

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА «АЭРОКОСМОС»

# **АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА**

**под редакцией академика В.Г. БОНДУРА**

Москва  
«Научный мир»  
2012

УДК 504.05/064/55/553.98  
ББК 26.0



А 99

*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 11-05-07084-д*

Рецензенты:

академик Н.С. Касимов,  
член-корреспондент РАН В.П. Савиных

**А 99 Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. Под редакцией академика В. Г. Бондура — М.: Научный мир, 2012. 558 с.: ил. + 52 с. цв. ил. ISBN 978-5-91522-316-4**

В данной книге проведены анализ и систематизация современных методов и технологий аэрокосмического мониторинга для исследования геологического строения нефтегазоносных территорий, поиска, разведки и освоения месторождений нефти и газа, оценки воздействий нефтегазового комплекса на окружающую среду, а также методов обработки аэрокосмических данных, новых типов аппаратуры и систем дистанционного зондирования, используемых для такого мониторинга. Подробно изложены задачи, решаемые с использованием методов и технических средств дистанционного зондирования при мониторинге нефтегазоносных территорий, а также объектов нефтегазового комплекса.

Рассмотрены научные проблемы, связанные с разработкой новых и развитием существующих аэрокосмических методов, аппаратуры и систем дистанционного зондирования для решения задач нефтегазового комплекса. Большое внимание уделяется решению проблем обработки больших потоков аэрокосмической информации, получаемой при мониторинге объектов нефтегазового комплекса, создании цифровых карт, трехмерных моделей местности, ГИС различной тематической направленности для нефтегазовой отрасли. Приведены примеры применения аэрокосмических данных для: изучения геологического строения различных нефтегазоносных регионов; поиска и разведки месторождений углеводородного сырья на суше и в морских акваториях; экологического мониторинга при разработке месторождений, а также при транспортировке нефти, газа и нефтепродуктов.

Материалы книги написаны ведущими учеными России и других стран, специализирующимися в областях дистанционного зондирования Земли, геологии нефти и газа, геоэкологии, геоинформатики и др. Книга будет полезна специалистам в области аэрокосмического мониторинга, поиска и разведки месторождений нефти и газа, геологии, экологии, а также преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов. Она представит особый интерес для разработчиков и пользователей информационных технологий в сфере аэрокосмического мониторинга нефтегазового комплекса.

In this book, state-of-the-art aerospace monitoring methods and technologies for studying geological structures of oil and gas areas, search, exploration, and development of oil and gas fields, assessing the impact of oil and gas industry on the environment, as well as aerospace data processing methods, new types of equipment and remote sensing systems used for such monitoring are analyzed and systemized. Tasks solved using remote sensing methods and hardware for oil and gas area monitoring are given in details.

Scientific problems related with developing new aerospace methods and improving the existing ones, remote sensing instruments and systems for solving oil and gas facility tasks are considered. Considerable attention is paid to the problem of processing large flows of aerospace data obtained during monitoring of oil and gas facilities; creation of digital maps and 3D terrain models, various thematic GIS for oil and gas industry. There are described exemplary applications of aerospace data for studying geological structures of various oil and gas areas; search and exploration of crude hydrocarbons on land and in marine water areas; environmental monitoring during oil and gas field development, as well as during oil, gas, and oil product transportation.

The materials of the book have been written by prominent scientists from Russia and other countries, specializing in the fields of the Earth remote sensing, oil and gas geology, environmental geology, geoinformatics, etc. The book will be useful for specialists in the areas of aerospace monitoring, prospecting and exploration of oil and gas fields, geology, ecology, as well as for teachers, post-graduates, and senior students. The book will be of special interest to developers and users of information technologies in the field of aerospace monitoring of oil and gas industry.

УДК 504.05/064/55/553.98  
ББК 26.0

ISBN 978-5-91522-316-4

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Научно-исследовательский институт аэрокосмического  
мониторинга «АЭРОКОСМОС», 2012  
© Научный мир, 2012

## Глава 1

# ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА. РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

*В. Г. Бондур*

### 1.1. Аэрокосмический мониторинг нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Реальности и перспективы

#### Введение

Для рационального использования углеводородных природных ресурсов, изучения геологического строения нефтегазоносных территорий, повышения эффективности разведки и поиска нефти и газа, обеспечения безопасности деятельности предприятий добычи, переработки, хранения, транспортировки и раздачи нефти, нефтепродуктов и газа, а также для снижения их негативных воздействий на окружающую среду необходимо использовать последние достижения науки и соответствующее информационное обеспечение. Одним из наиболее эффективных способов решения данной проблемы является широкое применение современных аэрокосмических методов, технологий и средств дистанционного зондирования, новых методов обработки аэрокосмической информации и геоинформационных технологий.

В настоящем разделе книги 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, переработки, хранения 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 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 Deepwater Horizon

компании British Petroleum в Мексиканском заливе, а также для контроля ледовой обстановки в нефтегазоносных районах Арктики.

## **Общая характеристика аэрокосмических методов и технологий**

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из важнейших и бурно развивающихся видов космической деятельности, который наиболее восприимчив к инновациям. Он обеспечивает быстрое получение практически значимых результатов, которые уже сейчас вносят большой вклад в экономику развитых стран мира. Этот сектор космической деятельности основан на использовании высоких наукоемких технологий и последних достижений фундаментальной и прикладной науки (Бондур, 2010). Космическая информация применяется во многих областях, прежде всего, для предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, исследования и рационального использования природных ресурсов, охраны окружающей среды, энергетики, градостроительства, транспортного комплекса, метеорологии и климатологии, лесного и сельского хозяйства, картографии, создания геоинформационных систем и др. (Бондур и др., 2009а). Естественно, что эта информация должна широко использоваться и в интересах нефтегазовой отрасли.

Основные мировые тенденции развития космических систем ДЗЗ связаны с увеличением числа спутников высокого и сверхвысокого разрешения (меньше 0,4 ... 1 м), в том числе всепогодных радиолокационных космических аппаратов, отказом от дорогостоящих спутников – «комбайнов» и увеличением качества малых спутников, все более широким использованием кластеров однотипных спутников (например, 6 оптических спутников RapidEye, 4 радиолокационных спутника Cosmo-SkyMed с разрешением 1 м и др.), созданием комплексных многоспутниковых систем космического мониторинга (например, международная система ГСНЗ (Глобальная система наблюдения Земли), Европейская система GMES, проект международной системы МАКСМ и др.), отказом от неоперативных фотографических космических средств, а также широким международным сотрудничеством в области ДЗЗ. В связи с этим эффективность использования космических методов и технологий в различных направлениях 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 и получения 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, 2010; Бондур и др., 2009а). Эти особенности делают космические методы, технологии и системы мониторинга чрезвычайно перспективными для решения задач нефтегазового комплекса России.

Воздушные 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 (Бондур, 2010; Трифонов, 2010; Безопасность ..., 2002):

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

Для аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса уже в настоящее время используются различные методы дистанционного зондирования, в том числе: методы, основанные на регистрации характеристик электромагнитного поля (прежде всего, многоспектральные сканерные оптико-электронные и гиперспектральные методы, тепловизионные методы, методы ИК- и СВЧ-радиометрии, активные лидарные и радиолокационные методы и др.); магнитометрические методы; гравиметрические методы; пассивная гамма-спектрометрия (Бондур, 1995, 2004, 2010; Бондур, Зубков, 2001; Савин, Бондур, 2000; Хренов, 2003; Аэрометоды, 1971; Харитонов и др., 2004; Геоэкологическое..., 1999; Advanced..., 1996).

Перспективы повышения эффективности аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса связаны с широким использованием новых методов дистанционного зондирования, таких, например, как: дистанционная пространственно-частотная спектрометрия; многочастотные радиотомография и СВЧ-радиометрия; многочастотная радиоволнография; радиоинтерферометрия; бистатическая радиолокация; Фурье-спектрометрия; лазерное флуоревидение; 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 (Бондур, 2010). Эти перспективы в значительной мере связаны также с развитием методов и технологий обработки и хранения разнородной аэрокосмической информации, получаемой в процессе мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса, а также с применением современного геоинформационного обеспечения (Бондур, 2004, 2010; Бондур и др., 2009а; Бондур, Воробьев, 2012; Савин, Бондур, 2000; Трифонов, 2010; Лопатин, 1996; Харитонов и др., 2004).

### **Систематизация задач нефтегазовой отрасли, решаемых 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 углеводородов на суше и на море;
- нефтеперерабатывающие комплексы;
- хранилища углеводородного сырья и нефтепродуктов;
- нефте-, газо- и продуктопроводы;
- 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 (Бондур, 2010):

- проведение фундаментальных научных исследований процессов образования и миграции углеводородов с использованием аэрокосмической информации;
- исследование геологического строения нефтегазоносных территорий, в том числе изучение линеamentной сети и глубинной тектоники, кольцевых структур, проведение тектонического районирования этих территорий на основе космических данных 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 изменения 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, переработки и раздачи углеводородов на суше и на море для оценки последствий и снижения рисков от деятельности предприятий нефтегазовой отрасли, в том числе: выявление загрязнений нефтепродуктами участков грунта, растительности и снежного покрова в пределах буровых скважин, нефтехранилищ и станций перекачки нефти; морских платформ, мест загрузки, разгрузки и движения судов для перевозки нефти, нефтепродуктов и сжиженного газа; 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, геоинформационных систем (ГИС) различной тематической направленности для нефтегазоносных районов и др. 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 этих предприятий и ликвидации аварий на них с использованием аэрокосмических данных и др.

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

### **Принципы организации и проведения аэрокосмического мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса**

При организации и проведении 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 использоваться различные космические аппараты (КА), воздушные средства (самолеты, вертолеты, дельтапланы, беспилотные летательные аппараты, дирижабли и др.), оснащенные различными типами пассивной и активной аппаратуры дистанционного зондирования, функционирующей в различных диапазонах спектра электромагнитных волн (от ультрафиолетового до радио), 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. 1.1.1 приведена структурная схема проведения аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса и формирования информационных продуктов в процессе такого мониторинга.

Для мониторинга объектов нефтегазового комплекса могут использоваться:



**Рис. 1.1.1.** Структурная схема проведения аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса и формирования информационных продуктов в его процессе

- спутники, оборудованные оптической аппаратурой ультрафиолетового, видимого и ИК-диапазонов спектра сверхвысокого, высокого и среднего разрешения (0,4–30,0 м), многоспектральной аппаратурой среднего (5,0–90,0 м) и низкого разрешения (обзорные) (0,1–1,0 км), а также гиперспектральной аппаратурой;
- радиолокационные спутники, оборудованные радиолокаторами с синтезированием апертуры (РСА) высокого (1,0–8,0 м), среднего (12,5–25,0 м) и низкого (100–600 м) разрешения;
- спутники для магнитной и гравитационной съемок;
- метеорологические спутники;
- спутниковые навигационные системы;
- пилотируемые космические станции;
- воздушные средства (самолеты, вертолеты, дельтапланы, беспилотные летательные аппараты и дирижабли), оборудованные цифровыми оптическими камерами, сканирующими оптико-электронными комплексами, гиперспектрометрами, тепловизорами, ИК-радиометрами, лидарами, радиолокаторами с синтезированием апертуры, микроволновыми радиометрами, аппаратурой гамма-съемки и другими приборами;
- средства связи и передачи данных;
- наземные ситуационные и информационно-аналитические центры;
- программные и технические средства обработки информации, формирования баз данных, представления пространственно-организованных данных для решения широкого спектра задач нефтегазовой отрасли.





Рис. 1.1.2. Организация приема, обработки и хранения данных при космическом мониторинге

В процессе проведения аэрокосмического мониторинга объектов нефтегазового комплекса формируется исходная информация (аэрокосмические изображения, другие данные дистанционного зондирования, геофизическая информация). При использовании воздушных средств мониторинга оперативная обработка информации может производиться в отдельных случаях на борту авиационных средств, и ее результаты могут передаваться потребителям в режиме «online» или поступать на наземные средства обработки (см. рис. 1.1.1).

Схема организации приема, обработки и хранения данных при космическом мониторинге приведена на рис. 1.1.2. Информация с различных спутников может оперативно приниматься на антенные комплексы наземных центров приема, а также поступать через FTP-серверы или вводиться с магнитных носителей.

Аэрокосмическая и сопутствующая информация, полученная при проведении мониторинга, подвергается предварительной и детальной тематической обработке. С использованием результатов обработки создаются промежуточные информационные продукты, тематические карты и ГИС различной тематической направленности, на

основе которых формируются рекомендации для принятия управленческих решений (Бондур, 2010; Бондур, Воробьев, 2012). Данные, получаемые на любом этапе формирования информационных продуктов, могут передаваться в главные или региональные ситуационные или информационно-аналитические центры потребителей (см. рис. 1.1.1).

### **Физические основы поиска и разведки углеводородов с использованием аэрокосмической информации**

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; Бондур, 2010). Это может быть зафиксировано на многоспектральных и гиперспектральных космических изображениях.

Физические механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на таких изображениях, обусловлены тектоническим, ротационным и флюидогеодинамическим механизмами (Бондур, Зверев, 2007). При этом миграция углеводородных флюидов и тепломассоперенос 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, 2010; Бондур, Зверев, 2007; Бондур и др., 2009а; Трифонов, 2010).

На космических изображениях путем структурно-морфологического анализа выделяются геологические особенности, проявляющиеся в виде систем прямых и дугообразных линеаментов, а также овально-кольцевых образований. Структурно-морфологические характеристики 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 (Трифонов, 2010). 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; Бондур и др., 2012).

Для автоматического выделения линеаментов и овально-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, в принципе, можно исследовать и по радиолокационным космическим изображениям.

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 радиолокационных космических 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. (Бондур, 2010).

Углеводородные залежи в ловушках, проявляющиеся в структурном поднятии, приводят к повышению температуры земной поверхности. Это вызывается деятельностью микроорганизмов внутри залежи, 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 дистанционного зондирования в ИК- и микроволновом диапазонах спектра электромагнитных волн.

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; Бондур, 2010).

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 и др., 2006). Аэрокосмические методы определения рельефа дна по эффектам на поверхности и в приповерхностном слое моря, описанные в работах (Бондур, Гребенюк, 2000; Бондур, 2004), могут использоваться для исследования глубинных разломов, зон разуплотнения, а также локальных структур. Такие структуры могут быть выявлены с использованием специальных методов обработки оптических и радиолокационных изображений морской поверхности (в том числе методом дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, многочастотной радиоволнографии и др., описанных, например, в работах (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 и др., 2006).

Возможности поиска месторождений углеводородов в морских акваториях аэрокосмическими методами связаны также с регистрацией естественных нефте- и газопроявлений на водной поверхности. Такие проявления (сипы) обусловлены

просачиванием по разломам и трещинам миграционных потоков углеводородов из нефтегазоносных стректур и газогидратных скоплений морского дна (Дегазация..., 2010; Дмитриевский, Баланюк, 2009; MacDonald, 1998; Etiope, 2009). Просачивание является конечным пунктом миграции нефти и газа. Поэтому их обнаружение на водной поверхности аэрокосмическими методами является свидетельством наличия углеводородов.

На рис. 1.1.3 (см. цветную вклейку) в качестве примера приведено изображение естественных нефтепроявлений в Персидском Заливе.

На рис. 1.1.4 (см. цветную вклейку) иллюстрируются газопроявления на морской поверхности.

Выходы нефти и газа на поверхность моря разделяются на 3 вида (Дегазация ..., 2010):

- площадные поступления углеводородов и их фракций из нефтегазоносных структур морского дна через сеть разломов;
- продолжительная разгрузка газа из газогидроносных осадков;
- локальные выходы, обусловленные грязевыми вулканами, сипами, грифонами, сальзами и др.

При решении задач дистанционного поиска нефти по нефтепроявлениям на поверхности моря необходимо отделить эти проявления от антропогенных нефтяных загрязнений водной поверхности (аварии на морских судах, нефтяных платформах, подводных нефтепроводах и др.) (Бондур, 2004, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Иванов, 2007; Лаврова и др., 2011; Лаврова, Митягина, 2011). Для этого необходимо знать отличительные признаки естественных нефтепроявлений. Основными из них являются толщина нефтяной пленки, цвет, форма и топология поверхностных проявлений, время их существования, привязка к районам нефтегазонаполнения, периодичность проявлений (MacDonald, 1998; Scantland, Biegert, 1996; Иванов, 2007; Лаврова, Митягина, 2011).

Основными признаками газопроявлений на морской поверхности являются скопление газовых пузырей, проталины на поверхности льда (зимой), крупные вздутия морских льдов (Огай и др., 2007; Etiope, 2009).

Детальный анализ таких отличительных признаков дан в Главе 4 настоящей книги.

Дистанционное выявление нефтегазопроявлений на морской поверхности может осуществляться путем регистрации следующих физических полей (Бондур, 1987, 2004, 2010; Bondur, 2011):

- аномалий пространственной структуры морской поверхности, приводящих к деформациям спектров морского волнения;
- спектральной яркости и температуры поверхности моря;
- спектров флуоресценции;
- удельной эффективной поверхности рассеяния радиоволн;
- поляризации;
- диэлектрической проницаемости и др.

Изменения этих физических полей в области нефтегазопроявлений на морской поверхности могут быть зарегистрированы различными аэрокосмическими методами (Бондур, 1995, 2004, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Замшин, 2012; Bondur, 2006, 2011; Keeler et al, 2005): оптическими многоспектральными, гиперспектральными, тепловыми, лидарными, радиолокационными, СВЧ-радиометрическими, а также методами дистанционной пространственно-частотной спектрометрии.

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. Нефтегазоносность 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 и др. (Харитонов и др., 2004; Бондур, 2010).

### **Физические основы аэрокосмического мониторинга воздействия объектов нефтегазового комплекса на окружающую среду**

При решении многочисленных задач нефтегазового комплекса осуществляется дистанционное зондирование различных объектов, расположенных на суше и на море. В случае аварий на этих объектах происходят утечки нефтяных и газовых компонентов, которые приводят к загрязнению окружающей среды. При этом аэрокосмическими средствами мониторинга регистрируются различные изменения на поверхности и под поверхностью земли и воды, которые происходят в результате деятельности объектов нефтегазовой отрасли.

**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, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Зубков, 2001; Межерис, 1987; Глушков и др., 1994; Дейдан и др., 1994; Хренов, 2003):

- появлении 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;
- возникновении тепловых контрастов в местах аварий трубопроводов и появления загрязняющих компонент на поверхности по отношению к окружающему фону, регистрируемых инфракрасной и радиотепловой аппаратурой;
- эффекте «сужения» спектра радиолокационных сигналов, отраженных от мест загрязнения земной поверхности, по сравнению с окружающим фоном или

- эффекте изменения корреляционных характеристик сигналов в областях фона и загрязненных участков, регистрируемого радиолокационными средствами;
- эффекте изменения диэлектрической проницаемости почвы в местах «прорыва» нефте-, газо-, 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.

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 радиолокационной аппаратуры (Бондур, 2010; Бондур, Чимитдоржиев, 2008).

Одним из важных параметров, определяющим 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 (Бондур, 2010).

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. Один из методов выявления дефектов магистральных нефтепроводов основан на том обстоятельстве, что 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, измерение температуры грунта над трубопроводом позволяет выявить утечки и локализовать дефекты в нефтепроводах (Бондур, 2010; Геоэкологическое обследование ..., 1999).

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 приёмника радиолокационной станции (РЛС), что и позволяет обнаружить такое загрязнение (Бондур, 2010).

При прорыве подземного газопровода образуется локальное газовое пятно, которое 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 (Бондур, 2010).

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; Бондур, 2004, 2010; Абрамов и др., 2012; 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; Бондур, 2010):

- спектральное распределение интенсивности флуоресценции:  $S_i^{omni} = S_i/S_{max} = f(\lambda_i)$ , т.е. форма спектра или положение максимума;
- эффективность флуоресценции  $\psi_i = \varphi_i k_0$  на длине волны  $\lambda_i$ , где  $\varphi_i$  – функция, описывающая спектральную форму линии флуоресценции,  $k_0$  – коэффициент ослабления;
- 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; Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2001).

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 (Бондур, 2010; Бондур, Зубков, 2001).

**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 компонентов (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, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2011). Такое изменение может регистрироваться путем пространственного спектрального анализа оптических изображений методом дистанционной пространственно-частотной спектрометрии и радиолокационными методами (Бондур, 1987, 1995, 2000, 2004, 2010; Bondur, 2011).

Радиолокационные станции бокового обзора (РЛСБО), зондирующие поверхность при пологих углах ( $\theta \approx 10^\circ - 40^\circ$  – угол скольжения луча), используют эффект

брегговского рассеяния 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

$\kappa = 2 \cdot \pi / \Lambda_{\text{МВ}}$  – волновое число морских волн;

$\kappa_0 = 2 \cdot \pi / \lambda_0$  – волновое число излучаемых радиоволн;

$\Lambda_{\text{МВ}}$  – 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 водной поверхности будут наблюдаться участки с ярко выраженным отрицательным контрастом (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  $\epsilon \approx 2-4$ ) и, соответственно, меняется уровень отраженного радиосигнала от загрязненных участков водной или морской поверхности (контрасты  $\sim 2-8$  дБ) (Бондур, 2010).

В-третьих, возникновение загрязняющих нефтегазокомпонент на глубине может привести к появлению градиента плотности по глубине  $\Delta\rho / \Delta h$ , что в принципе, может стать источником зарождения внутренних волн, которые, взаимодействуя с поверхностным волнением, приводят к появлению гладких полос на морской поверхности, которые могут быть зафиксированы путем пространственного спектрального анализа оптических и радиолокационных изображений (Бондур, 1987, 2000, 2004, 2010; Bondur, 2006, 2011; Keeler et al, 2005).

В-четвертых, наличие течений в попавших в морскую среду загрязняющих веществах (в том числе и при «захвате» окружающих слоев воды) может служить физической основой для их обнаружения с помощью когерентных радиолокационных систем. В частности, с помощью 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 ДЗЗ (Бондур, 1995, 2000, 2004, 2010).



В-шестых, в областях нефтяных загрязнений изменяются коэффициенты спектральной яркости в различных спектральных диапазонах, которые могут регистрироваться многоспектральной и гиперспектральной оптической аппаратурой (Бондур, 2004, 2010; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006; Bondur, 2006, 2011; Advanced..., 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 такое подавление линии комбинационного рассеяния (КР) воды. Эти эффекты могут обнаруживаться флуоресцентными лидарами (Межерис, 1987; Бондур, 2004, 2010; Бондур, Зубков, 2001; Абрамов и др., 2012; Lutomirski, 1994).

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

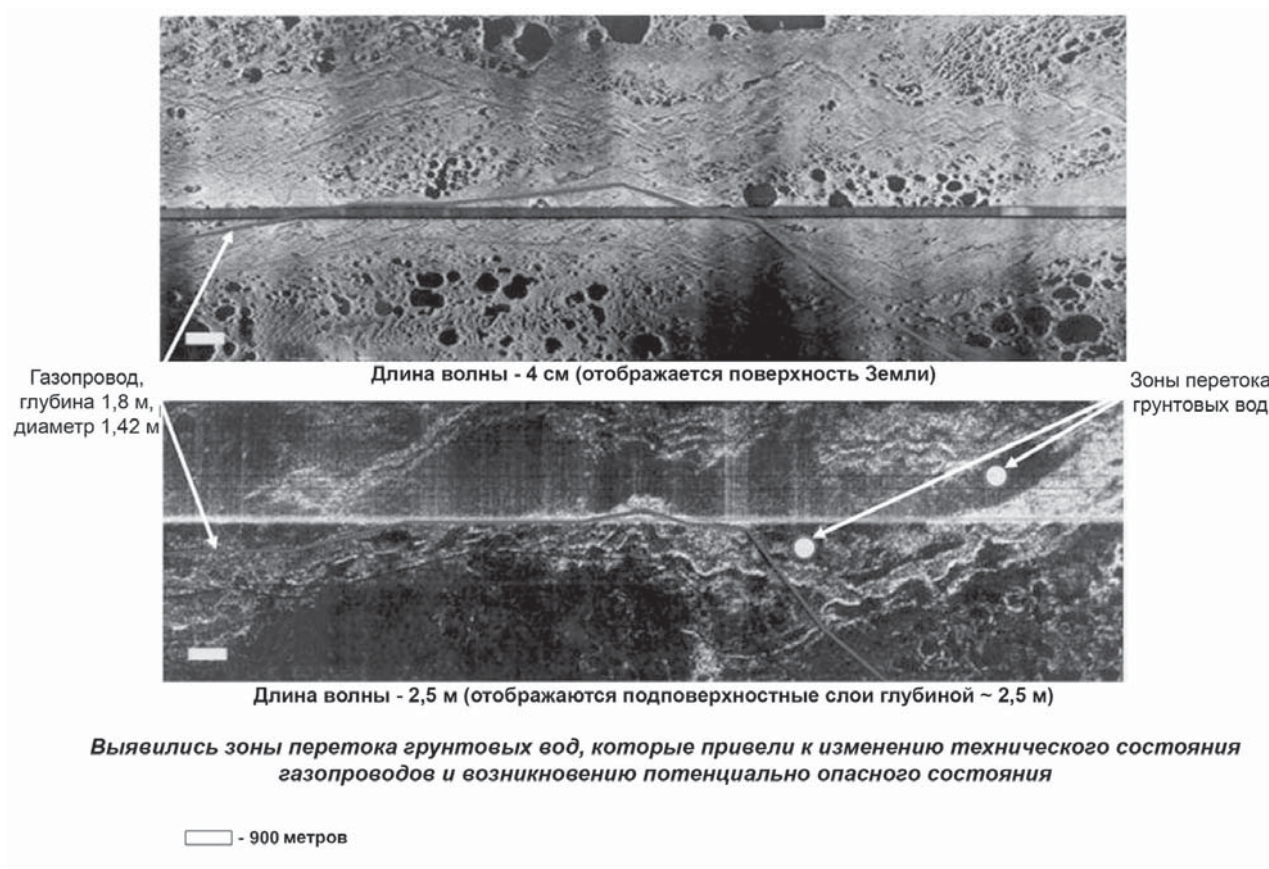
### **Примеры применения космических методов для мониторинга экологического состояния района нефтедобычи**

На рис. 1.1.5а (см. цветную вклейку) показано RGB-синтезированное изображение, полученное со спутника QuickBird, для района нефтедобычи (вахтенный поселок Пионерный в Томской области). В результате обработки данного изображения с использованием вегетационных индексов NDVI и TCHVI и проведения классификации методом максимального правдоподобия выявлены ландшафтные особенности исследуемого района (см. рис. 1.1.5б), которые приведены на шкале цветоделения.

На рис. 1.1.6 (см. цветную вклейку) представлены результаты обработки фрагмента (рис. 1.1.6а) космического изображения, полученного со спутника QuickBird, приведенного на рис. 1.1.5. На рис. 1.1.6в представлено цветокодированное изображение этого фрагмента, составленное в псевдоцветах для выявления областей антропогенных воздействий. Желтым квадратом обозначена область, представленная на рис. 1.1.6б в увеличенном виде.

Увеличенный фрагмент цветокодированного изображения (см. рис. 1.1.6б), 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.

На рис. 1.1.6г приведен результат неконтролируемой классификации данного фрагмента по методу k-средних с принудительным определением трех классов. Результаты классификации можно интерпретировать как участки, соответствующие различным



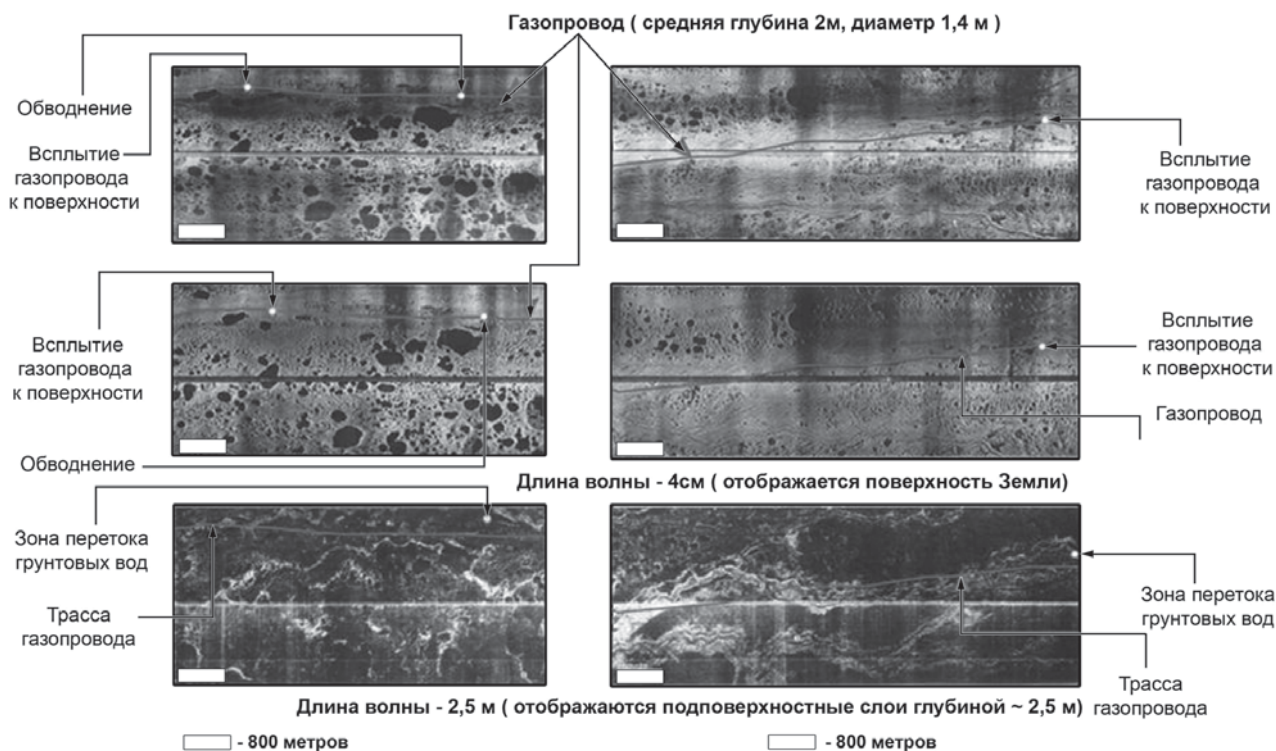
**Рис. 1.1.8.** Двухчастотные радиолокационные изображения участка газопровода Новый Уренгой – Сургут

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 показаны участки угнетения растительности, вызванные деятельностью нефтедобывающего комплекса. Зеленым показаны участки, находящиеся в удовлетворительном экологическом состоянии.

Анализ полученных результатов показывает, что в районе нефтедобычи антропогенная нагрузка на окружающую среду крайне высока. Наблюдаются 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 радиолокационный мониторинг трубопроводов**

Для мониторинга нефте-, газо- и продуктопроводов эффективно использование метода радиотомографии, основанного на многочастотном радиозондировании. При



**Рис. 1.1.9.** Двухчастотные радиолокационные изображения участков трассы газопровода Уренгой – Сургут – Челябинск

этом в сантиметровом диапазоне на радиолокационных изображениях отображается поверхность, а в метровом 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. 1.1.7 (см. цветную вклейку). Приведены схема съемки (рис. 1.1.7а), фрагменты радиолокационных изображений, полученных в районе Нижнеуртовска на длине волны  $\lambda_1 = 4$  см (рис. 1.1.7б, верхний фрагмент) и на длине волны  $\lambda_2 = 2,5$  м (рис. 1.1.7в, верхний фрагмент), а также разностное изображение (рис. 1.1.7г, верхний фрагмент).

На нижних фрагментах рис. 1.1.7б, в, г приведены результаты классификации и цветокодирования верхних исходных радиолокационных изображений (в см- и м-диапазонах) и разностного по яркости с использованием алгоритма кластерного анализа ISODATA. На обработанном разностном радиолокационном изображении (см. рис. 1.1.7г, нижний фрагмент) выявлены подпочвенные разливы нефти.

На рисунках 1.1.8 и 1.1.9 приведены примеры двухчастотной радиолокационной съемки с самолета участков трасс газопроводов Новый Уренгой – Сургут (рис. 1.1.8) и Уренгой – Сургут – Челябинск (рис. 1.1.9). На фрагментах радиолокационных изображений, полученных в м-диапазоне ( $\lambda_2 = 2,5$  м), виден сам газопровод и зоны

перетока грунтовых вод (рис. 1.1.8, 1.1.9 внизу). На фрагментах радиолокационных изображений, полученных в см-диапазоне ( $\lambda_1 = 4$  см), выявлены всплытие газопровода к поверхности и участки обводнения (рис. 1.1.9).

### **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, 2010; Бондур, Гребенюк, 2001; Иванов, 2007; Лаврова, Митягина, 2011; Лаврова и др., 2011).

На рис. 1.1.10 и 1.1.11 (см. цветную вклейку) приведены примеры использования космической информации для анализа последствий аварий на нефтяной платформе *Deerwater Horizon* фирмы *British Petroleum* в Мексиканском заливе.

На рис. 1.1.10 представлены космические оптические изображения, полученные со спутника *AQUA* 25 апреля, 9 мая и 12 июля 2010 г., а также со спутника *TERRA* 28 мая 2010 г., на которых отчетливо проявляются последствия этой аварии в акватории залива. На рис. 1.1.11 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 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 (Бондур, Воробьев, 2012). На рис. 1.1.11 приведено исходное космическое изображение, результат классификации методом кластерного анализа и карта с областью распространения нефтяного загрязнения, отображаемая в системе *Google Earth*.

Результаты обработки радиолокационных изображений для анализа последствий аварий на этой платформе приведены в Главе 4 настоящей книги (Бондур, Замшин, 2012).

На рис. 1.1.12 (см. цветную вклейку) в качестве примера представлены результаты обработки радиолокационного изображения, полученного 28 декабря 2005 г. с борта спутника *RADARSAT* для района добычи нефти на шельфе Каспийского моря (Нефтяные Камни). На рис. 1.1.12а приведено исходное космическое изображение и его увеличенные фрагменты. На рис. 1.1.12б (слева) приведена серия изображений, демонстрирующая последовательность промежуточных этапов обработки, а справа приведен результат классификации по методу максимального правдоподобия. На правом фрагменте рис. 1.1.12б отчетливо выделены области нефтяных загрязнений и искусственные сооружения в море.

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

Ниже иллюстрируются некоторые примеры космического мониторинга ледовой обстановки в морях Арктической зоны России. На рис. 1.1.13 (см. цветную вклейку) приводится пример анализа ледовой обстановки в Северном Ледовитом океане по радиолокационным изображениям, полученным со спутника RADARSAT. В процессе космического мониторинга ледовой обстановки выполнялись следующие основные операции: планирование радиолокационных съёмок в заданных районах; получение изображений и их предварительная обработка; предварительный анализ изображений, построение временных рядов географически совмещённых фрагментов изображений с выделением областей интереса; расчёт полей радиояркостности  $\beta^\circ$ (дБ); формирование информационных продуктов на различные даты.

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

### **Заключение**

На основании проведенного анализа обоснована актуальность и необходимость применения аэрокосмических методов и технологий дистанционного зондирования Земли для мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса. Проведена систематизация основных задач нефтегазовой отрасли, которые могут решаться аэрокосмическими методами. Предложены принципы организации и проведения аэрокосмического мониторинга в интересах нефтегазовой отрасли, описаны этапы получения и обработки 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 поиска и разведки 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 регистрацией структурно-морфологических особенностей поверхности, регистрируемых различной аэрокосмической аппаратурой. Информативными признаками для поиска и разведки месторождений нефти и газа и оценки углеводородного потенциала аэрокосмическими методами являются: структурно-морфологические особенности линейно-амбонной сети и овально-кольцевых образований; специфические изометрические формы рельефа, выраженные слабыми неотектоническими поднятиями, наиболее благоприятные для расположения нефтегазовых ловушек; нефте- и газопроявления на морской поверхности за счет просачивания миграционных потоков углеводородов из нефтегазоносных структур морского дна, которые могут выявляться путем дистанционной регистрации вариаций полей спектральной яркости, температуры, гамма-излучения и аномалий магнитного и гравитационного полей в областях, связанных с нефтегазоносностью.

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, возникающие за счет различия коэффициентов спектральных яркостей объекта и фона; изменения спектров флуоресценции; вариации диэлектрической проницаемости; деформации спектров поверхностного волнения за счет «выглаживания» его высокочастотных компонент при сбросе в морскую среду нефти, нефтепродуктов и газовых компонент; доплеровское смещение частоты радиолокационных сигналов из-за появления течений в области воздействия нефтегазовых объектов.

Эти признаки могут регистрироваться многоспектральной и гиперспектральной оптической аппаратурой дистанционного зондирования, ИК- и микроволновыми радиометрами, радиолокаторами, радиоинтерферометрами, альтиметрами, лазерными комплексами, средствами спутниковых навигационных систем, пассивными гамма-спектрометрами, активной аппаратурой, основанной на использовании и регистрации потоков частиц, а также аппаратурой для регистрации магнитного и гравитационного полей.

Продемонстрированы возможности применения 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, контроля ледовой обстановки в нефтегазовом районе Арктики.

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

## Литература

1. *Абрамов О.И., Бондур В.Г., Васильчиков П.М., Пелевин В.В.* Авиационный флуоресцентный сканирующий лидар (флуоровизор) для мониторинга районов добычи и транспортировки углеводородов. В настоящей книге. 2012. С. 478–486.
2. *Аэрометоды геологических исследований.* Гл. ред. *Еремин В.К.* Лаборатория аэрометодов МГ СССР. Л.: «Недра». 1971. 704 с.
3. *Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта.* М.: МГФ «Знание». 2002. 750 с.
4. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т.1. Физика. Химия. Биология. М.: Наука. 2004. С. 55 – 117+8 стр. цв. вклейки.
5. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

6. *Бондур В.Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2000. № 5. С. 16–27.
7. *Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера-океан по пространственным спектрам изображений // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. С. 217–230.
8. *Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
9. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Методы обработки аэрокосмических изображений, полученных при мониторинге объектов нефтегазовой отрасли. В настоящей книге. 2012. С. 395–409.
10. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Аэрокосмические методы определения рельефа дна в прибрежных зонах морей и океанов // Исследование Земли из космоса. 2000. № 6. С. 59–73.
11. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
12. *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 // Исследование Земли из космоса. 2009а. № 6. С. 3–15.
13. *Бондур В.Г., Замшин В.В.* Космический радиолокационный мониторинг морских акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородов. В настоящей книге. 2012. С. 255–271.
14. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса. 2005б. № 3. С. 37–52.
15. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. 2005а. Т. 402. № 1. С. 98–105.
16. *Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
17. *Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В.* Многоуровневый линеаментный анализ космических изображений западно-сибирской нефтегазоносной провинции. В настоящей книге. 2012. С. 92–102.
18. *Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многоспектральным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // Исследования Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
19. *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.
20. *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 // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49 + 9 стр. цв. вклеек.

21. *Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир. 2009б. 692 с. 22 цв. ил.
22. *Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
23. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности, под. ред. *Шевнина В.А. и Модина И.Н.* М.: «Геомакс». 1999. 512 с.
24. *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. С. 433–449.
25. Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина, 18–22 октября 2010 г. (Отв. ред. ак. *А.Н. Дмитриевский*, д.г.-м.н. *Б.М. Валяев*). М.: ГЕОС. 2010. 712 с.
26. *Дейдан Т.А., Пацаева С.В., Фадеев В.В.* и др. Спектральные особенности флуоресценции нефтепродуктов в пленках и в объеме воды // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 455–463.
27. *Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е.* Газогидраты морей и океанов. М.: ООО «ИРЦ Газпром». 2009. 416с.
28. *Иванов А.Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
29. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А.* и др. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН. 2011. 480 с.
30. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 55–63.
31. *Лопатин Д.В.* Использование орбитальной информации для изучения тектонического строения Северной Евразии // Исследование Земли из космоса. 1996. № 4. С. 93–100.
32. *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.
33. *Межерис А.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир. 1987. 552 с.
34. *Огай Е.К., Уразаева С.Б., Петровский В.Б.* Новые перспективы и направления нефтегазопоисковых работ с использованием современных технологий дистанционного зондирования Земли // Геология и охрана недр. 2007. № 3. С. 82–89.
35. *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.
36. *Трифонов В.Г.* 30 лет геологических исследований с помощью космических средств. Тенденции, достижения, перспективы // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 27–39.
37. *Харитонов А.Л., Хассан Г.С., Серкерев С.А.* Изучение глубинных неоднородностей тектоносферы и мантии Земли по спутниковым магнитным и гравитационным данным // Исследование Земли из космоса. 2004. № 3. С. 81–87.
38. *Хренов Н.Н.* Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. М.: «Газойл пресс». 2003. 352 с.



39. *Щепин М.В., Евдокимов С.В., Головченко Ю.В.* Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимков // Исследование Земли из космоса. 2007. № 4. С. 74–87.
40. Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System (AAHIS): an imaging spectrometer for maritime application. M.A. Volker, R.G. Resmini, G.C. Mooradian, T.B. McCard, C.P. Warren, M.M. Fene. SETS Technology, Inc. Mililani, Hawaii. C.C. Coyle and R.D. Anderson. Science Applications International Corporation. San Diego, California. USA. 1996.
41. *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.
42. *Bondur V.G.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas, 31st International Symposium on remote Sensing of Environment. ISRSE. 2006. 7 p.
43. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water - Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia, 2011, pp. 155-180 <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
44. *Elachi C., Brown W.E.* Models of radar imaging of the ocean surface waves // IEEE, Trans, Antennas and Propag. 1977. Ap. 25. № 1. P. 84–95.
45. *Etioppe G.* A Global Dataset of Gas and Oil Seeps: a new Tool for Hydrocarbon Exploration // Oil and Gas Business. 2009.
46. *Keelre R.N., Bondur V.G., Gibson C.H.* Optical satellite Imagery Detection of Internal Waves Effects from a Submerged Turbulent Outfall in the stratified Ocean // Geophysical Research Letters. Vol. 32. Z 12610, doi: 10.1029/2005GL022390. 2005.
47. *Lutomirski R.F.* Lidar remote sensing of ocean waters // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 1994. V. 2222. P. 12–19.
48. *MacDonald I.R.* Natural oil spills // Scientific American. 1998. 279(5). P. 51–66.
49. *Scantland S., Biegert E.K.* Radar locates offshore oil slicks // Earth Observation Magazine. 1996. 5. P. 30–32.
50. *Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Gomp. Geosci. 1997. V. 23. № 1.