

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ В РАЙОНЕ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ
“НЕФТЯНЫЕ КАМНИ” В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

© 2011 г. А. Ю. Иванов^{1*}, М. Ю. Достовалов², А. А. Синева³

¹ Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

² Научно-исследовательский институт точного приборостроения, Москва

³ Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской обл.

*E-mail: ivanoff@ocean.ru

Поступила в редакцию 25.08.2010 г.

На основе обработки и анализа радиолокационных изображений (РЛИ) спутника Radarsat-2, полученных летом 2009 г. на район промыслов “Нефтяные Камни” в Каспийском море, показано, что они являются полноценными продуктами, позволяющими получать информацию о динамике нефтяных загрязнений, их параметрах, а при определенных допущениях — оценки объемов технологических сбросов. Для картографирования пространственно-временного распределения пятен лучше всего подходят обзорные режимы радиолокатора с синтезированной апертурой Radarsat-2 с вертикальной соосной поляризацией (VV) сигнала; на перекрестных поляризациях мощность сигнала для этих задач недостаточна. Использование поляризационных съемок само по себе не улучшает обнаружение и идентификацию нефтяных загрязнений. Специальный квадрополяризационный режим съемки в данных экспериментах не выявил существенных преимуществ; максимальные контрасты наблюдались на вертикальной поляризации. Получены оценки объемов разливов.

Ключевые слова: Radarsat-2, радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационные изображения, нефтяные загрязнения, “Нефтяные Камни”, Каспийское море

ВВЕДЕНИЕ

Как неоднократно отмечалось, космическая радиолокация является эффективным инструментом дистанционного зондирования (ДЗ) с целью обнаружения разливов нефти, причем радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), формирующий радиолокационные изображения (РЛИ) поверхности моря, является одним из наилучших решений (van der Sandven, Thomas, 2004; Brekke, Solberg, 2005; Иванов, 2007). С одной стороны, РСА как инструмент наблюдения пленочных загрязнений является наиболее эффективным средством ДЗ, но, с другой стороны, существует проблема определения ряда параметров нефтяной пленки с его помощью, например ее толщины (и в итоге объемов разливов) (van der Sandven, Thomas, 2004; Иванов, 2007). На сегодняшний день измерение геометрических характеристик и площадей пятен на РЛИ не представляет практических затруднений (Иванов и др., 2004; Иванов и др. 2005; Иванов и др., 2007), однако для оценки толщины пленки приходится пользоваться данными других дистанционных датчиков (ИК/УФ-сканерами, лазерными флуориметрами, СВЧ-радиометрами) (Fingas, Brown, 2000) или косвенной информацией и методами.

Для решения этой проблемы был предложен геоинформационный (ГИС) подход (Иванов, Затыгалова, 2007), позволяющий выявлять пленочные/нефтяные загрязнения и с достаточно высокой достоверностью идентифицировать источники загрязнения. Он успешно применялся для мониторинга ряда российских акваторий (Иванов, Затыгалова, 2007; Иванов, 2010а). Информацию о применении космической радиолокации для мониторинга пленочных загрязнений моря можно найти в (Иванов, 1997; Иванов и др., 2004; Иванов и др., 2005; Иванов, 2007; Иванов и др., 2007; Иванов, Затыгалова, 2007; Иванов и др., 2008; Иванов, 2010б).

Одним, своего рода “естественным” полигоном для отработки технологий ДЗ нефтяных загрязнений, привлекающим исследователей, является пгт Нефтяные Камни, расположенный в Каспийском море в 42 км к востоку от п-ова Апшерон (рис. 1). Он построен на металлических эстакадах, сооруженных в 1949 г. с началом добычи нефти на банке Черные Камни (название из-за нефти, сочащейся из естественных источников на дне).

Месторождение “Нефтяные Камни” входит в Южно-Каспийскую нефтегазоносную провинцию и приурочено к крупной антиклинали, разбитой си-

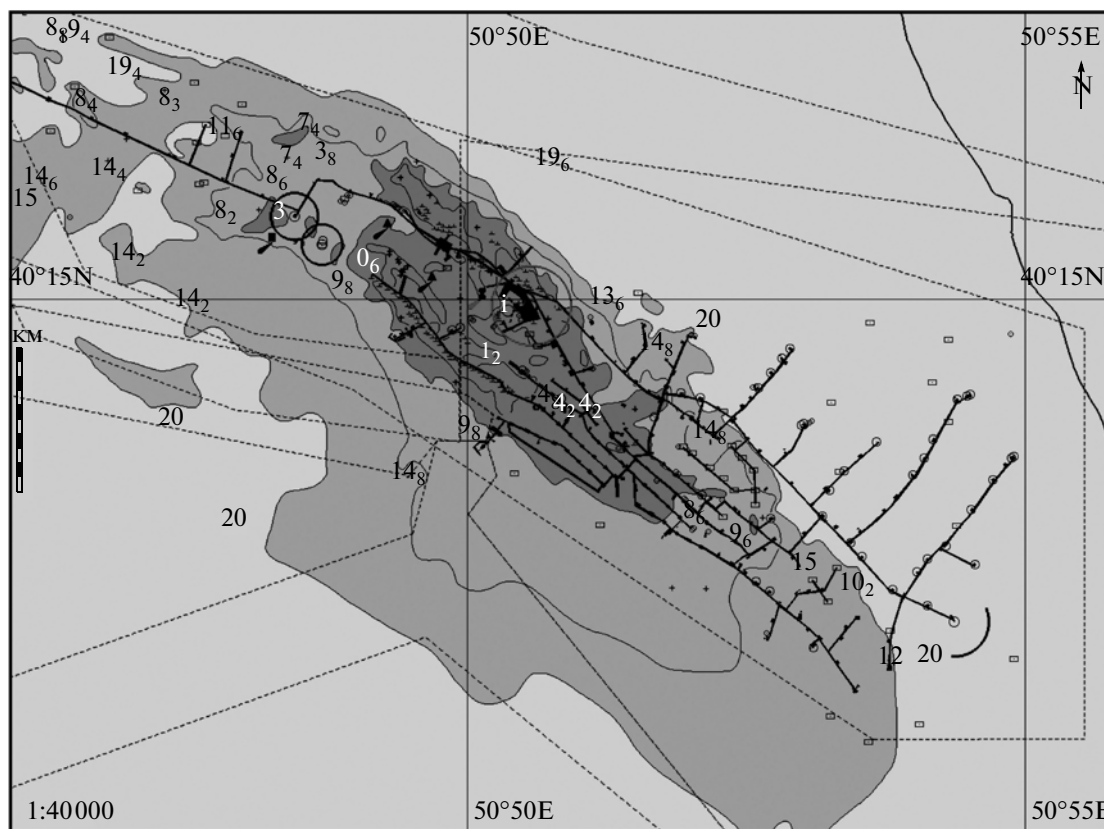


Рис. 1. Нефтепромыслы «Нефтяные камни» на фрагменте навигационной карты № 35072 (прямоугольниками и кружками обозначены буровые вышки).

стемой разрывных нарушений; наиболее продуктивны отложения среднего плиоцена. Глубина залежей составляет 260–1590 м, эффективная мощность до 100 м. Нефть содержит 13–32% легких фракций, 0,2–2,4% парафина, сера отсутствует; плотность нефти составляет 853–929 кг/м³. Оператор – Нефтегазодобывающее управление (НГДУ) «Нефтяные Камни». На месторождении пробурено более 2 тыс. скважин, причем во времена СССР здесь добывалось до 10 млн. т нефти в год, или 60% всей морской нефти (Бабаев, Зонн, 2005). В настоящее время месторождение находится в конечной стадии разработки. В конце 1990-х гг. насчитывалось всего 421 действующая скважина. Современный среднесуточный уровень добычи – 1800–2000 т нефти (Зонн, 2004). Нефть поступает на материк по подводному нефтепроводу длиной 78 км. По разным оценкам, остаточные извлекаемые запасы нефти на месторождении составляют от 20 до 180 млн. т (данные Госнефтекомпании Азербайджана (ГНКАР)). Тем не менее бурение новых скважин в ближайшее время будет продолжено с целью повышения общих объемов добычи с 800 тыс. т до 1,2 млн. т нефти в год (ГНКАР).

Одним из характерных признаков «Нефтяных Камней» являются пятна плавающей нефти. Ос-

новная причина загрязнений – хронические утечки при добыче и транспортировке из неисправных систем и трубопроводов (Нефть и газ..., 2002; Голь, 2003; Зонн, 2004). Ремонт и замена таких коммуникаций требует больших капиталовложений, но поскольку эти вложения не приведут к увеличению добычи нефти, ГНКАР рассматривает их как нецелесообразные (Нефть и газ..., 2002). Бакинская бухта в связи с постоянными утечками здесь и на др. промыслах Азербайджана является одной из наиболее загрязненных акваторий в мире – в ней образовалась так называемая мертвая зона. По данным (Бабаев и Зонн, 2005), мощность донных отложений, загрязненных нефтью, с концентрацией токсичных веществ, превышающей максимально допустимую в 100 раз, здесь составляет 8–10 м. Время от времени обширные акватории покрываются нефтяной пленкой, препятствующей растворению кислорода в воде и губительно действующей на морскую флору и фауну. В районе НДГУ «Нефтяные камни» пленка на поверхности моря может покрывать площади от 200 до 1000 км² (Море проблем, 2001; Зонн, 2004) и даже 1500 км² (Голь, 2003), а отдельные производственные выбросы – составлять от 0,5 до 300 т и более (Голь, 2003).

Таблица 1. Характеристики SGX продуктов Wide и Standard Quadro-Pol

Режим съемки	Ширина кадра, км	Размер пиксела (дальность × азимут), м	Пространственное разрешение по азимуту, м	Поляризация	Кол-во возможных кадров в полосе обзора
Wide	150	10 × 10	24.7	ВВ и ВГ или ГВ и ГГ	3
Standard Quadro	25	8 × 3.1	7.6	ВВ, ВГ, ГВ и ГГ	31

Таблица 2. Съемки пгт “Нефтяные Камни” со спутника Radarsat-2

Дата	Виток	Время, UTC	Режим съемки	Углы падения, град	Поляризация
11.07.2009	8218	14:29	Wide 2	31-39	ВВ, ВГ
12.07.2009	8225	02:43	То же	То же	То же
28.07.2009	8460	14:33	»	»	»
29.07.2009	8468	02:47	»	»	»
21.08.2009	8803	14:33	Standard Quadro 18	37-39	ВВ, ВГ, ГВ, ГГ
То же	То же	То же	То же	То же	То же
22.08.2009	8811	02:47	Standard Quadro 10	29-31	»
То же	То же	То же	То же	То же	»
21.09.2009	9246	14: 29	Wide 2	31-39	ВВ
22.09.2009	9254	02: 43	То же	То же	То же

В настоящей статье на основе обработки и анализа РЛИ спутника Radarsat-2 получены параметры разливов нефти в районе НГДУ. Проведена оценка поляризационных возможностей РСА Radarsat-2, а также выполнено сравнение полученных оценок с оценками независимых источников и оценками работ (Боев, Матвеев, 2005; Боев, Матвеев, 2008; Белоброва и др., 2009), которые авторы посчитали явно завышенными.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

РЛИ спутника Radarsat-2 были получены в рамках программы Канадского космического агентства “Scientific Opportunity and Research” (SOAR), проект № 648 “Oil slicks in Radarsat-2 SAR multi-polarization images” в виде стандартных продуктов Wide (W) и Standard Quadro-Pol (SQ). Они представляют собой синтезированные изображения с некогерентным накоплением по азимуту и дальности, с динамическим диапазоном 16 бит, разрешением 8 и 25 м и полосой обзора 25 и 150 км (табл. 1). Изображения поставлялись в виде продуктов SGX (SAR Georeferenced Extra Fine Resolution) и SLC (Single Look Complex), причем последний использовался для расчета поляризационных характеристик.

Продукты спутника Radarsat-2 поставляются в специальном формате и поддерживаются свободно распространяемыми программами для обработки данных радиолокации, такими, как NEST (Next

ESA SAR Toolbox) и PolSARPro (Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool). Основные характеристики РЛ-продуктов Radarsat-2 приведены в табл. 1., а в табл. 2 – перечень полученных и проанализированных съемок. На рис. 2 показано покрытие “Нефтяных Камней” съемками Radarsat-2 в июле, августе и сентябре 2009 г. по данным программы Radarsat Swath Planner Application, а на рис. 3–6 – сами РЛИ.

Обработка РЛИ выполнялась с использованием стандартных и специальных алгоритмов. Всего в рамках эксперимента было получено, обработано и проанализировано 10 РЛИ (табл. 2).

ОБРАБОТКА РЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Обработка с помощью программы NEST 3С, помимо стандартных процедур, включала калибровку снимков в децибелах и фильтрацию для подавления спекл-шума, присущему РЛИ высокого разрешения. Кроме того, фильтрация способствовала уменьшению шума при построении профилей распределения интенсивности рассеяния вдоль направлений азимута и дальности.

Расчет поляризационных характеристик проводился с помощью программы PolSARPro v.4.0. Для исследования вклада поляризаций в формирование РЛ-образов нефтяных пленок использовался метод декомпозиции Паули, декомпозиция на основе эн-

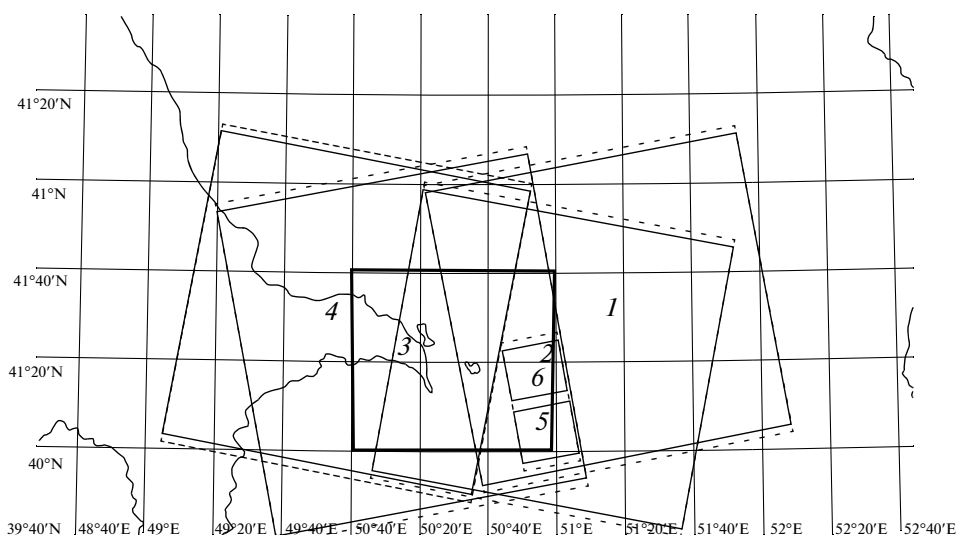


Рис. 2. Покрытие съемками спутника Radarsat-2 промыслов “Нефтяные Камни” в июне, августе и сентябре 2009 г.

тропии и угла поворота плоскости поляризации α и др. параметры (Cloude, Pottier, 1996; Cloude, Pottier, 1997).

В методе поляриметрической декомпозиции Паули, используется разложение матрицы рассеяния на компоненты $|\alpha^2|$, $|\beta^2|$ и $|\gamma^2|$, которые соответствуют определенным механизмам рассеяния (Cloude, Pottier, 1996). Компонент $|\alpha^2|$ соответствует матрице рассеяния сферы, плоскости или трехгранного отражателя. В частности, величина коэффициента $|\alpha^2|$ определяет мощность, рассеянную от объектов, характеризуемых однократным или случайным рассеянием. Компонент $|\beta^2|$ описывает механизм рассеяния на отражателях, ориентированных под углом 0° , а компонент $|\gamma^2|$ соответствует механизму рассеяния на отражателях, ориентированных под углом 45° . Комбинирование перечисленных компонент может быть использовано для извлечения соответствующей физической информации.

Другой метод поляриметрической декомпозиции, основанный на вычислении энтропии рассеяния (H) и угла α (Cloude, Pottier, 1997; Захарова, Захаров, 2009), также широко применяется для классификации механизмов рассеяния. В основе метода лежит анализ собственных чисел и собственных векторов матрицы когерентности, для чего вычисляются параметры H и α .

Расчет контрастов также проводился с помощью пакета NEST. Значения удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на откалиброванных и отфильтрованных изображениях вертикальной поляризации восстанавливались вдоль разрезов по азимуту и дальности. Пример РЛИ с указанными

разрезами и графики УЭПР приведен на рис. 7. На графиках (рис. 7б, 7в) линиями показаны средние значения УЭПР для отдельных участков морской поверхности: участкам, покрытым нефтяной пленкой, соответствуют меньшие по абсолютному значению, а чистым участкам – большие (меньшие по модулю значения). Контраст определялся как разность в дБ между значениями УЭПР в пятне и на чистой воде.

Для дальнейшего анализа использовался ГИС-подход (Иванов, Затягалова, 2007). Одним из его преимуществ является возможность интегрирования и накопления информации о нефтяном загрязнении, отображения ее в удобной форме, определения геометрических и пространственно-временных характеристик обнаруженных пятен. Для дальнейшего анализа в ГИС пятна на изображениях были векторизованы и трансформированы в формат данных, поддерживающий соответствующую географическую привязку и систему координат.

На рис. 8 показан пример подобного анализа в ГИС. В ней, помимо разнообразных данных на район интереса (батиметрия, судоходные трассы и др.), были интегрированы векторные слои, содержащие контуры нефтяных пятен. В результате была получена карта разливов и определены площади пятен. На рис. 8 хорошо видна пространственно-временная динамика разливов. Очевидно, что на размер и пространственное положение пятен относительно пгт Нефтяные Камни влияет ветер и поверхностные течения. Так, при слабом ветре пятна растекаются и имеют достаточно большие площади (рис. 8, 9), покрывая не только район, расположенный непосредственно у нефтедобывающих эстакад и платформ. При сильном ветре пятна имеют значительно мень-

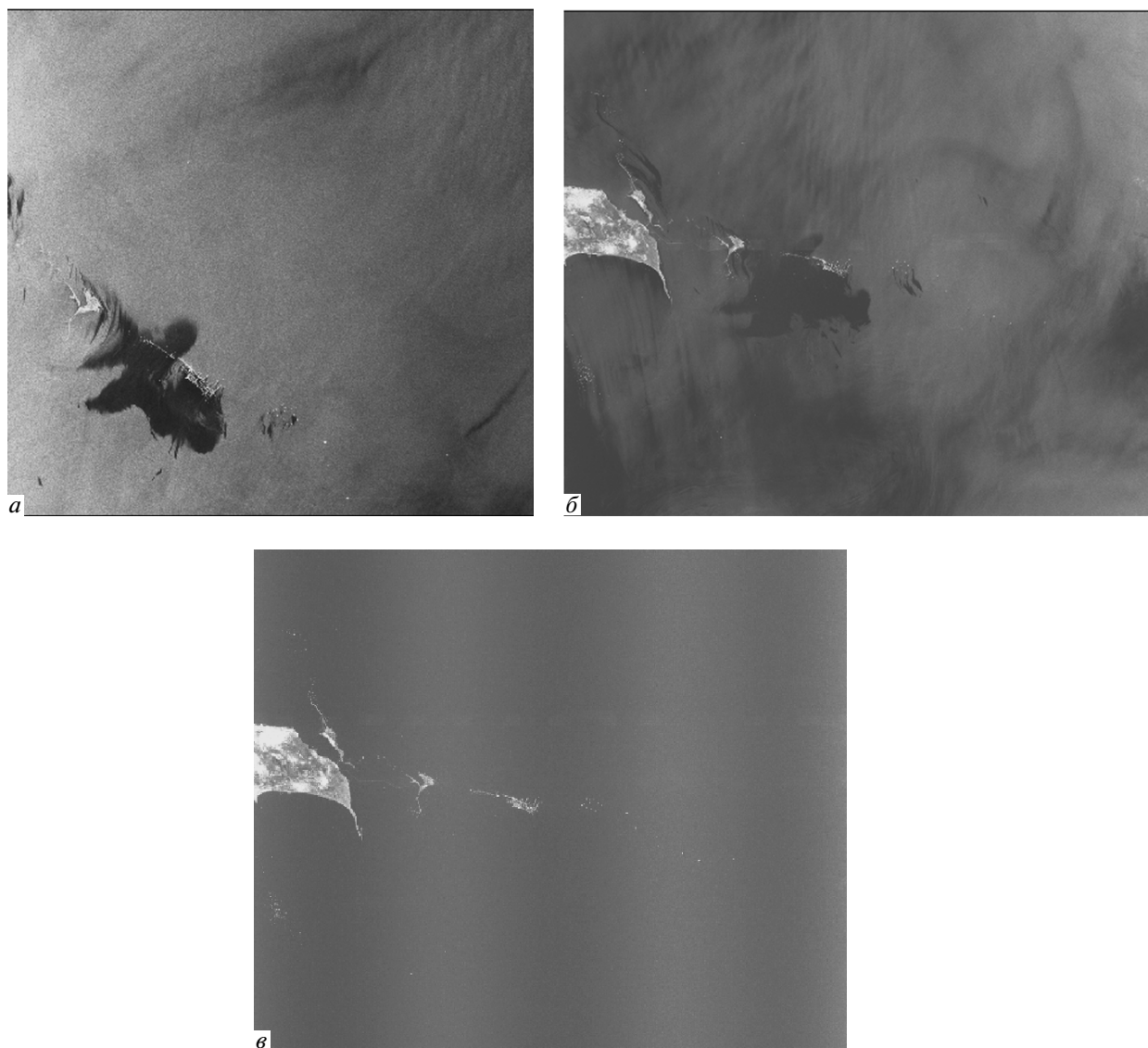


Рис. 3. “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2, полученных в широком обзорном режиме W-2: *a* – 11 июля 2009 г., 14:29 UTC; *б* – 12 июля 2009 г., 02:43 UTC на вертикальной (ВВ) и *в* – 12 июля 2009 г., 02:43 UTC на перекрестной (ВГ) поляризациях. © CSA/MDA.

шую площадь и локализованы, главным образом, вблизи месторождения.

Для определения объемов разливов по данным космической радиолокации применяется косвенный подход, в котором по площади пятен на РЛИ имеется возможность оценки объемов разлива (Иванов и др., 2007). Для решения этой задачи необходимо знать толщину пленки, которую можно получить из физических соображений, связывающих визуальный цвет пленок при дневном освещении с их толщинами (Bonn Agreement..., 2009). Согласно наблюдениям, толщина антропогенных средних и тонких нефтяных пленок в общем случае варьирует в широком диапазоне от 0.04 до 200×10^{-3} мм (0.00004 – 0.2 см), а цвет визуально – от

серебристо-серого до темно-коричневого (Bonn Agreement..., 2009).

Содержание нефти, согласно (Bonn Agreement..., 2009), в пятнах серебристо-серого цвета толщиной от 0.04 до 0.3×10^{-3} мм может быть от 40 до 300 л/км², а в радужной пленке толщиной от 0.3 до 5.0×10^{-3} мм – 300 – 5000 л/км². Однако при оценках обычно выбирают пограничное значение в 300 кг/км², которое достаточно хорошо согласуется с экспериментальными оценками (300 – 350 кг/км²) отечественных работ (см. (Проблемы химического загрязнения..., 1989)) и достаточно хорошо совпадает с данными наблюдений (Гюль, 2003). С учетом значений толщин пленки 0.3×10^{-3} и 5.0×10^{-3} мм получены ми-

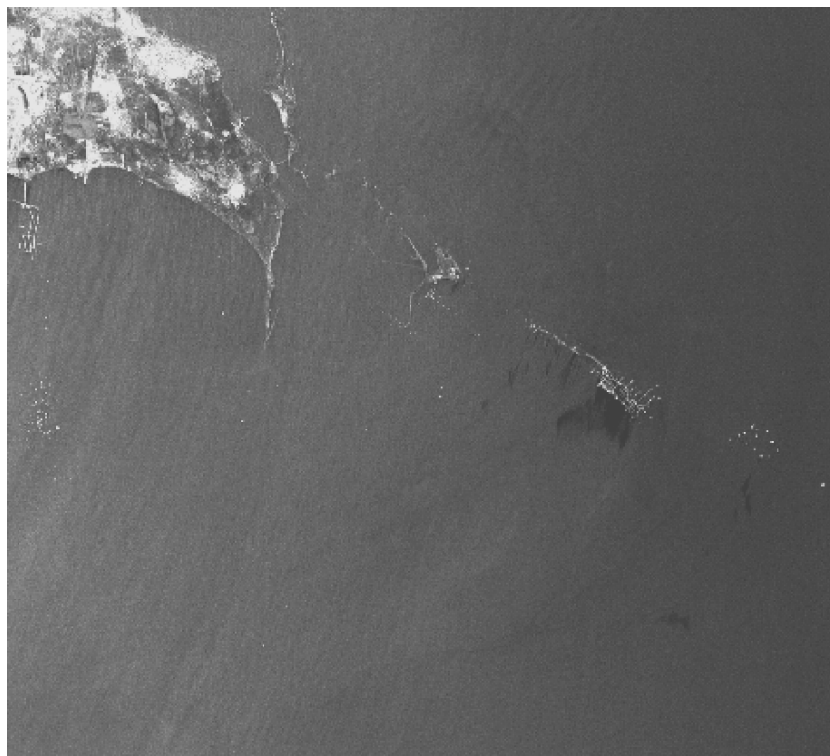


Рис. 4. “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2, полученном в широком обзорном режиме W-2: 28 июля 2009 г., 14:33 UTC. © CSA/MDA.

нимальные и максимальные оценки, приведенные в табл. 3.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РЛИ

Во время РЛ-съемки достаточно часто используют поляриметрию или метод ДЗ, основанный на измерении и изучении поляризационных характеристик обратного рассеяния, таких как степень поляризации электромагнитных волн, угол поворота плоскости поляризации и ряда др. Поляриметрические РСА позволяют регистрировать сигналы, которые в результате рассеяния изменяют энергию и поляризацию падающего сигнала как, например, в случае морской поверхности. Кроме того, они позволяют регистрировать изменения состояния морской поверхности, которые могут быть привязаны к физическим параметрам среды или представлены как функции, связывающие излученный и принятый поляризационный сигналы.

В первых работах, посвященных изучению поляризационных свойств пленочных снимков, использовались РЛИ мультиспектрального (X-, C- и L-диапазоны) и мультиполяризационного РСА SIR-C/X (Gade et al., 1998). Анализ этой и др. работ, посвященных разработке алгоритмов распознавания нефтяных загрязнений моря (см., например, (Lombardo, Oliver, 2000; Fortuny-Guasch, 2003)), показал, что взгляд на эту проблему был скорее оптимисти-

чным. Свидетельство тому — анализ отображения нефтяных пятен на поляризационных РЛИ Radarsat-2, полученных в нашем эксперименте на соосной и перекрестной поляризации (ВВ и ВГ) и в квадро-режиме (ВВ, ГГ, ВГ и ГВ), который выявил два интересных момента.

Во-первых, перекрестные комбинации (ВГ и, очевидно, ГВ) в режиме Wide не пригодны для обнаружения пленочных загрязнений из-за отсутствия полезного сигнала от морской поверхности (рис. 3б, 3в). Это связано с тем, что перекрестная компонента, как правило, на порядок (10 дБ) ниже соосной компоненты в зависимости от состояния подстилающей поверхности и углов съемки (Migliaccio et al., 2007). Кроме того, поверхность моря характеризуется поверхностным рассеянием — с низкой энтропией и малыми углами α — т.е. малыми вкладами в перекрестные компоненты. Для их усиления, как правило, используют режимы съемки при небольших углах падения.

В широкообзорных режимах (Wide и ScanSAR) ситуация дополнительно усложняется тем, что в них формирование РЛИ происходит из нескольких полос по дальности (т.е. в небольшой полосе доплеровского спектра). Если, например, РЛИ формируется из четырех полос, то на каждую полосу приходится не более 0.25 части спектра, а фактически — еще меньше, в связи с чем энергетика существенно ухудшается. В результате интенсивность отражения

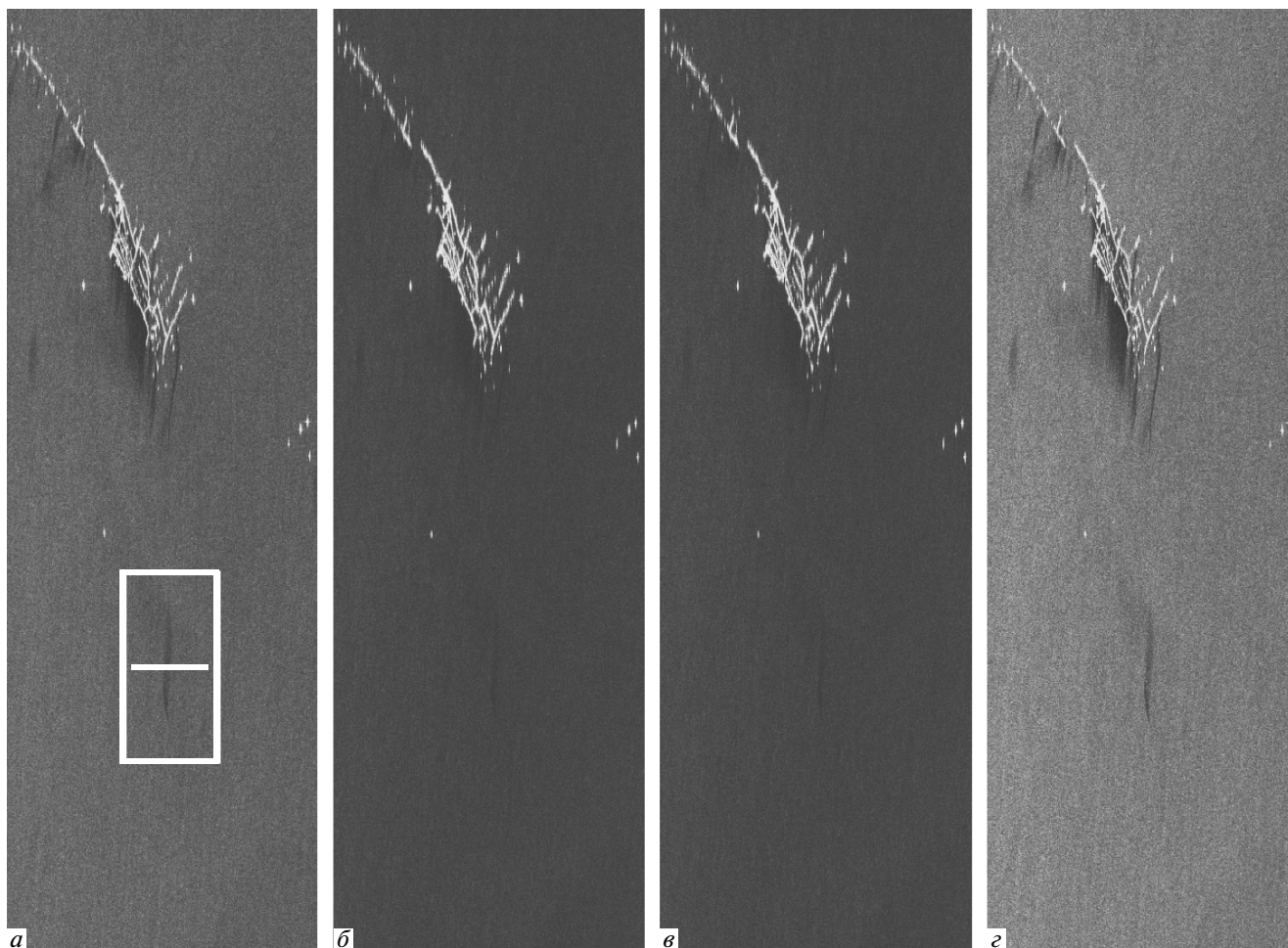


Рис. 5. “Нефтяные камни” на РЛИ Radarsat-2 от 21 августа 2009 г., 14:34 UTC, полученных в стандартном квадрополяризационном режиме (мода SQ-18): *a* – ГГ; *б* – ГВ; *в* – ВГ; *г* – ВВ. Отрезком прямой линии показано положение радиометрического разреза, а прямоугольником – место, где рассчитывались поляриметрические характеристики. © CSA/MDA.

от поверхности моря на перекрестных компонентах уходит на уровень шумов. Поэтому на широкообзорных РЛИ перекрестных поляризаций неоднородности морской поверхности не отображаются, тогда как в узкополосных режимах съемки полезный сигнал имеется.

Во-вторых, в связи с этим анализ поляризационных характеристик оказался возможен только в стандартном квадрополяризационном SQ-режиме с набором поляризаций ВВ, ВГ, ГВ и ГГ. Однако съемки в этом режиме имеют узкую полосу обзора (25 км), что делает его не пригодным для мониторинговых задач. Тем не менее, обработка РЛИ от 21 августа 2009 г. позволила получить набор поляризационных характеристик (коэффициенты декомпозиции по методу Паули, анизотропию (A), энтропию (H), угол α) и ряд поляризационных соотношений. Эти результаты не приводятся, ибо обработка не выявила каких-либо значимых эффектов, позво-

ляющих улучшить идентификацию нефтяных загрязнений и использовать комбинации соосной и перекрестной поляризаций в практической работе. С одной стороны, это, возможно, связано с тем незначительным влиянием поляризации на интенсивность рассеяния радиолокационного сигнала морской поверхностью при наличии нефтяной пленки (Touzi et al., 1992; Touzi, Charbonneau, 2002). С другой стороны, квадрополяризационные РЛИ были получены при больших углах падения и сильном ветре (табл. 3), что могло также повлиять на конечный результат. Сравнение РЛИ, приведенных на рис. 5, показывает, что максимальный контраст наблюдается на ВВ-поляризации, что также подтвердил расчет контрастов (табл. 3) и что неоднократно отмечалось ранее (Touzi et al., 1992; Gade et al., 1998; Wismann et al., 1998).

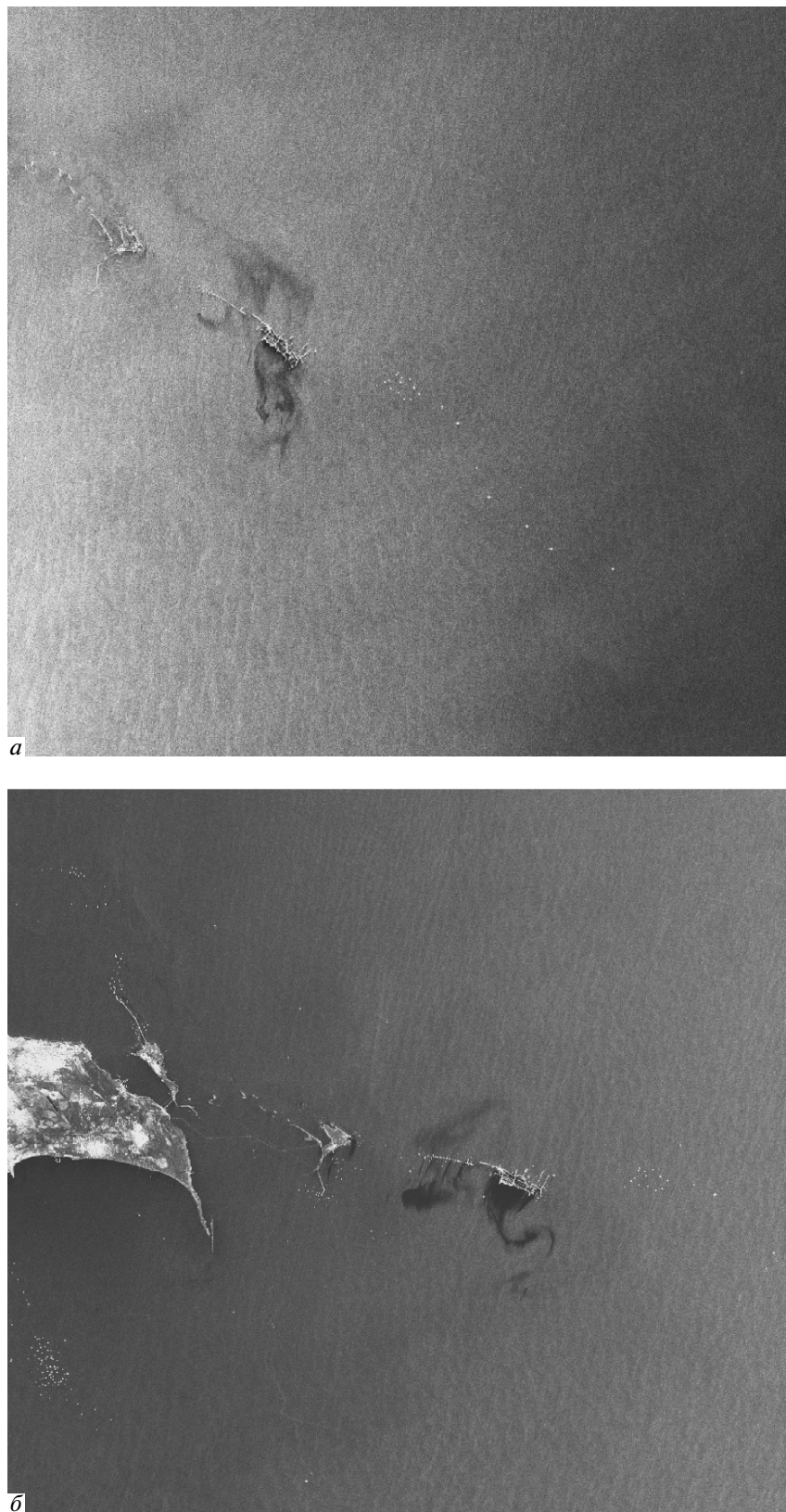


Рис. 6. “Нефтяные камни” на фрагментах РЛИ Radarsat-2, полученных в широком обзорном режиме (мода W2): *a* – 21 сентября 2009 г., 14:29 UTC; *б* – 22 сентября 2009 г., 02:43 UTC. © CSA/MDA.

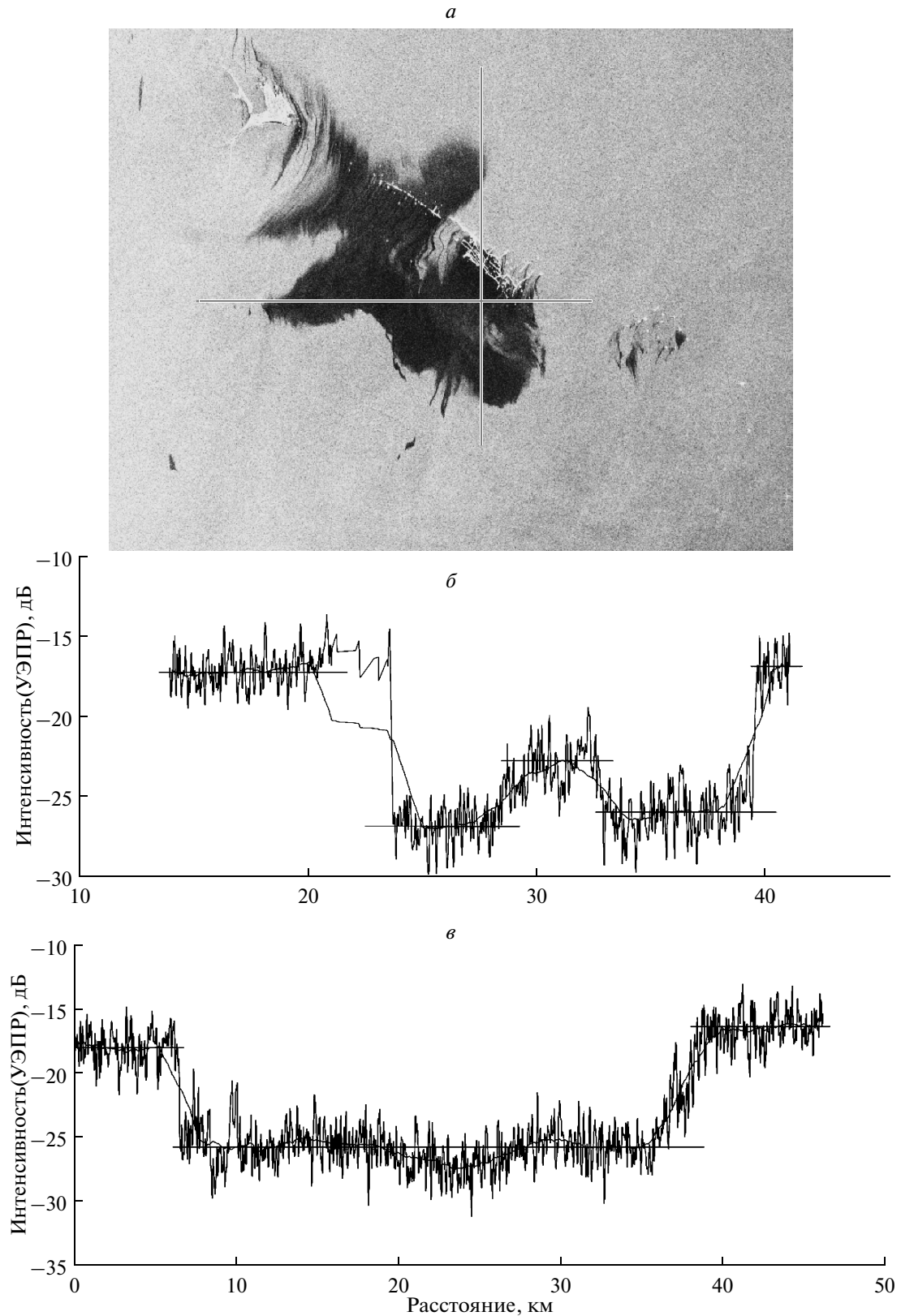


Рис. 7. Пример определения контраста на радиолокационном изображении; *a* – положение разрезов на фрагменте РЛИ Radarsat-2 от 11 июля 2009 г.; *б, в* – графики распределения УЭПР, построенные по разрезам (вертикальные и горизонтальные линии) вдоль направлений азимута и дальности.

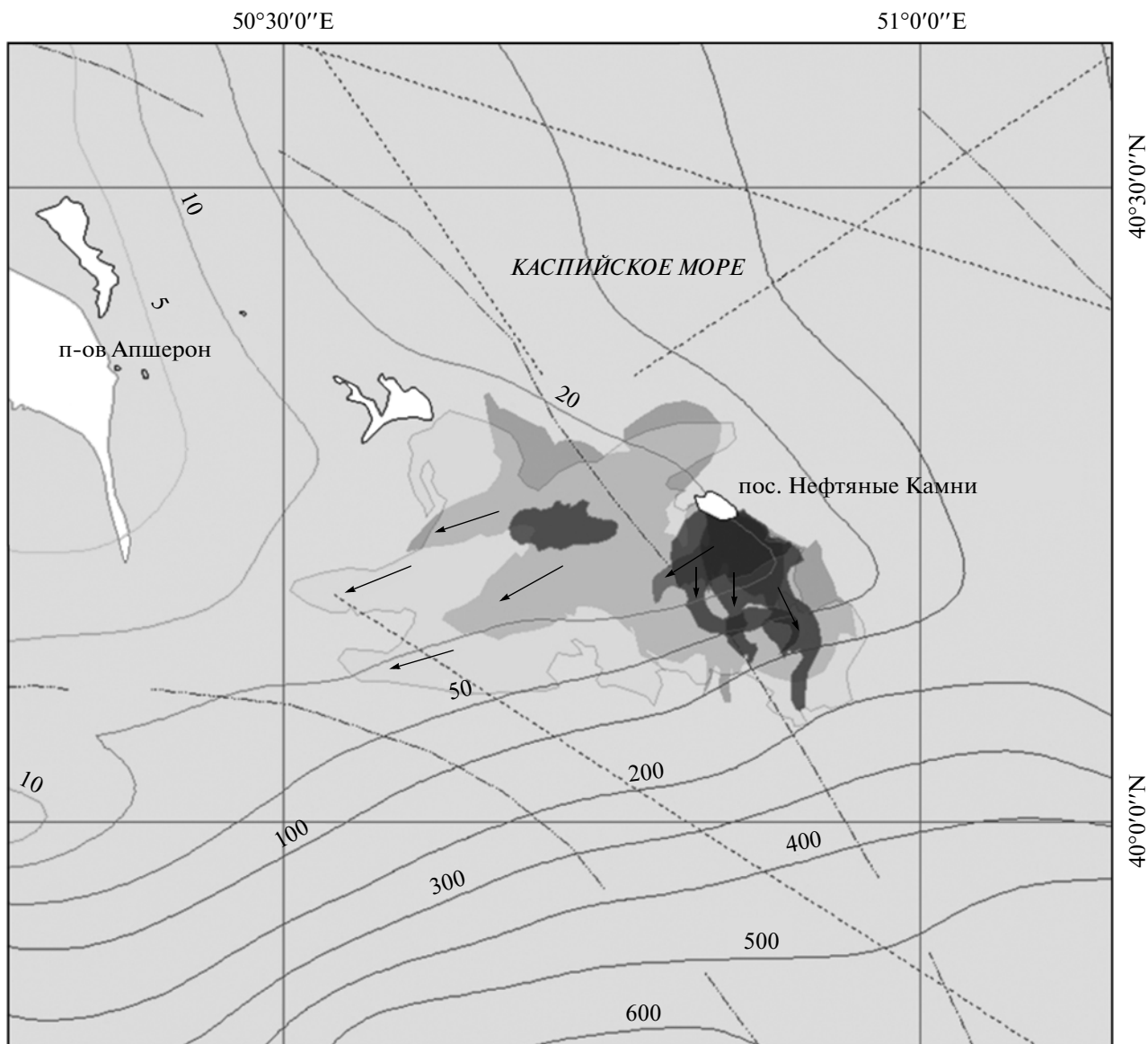


Рис. 8. Сводная карта нефтяных пятен, обнаруженных и исследованных на РЛИ Radarsat-2, в окне географической информационной системы. Стрелками показано южное и юго-западное направление дрейфа нефтяных пятен.

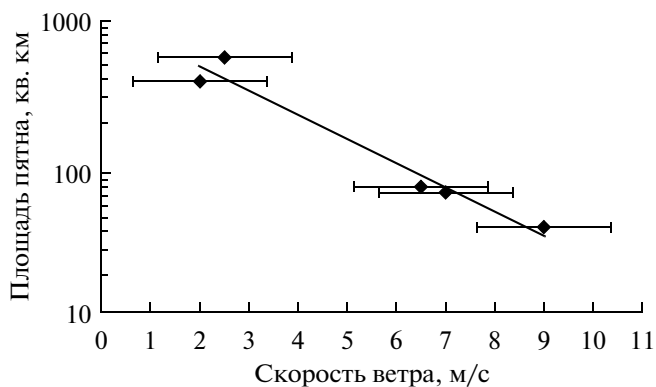


Рис. 9. Зависимость площади пятен от скорости ветра, полученная в данном эксперименте.

ОБСУЖДЕНИЕ

Суть взаимодействия электромагнитной волны с шероховатой поверхностью заключается в следующем. При падении элементарного пучка на элементарную площадку происходит его френелевское отражение. При этом в отраженном излучении колебания вектора напряженности имеют определенную ориентацию, т.е. отраженное излучение поляризуется. При взаимодействии с шероховатой поверхностью элементарные сигналы отражаются от площадок, имеющих разные размеры неоднородностей и различную пространственную ориентацию. Вследствие этого отраженные сигналы, будут иметь различные поляризационные характеристики, а сум-

Таблица 3. Результаты обработки и анализа РЛИ

Дата	Ветер, м/с	Площадь пятен, км ²	Контраст, дБ (ВВ-поляризация)	Минимальные и максимальные оценки объемов разлива, тонн
11.07.2009	переменный, слабый	384.0	9.5	115.2–1920.0
12.07.2009	2–3	568.5	7	170.5–2842.5
28.07.2009	8–10	38.7	8	11.6–193.5
21.08.2009	10–11	–	6.2/5.5/2.2/2.0*	–
22.08.2009	10–12	–	–	–
21.09.2009	6–8	66.1	3.5	19.8–330.5
22.09.2009	6–7	72.6	7	21.8–363.0

Примечание. * ВВ/ГГ/ГВ/ВГ – поляризации

марная энергия отраженного излучения будет характеризовать шероховатость некоего участка морской поверхности. Во время работы с перекрестной поляризацией (излучение на вертикальной, прием на горизонтальной) вклад каждой элементарной площадки приводит к ослаблению суммарной интенсивности рассеяния по сравнению, например, с соосной поляризацией (излучение и прием на вертикальной или на горизонтальной). В результате перекрестные режимы становятся мало пригодными для детектирования пленочных загрязнений моря.

Поляризационная классификация в свою очередь основана на изучении комбинации параметров анизотропии, энтропии и угла α . В случае морской поверхности свободной от нефтяной пленки береговскую модель можно считать доминирующим механизмом рассеяния; оно характеризуется низкими значениями энтропии ($0 < H < 0.5$). В области связанных значений A , H и α береговское рассеяние также характеризуется низкими значениями анизотропии и угла α : $A < 0.5$ и $0 < \alpha < 45^\circ$. Участки поверхности, покрытые нефтяной пленкой, начинают характеризоваться высокими значениями H , что подразумевает механизм(ы) рассеяния отличные от береговского (Migliaccio et al., 2007; Nunziata, 2008). В наших экспериментах в области нефтяного пятна значения H изменялись в диапазоне 0.40–0.65, что может говорить о наличии второго, альтернативного механизма рассеяния. Однако из-за отсутствия статистической выборки делать какие-либо выводы преждевременно.

Наконец, первые эксперименты, проведенные с искусственными пленками (в том числе с имитирующими естественные слики) и мультиполяризационной радиолокацией, показали, что поляризационный коэффициент χ невелик, а комбинирование поляризаций в общем случае дает незначительный вклад в рассеяние радиолокационного сигнала морской поверхностью при наличии пленки (Gade et al., 1998). Поэтому в рамках береговской модели в случае наличия нефтяной пленки на поверхности моря многие поляризационные подходы могут быть

не применимы (van der Sandven, Thomas, 2004; Nunziata, 2008).

Важное влияние на распространение нефтяных пятен в Каспийском море оказывает скорость и направление ветра (Голь, 2003). Анализ РЛИ, полученных в нашем эксперименте, показал зависимость сигнатур на РЛИ от скорости ветра. Даже из визуального анализа изображений на рис. 3–6 следует, что слабый ветер благоприятствует активному растеканию нефти по морской поверхности, что приводит к образованию пятен больших размеров. Наоборот, сильный ветер, разрушая и диспергируя тонкие нефтяные пленки, начинает препятствовать этому процессу, не давая нефтяному пятну покрывать большие площади. В условиях слабого ветра пятна в районе НГДУ достигают 400–500 км² (табл. 3), что говорит о серьезном хроническом нефтяном загрязнении. Аналогичные результаты получены в (Лаврова и др., 2010). Зависимость размера пятен от скорости ветра, полученная в данном эксперименте, показана на рис. 9. Очевидно, она построена при условии постоянства выбросов и отнюдь не претендует на универсальность.

Специфика течений в Среднем Каспии приводит к тому, что распространение нефтяных загрязнений происходит главным образом в сторону Бакинской бухты и побережья Апшеронского залива (Иванов и др., 2004). В отличие от мелководной северной части моря, течения Среднего и Южного Каспия отличаются значительной устойчивостью и циклонической завихренностью. Причем наиболее четко связь между течениями должна проявляться в условиях слабого ветра или штиля. При соответствующих гидрометеорологических условиях (при ветрах северных румбов) нефтяная пленка может достигнуть побережья Южного Азербайджана или распространиться далее на юг, а при слабых ветрах сохраняться на поверхности моря несколько дней.

Как видно из табл. 3, контрасты изменялись от 3.5 дБ (21 сентября 2009 г.) до 9.5–10 дБ (11 июля 2009 г.). Анализ РЛИ Radarsat-2 показал, что участки с наибольшими контрастами в основном располагаются в непосредственной близости от источников

загрязнений — эстакад и нефтяных вышек. Такие участки могут быть покрыты свежей нефтяной пленкой, что согласно (Боев, Матвеев, 2005) может означать более высокую толщину, концентрацию и активность пленки, чем на участках с более низкими значениями контраста. Однако в связи со сложной зависимостью контраста от факторов среды (скорости ветра, состояния поверхности моря) и параметров самой нефтяной пленки (Wismann et al., 1998; Боев, Матвеев, 2005), а также с расхождением теоретических и экспериментальных оценок (модельные контрасты сликов существенно меньше наблюдаемых — см. (Кудрявцев и др., 2008)), его значения для оценок не использовались.

В итоге анализ нефтяных пятен на РЛИ Radarsat-2 в режиме Wide показал, что они имеют достаточное разрешение при ширине полосы съемки 150 км и вполне пригодны для регионального мониторинга нефтяных загрязнений — на вертикальной поляризации в этом режиме фиксировались нефтяные пятна размером до 500 км².

В заключение остановимся на сравнении наших оценок (табл. 3) с оценками, приведенными в работах (Боев, Матвеев, 2005; Боев, Матвеев, 2008; Белоброва и др., 2009). Очевидно, в них получены завышенные оценки толщины пленки (0.02–0.17 см) и, соответственно, объемов разлива от 32000 т (62 т/км²) в (Боев, Матвеев, 2005) до 43925 т в (Белоброва и др., 2009). Чтобы понять, насколько, они завышены, обратимся к цифрам реальной добычи и реальных выбросов, которые имеются в литературных источниках. Итак:

1. В 2009 г. на «Нефтяных Камнях» добывалось в среднем 2400 т нефти в сутки или от 10 до 60 т в день из одной скважины (информация НГДУ «Нефтяные Камни»). С учетом того, что добыча нефти (см. выше) медленно падала, можно предположить, что во время экспериментов в 1990 г. на НГДУ добывалось максимум 2500–3000 т в сутки.

2. По оценкам нефтяников/экологов выбросы нефти в окружающую среду при ее добычи, приходящиеся на одну тонну добываемой нефти, составляют в среднем около 5 кг, а максимальные — до 15 кг (www.caspio.ru).

3. Наконец, по данным (Проблемы химического загрязнения..., 1989), среднее содержание нефти в нефтяной пленке, плавающей на поверхности моря, может составлять 300–350 кг/км².

В итоге получаем: по п. 1 — максимально возможный гипотетический сброс на НГДУ «Нефтяные камни» может быть 2500 т (т.е. вся добытая в этот день нефть); по п. 2 — всего лишь $3000 \times 5/15 \text{ кг} = 1000 \text{ т}$, а по п. 3 — $200...1000 \text{ км}^2 \times 300 \text{ кг/км}^2 = 60...300 \text{ т}$. И соответственно в среднем возможные катастрофические выбросы нефти по разным оценкам не превышают 200 т нефти в день.

Кроме того, оценки, приведенные в (Иванов, Сокольский, 2000; Польш, 2003; Зонн, 2004; Лебедев, 2009) и на сайте www.caspio.ru, говорят о том, что в 1990-х гг. нефтяное загрязнение Каспийского моря с учетом всех источников, включая основной — речной сток (80–85%), оценивалось в 100–120 тыс. т в год, типичные толщины пленок в Каспийском море по данным наблюдений варьировали от 0.03×10^{-3} до 0.16 мм, а площади разливов при выбросах нефти от 0.5 до 4 тыс. т — от 1 до 1500 км² (Польш, 2003).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью обработки РЛИ спутника Radarsat-2 и использования геоинформационного подхода был проведен анализ динамики и объемов выбросов на НГДУ «Нефтяные камни» в июле и сентябре 2009 г. Полученные РЛИ были обработаны и проанализированы с целью выявления пятен нефтяных загрязнений. В результате обработки РЛИ была создана карта распределения пятен нефти около месторождения (рис. 8). Ее анализ еще раз подтвердил неблагоприятную экологическую обстановку в районе нефтепромыслов «Нефтяные Камни», так как характерной чертой данной акватории являются пятна нефтяных разливов больших размеров около буровых и эстакад. Очевидно, ситуация кардинально не изменилась со времени анализа первых РЛИ «Алмаз-1» и ERS-1 в 1991–1992 гг.

Полученная карта была проанализирована на предмет выявления динамики загрязнений. Анализ показал, что имеется определенная корреляция между площадью пятен и силой ветра. Особое географическое положение «Нефтяных Камней» приводит к тому, что в зависимости от скорости и направления ветра нефть может распространяться в различных направлениях. В частности, наибольших размеров нефтяные разливы достигают при ветровых условиях близких к штилевым. Специфика течений в Среднем Каспии приводит к тому, что распространение нефтяных загрязнений под действием преобладающих течений происходит, главным образом, в сторону Апшеронского залива и Бакинской бухты. При ветрах северных румбов нефтяная пленка может достигнуть побережья Азербайджана и распространиться далее в юго-западную часть Каспийского моря.

Расчитанные значения контрастов находятся в соответствии с экспериментальными данными и теоретическими представлениями, и так или иначе могут охарактеризовать нефтяное пятно. Максимальные контрасты, как и ожидалось, наблюдались на ВВ-поляризации. Однако в теоретических построениях и модельных расчетах ими надо пользоваться осторожно, так как контрасты зависят от скорости ветра, состояния поверхности моря, типа нефти и толщины пленки. Следует также учиты-

вать, что наблюдаемые контрасты часто существенно выше модельных (Кудрявцев и др., 2008).

Несмотря на оптимизм первых работ, посвященных поляризационной радиолокации (Fortuny-Guasch, 2003), наши эксперименты показали, что ее конкретные возможности зависят от режима съемки. Так, съемки на перекрестной поляризации в режиме Wide (а также, очевидно, и в ScanSAR) не пригодны для обнаружения пленочных загрязнений моря из-за отсутствия полезного сигнала от морской поверхности. В режиме Standard Quadro поляризационная съемка не выявила каких-либо значимых эффектов, позволяющих существенно улучшить обнаружение и идентификацию нефтяных загрязнений, а также использовать поляризационные характеристики в практической работе. По-видимому, разработка альтернативных моделей взаимодействия РЛ-сигнала с поверхностью моря при наличии нефтяного загрязнения может принести определенный успех в свете использования поляризационных характеристик для идентификации пленочных загрязнений (Schuler et al., 2002; van der Sandven, Thomas, 2004). Тем не менее, в серии работ (Migliaccio et al., 2007; Gambardella, 2007; Nunziata, 2008) показано, что учет поляризационных и фазоразностных соотношений на соосных ВВ- и ГГ-поляризациях может быть полезен для различения пятен нефти и биогенных пленочных сликов. Внимание следует обратить и на анализ на основе поляризационной энтропии (характеризующей механизмы рассеяния и изменение поляризационных свойств) при различении антропогенных и биогенных пятен. В связи с этим эксперименты, учитывающие поляризационные характеристики нефтяных пятен, несомненно, должны быть продолжены.

Оценки объемов разливов (табл. 3) были получены с использованием методики (Bonn Agreement..., 2009) и геоинформационного подхода. Они находятся в соответствии с данными независимых источников об исследуемом месторождении, что говорит об адекватности применяемого подхода. Оценки, полученные в данной работе, более соответствуют реальному состоянию дел, чем оценки, приведенные Боевым и Матвеевым (2005), Боевым и Матвеевым (2008) и Белобровой и др. (2009), завывающие объемы разливов более чем на два порядка.

РЛ-данные спутника Radarsat-2, использованные в работе, были получены в рамках программы Канадского космического агентства SOAR, проект 648 из MDA Corporation (www.mda.com), сотрудникам которой авторы выражают свою благодарность. Помощь специалистов ООО “Гео-Альянс” в обработке РЛИ также отмечается с благодарностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаев А.Г., Зонн И.С. Природопользование в регионе Каспийского моря // Вестн. РАН. 2005. Т. 75. № 8. С. 715–719.
- Белоброва М.В., Боев А.Г., Кабанов А.В. и др. Оперативное картографирование и диагностика нефтяных загрязнений морской поверхности по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Космична наука і технологія. 2009. Т. 15. № 5. С. 24–33.
- Боев А.Г., Матвеев А.Я. Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла “Нефтяные Камни” по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10. № 2. С. 178–188.
- Боев А.Г., Матвеев А.Я. Радиолокационный метод оценки параметров нефтяных загрязнений морской поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 5. С. 29–36.
- Голь А.К. Проблема загрязнения Каспийского моря. Баку: “Муаллим Нешриййаты”, 2003.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И. Результаты поляриметрической обработки данных ALOS PALSAR для исследования земных покровов в различных климатических условиях / Тр. XXV Всерос. симп. Радиолокационное исследование природных сред. СПб., 2009.
- Зонн И.С. Каспийская энциклопедия. М.: Международные отношения, 2004. 464 с.
- Иванов А.Ю. Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА “Космос-1870” и “Алмаз-1” // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 6. С. 70–80.
- Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
- Иванов А.Ю. О восстановлении параметров морской среды по данным космических РСА // Исслед. Земли из космоса. 2010а. № 3. С. 77–92.
- Иванов А.Ю. Нефтепроявления на поверхности озера Байкал // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 2. С. 75–87.
- Иванов А.Ю., Востоков С.В., Ермошкин И.С. Картографирование пленочных загрязнений морской поверхности по данным космической радиолокации (на примере Каспийского моря) // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 4. С. 82–92.
- Иванов А.Ю., Голубов Б.Н., Затыгалова В.В. О нефтегазоносности и разгрузке подземных флюидов в южной части Каспийского моря по данным космической радиолокации // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 62–81.
- Иванов А.Ю., Ермошкин И.С., Фанг М. и др. Использование космической радиолокации широкого обзора для картографирования нефтяных загрязнений моря // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 78–95.
- Иванов А.Ю., Затыгалова В.В. Картографирование пленочных загрязнений моря с использованием космической радиолокации и географических информационных систем // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 46–63.
- Иванов А.Ю., Литовченко К.Ц., Затыгалова В.В. Аварийный разлив мазута в Керченском проливе: радиолокационный мониторинг и результаты моделирования // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 4. С. 62–76.
- Иванов В.П., Сокольский А.Ф. Научные основы стратегии защиты биологических ресурсов Каспийского моря от нефтяного загрязнения. Астрахань: КаспНИРХ, 2000. 181 с.

- Кудрявцев В.Н., Иванова Н.А., Гущин Л.А., Ермаков С.А. Оценка контрастов спектра ветровых волн в снимках, вызванных биогенными и нефтяными пленками: Препринт № 765. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2008. 30 с.
- Лаврова О.Ю., Каримова С.С., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Оперативный спутниковый мониторинг акваторий Черного, Балтийского и Каспийского морей в 2009–2010 годах / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 168–185.
- Лебедев С.А. Оценка фонового загрязнения нефтепродуктами Черного и Каспийского морей с использованием данных дистанционного зондирования и модельных расчетов. 2009. (mkgtu.ru/docs/konf_sem/lebedev.pdf).
- Море проблем: Опыт системного исследования Каспийского региона. М.: СОПС, 2001. 183 с.
- Нефть и газ за рубежом / Под ред. Вачнадзе Г.Н. М.: ПИК ВИНТИ, 2002. 112 с.
- Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. Т. 8. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 208 с.
- Bonn Agreement Aerial Operations Handbook. 2009.
- Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Rem. Sens. Environ. 2005. 95. P. 1–13.
- Cloude S.R., Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1996. V. 34. № 2. P. 498–518.
- Cloude S.R., Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 35. № 1. P. 68–78.
- Fingas M., Brown C. Oil-spill remote sensing – An update // Sea Technol. 2000. V. 41. P. 21–26.
- Fortuny-Guasch J. Improved oil slick detection and classification with polarimetric SAR / Proc. POLinSAR-2003 Workshop, 14–16 Jan. 2003, Frascati, Italy (ESA SP-529).
- Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. et al. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR // J. Geophys. Res. 1998. 103. P. 18851–18866.
- Gambardella A. Oil spill detection by means of synthetic aperture radar. University of Cagliari, 2007.
- Lombardo P., Oliver C.J. Optimum detection and segmentation of oil-slicks with polarimetric SAR data / Proc. IEEE 2000 Int. Radar Conf., 7–12 May 2000. Alexandria, USA. P. 122–127.
- Migliaccio M., Gambardella A., Tranfaglia M. SAR polarimetry to observe oil spills // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2007. V. 45. № 2. P. 506–511.
- Nunziata F. Single- and multi-polarization electromagnetic models for SAR sea oil slick observation. Ph.D. Thesis, University of Napoli, 2008.
- Schuler D., Lee J.S., Kasilingam D., Nesti G. Surface roughness and slope measurements using polarimetric SAR data // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2002. V. 40. № 3. P. 687–698.
- Touzi R., Charbonneau F. Polarimetric workstation user guide. Canada Centre for Remote Sensing, 2002. 13 p.
- Touzi R., Goze S., Le Toan T., Lopes A., Mougin E. Polarimetric discriminators for SAR images // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1992. V. 30. № 5. P. 973–980.
- van der Sandven J.J., Thomas S.J. Application potential of Radarsat-2. Supplement 1. Natural Resources Canada, 2004.
- Wismann V., Gade M., Alpers W., Hühnerfuss H. Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency multi-polarization microwave scatterometer // Int. J. Rem. Sens. 1998. V. 19. P. 3607–3623.

Determination of Oil Spill Parameters Around the “Oil Stones” Production Site in the Caspian Sea Using Spaceborne Polarimetric SAR Images

A. Yu. Ivanov¹, M. Yu. Dostovalov², A. A. Sineva³

¹ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

² Research Institute of Precision Instruments, Moscow

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region

Based on processing and analysis of the Radarsat-2 synthetic aperture radar (SAR) images acquired in summer 2009 over the Neftyaneye Kanmi (Oil Stones) oil field in the Caspian Sea, it is shown that the Radarsat-2 data are suitable for retrieval of some parameters of oil spills and oil pollution in the sea. They are reliable information products allowing obtaining information on extent, areas, and under certain assumptions – volumes of technological oil releases. For oil spill mapping it is better to use the wide-swath modes of Radarsat-2 on vertical (VV) polarization. Backscattering signal on cross polarization in general is insufficient for this purpose. Use of polarimetric SAR imagery itself does not improve detection and identification of oil spills. For example imaging in standard quadro-polarization mode has not revealed essential advantages; the maximum contrasts were observed on vertical polarization. On the basis of SAR image analysis estimates of volumes of oil released into the marine environment are obtained.

Keywords: Radarsat-2, synthetic aperture radar, SAR images, oil spills, “Oil Stones”, Caspian Sea