

## АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

© 2010 г. В. Г. Бондур

ГУ «Научный центр аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС» Минобрнауки РФ и РАН, Москва

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 24.06.2010 г.

В работе обосновывается актуальность и анализируются особенности применения современных аэрокосмических методов и технологий для мониторинга различных объектов нефтегазового комплекса, изучения геологического строения нефтегазоносных территорий, поиска месторождений нефти и газа, в том числе в арктических регионах, контроля нефте-, газо- и продуктопроводов, а также для оценки экологического состояния мест добычи и транспортировки углеводородов на суше и на море. Систематизируются задачи нефтегазовой отрасли, которые могут решаться с использованием аэрокосмической информации. Рассматриваются принципы организации аэрокосмического мониторинга и физические основы методов дистанционного зондирования (ДЗ) для решения различных задач нефтегазового комплекса. Приводятся примеры применения аэрокосмических методов и технологий для мониторинга экологического состояния районов нефтедобычи, мониторинга трубопроводов, обнаружения загрязнений морской среды нефтепродуктами, в том числе после аварии на нефтяной платформе в Мексиканском заливе в 2010 г., а также для контроля ледовой обстановки в нефтегазоносных районах Арктики.

**Ключевые слова:** аэрокосмический мониторинг, дистанционное зондирование, нефтегазоносные территории, нефтегазовый комплекс, охрана окружающей среды

### ВВЕДЕНИЕ

Нефть и газ являются важнейшими компонентами мировой энергетики. Они удовлетворяют потребности человечества в источниках энергии более чем на треть. В настоящее время в суммарном потреблении природных энергетических ресурсов в мире доля нефти составляет 40%, газа — 23%. При этом в балансе энергоисточников России доля природного газа составляет 52%, а нефти — 23% (Лаверов, 2006). Наша страна обладает крупнейшими природными ресурсами углеводородов. Поэтому нефтегазовая отрасль является ключевой в экономике современной России. В государственном балансе запасов учтено более 2500 месторождений нефти и природного газа. Они различаются по запасам, стадиям освоения и размещению на территории страны (Конторович, Коржубаев, 2002). Основная часть разведанных запасов находится в Западной и Восточной Сибири, на морском шельфе Сахалина, Баренцева и Карского морей. Потенциальные нефтегазоносные провинции занимают огромные площади и резко отличаются по степени геологической изученности и прогнозным ресурсам (Мазур, Лобов, 2004). Для получения новой информации о геологическом строении нефтегазоносных территорий, оценки их перспективности с точки зрения

наличия нефти и газа, информационного обеспечения процессов поиска и разведки месторождений углеводородов необходимо использование инновационных методов и технологий, одними из наиболее эффективных среди которых являются аэрокосмические.

Важную роль в деятельности нефтегазового комплекса России играют транспортные системы (нефте-, газо- и продуктопроводы, танкеры для перевозки нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа). В настоящее время на территории нашей страны эксплуатируется более 1 млн. км магистральных, промысловых и распределительных нефте-, газо- и продуктопроводов. Трубопроводная система покрывает 35% огромной территории страны, на которой проживает почти 60% ее населения. Только на магистральных трубопроводах ежегодно происходит в среднем около 55 аварий (Безопасность..., 2002; Мазур, Иванцов, 2004). В связи с этим и с возрастающими требованиями к контролю и обеспечению безопасности трубопроводов исключительное значение приобретают разработка и внедрение в практику новых методов и средств диагностики данных объектов. При решении этой проблемы перспективно использование аэрокосмических методов и технологий, что обусловлено как их преимуществами, так и

уникальностью для выявления, прежде всего, таких повреждений трубопроводов, как свищи и трещины, которые не влияют на режим перекачки и не могут быть обнаружены параметрическими методами и внутритрубными мониторинговыми системами.

На предприятиях добычи, хранения, транспортировки, раздачи и переработки нефти, газа и нефтепродуктов обычно имеют место безвозвратные потери, обусловленные утечками, разливами, прорывами и авариями, а также другими источниками, что приводит к загрязнению окружающей среды. При этом нефть и нефтепродукты являются одними из наиболее опасных видов загрязнения. Это связано с тем, что они представляют собой смесь органических соединений, содержащих большое количество химически активных веществ, которые изменяют состав объектов окружающей среды, преобразуя естественные компоненты в токсичные формы.

Имеется множество случаев аварий в местах добычи и транспортировки нефти и газа. Одним из последних “громких” примеров является авария на нефтяной платформе компании British Petroleum в Мексиканском заливе, произошедшая в апреле 2010 г. Для мониторинга экологического состояния территорий суши и морских акваторий, где расположены предприятия нефтегазового комплекса, могут с успехом использоваться современные аэрокосмические методы и средства.

Для рационального использования углеводородных природных ресурсов и обеспечения безопасности на объектах добычи, переработки, хранения, транспортировки и раздачи нефти, нефтепродуктов и газа, повышения эффективности функционирования предприятий нефтегазовой отрасли необходимо использовать последние достижения науки и соответствующее информационное обеспечение. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является широкое применение современных аэрокосмических методов и технологий ДЗ, новых методов обработки аэрокосмической информации и геоинформационных технологий.

Рассмотрению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

## ОСОБЕННОСТИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) — один из важнейших и бурно развивающихся видов космической деятельности, который наиболее восприимчив к инновациям. Этот вид деятельности является чрезвычайно перспективной сферой, которая уже сейчас вносит большой вклад в экономику развитых стран. Ее характерной чертой являются высокие темпы развития и

быстрое получение практически значимых результатов. Этот сектор космической деятельности основан на использовании высоких наукоемких технологий и последних достижений фундаментальной и прикладной науки.

Космическая информация используется во многих областях, прежде всего, для предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, исследования и рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, в интересах энергетики, градостроительства, транспортного комплекса, метеорологии и климатологии, лесного и сельского хозяйства, картографии и др. (Бондур и др., 2009б). Естественно, что она должна широко использоваться и в интересах нефтегазовой отрасли.

С учетом основных мировых тенденций развития космических систем ДЗЗ, связанных с увеличением числа спутников высокого и сверхвысокого разрешения (меньше 0.4–1 м), в том числе всепогодных радиолокационных (РЛ) космических средств, все более широким использованием кластеров малых спутников, созданием комплексных многоспутниковых систем космического мониторинга, отказом от неоперативных фотографических космических средств, а также широким международным сотрудничеством в области ДЗЗ, эффективность использования космических методов и технологий в различных направлениях человеческой деятельности, в том числе и в интересах нефтегазовой отрасли, будет непрерывно повышаться.

Важнейшими преимуществами космических методов и систем мониторинга являются: большая обзорность; возможность работы в любых труднодоступных районах, получение информации практически в любом масштабе, с различным пространственным и временным разрешением; широкий спектр регистрируемых параметров; высокая достоверность и оперативность получения данных; возможность многократно наблюдать исследуемые районы и работать при частичном или полном отсутствии топографической основы; относительная дешевизна информации (особенно при работе на больших площадях) (Бондур, 2004; Бондур и др., 2009а).

Авиационные средства мониторинга занимают свою нишу при решении задач мониторинга объектов нефтегазовой отрасли, связанную с получением более детальной информации и в более локальном масштабе. Эффективность их применения существенно повышается в случае комплексирования с космическими средствами.

Актуальность и необходимость применения аэрокосмических методов и технологий в нефтегазовой отрасли России обусловлена следующими обстоятельствами:

- значительными площадями нефтегазоносных территорий;
- большой протяженностью трубопроводных сетей для транспортировки углеводородов;
- труднодоступностью большей части регионов, где производится добыча и транспортировка углеводородов на суше и в прибрежных акваториях;
- суровыми погодными условиями;
- широкими и непрерывно увеличивающимися возможностями для решения большого числа разнородных задач, стоящих перед нефтегазовой отраслью.

Для аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса уже в настоящее время используются различные методы ДЗ, в том числе (Савин, Бондур, 2000; Бондур, 1995; 2004; Бондур, Зубков, 2001; Хренов, 2003; Аэрометоды, 1971; Харитонов и др., 2004; Геэкологическое..., 1999; Volker et al., 1996): методы, основанные на регистрации характеристик электромагнитного поля, прежде всего: оптико-электронные сканерные методы; тепловизионные методы; методы ИК- и СВЧ-радиометрии; гиперспектральные методы; лидарные методы; РЛ-методы – радары с синтезированной апертурой (РСА) и радары бокового обзора (РЛСБО); магнитометрические методы; гравиметрические методы; пассивные методы, основанные на регистрации потоков частиц (гамма-спектрометрия).

Перспективы повышения эффективности аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса связаны с широким использованием новых методов ДЗ, таких, например, как: дистанционная пространственно-частотная спектрометрия; многочастотные радиотомография и СВЧ-радиометрия; многочастотная радиоволнография; радиоинтерферометрия; бистатистическая радиолокация, Фурье-спектрометрия; лазерное флуоресцирование; методы спутниковой навигации, спутниковая альтиметрия, активные методы, основанные на регистрации потоков элементарных частиц и др., а также с комплексным использованием разнородной аэрокосмической и подспутниковой (в том числе геофизической) информации. Эти перспективы связаны также с развитием методов и технологий обработки и хранения разнородной аэрокосмической информации, современного геоинформационного обеспечения (Бондур, 2004; Савин, Бондур, 2000; Бондур и др., 2009а; Трифонов, 2010; Лопатин, 1996; Харитонов и др. 2004).

#### ЗАДАЧИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ, РЕШАЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

Основными объектами нефтегазового комплекса, для которых необходимо осуществлять

мониторинг, являются: районы, перспективные с точки зрения разработки новых месторождений нефти и газа, в том числе в арктических районах; места добычи и транспортировки углеводородов на суше и на море; нефте-, газо- и продуктопроводы; нефтеперерабатывающие комплексы; хранилища сырья и продуктов; водный и наземный транспорт для перевозки нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа и др.

Уже в настоящее время с применением аэрокосмических методов и технологий можно решать множество задач в интересах нефтегазовой отрасли, прежде всего, таких, как:

- проведение фундаментальных научных исследований процессов образования и миграции углеводородов с использованием аэрокосмических данных;

- исследование геологического строения нефтегазоносных территорий, в том числе изучение линеаментной сети и глубинной тектоники, кольцевых структур, проведение тектонического районирования этих территорий на основе космической информации для информационного обеспечения изыскательских работ по выявлению новых и оценке перспективности существующих месторождений нефти и газа;

- мониторинг текущего состояния нефте-, газо- и продуктопроводов для выявления утечек, нарушений технического состояния и др.;

- определение потенциально опасных участков трубопроводов, в том числе оценка изменения пойм рек, водоемов и болотных массивов в результате динамики мерзлотных и гидрофизических свойств грунтов, оценка динамики мерзлотного режима грунтов и результатов ее воздействия, а также выявление наиболее благоприятных геоэкологических условий для прокладки новых трубопроводов;

- мониторинг опасных природных и природно-техногенных процессов при освоении и транспортировке углеводородов, в том числе таких, как землетрясения, сели, лавины, оползни, цунами, тропические циклоны и др., на основе аэрокосмических данных;

- дистанционный мониторинг ледовой обстановки в арктических районах, в том числе в местах расположения буровых платформ и Северного морского пути;

- оперативный космический мониторинг пожаров в буферных зонах магистральных трубопроводов и других объектов нефтегазового комплекса;

- экологический мониторинг мест добычи, транспортировки и переработки углеводородов на суше и на море для оценки последствий и снижения рисков от деятельности предприятий нефтегазовой отрасли, в том числе: выявление загряз-

нений нефтепродуктами участков грунта, растительности и снежного покрова в пределах буровых скважин и станций перекачки нефти; морских платформ, нефтехранилищ, мест загрузки и разгрузки судов для перевозки нефти и нефтепродуктов; подземных и подводных трубопроводов; выявление цветения озер в результате поступления минеральных и органических суспензий и др.;

- контроль темпов и оценка эффективности рекультивации земель и загрязненных территорий на основе аэрокосмических данных;

- проведение экологической паспортизации объектов нефтегазовой отрасли с использованием аэрокосмической информации;

- определение расположения трубопроводов, строений и других объектов нефтегазовой отрасли и формирование их кадастров на основе аэрокосмических данных;

- создание цифровых карт, трехмерных моделей местности, ГИС различной тематической направленности для нефтегазоносных районов с использованием аэрокосмической информации;

- дистанционный мониторинг несанкционированных врезок в магистральные нефте- и продуктопроводы;

- выявление несанкционированной хозяйственной и строительной деятельности, а также появления техногенных объектов в зонах отвода объектов нефтегазового комплекса на основе аэрокосмических данных;

- дистанционный мониторинг районов строительства новых объектов нефтегазового комплекса;

- мониторинг из космоса мест сжигания попутного газа и контроль функционирования факельных установок;

- информационное обеспечение долгосрочного планирования и управления деятельностью предприятий нефтегазового комплекса и ликвидации аварий на них с использованием аэрокосмических данных.

Спектр этих задач может быть расширен по мере развития методов, технологий и технических средств ДЗ и обработки полученной информации.

### ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ИНТЕРЕСАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

При организации аэрокосмического мониторинга в интересах нефтегазовой отрасли необходимо использовать принципы, свойственные сложным информационным системам (Бондур, 1995; Савин, Бондур, 2000). Для проведения аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса должны применяться различные космические аппараты, воздушные средства (са-

молеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты, дирижабли), оснащенных широким набором пассивной и активной аппаратуры ДЗ, функционирующей в различных диапазонах спектра электромагнитных волн (от УФ- до радиодиапазона), а также геофизической аппаратурой, средства связи, наземные средства приема спутниковых данных, ситуационные и информационно-аналитические центры, программные и технические средства обработки, долговременного хранения и предоставления пользователям аэрокосмической информации, а также соответствующее геоинформационное обеспечение.

На рис. 1 приведена схема проведения аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса, а на рис. 2 – структурная схема формирования информационных продуктов в процессе такого мониторинга.

Для проведения мониторинга объектов нефтегазового комплекса могут использоваться:

- спутники, оборудованные оптической аппаратурой УФ-, видимого и ИК-диапазонов спектра сверхвысокого и высокого разрешения – 0.4–4.0 м; многоспектральной аппаратурой среднего – 5.0–90 м и низкого разрешения (обзорные) – 100 м–1 км; гиперспектральной аппаратурой.

- РЛ-спутники, оборудованные РСА высокого (1.0–8.0 м), среднего (12.5–25 м) и низкого (100–600 м) разрешения;

- спутники для магнитной и гравитационной съемки;

- метеорологические спутники;

- средства спутниковых навигационных систем;

- пилотируемые долговременные орбитальные станции;

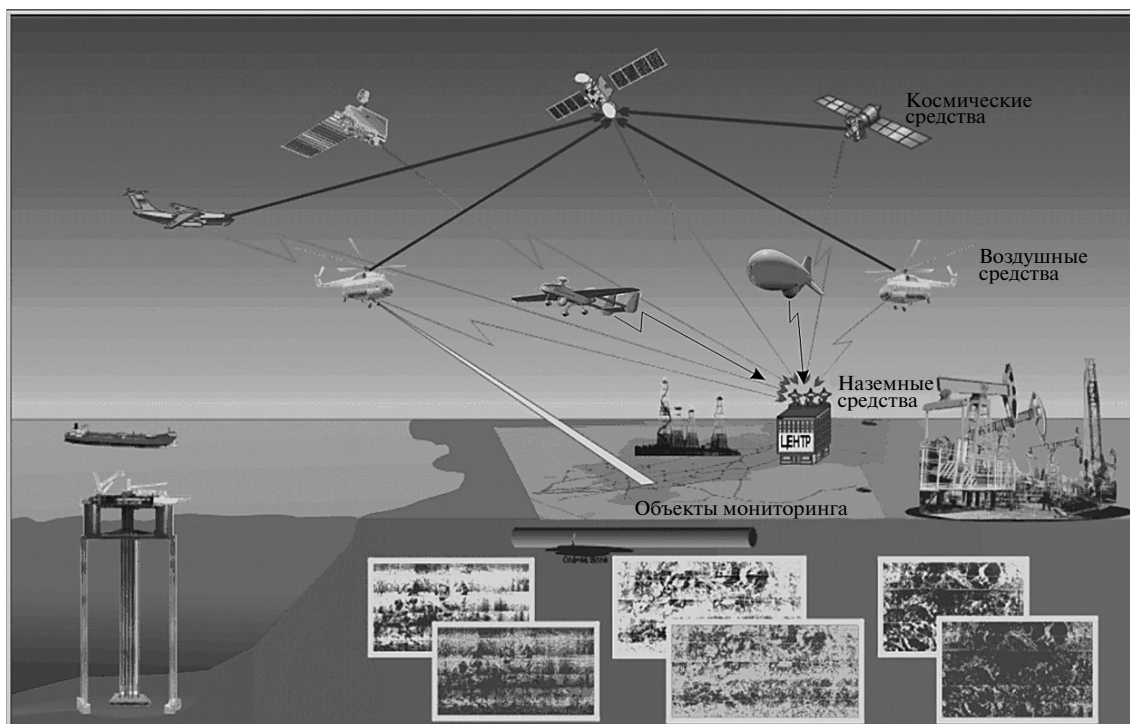
- воздушные средства (самолеты, вертолеты, дельтапланы, беспилотные летательные аппараты и дирижабли), оборудованные цифровыми оптическими камерами; сканирующими оптико-электронными комплексами; гиперспектрометрами; тепловизорами, ИК-радиометрами; лидарами; РСА; микроволновыми радиометрами, аппаратурой гамма-съемки и другими приборами;

- средства связи и передачи данных;

- наземные ситуационные и информационно-аналитические центры;

- программные и технические средства для обработки информации, формирования баз данных, представления пространственно-организованных данных в виде ГИС в интересах решения широкого спектра задач нефтегазовой отрасли.

В процессе проведения аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса формируется исходная информация (аэрокосмические изображения,



**Рис. 1.** Схема проведения аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса.



**Рис. 2.** Структурная схема формирования информационных продуктов в процессе аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса.

другие данные ДЗ, а также геофизическая информация). При использовании воздушных средств мониторинга оперативная обработка информации в отдельных случаях может производиться на борту авиационных средств, и ее результаты могут передаваться потребителям в режиме “online” или поступать на наземные средства обработки (см. рис. 2).

Информация с различных спутников может оперативно приниматься на антенные комплексы наземных центров приема, а также поступать через FTP-серверы или вводиться с магнитных носителей. Схема организации приема, обработки и хранения данных при космическом мониторинге приведена на рис. 3.

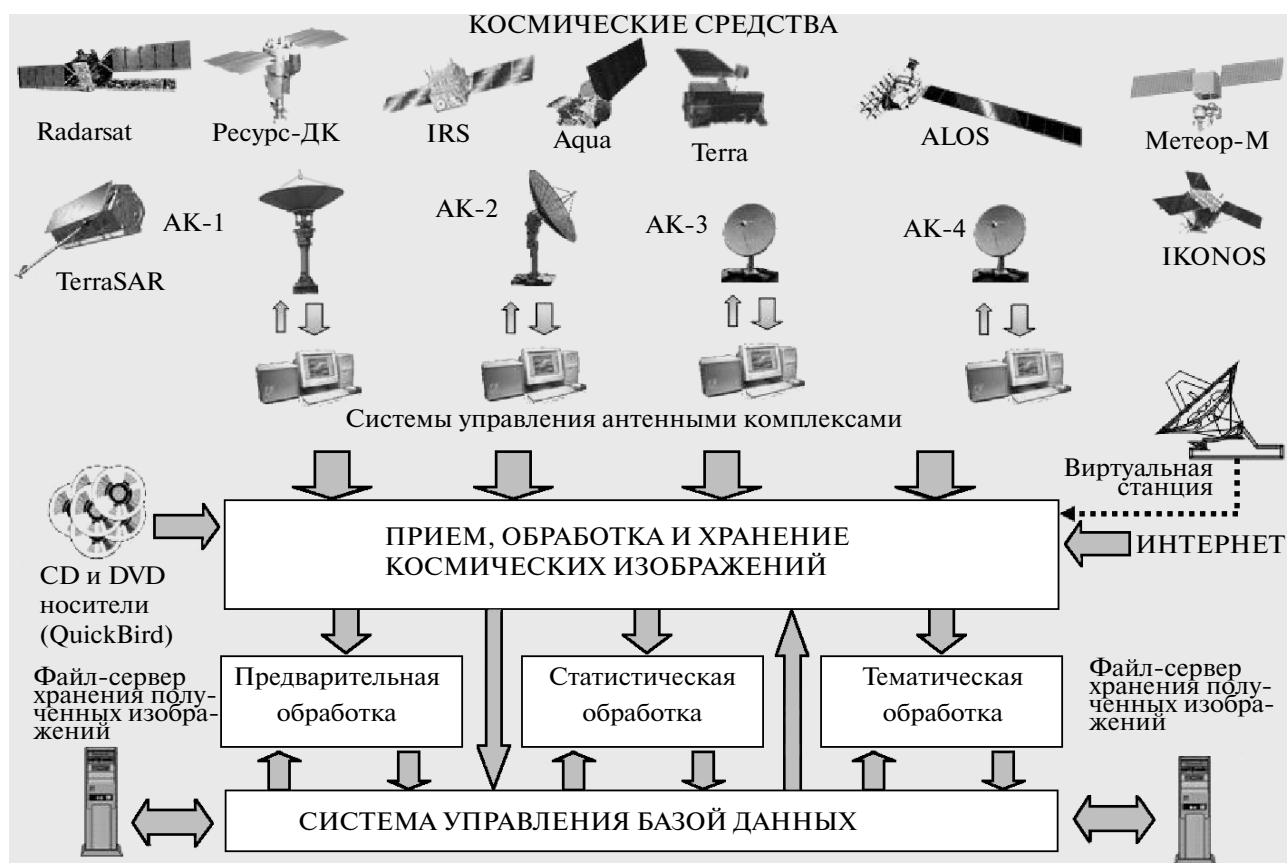


Рис. 3. Организация приема, обработки и хранения данных при космическом мониторинге.

При выполнении мониторинга аэрокосмическая и сопутствующая информация подвергается предварительной и детальной тематической обработке. С использованием полученных результатов формируются промежуточные информационные продукты, тематические карты и ГИС различной тематической направленности, на основе которых формируются рекомендации для принятия управленческих решений. Данные, получаемые на любом этапе формирования информационных продуктов, могут передаваться в главные или региональные ситуационные или информационно-аналитические центры потребителей (см. рис. 2).

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

*Экологический мониторинг районов добычи  
и транспортировки углеводородов*

При решении многочисленных задач нефтегазового комплекса осуществляется ДЗ различных объектов, расположенных на суше и на море. В случае аварий на этих объектах происходят

утечки нефтяных и газовых компонент, которые приводят к загрязнению окружающей среды. При этом аэрокосмическими средствами мониторинга регистрируются различные изменения на поверхности и под поверхностью земли и воды.

**Земная поверхность.** Обнаружение нефтяных и газовых компонент на земной поверхности, а также под поверхностью основывается на следующих основных физических эффектах, которые проявляются в изменении характеристик электромагнитного излучения, регистрируемого аэрокосмической аппаратурой (Бондур, 1995; 2000; 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Межерис, 1987; Глушков и др., 1994; Дейдан и др., 1994; Хренов, 2003):

- возникновении тепловых контрастов в местах аварий трубопроводов и появления загрязняющих компонент на поверхности по отношению к окружающему фону, регистрируемых ИК- и радиотепловой аппаратурой;

- появлению контрастов яркости между аномальными областями и фоном в различных участках электромагнитного спектра за счет различия коэффициентов спектральных яркостей, которые регистрируются многоспектральной или гиперспектральной аэрокосмической аппаратурой;

– эффекте “сужения” спектра РЛ-сигналов, отраженных от мест загрязнения земной поверхности, по сравнению с окружающим фоном, или эффекте изменения корреляционных характеристик сигналов в областях фона и загрязненных участков, регистрируемые РЛ-средствами;

– эффекте изменения диэлектрической проницаемости почвы в местах “прорыва” нефте-, газо- и продуктопроводов, обусловленных воздействием химически активных компонент на почву, регистрируемого многочастотными радиолокаторами;

– изменении спектров флуоресценции аномальных участков (в зонах появления нефти и нефтепродуктов) по сравнению с фоном, регистрируемых флуоресцентными лидарами.

Одним из важных параметров, определяющих возможность мониторинга объектов нефтегазового комплекса с помощью тепловизионной, ИК- или СВЧ-радиометрической аппаратуры, является разность радиационных температур объекта и фона, зависящая от их физических температур, а также от их коэффициентов излучения.

Это обусловлено следующими обстоятельствами. В случае утечек из продуктопроводов или газопроводов тепловой контраст обусловлен эффектом Джоуля–Томсона, заключающемся в понижении температуры за счет перехода жидкой фазы, находящейся под давлением, в легкие газообразные фракции углеводородов. Кроме того, температура нефти в трубопроводе, как правило, превышает температуру грунта на той же глубине. Поэтому при утечке нефти по подземному каналу сравнительно небольшого сечения ее температура при удалении от места повреждения трубопровода в результате теплообмена с окружающей средой снижается. Следовательно, дистанционное измерение температуры грунта над трубопроводом позволяет выявить утечки и локализовать дефекты в нефтепроводах (Геоэкологическое обследование..., 1999).

При воздействии нефти, нефтепродуктов или газовых компонентов, связанных с утечками из трубопроводов, на травяной покров и почву изменяются яркостные характеристики в различных спектральных диапазонах  $\Delta\lambda_i$ , связанные с вариациями спектральных отражательных способностей почв и растительности, которые могут быть зарегистрированы многоспектральной и гиперспектральной аэрокосмической аппаратурой. Кроме того, в этих случаях изменяются вегетационные индексы NDVI и NCHVI, которые хорошо регистрируются с использованием данных, полученных многоспектральной оптической аппаратурой ДЗЗ, а также совместным использованием оптической и РЛ-аппаратуры (Бондур, Чимитдоржиев, 2008).

В местах загрязнения местности нефтью или продуктами ее переработки (бензин, керосин,

смолы), изменяется (уменьшается) удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР), приводящая к изменению (уменьшению) уровня сигнала на выходе приемника РЛС. Это и позволяет дистанционно обнаружить такое загрязнение.

При прорыве подземного газопровода образуется локальное газовое пятно. Оно концентрируется в некоторой области около места разрыва (прорыва) и изменяет диэлектрическую проницаемость среды, которая, как и локальное изменение температуры, служит важным признаком газовых загрязнений среды, обнаруживаемых радиофизическими средствами ДЗЗ.

Одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния окружающей среды в районах добычи и транспортировки нефти и газа является лазерная флуоресцентная спектроскопия (Межерис, 1987; Бондур, Зубков, 2001; Дейдан и др., 1994). Сырые нефти различных месторождений, как и нефтяные фракции – бензин, мазут и т.д., отличаются процентным содержанием метановых, нафтеновых и ароматических углеводородов. Поскольку каждый углеводородный компонент имеет свои индивидуальные флуоресцентные характеристики, то возможно определение вида нефтепродукта по его спектру флуоресценции. Флуоресценция любого продукта определяется следующими основными характеристиками, которые и могут использоваться как соответствующие демаскирующие признаки (Межерис, 1987; Глушков и др., 1994):

– спектральное распределение интенсивности флуоресценции:  $S_i^{\text{отн}} = S_i/S_{\text{max}} = f(\lambda_i)$ , т.е. форма спектра или положение максимума;

– эффективность флуоресценции  $\psi_i = \phi/k_0$  на длине волны  $\lambda_i$ ;

– спектральное распределение постоянных времени  $\tau_i = f(\lambda_i)$ , т.е. спектр времен затухания.

Кроме того, для дистанционной идентификации нефтепродуктов могут быть использованы линии комбинационного рассеяния, которые, в отличие от первых трех характеристик, не зависят от толщины нефтяной пленки и связаны с индивидуальностью нефтепродукта (Дейдан и др. 1994).

Комплексное использование спектральных и временных характеристик флуоресценции позволяет проводить идентификацию нефтепродуктов не только по группам (сырая нефть, легкие фракции, тяжелые остаточные фракции), но также по видам (различные масла, дизтопливо и т.д.), а возможно, и по маркам отдельных нефтепродуктов.

**Водная среда.** Как и для случая земной поверхности, в основе физических принципов дистанционного мониторинга состояния водной среды в районах добычи и транспортировки нефти в морских акваториях лежат несколько основополагающих явлений.

Во-первых, при наличии в составе сбрасываемых в морскую среду загрязняющих примесей “легких” жидкостных фракций или поднимающихся к поверхности газовых компонент (например, при разрывах подводных нефте- и газопроводов) происходит изменение спектрального состава морского волнения из-за эффекта “выглаживания” мелкоструктурных составляющих этого волнения (Бондур, 1987; 1995; 2004). Такое изменение может регистрироваться путем пространственного спектрального анализа оптических изображений методом дистанционной пространственно-частотной спектрометрии и РЛ-методами (Бондур, 1987; 1995; 2000; 2004; Бондур, Гребенюк, 2001).

РЛ-системы (РЛСБО, РСА), зондирующие поверхность при пологих углах ( $\theta \approx 10^\circ\text{--}40^\circ$  – угол скольжения луча), используют эффект брэгговского отражения сигналов, когда переизлучение сигналов морской поверхностью в сторону приемной антенны происходит в основном на резонансной длине волны (Bass, Fuks, 1968; Elachi, Brown, 1977)

$$\kappa = 2 \cdot \kappa_0 \cdot \cos\theta,$$

где  $\kappa = 2 \cdot \pi / \Lambda_{MB}$ ,  $\kappa_0 = 2 \cdot \pi / \lambda_0$ ,  $\Lambda_{MB}$  – длина морской волны,  $\lambda_0$  – длина волны РЛС.

Сам же радиолокатор фиксирует уменьшение уровня отраженного сигнала от участков “загрязнения” поверхности легкими фракциями, и на радиолокационных изображениях (РЛИ) водной поверхности будут наблюдаться участки с ярко выраженным отрицательным контрастом (будут видны темные полосы), где уровень отраженного сигнала меньше уровня сигнала от фона. Такая “картина” будет наблюдаться при морском волнении, больше 0.5–1 балла и углах визирования поверхности  $>35^\circ$  (Бондур, 2004). При слабом волнении или штиле (балльность 0–0.5 балла) в месте выхода загрязнений, особенно при наличии пузырьковой газовой составляющей загрязнений, будут наблюдаться аномалии положительной контрастности по отношению к уровню собственного шума приемника (Бондур, 2004).

Во-вторых, наличие примесей с резко отличными от чистой воды свойствами приводит к изменению диэлектрической проницаемости (причем, как известно, относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды  $\epsilon \approx 80$ , а бензина  $\epsilon \approx 2\text{--}4$ ), и соответственно меняется уровень отраженного радиосигнала от загрязненных участков водной или морокой поверхности (контрасты  $\sim 2\text{--}8$  дБ).

В-третьих, возникновение загрязняющих нефтегазовых компонент в толще воды может привести к появлению градиента плотности по глубине,  $\Delta\rho/\Delta h$ , что в принципе может стать источником зарождения внутренних волн. Их взаимодействие с

поверхностным волнением приводит к появлению гладких полос на морской поверхности, которые могут быть зафиксированы путем пространственного спектрального анализа оптических и РЛИ (Бондур, 1987; 2000, 2004).

В-четвертых, наличие течений в зоне попавших в морскую среду загрязняющих веществ (в том числе и при “захвате” окружающих слоев воды) может служить физической основой для их обнаружения с помощью когерентных РЛ-систем. В частности, с помощью РСА может быть зафиксирован доплеровский сдвиг частоты, если течение направлено в сторону диаграммы направленности антенны РСА или от нее (Бондур, 2004).

В-пятых, в области нефтяных загрязнений изменяется температура воды. Для газовых компонент наиболее характерным является изменение физической температуры и, соответственно, радиояркостной температуры поверхности. Эти эффекты регистрируются тепловизионной и радиотепловой аппаратурой (Бондур, 1995; 2000; 2004).

В-шестых, в областях нефтяных загрязнений изменяются коэффициенты спектральной яркости в различных спектральных диапазонах, которые могут регистрироваться многоспектральной и гиперспектральной оптической аппаратурой (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006; Volker et al., 1996).

В-седьмых, при появлении растворенных, эмульгированных и дисперсных нефтяных фракций в толще воды изменяются спектры флуоресценции. Сигналы флуоресценции водной среды в этом случае отличаются более высокой интенсивностью по сравнению с фоновыми сигналами. При этом наблюдается также подавление линии комбинационного рассеяния (КР) воды. Эти эффекты могут обнаруживаться флуоресцентными лидарами (Межерис, 1987; Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2001; Lutomirski, 1994).

Таким образом, физическими причинами появления контрастов, обусловленных загрязнениями водной среды нефтью, нефтепродуктами и газовыми компонентами, являются: изменение спектрального состава морского волнения за счет подавления высокочастотных гравитационно-капиллярных компонент, изменения температуры среды, коэффициентов спектральной яркости, спектров флуоресценции, диэлектрической проницаемости, доплеровского смещения частоты РЛ-сигналов из-за появления течений и т.п., которые регистрируются на оптических и РЛ-изображениях гиперспектрометрами, тепловизорами и СВЧ-радиометрами, а также флуоресцентными лидарами.



*Использование аэрокосмической информации для поиска и разведки углеводородов*

Возможности применения аэрокосмических методов для решения задач поиска и разведки месторождений нефти и газа связаны с тем, что вертикальная миграция пластовых флюидов (в том числе и углеводородных) наиболее благоприятна в зонах разломов и повышенной трещиноватости, проявляющихся в виде линеаментов и кольцевых структур (Трифонов, 2010). Это может быть зафиксировано на многоспектральных и гиперспектральных космических изображениях. Формирование линеаментов, регистрируемых на таких изображениях, обусловлено тектоническим, ротационным и флюидогеодинамическим механизмами. При этом миграция углеводородных флюидов и теплоперенос от глубинных слоев и поверхности Земли вызывает изменение спектральных характеристик почв, грунтов, растительности, а также прозрачности приземных слоев атмосферы. Интегральный эффект от этих факторов приводит к аномалиям, выделяемым на космических изображениях, связанным с изменением напряженно-деформационного состояния земной коры и флюидогеодинамическими процессами (Бондур, Зверев, 2007).

На космических изображениях путем структурно-морфологического анализа выделяются геологические особенности, проявляющиеся в виде систем прямых и дугообразных линеаментов, а также овално-кольцевых образований. Структурно-морфологические особенности линеаментной сети, регистрируемые на космических изображениях, отражают особенности глубинного строения литосферы. Они являются информативными признаками для оценки перспективных нефтегазоносных структур и оценки их углеводородного потенциала.

Мониторинг изменения напряженно-деформационного состояния среды путем регистрации возрастания выраженности систем линеаментов на космических изображениях позволяет регистрировать геодинамические предвестники сейсмических событий на нефтегазоносных территориях, угрожающих объектам нефтегазового комплекса (Бондур, Зверев, 2005а, б; 2007).

Для автоматического выделения линеаментов и овално-кольцевых образований применяются методы компьютерного линеаментного анализа с помощью различных программ обработки космических изображений, например, программные пакеты LESSA, ALINA и др. (Zlatopolsky, 1997; Щепин и др., 2007). Следует отметить, что системы линеаментов можно исследовать и по космическим РЛИ.

В областях расположения локальных нефтегазоносных структур возникают также специфические изометрические формы рельефа, выраженные

на местности слабыми неотектоническими поднятиями. Зоны тектонических поднятий являются наиболее благоприятными для расположения нефтегазоносных ловушек (Трифонов, 2010). Эти структуры могут выявляться на оптических и РЛ-изображениях по морфологическим, гипсометрическим и морфометрическим признакам. Такого рода неотектонические поднятия могут быть зарегистрированы также методами спутниковой альтиметрии и спутниковой радиоинтерферометрии. Для регистрации и анализа структурных особенностей и специфических форм рельефа нефтегазоносных территорий могут применяться навигационные спутниковые системы GPS, ГЛОНАСС и др.

Углеводородные залежи в ловушках, проявляющиеся в структурном поднятии, приводят к повышению температуры земной поверхности. Это вызывается деятельностью микроорганизмов внутри залежей, а усиление флюидной проницаемости, связанное с новейшей активизацией трещин и, отчасти, обусловленное изостатическим поднятием из-за того, что залежи легче вмещающих пород, приводит к повышению влажности грунта (Лялько и др., 2006; Трифонов, 2010). Эти эффекты могут быть зарегистрированы аппаратурой ДЗ в ИК- и микроволновом диапазоне спектра.

Крупные геологические структуры отражаются также в радиоактивном поле и, в частности, в уровне интенсивности гамма-излучения, зависящем от морфологических особенностей этих структур. Физические механизмы связи поверхностного гамма-поля с глубинным строением, а следовательно, и с проявлением нефтегазоносных структур, обусловлены тем, что геологические структуры, развивающиеся в процессе осадконакопления, сопровождаются дифференциацией материала и изменением физических параметров осадочных пород (пористости, плотности, трещиноватости и др.), что отражается на распределении радиоактивных элементов (Аэрометоды..., 1971).

Возможности дистанционного поиска месторождений нефти и газа на морском шельфе обусловлены тем, что ловушки углеводородов приурочены, как правило, к глубоким горизонтам осадочного чехла и отображаются в виде различных структурных форм в донных ландшафтах, а также в толще и на поверхности воды (Лялько, 2006). Аэрокосмические методы определения рельефа дна по эффектам на поверхности и в приповерхностном слое моря, описанные в работах (Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2000), могут использоваться для исследования глубинных разломов, зон разуплотнения, а также локальных структур. Такие структуры могут быть выявлены с использованием специальных методов обработки оптических и РЛ-изображений морской поверх-

ности (в том числе методом дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, много-частотной радиоволнографии и др., описанных, например, в (Бондур, 1987; 1995; 2004; Бондур, Гребенюк, 2001)).

На основе анализа выявленных таким образом схем линеаментов, овально-кольцевых образований, распределений спектральной яркости и характеристик принимаемых радиосигналов производится структурно-геоморфологический анализ, классификация линеаментных зон, и определяется перспективность исследуемых шельфовых территорий на наличие углеводородов (Лялько, 2006).

Для выявления наличия углеводородов на суше и на морском шельфе могут использоваться также дистанционные методы, основанные на регистрации аномалий магнитного и гравитационного полей (Лопатин, 1996). Физические механизмы, обуславливающие возможности использования таких методов, связаны с тем, что разрывная тектоника фундамента, а также поднятия и прогибы земной коры, отображающие сдвиговые зоны, проявляются как в первичных регистрируемых гравитационном и магнитном полях, так и в производных, например в их градиентах. При этом в зонах поднятия наблюдаются отрицательные аномалии гравитационного и магнитного полей, а в зонах прогиба – положительные. Нефтегазонасность усиливает эти эффекты, что позволяет оценивать углеводородный потенциал путем регистрации аномалий магнитного и гравитационного полей (Лопатин, 2006; Трифонов, 2010).

Такие поля могут регистрироваться со спутников MAGSAT, GEOS, CHAMP (Харитонов и др., 2004).

#### НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

##### *Мониторинг экологического состояния района нефтедобычи*

На рис. 4 (справа) (см. на цветн. вклейках) показано RGB-синтезированное изображение, полученное со спутника QuickBird, для района нефтедобычи (вахтенный пос. Пионерный в Томской обл.). В результате обработки данного изображения с использованием вегетационных индексов NDVI и TSNVI и проведения классификации методом максимального правдоподобия выявлены ландшафтные особенности исследуемого района, которые приведены на шкале цветоделения (см. рис. 4).

На рис. 5 (на цветн. вклейках) представлены результаты обработки фрагмента (верхний слева) космического изображения, полученного со спутника QuickBird, приведенного на рис. 4.

Слева внизу представлено цветокодированное изображение этого фрагмента, составленное в псевдоцветах для выявления областей антропогенных воздействий. Желтым квадратом обозначена область, представленная на рис. 5 (справа) в увеличенном виде.

На рис. 5 (справа сверху) показан увеличенный фрагмент цветокодированного изображения, отображающий происходящие антропогенные изменения ландшафта вблизи поселка Пионерный. На данном рисунке розовыми, фиолетовыми, светло-голубыми тонами выделены участки поражения местности, вызванные воздействием разливов нефтепродуктов, желтым цветом показаны объекты инфраструктуры – дороги, трубопроводы, нефтяная вышка.

Справа внизу на рис. 5 приведен результат неконтролируемой классификации данного фрагмента по методу  $k$ -средних с принудительным определением трех классов. Результаты классификации можно интерпретировать как участки, соответствующие различным степеням воздействия на окружающую среду. Красным показаны антропогенные изменения ландшафта, вызванные сильными загрязнениями, прокладкой дорог и нефтепроводов, строительством объектов инфраструктуры, вырубками и т.д. Желтым обозначены участки угнетения растительности, вызванные деятельностью нефтедобывающего комплекса, зеленым – участки, находящиеся в удовлетворительном экологическом состоянии.

Анализ результатов, полученных на основании космических данных, показывает, что в районе нефтедобычи антропогенная нагрузка на окружающую среду крайне высока. Выявлены интенсивные разливы нефти и нефтепродуктов, деградация растительного и почвенного покрова, прочие нарушения природного ландшафта, вызванные как воздействием утечек, так и интенсивной хозяйственной деятельностью в исследуемом районе.

##### *Многочастотный РЛ-мониторинг трубопроводов*

Для мониторинга нефте-, газо- и продуктопроводов эффективно использование метода радиотомографии, основанного на многочастотном радиозондировании. При этом в см-диапазоне на РЛИ отображается поверхность, а в м-диапазоне появляется возможность “заглядывать” под поверхность и контролировать состояние трубопроводов на глубине их залегания (Савин, Бондур, 2000).

Принцип действия авиационного двухчастотного радиолокатора иллюстрируется на рис. 6 (на цветн. вклейках). На этом рисунке приведены схема съемки (рис. 6а), фрагменты РЛИ, полученных в районе Нижневартовска на длине волны  $\lambda_1 = 4$  см (рис. 6б, сверху) и на длине волны

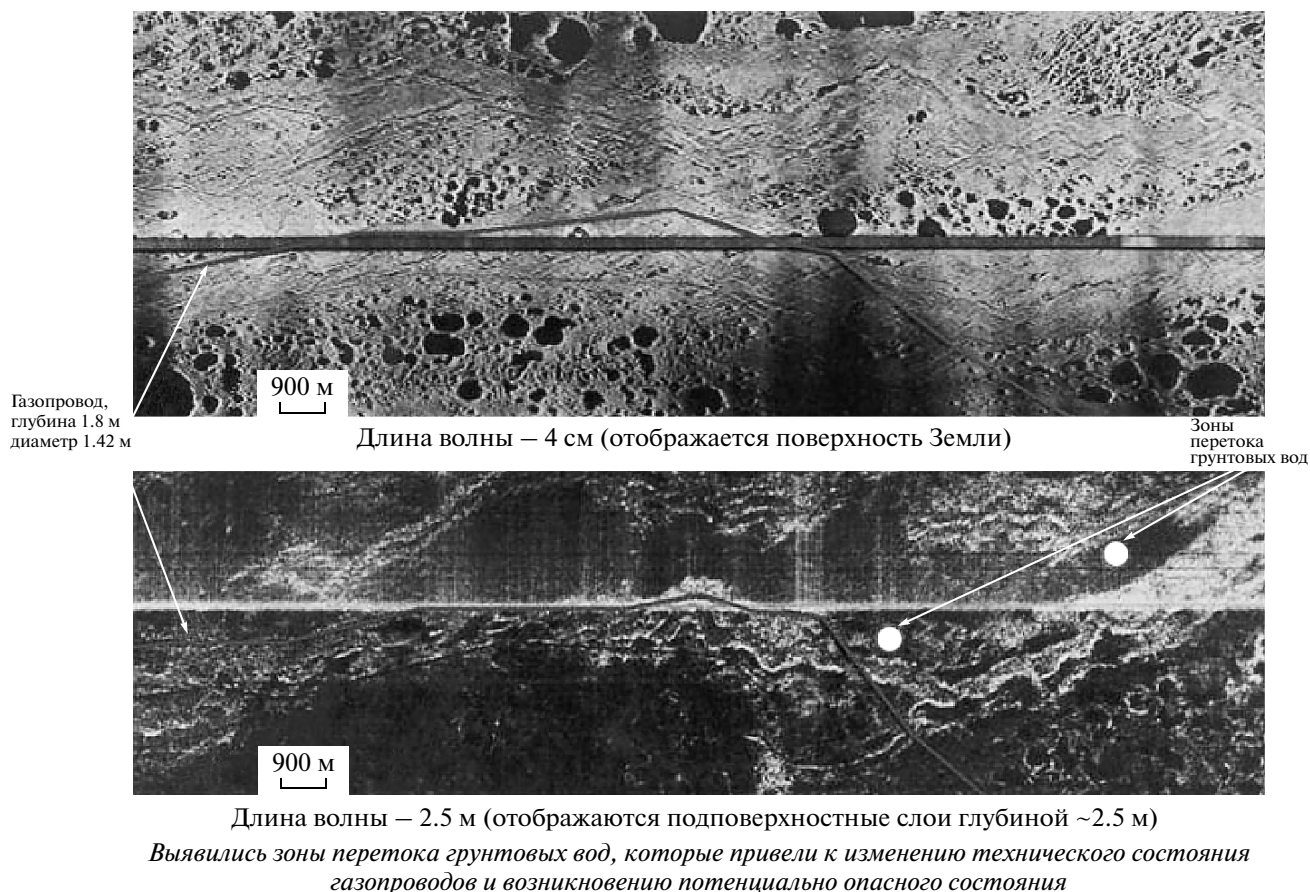


Рис. 7. Многочастотные РЛИ участка газопровода Новый Уренгой–Сургут.

$\lambda_2 = 2.5$  м (рис. 6в, сверху), а также разностное изображение (рис. 6г, сверху). На нижних фрагментах рис. 6б–г приведены результаты классификации и цветокодирования по яркости верхних исходных РЛИ (в см- и м-диапазонах) и разностного с использованием алгоритма кластерного анализа ISODATA. На обработанном разностном РЛИ (см. рис. 6г, внизу) выявлены подпочвенные разливы нефти.

На рис. 7 приведены примеры двухчастотной РЛ-съемки с самолета участков трасс газопроводов Новый Уренгой–Сургут, а на рис. 8 и Уренгой–Сургут–Челябинск. На фрагментах РЛИ, полученных в м-диапазоне ( $\lambda_2 = 2.5$  м), видны сам газопровод и зоны перетока грунтовых вод (рис. 7, 8, внизу). На фрагментах РЛИ, полученных в см-диапазоне ( $\lambda_1 = 4$  см), выявлены всплытие газопровода к поверхности и участки обводнения.

#### *Космический мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности*

Применение космических методов и технологий чрезвычайно эффективно для мониторинга загрязнений нефтью морских акваторий, связанных

с авариями на морском транспорте, нефтяных платформах, подводных нефтепроводах (Бондур, 1987; 1995; 2004; Бондур, Гребенюк, 2001).

На рис. 9, 10 (на цветн. вклейках) приведены примеры космического мониторинга последствий аварии на нефтяной платформе British Petroleum в Мексиканском заливе, произошедшей в апреле 2010 г.

На рис. 9 представлены космические изображения, полученные со спутника Aqua 25 апреля, 9 мая и 12 июля 2010 г., а также со спутника Terra 25 апреля 2010 г., на которых отчетливо проявляются последствия этой аварии в акватории залива.

На рис. 10 приведен пример обработки многоспектрального космического изображения, полученного 31 мая 2010 г. с борта спутника Terra (аппаратура MODIS).

Предварительная обработка, включая распаковку, калибровку и географическую привязку исходного изображения, проводилась в автоматическом режиме. Тематическая обработка проводилась в интерактивном режиме и заключалась в выполнении следующих основных операций: маскирование суши; выделение облачности; выделение области интереса; подбор оптимальных

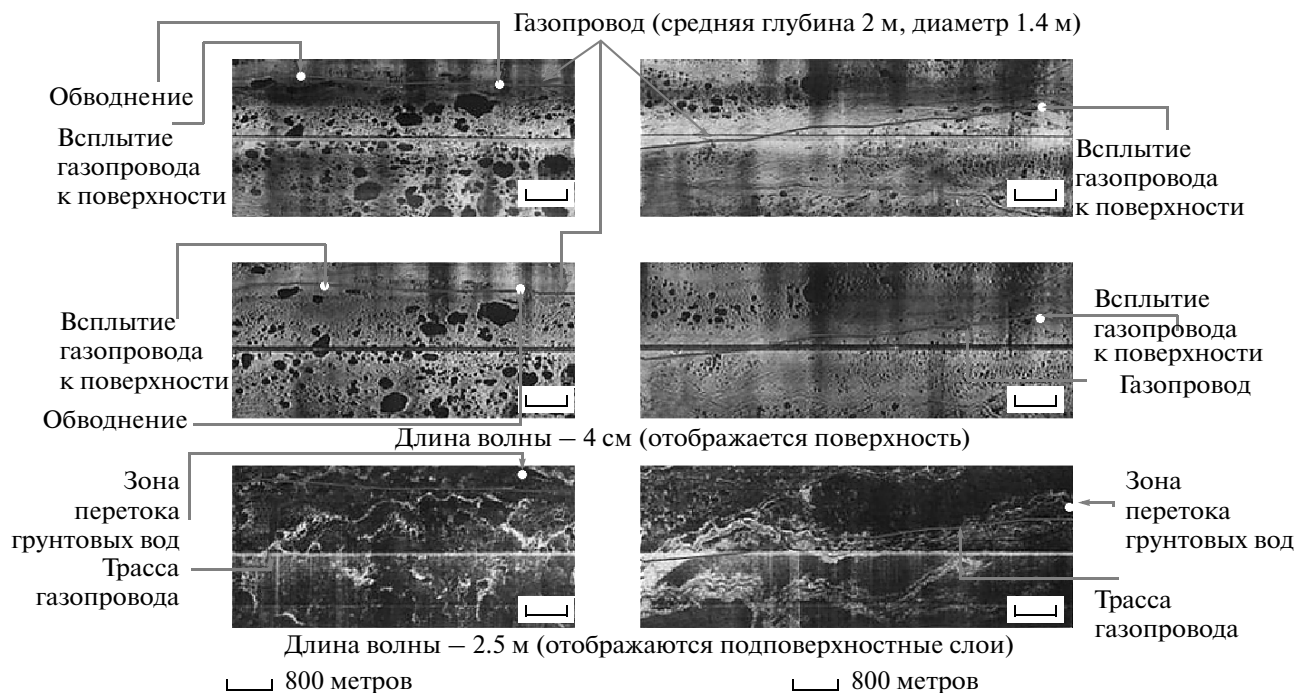


Рис. 8. Многочастотные РЛИ участков трассы газопровода Уренгой–Сургут–Челябинск.

параметров для классификации; классификация области интереса с использованием алгоритма ISODATA; выделение классов, соответствующих двум уровням загрязнения водной поверхности нефтью; векторизации полученных результатов и их интеграции в ГИС.

На рис. 10 приведены исходное космическое изображение, результат классификации методом кластерного анализа и карта с областью распространения нефтяного загрязнения, отображаемая в системе Google Earth.

На рис. 11 (на цветн. вклейках), в качестве примера представлены результаты обработки РЛИ, полученного 28 декабря 2005 г. со спутника Radarsat для района добычи нефти на шельфе Каспийского моря (Нефтяные Камни). На рис. 11а приведены исходное космическое изображение и его увеличенные фрагменты. На рис. 11б (слева) приведены изображения, демонстрирующие последовательность промежуточных этапов обработки, а справа приведен результат классификации по методу максимального правдоподобия.

На правом фрагменте рис. 11б отчетливо выделены области нефтяных загрязнений и искусственные сооружения в море.

#### *Мониторинг ледовой обстановки в арктических нефтегазовых акваториях*

Ниже приведены некоторые примеры космического мониторинга ледовой обстановки в мо-

рях Арктической зоны России. На рис. 12 (на цветн. вклейках) приводится пример анализа ледовой обстановки в Северном Ледовитом океане по РЛИ, полученным со спутника Radarsat-1. В процессе космического мониторинга ледовой обстановки выполнялись следующие основные операции: планирование РЛ-съемок в заданных районах; получение изображений и их предварительная обработка; предварительный анализ изображений, построение временных рядов географически совмещенных фрагментов изображений с выделением областей интереса; расчет полей радиояркостности  $\beta^\circ$  (дБ); формирование информационных продуктов на различные даты.

Сформированные информационные продукты на различные даты используются для анализа ледовой обстановки в исследуемом регионе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы современные тенденции развития ДЗЗ и обоснована актуальность и необходимость применения аэрокосмических методов и технологий для мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса. Проведена классификация основных задач нефтегазовой отрасли, которые могут решаться аэрокосмическими методами.

Предложены принципы организации аэрокосмического мониторинга в интересах нефтегазовой отрасли, описаны этапы получения и обра-

ботки информации, а также пути ее прохождения от источников (различные спутники и воздушные средства, оборудованные различной аппаратурой ДЗЗ) до потребителей с использованием современных геоинформационных технологий.

Проведен анализ физических механизмов, определяющих возможности аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий для оценки их перспективности на наличие углеводородов, а также оценки состояния и контроля влияния объектов нефтегазового комплекса на окружающую среду.

Показано, что возможности такого мониторинга связаны с регистрацией изменений характеристик электромагнитного излучения, гамма-излучения, аномалий гравитационного и магнитного полей, а также с регистрацией структурно-морфологических особенностей поверхности, регистрируемых различной аэрокосмической аппаратурой. Основными информативными параметрами среды, регистрируемыми аэрокосмическими методами при экологическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса на суше и на море, являются: тепловые контрасты в местах появления загрязняющих компонент за счет изменения физической температуры и коэффициентов излучения; контрасты яркости за счет различия коэффициентов спектральных яркостей объекта и фона; изменения спектров флуоресценции, диэлектрической проницаемости; деформаций спектров поверхностного волнения за счет “выглаживания” его высокочастотных компонент при сбросе в морскую среду нефти, нефтепродуктов и газовых компонент; доплеровского смещения частоты РЛ-сигналов из-за появления течений в области воздействия нефтегазовых объектов.

Информативными признаками для поиска и разведки месторождений нефти и газа и оценки углеводородного потенциала дистанционными методами являются структурно-морфологические особенности линеamentной сети и овально-кольцевых образований, специфические изометрические формы рельефа, выраженные слабыми неотектоническими поднятиями, наиболее благоприятные для расположения нефтегазовых ловушек, а также вариации полей спектральной яркости, температуры, гамма-излучения и аномалии магнитного и гравитационного полей в областях положительных морфометрических аномалий рельефа, связанных с нефтегазоносностью.

Эти признаки могут регистрироваться многоспектральной и гиперспектральной аппаратурой ДЗЗ, ИК- и микроволновыми радиометрами, радионтероферометрами, альтиметрами, средствами спутниковых навигационных систем, а также аппаратурой для регистрации магнитного и гра-

витационного полей и пассивными гамма-спектрометрами.

Показано, что перспективы повышения эффективности решения задач мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса связаны с использованием новых методов, технологий и аппаратуры ДЗЗ, разработкой и применением новых методов обработки аэрокосмической информации, применением современных геоинформационных технологий, а также с комплексированием аэрокосмических и наземных данных.

Продемонстрированы возможности аэрокосмических методов и технологий для мониторинга экологического состояния районов нефтедобычи, мониторинга трубопроводов с помощью двухчастотного радиолокатора, выявления нефтяных загрязнений морской поверхности, в том числе при аварии на нефтяной платформе в Мексиканском заливе, контроле ледовой обстановки в нефтегазовом районе Арктики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аэрометоды геологических исследований / Под. ред. В.К. Еремина. Лаборатория аэрометодов МГ СССР. Л.: Недра, 1971. 704 с.
- Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта. М.: МГФ Знание, 2002. 750 с.
- Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера–океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 217–230.
- Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Бондур В.Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии / Новые идеи в океанологии. Т. 1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука, 2004. С. 55–117.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Аэрокосмические методы определения рельефа дна в прибрежных зонах морей и океанов // Исслед. Земли из космоса. 2000. № 6. С. 59–73.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В.Г., Доброзраков А.Д., Курекин А.С., Курекин А.А., Пичугин А.П., Яцевич С.Е.* Рассеяние радиоволн морской поверхностью при бистатической локации // Исслед. Земли из космоса. 2009а. № 6. С. 3–15.

- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // ДАН. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеamentов // Исслед. Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1 С. 47–56.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений верхнего слоя океана // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 142–155.
- Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многоспектральным спутниковым изображениям высокого разрешения. Ч. 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий океана с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009б. 692 с.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
- Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под. ред. В.А. Шевнина, И.Н. Модина. М.: Геомакс, 1999. 512 с.
- Глушков С.Н., Фадеев В.В., Филиппова Е.М. и др.* Проблемы лазерной флуориметрии органических примесей в природных водах // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4.
- Дейдан Т.А., Пацаева С.В., Фадеев В.В. и др.* Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4.
- Конторович А.И., Коржубаев А.Г.* Энергия рождает энергию. Энергетика и устойчивое развитие мирового сообщества // Эко. 2002. № 8.
- Лаверов Н.П.* Топливо-энергетические ресурсы: состояние и рациональное использование // Тр. научной сессии РАН. М.: Наука, 2006. С. 21–29.
- Лопатин Д.В.* Использование орбитальной информации для изучения тектонического строения Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 93–100.
- Лялько В.И., Федоровский О.Д., Попов М.О. и др.* Многоспектральные методы дистанционного зондирования Земли в задачах природопользования. Киев: Наукова думка, 2006. 357 с.
- Мазур И.И., Лобов А.Г.* Нефть и газ. Мировая история. М.: Изд. дом. Земля и человек. XXI век, 2004. 891 с.
- Мазур И.И., Иванцов О.М.* Безопасность трубопроводных систем. М.: ЕЛИМ, 2004. 2098 с.
- Межерис А.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 552 с.
- Миловский Г.А., Бугарь В.Д., Деревянко И.В.* Крупномасштабное прогнозирование оруденения и нефтегазоносности на Приполярном Урале // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 1. С. 67–71.
- Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- Трифонов В.Г.* 30 лет геологических исследований с помощью космических средств. Тенденции, достижения, перспективы // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 27–39.
- Харитонов А.Л., Хассан Г.С. Серкерев С.А.* Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 81–87.
- Хренов Н.Н.* Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. М.: Газойл пресс, 2003. 352 с.
- Щепин М.В., Евдокимов С.В., Головченко Ю.В.* Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимком // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 4. С. 74–87.
- Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E., Rosenberg A.D.* Very High Frequency Radiowave Scattering by Disturbed Sea Surface // IEEE Trans. Ant. Prop. 1968. AP-16. № 5. P. 554–568.
- Elachi C., Brown W.E.* Models of radar imaging of the ocean surface waves // IEEE Trans. Ant. Prop. 1977. AP-25. № 1. P. 84–95.
- Lutomiński R.F.* Lidar remote sensing of ocean waters // Soc. Photo-Optical Instrum. Eng. 1994. V. 2222. P. 12–19.
- Volker M.A., Resmini R.G., Mooradian G.C., McCard T.B., Warren C.P., Fene M.M.* Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System (AAHIS): an imaging spectrometer for maritime application. SETS Technology, Inc. Mililani, Hawaii / Eds. C.C. Coyle, R.D. Anderson. Science Applications International Corporation. San Diego, California. USA, 1996.
- Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Gomp. Geosci. 1997. V. 23. № 1.

## **Aerospace Methods and Technologies for Monitoring of Oil and Gas Areas and Facilities**

**V. G. Bondur**

*AEROCOSMOS Scientific Center for Aerospace Monitoring, Moscow*

This paper substantiates urgency and analyze features of advanced aerospace method and technology applications for monitoring of various oil and gas facilities to study subsurface geology of oil and gas areas, search for oil and gas deposits (including in Arctic regions), control oil, gas, and product pipelines, as well as to assess environmental situation of hydrocarbon production and transportation areas on land and in the sea. The tasks of oil and gas industry which can be solved, using aerospace data are systematized in this paper. The organization principles of aerospace monitoring and physics underlying remote sensing methods to solve various tasks of oil and gas industry are addressed here. The examples are given of using aerospace methods and technologies for the monitoring of environmental conditions of oil and gas production areas, pipeline monitoring, detection of marine environment pollution with oil products, including after the accident in the Gulf of Mexico in 2010, as well as ice conditions control in Arctic oil and gas areas.

**Key words:** aerospace monitoring, remote sensing, oil and gas areas, oil and gas facilities, environment protection



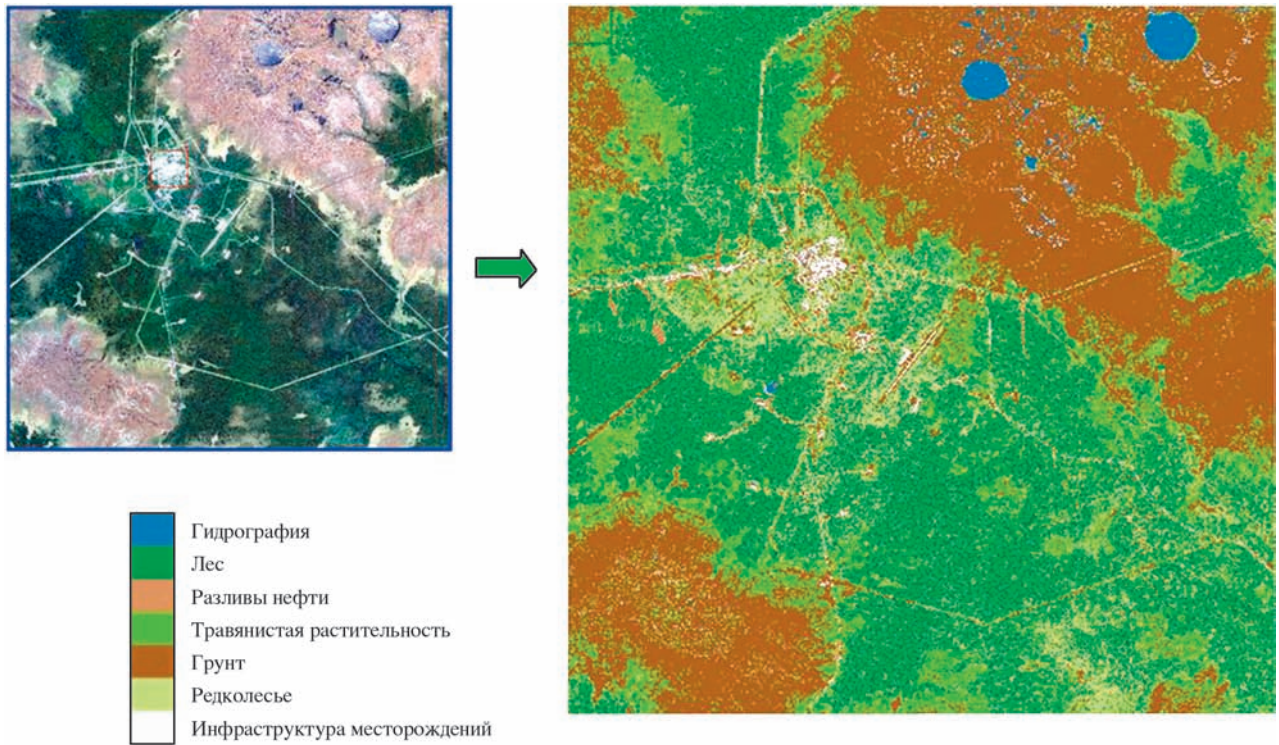


Рис. 4. Выявление ландшафтных особенностей по результатам классификации методом максимального правдоподобия.

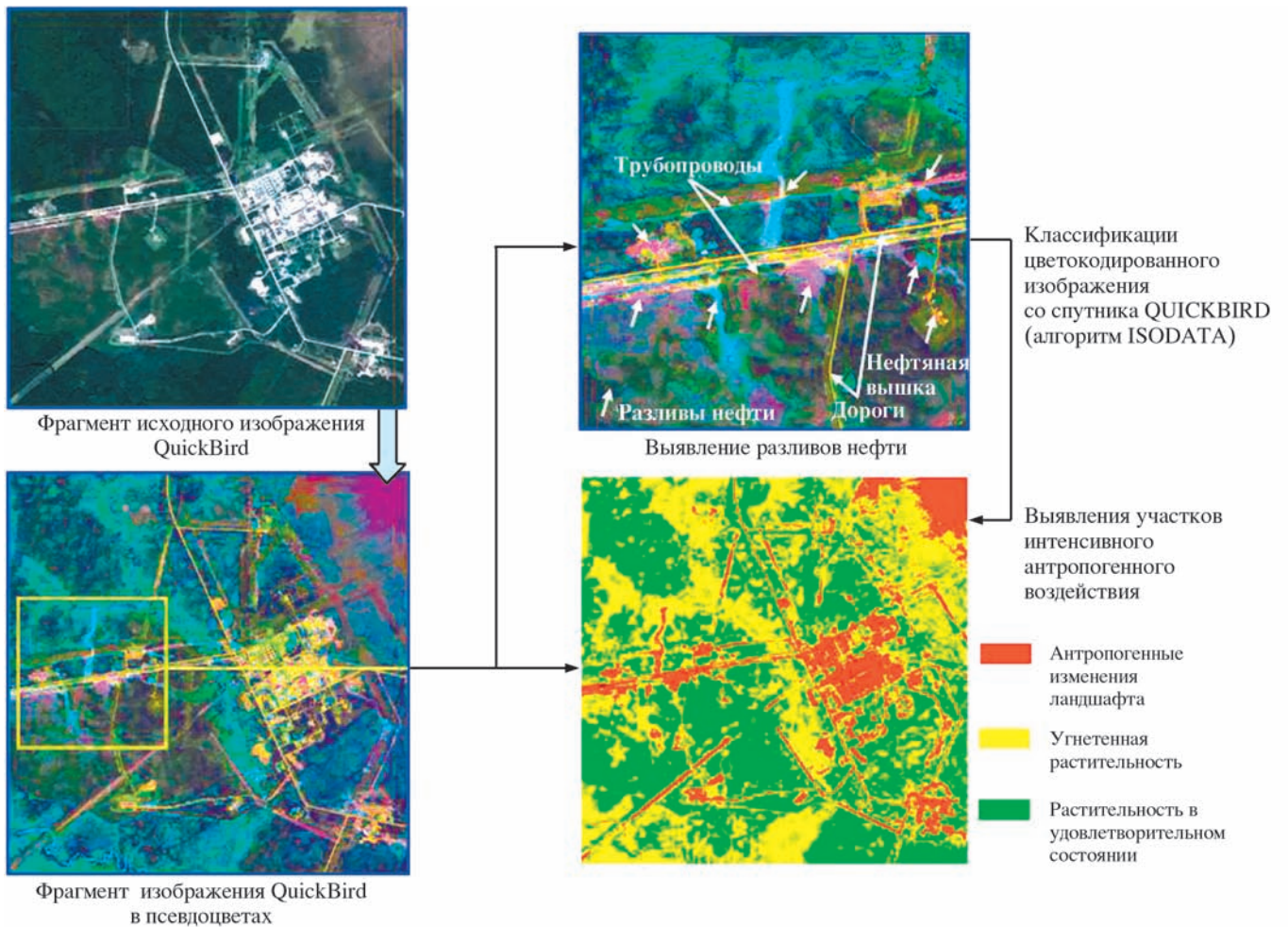


Рис. 5. Выявление участков, подвергающихся интенсивному антропогенному воздействию.



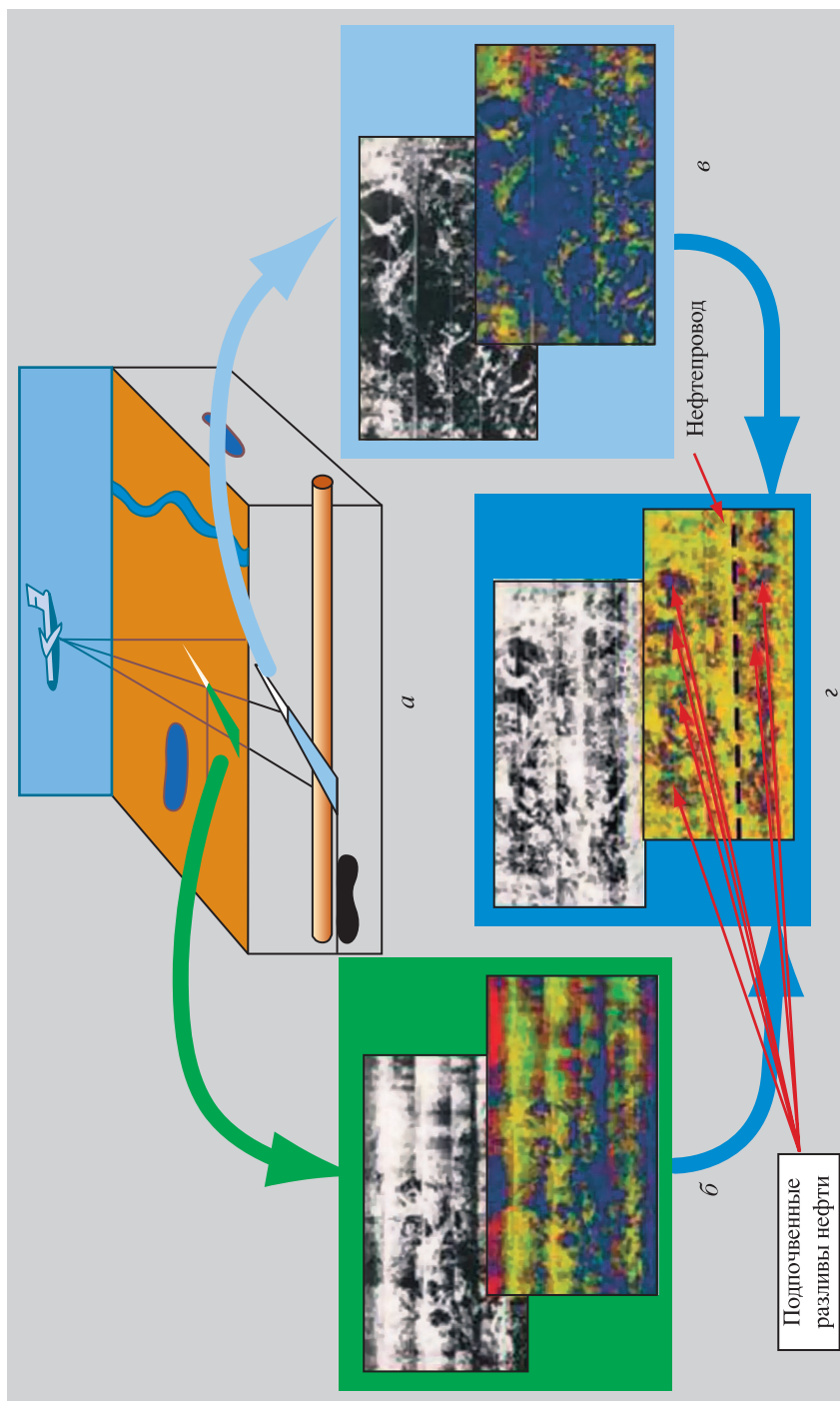
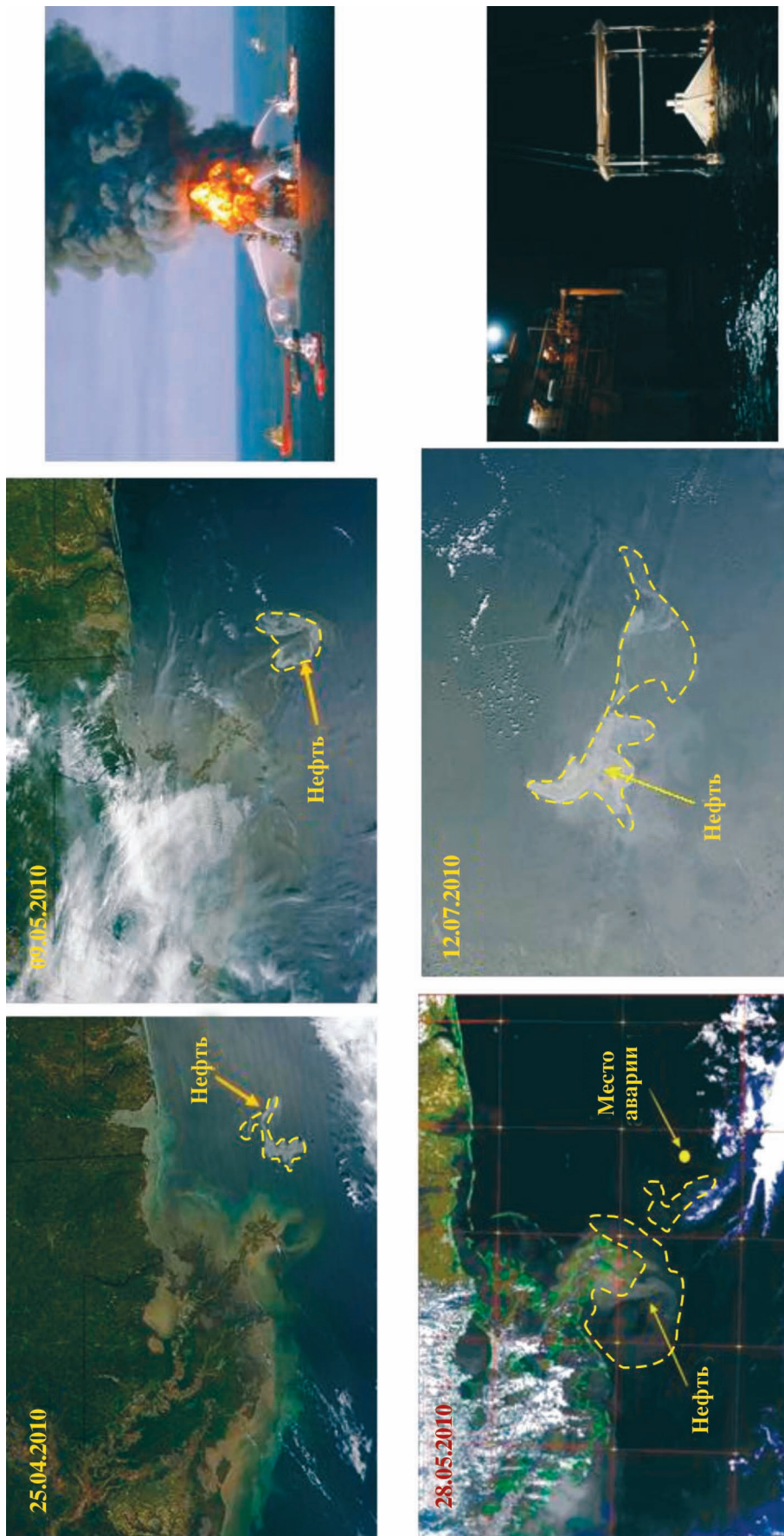
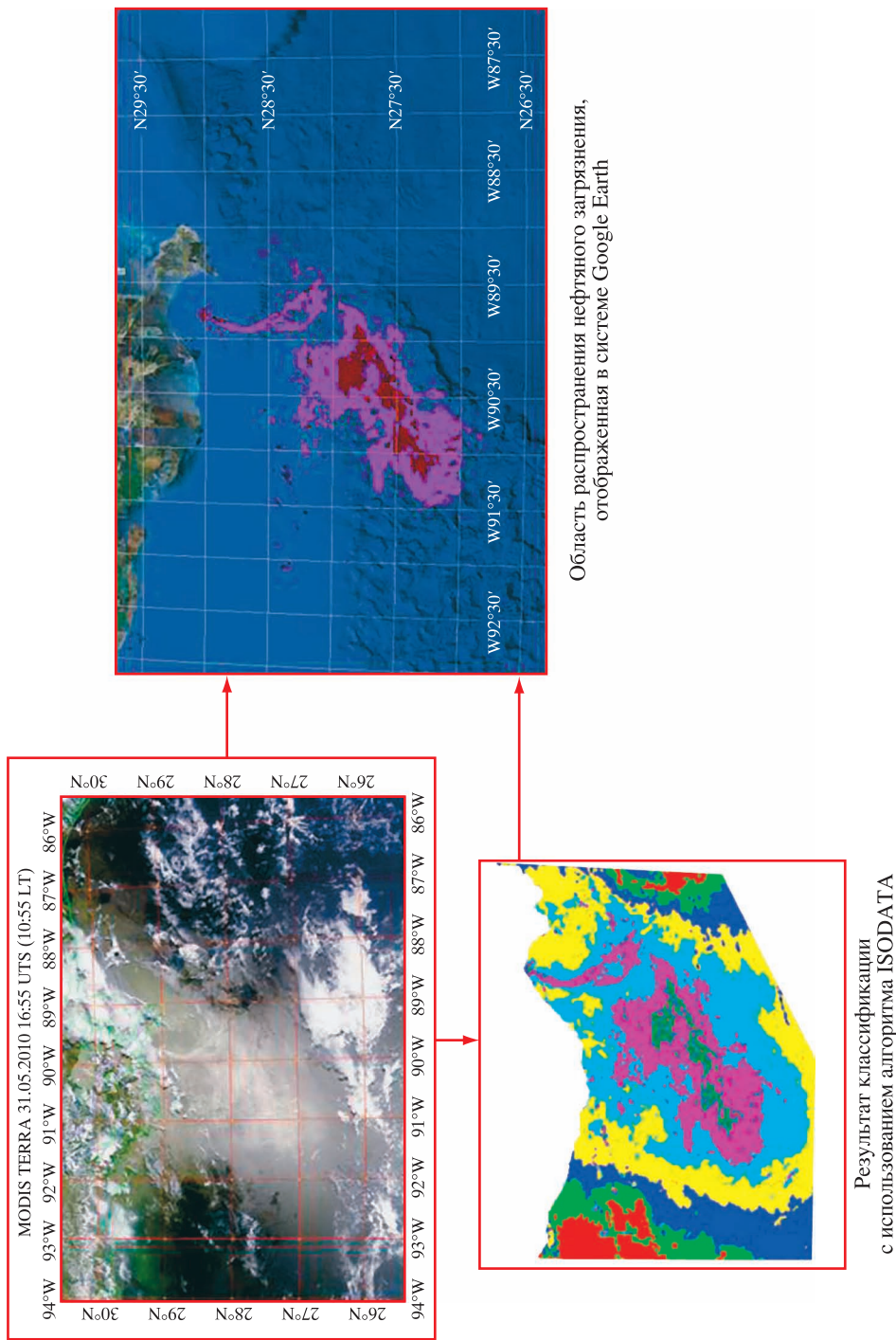


Рис. 6. Многочастотная РЛ-съёмка для контроля состояния трубопроводов.

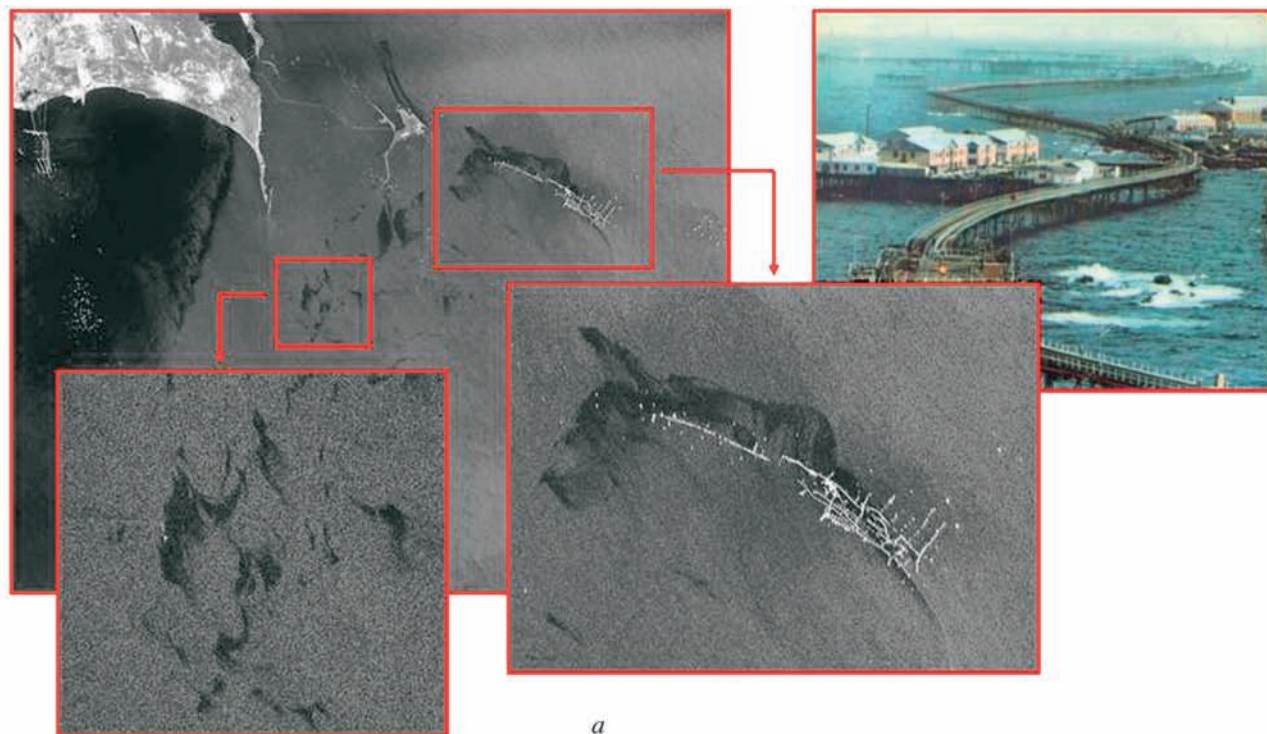


**Рис. 9.** Космический мониторинг последствий аварии на нефтяной платформе в Мексиканском заливе (апрель – июль 2010 г.).

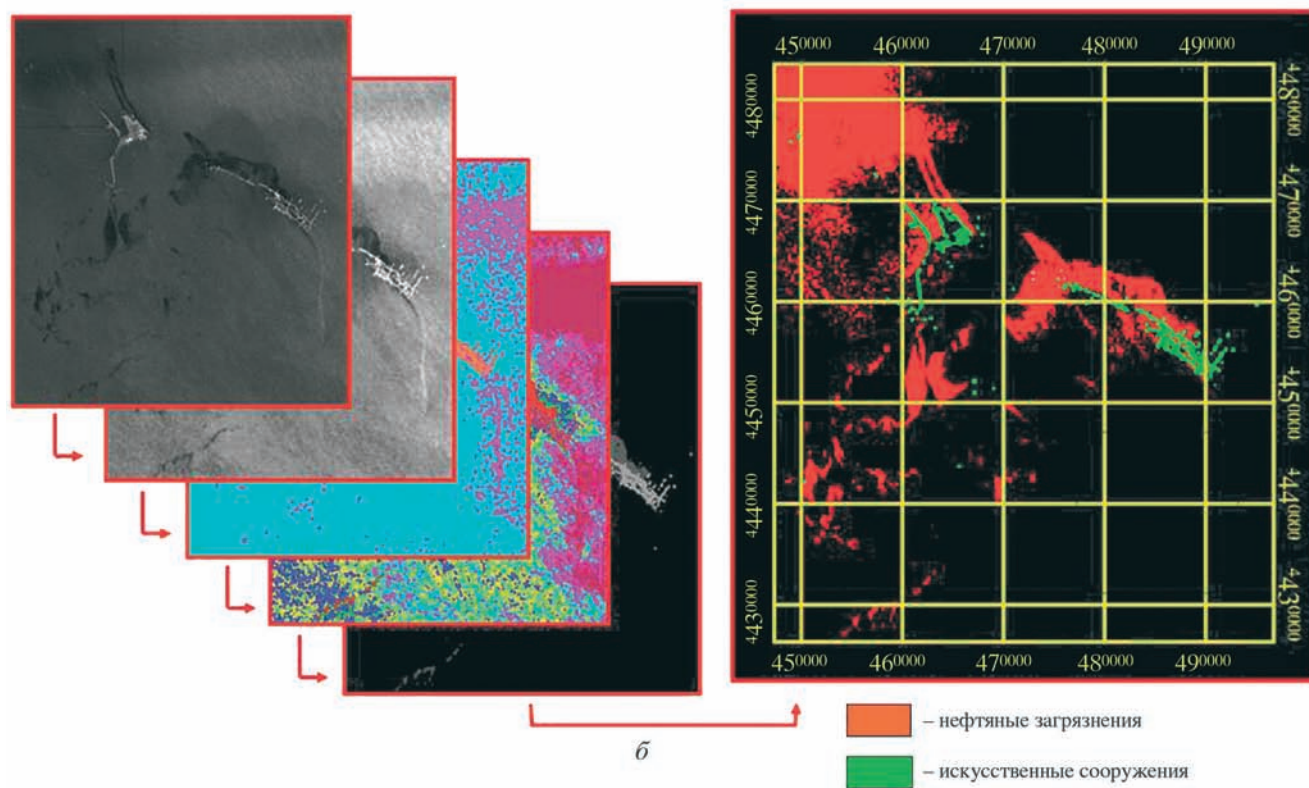


**Рис. 10.** Формирование карты распространения нефтяных загрязнений в Мексиканском заливе по результатам обработки изображения, полученного 31.05.2010 г. со спутника Тетра.

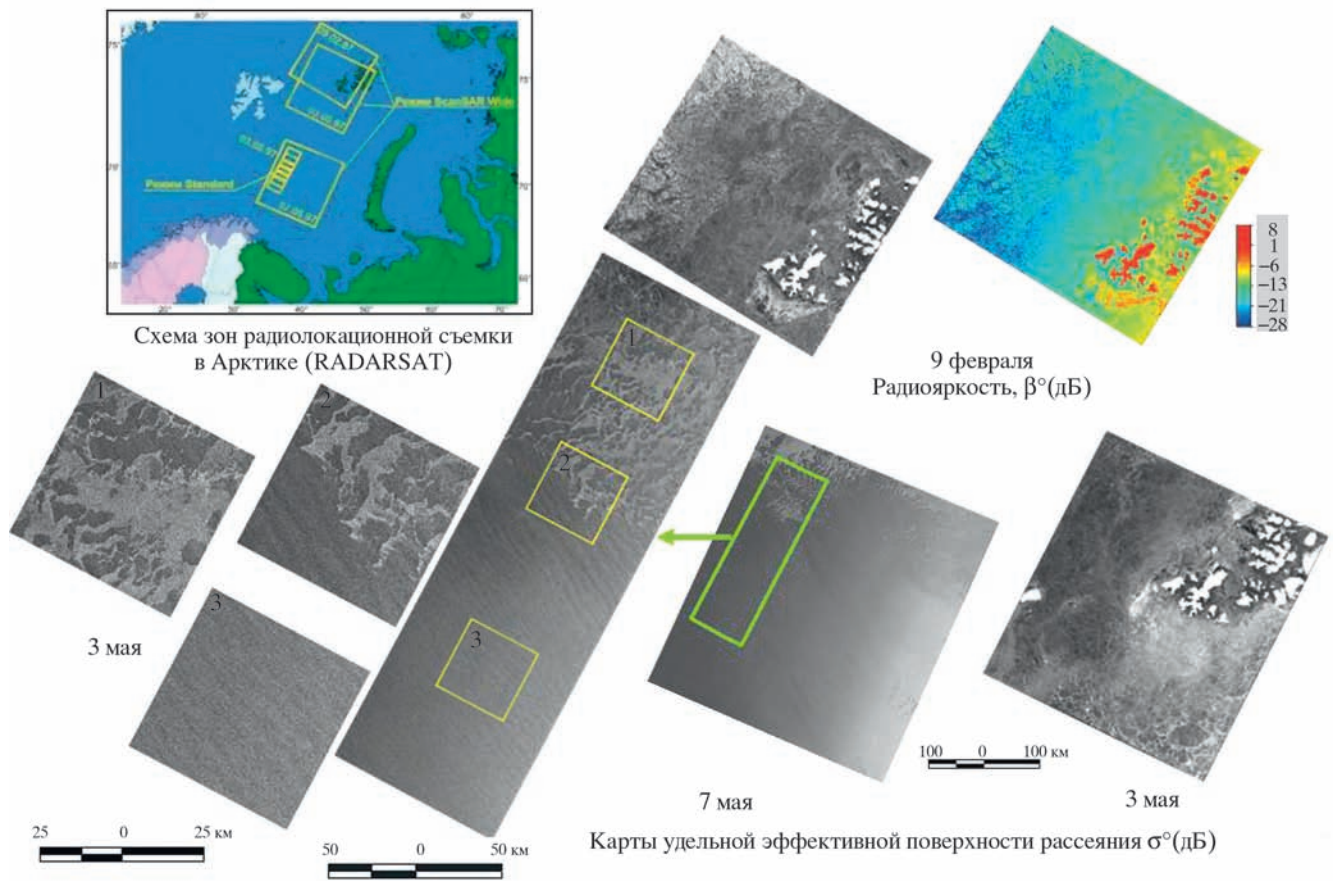




*a*



**Рис. 11.** Космический РЛ-мониторинг нефтяных загрязнений в Каспийском море (Нефтяные Камни): *а* – изображение, полученное спутником Radarsat-1 (28 декабря 2005 г., 14:30 UTC), и его увеличенные фрагменты; *б* – пример тематической обработки космического РЛИ для выявления нефтяных загрязнений в Каспийском море (Нефтяные Камни).



**Рис. 12.** Мониторинг ледовой обстановки в Арктическом нефтегазоносном регионе по РЛИ.