефтью и ее производными, может быть выполнен как в интерактивном, так и в автоматизированном режиме.

Для проведения *интерактивного анализа* необходимо скорректировать гистограмму яркостей исследуемого радиолокационного изображения (или его фрагмента) с целью оптимизации контрастов между фоновой обстановкой и выделяемыми аномалиями. Как правило, после выполнения этой процедуры нефтяные пятна становятся видны более отчетливо на изображении. Улучшение интерпретируемости нефтяных пятен на космических радиолокационных изображениях может быть достигнуто также за счет подавления спекл-шума сглаживающими фильтрами (Бондур, Старченков, 2001; Bondur, Starchenkov, 2006). Инструментарий для проведения яркостных преобразований и сглаживающей фильтрации радиолокационных изображений представлен во всех популярных программных пакетах, ориентированных на обработку данных ДЗЗ. На обработанном таким способом радиолокационном изображении нефтяные загрязнения легко выявляются визуально. Пример интерактивного выделения нефтяных загрязнений на космическом радиолокационном изображении приведен на рис. 4.3.1.

Скорректированное по яркости и отфильтрованное радиолокационное изображение может быть использовано, например, в качестве подложки для ситуационной карты при мониторинге аварий в районе объектов нефтяного комплекса. Пример такой ситуационной карты, сформированной путем обработки космического радиолокационного изображения, полученного с борта спутника TerraSAR-X, для аварии на



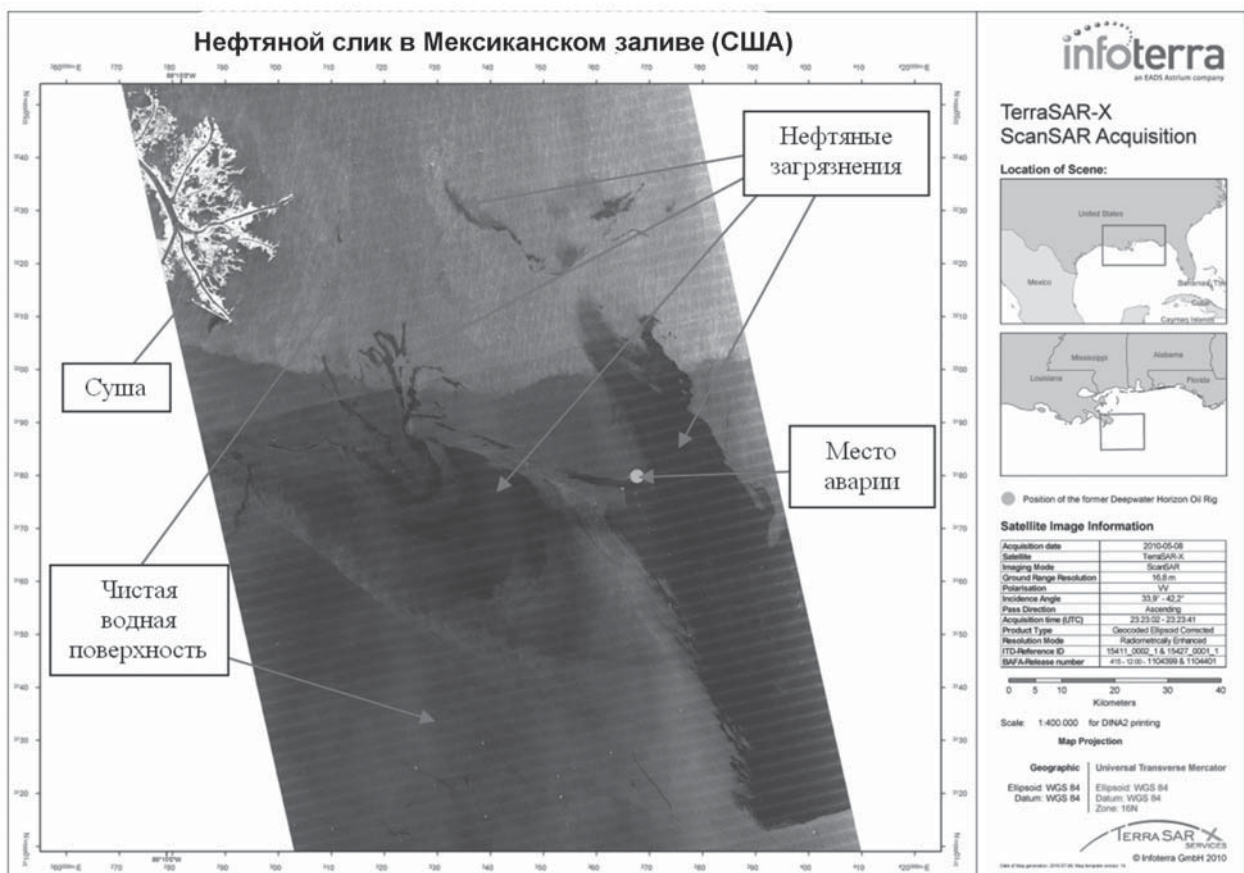
**Рис. 4.3.1.** Пример интерактивного выделения нефтяных загрязнений на морской поверхности по космическому радиолокационному изображению (Каспийское море, Нефтяные камни):

I – сильное загрязнение; II, III – участки расплывания нефтяного slickа; IV – нефтяной slick у системы платформ, связанный с утечками нефти в районе добычи; 1, 2 – слабые проявления нефтяных slickов; Φ – фоновый участок без нефтяных загрязнений

нефтяной платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе в 2010 году приведен на рис. 4.3.2.

Выделение нефтяных загрязнений акваторий по космическим радиолокационным изображениям *в автоматизированном режиме* в первом приближении может быть выполнено с использованием метода пороговой классификации. Для этого задается некоторый порог, разделяющий область значений яркости исследуемого изображения на две части, одна из которых соответствует загрязненной водной поверхности, другая — всем остальным объектам. Конкретное значение порога может быть либо подобрано экспериментально, либо установлено на основании априорных знаний, например, по результатам анализа серии других изображений данного типа для тестовых участков. Далее значения каждого пикселя изображения сравниваются с порогом, и выносится решение о его принадлежности к классу загрязненной водной поверхности. Результатом проведения такой процедуры является маска обнаруженных загрязнений.

Необходимо отметить, что в случае сложных метеоусловий при наличии фоновых помех такой подход не позволит получить адекватные результаты. В связи с этим в общем случае надежная идентификация загрязненных нефтепродуктами участков

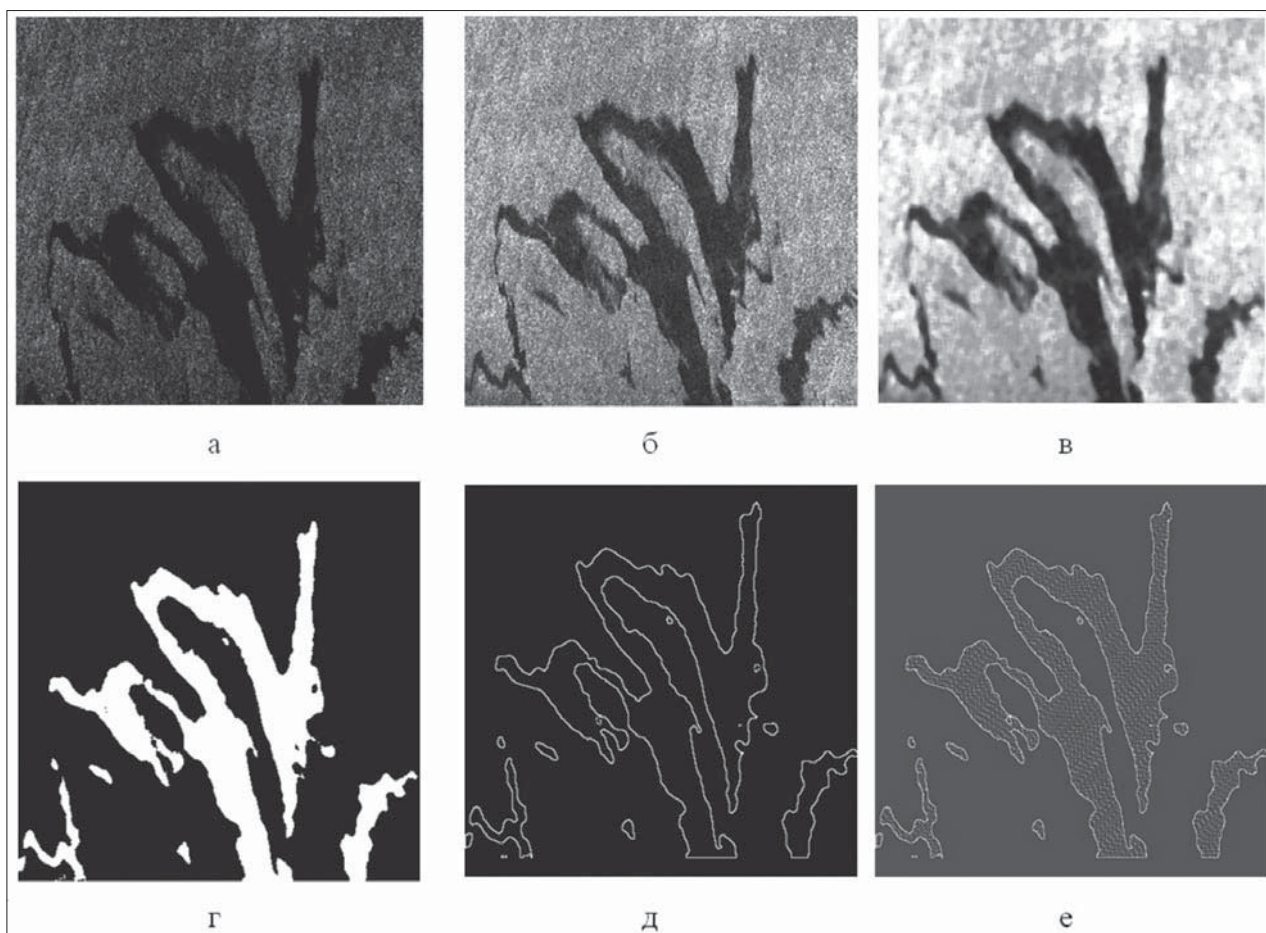


**Рис. 4.3.2.** Пример ситуационной карты последствий аварии нефтяной платформы Deepwater Horizon в Мексиканском заливе (2010 г.), сформированной на основе радиолокационного изображения, полученного со спутника TerraSAR-X (<http://www.astrium-geo.com/>)

водной поверхности предполагает использование более развитых подходов, хотя в их основе, как правило, также лежит пороговый метод обработки.

На рис. 4.3.3 приведен пример обработки фрагмента космического радиолокационного изображения, полученного со спутника TerraSAR-X вблизи места аварии на нефтяной платформе Deepwater Horizon в Мексиканском заливе (<http://www.astrium-geo.com/>), с выделением нефтяного загрязнения. В этом примере использовалась следующая последовательность операций:

- сужение рабочего диапазона значений;
- сглаживающая фильтрация изображения медианным фильтром с размером апертуры, равным 7 пикселям;
- пороговая обработка сглаженного изображения;



**Рис. 4.3.3.** Пример обработки фрагмента космического радиолокационного изображения, полученного со спутника TerraSAR-X, с выделением нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе: а – исходный фрагмент, б – результат сужения диапазона значений яркости, в – результат сглаживающей фильтрации, г – маска загрязнения, д – границы загрязнения в векторном виде, е – карта загрязнения в условных обозначениях



- векторизация маски нефтяного загрязнения;
- введение условных обозначений для векторного представления информации.

Как видно из рис. 4.3.3, в пределах данного фрагмента пороговый метод позволил достаточно точно выделить загрязненные участки.

Выделение нефтяных загрязнений по космическим радиолокационным изображениям морской поверхности наиболее эффективно можно осуществить с использованием *комплексного подхода*, сочетающего в себе элементы интерактивной и автоматической обработки. Такой подход позволяет оперативно получить адекватный результат.

В общем случае комплексный подход предполагает два этапа работ, а именно: интерактивную подготовку изображения к машинному анализу и сам анализ, который выполняется автоматически. В зависимости от ситуации могут использоваться различные методы подготовки и анализа изображений (Бондур, 2004, 2010; Бондур, Старченков, 2001; Бондур, Воробьев, 2012).

Наиболее удобными для дальнейшего использования результатами обработки космических радиолокационных изображений являются информационные продукты, представляющие собой карты загрязнений с собственным оформлением или с возможностью загрузки в геоинформационную систему. На рис. 4.3.4 приведен пример комплексной обработки космического радиолокационного изображения с выделением нефтяных загрязнений и инженерных объектов в зоне освоения месторождения (Каспийское море, Нефтяные камни).

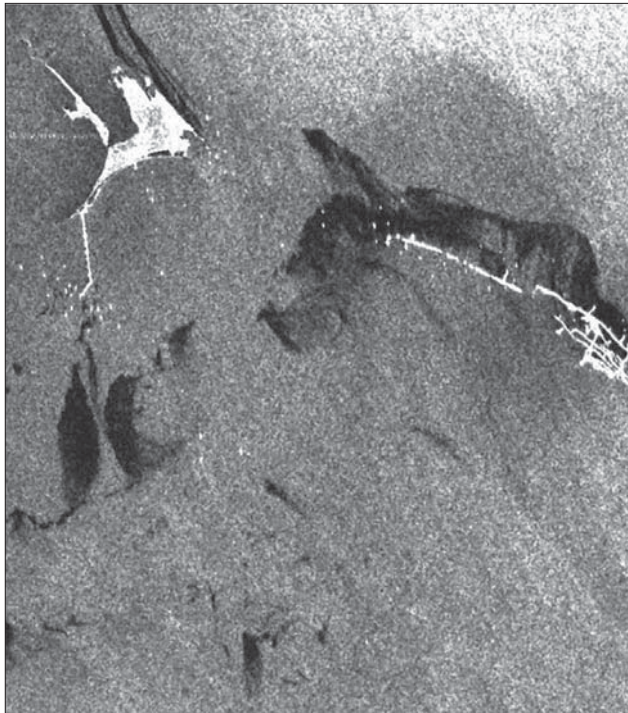
В приведенном примере использовалась многоуровневая кластеризация по алгоритму ISODATA и классификация по пороговому методу с предварительной фильтрацией и текстурным анализом исходного изображения. Результат представлен в виде цветокодированной карты в проекции UTM, схема выделенных загрязнений представлена отдельно на подложке Google Earth (<http://www.google.com/earth/index.html>).

### **Выявление естественных нефтегазопроявлений по радиолокационным изображениям**

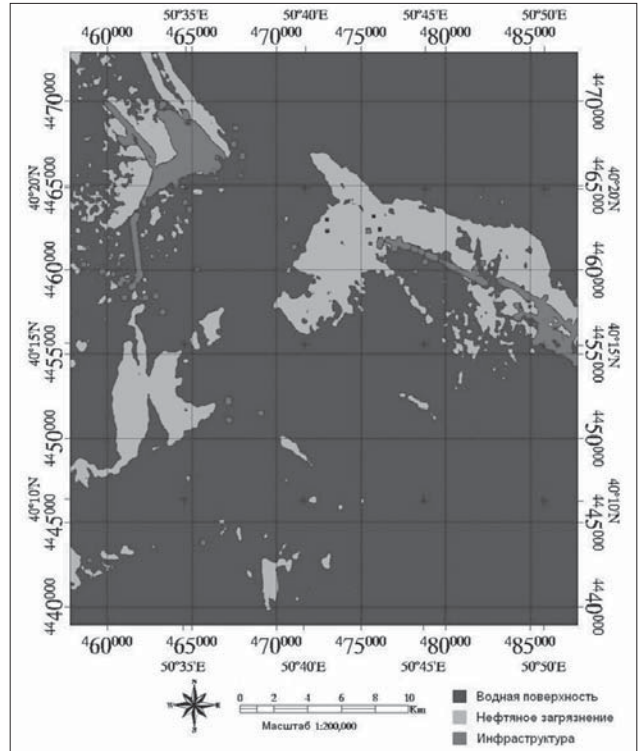
Одной из актуальных задач анализа космических радиолокационных изображений при мониторинге морских акваторий в районах добычи углеводородов является исследование генезиса выявляемых аномалий (Бондур, 2004, 2010; Бондур, Кузнецова, 2012; Иванов, 2007).

Известно, что наличие углеводородов как в водной толще, так и на поверхности акваторий может быть вызвано как антропогенными, так и естественными воздействиями. Среди антропогенных источников загрязнений, прежде всего, следует отметить аварии при добыче и транспортировке углеводородов, а также сбросы загрязненных вод с судов (Бондур, 2004, 2010, 2012; Бондур, Гребенюк, 2001; Иванов, 2007; Лаврова и др., 2011).

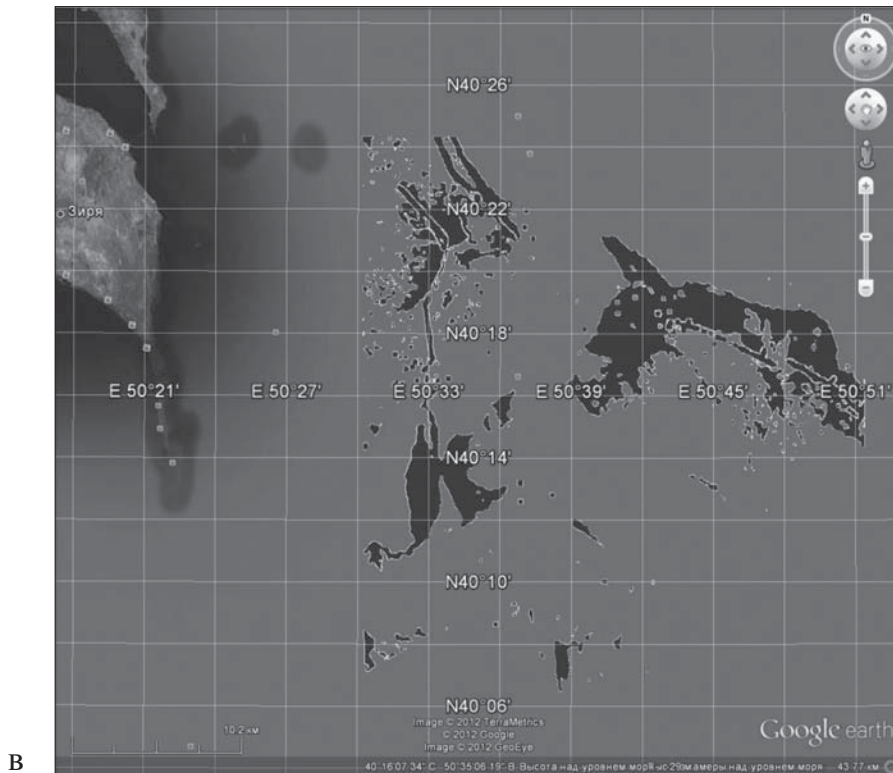
К естественным источникам загрязнения акваторий углеводородами относятся потоки углеводородов (сипы), приуроченные к залежам нефти и газа на шельфе, грязевым вулканам, газогидратам и скоплениям свободного газа в верхней части осадочного разреза (Бондур, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Иванов и др. 2007; Wilson



а



б



в

**Рис. 4.3.4.** Выделение нефтяных загрязнений и инженерных объектов в зоне освоения месторождения (Нефтяные камни, Каспийское море) с использованием комплексного подхода: а – исходное радиолокационное изображение; б – цветокодированная тематическая карта; в – выделенные нефтяные загрязнения на геоинформационной подложке Google Earth

et al., 1974; MacDonald, 1998). Зачастую вопрос о происхождении зафиксированного на радиолокационном изображении загрязнения акватории остается открытым.

Рассмотрим некоторые основные особенности радиолокационного обнаружения естественных нефтегазовых проявлений. При слабом волнении или штиле (балльность 0–0,5 балла) в месте выхода естественных нефтегазовых компонент, особенно при наличии пузырьковой газовой составляющей загрязнений, будут наблюдаться аномалии положительной контрастности по отношению к уровню собственного шума приемника (Бондур, 2004, 2010, 2012). Возникновение нефтегазовых компонент в толще воды приводит к появлению градиента плотности по глубине, что может вызвать генерацию внутренних волн, которые, взаимодействуя с поверхностным волнением, приводят к появлению гладких полос (сликов), что в свою очередь отразится на радиолокационном изображении (Бондур, 2004, 2010, 2012). Наличие течений в попавших в морскую среду загрязняющих веществах (в том числе и при «захвате» окружающих слоев воды) может служить физической основой для их обнаружения с помощью когерентных радиолокационных систем. В частности, с помощью радиолокатора может быть зафиксирован доплеровский сдвиг частоты, если течение направлено в сторону диаграммы направленности антенны или от нее (Бондур, 2004, 2010, 2012).

На практике установление происхождения загрязнений морских акваторий углеводородами, выявленных по радиолокационным изображениям, возможно с использованием дополнительных признаков. Среди признаков естественных нефтяных загрязнений водной поверхности, прежде всего, следует отметить следующие (Бондур, 2012; Бондур, Кузнецова, 2012; Иванов и др., 2007; Лаврова, Митягина, 2011; MacDonald, 1998; Wilson et al., 1974):

- нефтяные пятна естественного происхождения очень часто имеют так называемую точку всплытия, или «кляксообразное» утолщение, где всплывшая нефть аккумулируется на поверхности;
- постоянный источник на дне подпитывает пятна и способствует их росту во времени и пространстве;
- пятна располагаются группами вследствие того, что естественные источники не могут быть уединенными;
- пятна хорошо отслеживают поле преобладающих течений вследствие того, что естественные проявления создают тонкие пленки;
- характерные формы и размеры пятен – длинные (иногда десятки километров) линейные образования, часто имеющие форму запятых, зигзагов или петель, только что всплывшая нефть имеет форму круглых пятен небольшой площади;
- приуроченность к известным районам нефтегазонакопления или сосредоточения на дне грифонов, грязевых вулканов, сальз, сипов, которые источают нефть;
- периодичность появления пятен нефти.

На рис. 4.3.5 приведен пример космического радиолокационного изображения с проявлением нефтяных сипов естественного происхождения.

В то же время, такие косвенные признаки, как приуроченность нефтяных загрязнений к скоплениям судов, объектам нефтегазовой промышленности, морским путям могут служить основанием для того, чтобы считать эти загрязнения антропогенными.

На рис. 4.3.6 приведен пример антропогенных нефтяных загрязнений морской поверхности, приуроченных к нефтедобывающей инфраструктуре (Бондур, 2004).

### **Мониторинг поверхностного волнения и полей приповерхностного ветра в районах добычи и транспортировки углеводородов по радиолокационным изображениям**

Рассмотрим примеры космического мониторинга характеристик поверхностного волнения и полей приповерхностного ветра в акваториях морей и океанов в районах добычи и транспортировки углеводородов на основе анализа радиолокационных изображений.

Восстановление полей приповерхностного ветра и характеристик морского волнения является одной из важнейших задач, решаемых при мониторинге акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов. Данные о приповерхностном ветре и поверхностном волнении особенно важны для информационного обеспечения безопасности нефтедобывающих платформ и судов, прогнозирования распространения нефтяных загрязнений при авариях, определения траекторий движения айсбергов и др. (Бондур, 2004, 2010, 2012; Лаврова и др., 2011).

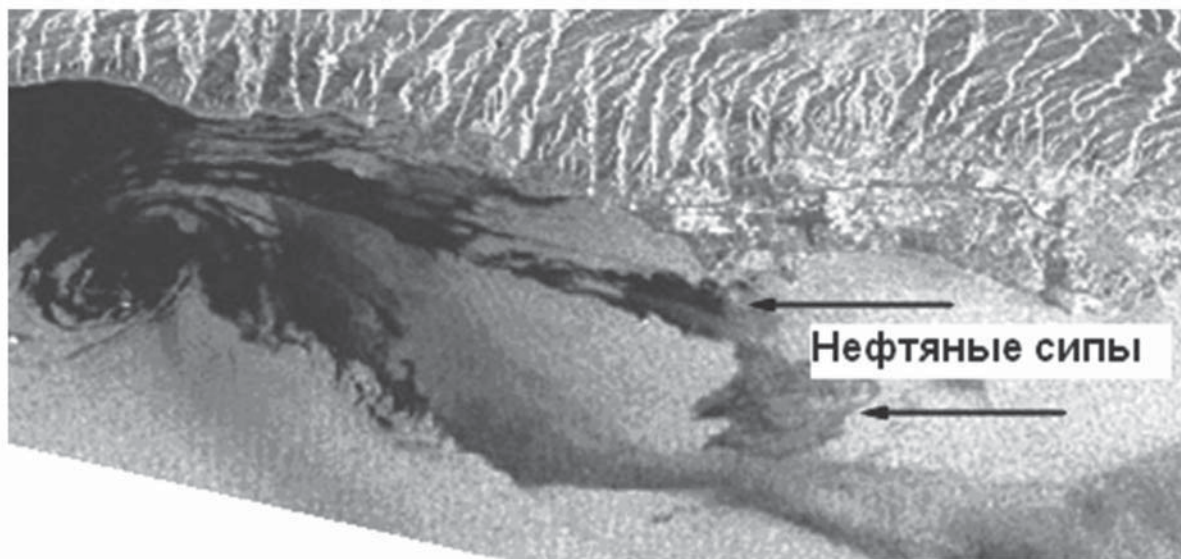
Определение характеристик приповерхностного ветра возможно как с использованием метеорологических космических радиолокаторов типа SSM/I, позволяющих получать продукты с разрешением в десятки километров, так и с использованием изображений высокого пространственного разрешения (1–30 метров), полученных при помощи космических радиолокаторов с синтезированием апертуры в С-диапазоне (Бондур, 2004, 2008, 2010, 2012; Portabella, 2002).

В настоящее время можно выделить следующие основные подходы к определению характеристик приповерхностного ветра по радиолокационным изображениям высокого пространственного разрешения (Бондур, 2004, 2008; Hersbach, 2003; Portabella, 2002):

- использование информативных признаков, определяемых на основе анализа интегральных преобразований фрагментов радиолокационных изображений с целью определения скоростей и направлений приповерхностного ветра в пределах обрабатываемых фрагментов и на разгонных участках;
- использование геофизических модельных функций для восстановления направления и полей скоростей приповерхностного ветра;
- интерактивный анализ радиолокационных изображений, определение направления и скорости ветра по косвенным признакам (ветровые тени, структурные характеристики изображений и др.).

Эффективным методом является сочетание перечисленных способов определения характеристик приповерхностного ветра, позволяющий также оценить и характеристики поверхностного волнения (Бондур, 2004, 2008).

Ниже приводится пример обработки космического радиолокационного изображения морской поверхности, полученного 27 сентября 2009 г. со спутника RADARSAT-2. В процессе его обработки определялись двумерные пространственно-частотные



**Рис. 4.3.5.** Пример космического радиолокационного изображения с проявлением нефтяных сипов естественного происхождения на водной поверхности (побережье в районе г. Санта-Барбара, США) (<http://www.nasa.gov>)



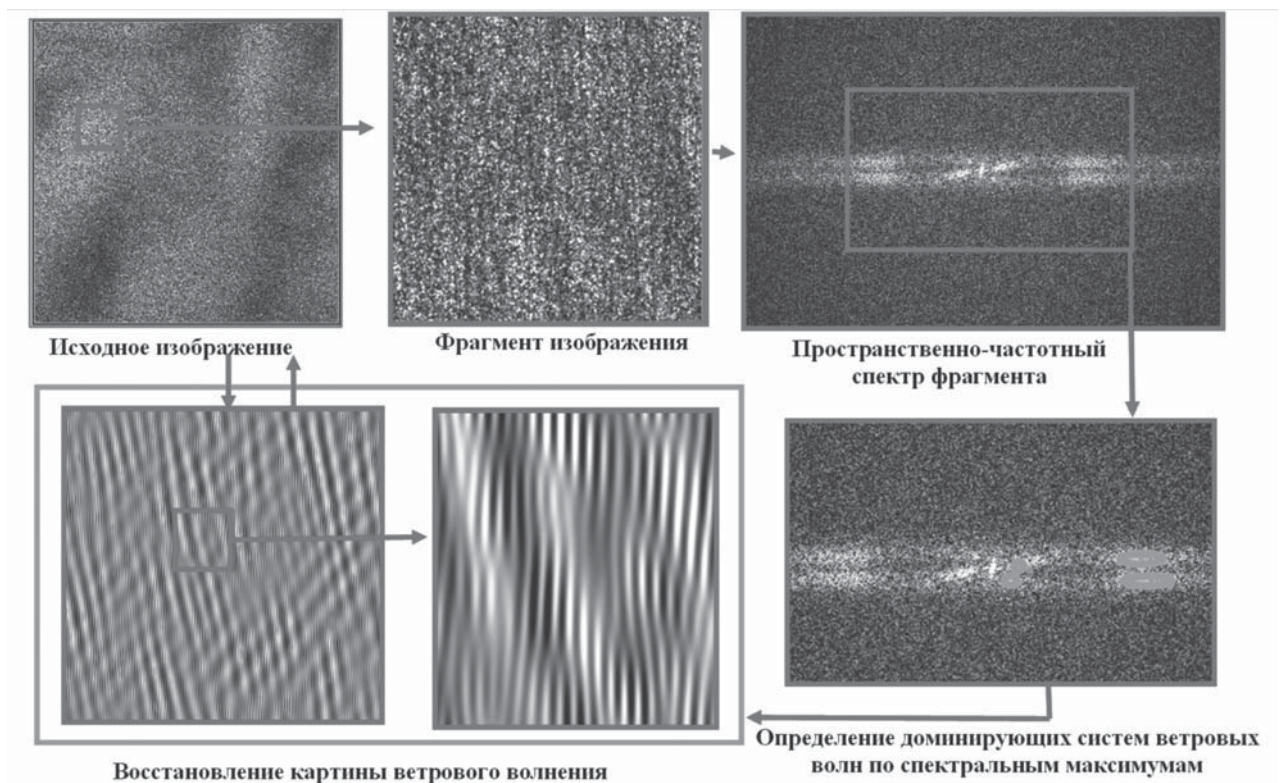
**Рис. 4.3.6.** Пример космических радиолокационных изображений с проявлением нефтяных загрязнений, приуроченных к нефтедобывающим платформам и судам (побережье в районе г. Санта-Барбара, США) (Бондур, 2004)

спектры фрагментов космического изображения, с использованием которых были выделены основные системы волн. Далее с использованием процедуры обратного преобразования Фурье пространственно-частотных спектров для выделенных областей (спектральных максимумов) были получены свободные от шумов модельные изображения основных систем волн, характеризующих состояние морской поверхности. Иллюстрация процесса восстановления структуры морской поверхности по фрагменту радиолокационного изображения с использованием метода дистанционной пространственно-частотной спектрометрии (Бондур, 1987, 2004, 2008; Bondur, 2011) приведена на рис. 4.3.7.

На основе анализа полученной картины ветрового волнения, свободной от шумов, с использованием эмпирических соотношений, связывающих характеристики ветрового волнения с характеристиками приповерхностного ветра, оценивались высоты волн, балльность волнения и скорость ветра на разгонном участке для доминирующей системы ветровых волн (Бондур, 1987, 2004, 2008; Бондур, Воляк, 1984; Bondur, 2011).

Результаты определения характеристик морского волнения и приповерхностного ветра для данного примера представлены в таблице 4.3.2.

На рис. 4.3.8 приведен пример расчета скорости приповерхностного ветра в каждой точке радиолокационного изображения, полученного со спутника RADARSAT-2 (пролив Карские Ворота, Северный Ледовитый океан). В данном случае использо-



**Рис. 4.3.7.** Восстановление картины ветрового волнения по космическим радиолокационным изображениям с использованием пространственно-спектрального подхода

Таблица 4.3.2

**Результаты определения характеристик морского волнения и приповерхностного ветра по космическому радиолокационному изображению**

Система волн	Средняя длина волны (м)	Тип волнения	Генеральное направление	Высота волн (м)	Скорость ветра на разгонном участке (м/с)
1	183	Развитое	Восток - запад	4,3	15,6
2	23	Развивающееся	Восток - запад	0,55	5,5
Волнение моря: 5–6 баллов					

васаль геофизическая модельная функции CMOD5, связывающая характеристики принятого радиолокационного сигнала с величинами скорости и направления приповерхностного ветра (Hersbach, 2003). В приведенном примере измерена скорость ветра непосредственно в момент съемки (так называемый «ветровой стресс»). Скорость ветра, определенная по космическому радиолокационному изображению, отображается на рис. 4.3.8б в градациях серого тона.

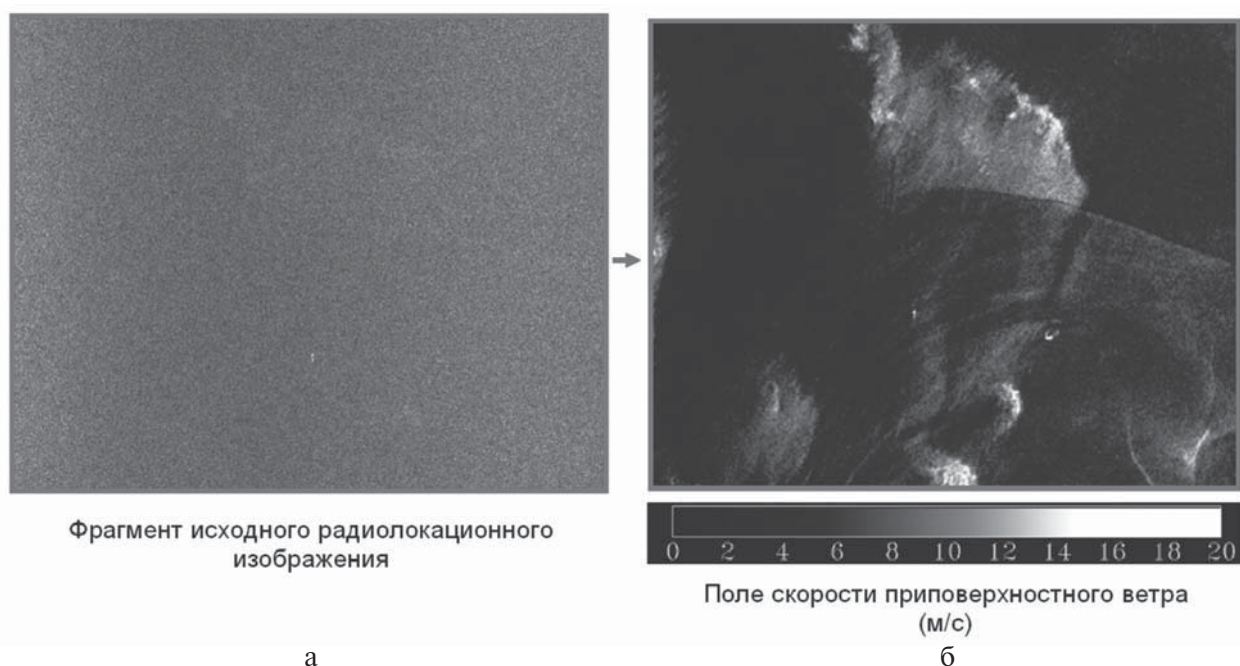
Приведенные примеры иллюстрируют широкие возможности использования космических радиолокационных изображений высокого и сверхвысокого разрешения для определения характеристик приповерхностного ветра и морского волнения при космическом мониторинге акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов.

### Заключение

Из проведенного анализа особенностей космических радиолокационных средств ДЗЗ следует, что применение таких средств для мониторинга морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов является высокоэффективным, особенно в труднодоступных акваториях.

В условиях значительной протяженности территорий, малой продолжительности светлого времени суток, высокой вероятности закрытости облачностью и других природных и климатических особенностей месторождений на морских шельфах Сахалина, Баренцева и Карского морей, космическая радиолокация является единственным средством, позволяющим обеспечить регулярный и высокоинформативный мониторинг в интересах решения задач нефтегазового комплекса.

Приведенные примеры мониторинга нефтяных загрязнений, естественных нефтегазопроявлений, восстановления характеристик морского волнения и полей приповерхностного ветра по космическим радиолокационным изображениям наглядно подтверждают широкие возможности использования космических радиолокационных данных для решения актуальных задач, связанных с космическим мониторингом объектов нефтегазового комплекса в акваториях морей и океанов, а также при осуществлении разведки, добычи и транспортировки углеводородов на шельфе и континентальном склоне.



**Рис. 4.3.8.** Пример использования геофизической модельной функции СМОД5 для восстановления поля скоростей приповерхностного ветра по радиолокационному изображению, полученному со спутника RADARSAT-2 в районе пролива Карские Ворота: а – исходное изображение; б – поле скоростей приповерхностного ветра в градациях серого тона

## Литература

1. *Аковецкий В.Г.* Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». 2008. 454 с.
2. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. 1972. 426 с.
3. *Бондур В.Г.* Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы. В настоящей книге. 2012. С. 15–37.
4. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–16.
5. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 55–117+8 стр. цв. вклеек.
6. *Бондур В.Г.* Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды: Курс лекций. М.: Московский государственный университет геодезии и картографии. 2008. 369 с.
7. *Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера-океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. С. 17–30.
8. *Бондур В.Г., Воляк К.И.* Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности // Труды ФИАН СССР: Т. 156. Исследования по гидрофизике. М.: Наука. 1984. С. 55–116.



9. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Методы обработки аэрокосмических изображений, полученных при мониторинге объектов нефтегазовой отрасли. В настоящей книге. 2012. С. 395–409.
10. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
11. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Исследование естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям. В настоящей книге. 2012. С. 272–287.
12. *Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
13. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю.* и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 1. С. 69–87.
14. *Иванов А.Ю.* О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 77–92.
15. *Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
16. *Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затягало В.В.* О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исследования Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
17. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 480 с.
18. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 55–63.
19. *Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE. 2006. 7 p.
20. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water - Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia, 2011, pp. 155-180 <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
21. *Bondur V., Starchenkov V.* Monitoring of Anthropogenic Influence on Water Areas of Hawaiian Islads Using RADARSAT and EVISAT Radar Imagery. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE. 2006. Pp. 184–187.
22. *Hersbach H.* CMOD5 An improved geophysical model function for ERS C-band scatterometry. January. 2003.
23. *MacDonald I.R.* Natural oil spills // Scientific American. 1998. 279(5). P. 51–66.
24. *Portabella M.* Wind field retrieval from satellite radar systems. Doctoral Thesis in Physics // University of Barcelona. 2002.
25. *Wilson R.D., Monaghan P.H., Osanik A.* et al. Natural marine oil seepage // Science. 1974. 184. P. 857–865.
26. <http://www.astrium-geo.com>.
27. <http://www.eoportal.org>.
28. <http://www.google.com/earth/index.html>.
29. <http://www.nasa.gov>.
30. <http://www.vniiem.ru/ru>.