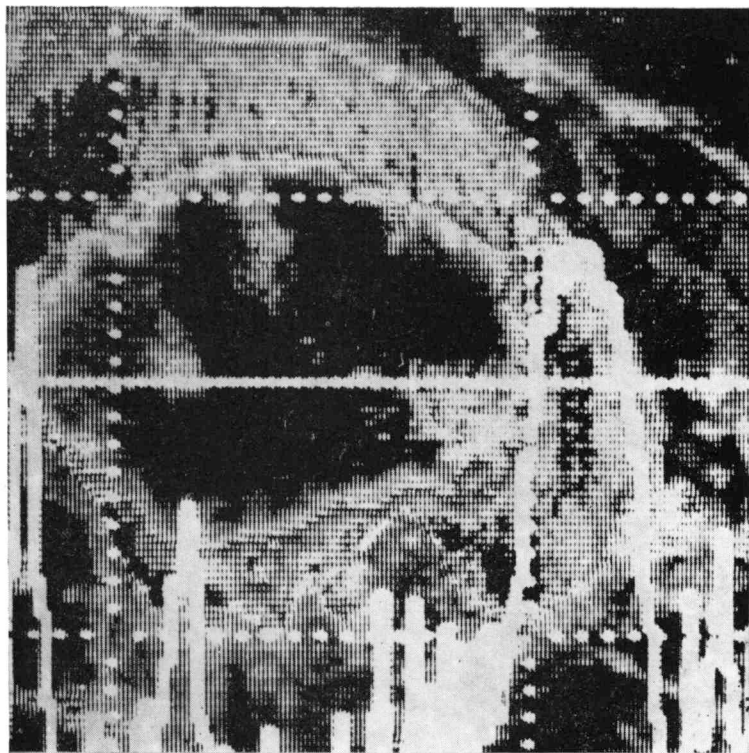


# Природа Земли из космоса

*Природа Земли **ИЗ КОСМОСА***

# *Природа Земли*



# ***ИЗ КОСМОСА***

Изучение  
природных  
ресурсов  
Земли  
с помощью  
данных,  
передаваемых  
со спутников  
по радиоканалам

Составители:

канд. техн. наук А. П. ТИЩЕНКО  
и канд. физ-мат. наук С. В. ВИКТОРОВ

Под редакцией  
д-ра техн. наук, проф.  
Н. П. КОЗЛОВА



Ленинград  
Гидрометеиздат 1984

## Авторы:

В. В. Козодеров, Л. Б. Карвовская, А. Д. Клещенко (глава 1); Ю. В. Трифонов (глава 2); А. С. Селиванов, Ю. М. Тучин (пп. 3.1, 3.2); Г. А. Аванесов, В. И. Тернапольский (п. 3.3); В. Г. Блинов, И. Ф. Берестовский, С. В. Викторов, Ю. Г. Симонов (глава 4); А. П. Тищенко, В. В. Асмус, В. П. Пяткин (глава 5); В. Г. Буров, Е. Г. Давыдова, Т. А. Жукова, Ю. Г. Симонов, И. И. Невяжский (глава 6); А. П. Тищенко, В. Г. Блинов, Е. Г. Давыдова, И. Г. Розанов (пп. 7.1, 7.2, 7.4), В. И. Рачулик (п. 7.3); В. Г. Прокачева (пп. 8.1, 8.2), В. Ф. Усачев (пп. 8.2, 8.3), В. Н. Королев, Л. Т. Пермитина (п. 8.4); С. В. Викторов (пп. 9.1, 9.4, 9.5), А. В. Бушуев (п. 9.2), А. С. Казьмин, В. Е. Скляр (пп. 9.3, 9.4), В. А. Гашко, Л. Л. Сухачева, В. Г. Антоненко, С. М. Сажин (п. 9.4), И. А. Бычкова, В. В. Виноградов (п. 9.5); Ю. В. Новиков (глава 10); М. А. Артамонов, Д. Г. Рихтер (глава 11).

Авторы книги являются сотрудниками следующих организаций:

Арктического и антарктического научно-исследовательского института Госкомгидромета, Всесоюзного объединения «Аэрогеология» Министерства геологии СССР, Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии Госкомгидромета, Вычислительного центра Сибирского отделения АН СССР, Географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Государственного гидрологического института Госкомгидромета, Государственного научно-исследовательского центра изучения природных ресурсов Госкомгидромета, Государственного океанографического института Госкомгидромета, Института космических исследований АН СССР, Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР, Лаборатории мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР.

## Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Л. Н. Васильев (Институт географии АН СССР), д-р техн. наук, проф. Н. П. Лаврова, д-р техн. наук, проф. И. Г. Журкин, канд. техн. наук Ю. А. Ильин, канд. техн. наук С. А. Сладкопеев, канд. техн. наук Р. И. Фимин, канд. техн. наук С. С. Судакова (Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии).

Предлагаемая книга впервые издается в отечественной литературе. Она подготовлена специалистами разных отраслей науки и народного хозяйства. Создатели спутников рассказывают об особенностях конструкции космических аппаратов, предназначенных для изучения природных ресурсов Земли. Инженеры представляют свои приборы, математики и программисты обсуждают, как лучше обрабатывать получаемые космические изображения на ЭВМ. Специалисты сельского хозяйства, геологи, лесоводы, океанологи, гидрологи рассказывают, как космическая информация используется в народном хозяйстве и для контроля природной среды. Специалистам эта книга поможет лучше ориентироваться в области космического природоведения, осознать ее достижения и нерешенные проблемы. Любопытный читатель найдет здесь немало интересных фактов, изложенных в доступной форме, а также большое количество оригинальных космических изображений, полученных с советских искусственных спутников Земли серии «Метеор».

The suggested book is the first book of this kind published in the USSR. It is written by experts in various branches of science and economy. Technologists deal with the peculiarities of satellites for remote sensing. Engineers present their spacecraft sensors, mathematicians and application programmers discuss problems of remote data processing. Experts in agriculture, geology, forestry, oceanology and hydrology speak about the use of remote sensing data in economy and control of environment. This book will help discipline scientists to realise the achievements of remote sensing and understand the unsolved problems. Any inquisitive reader can find here many interesting facts set forth in a popular manner as well as a lot of original images from Soviet satellites "Meteor".

## Предисловие

Запуском первого советского искусственного спутника Земли в октябре 1957 г. началась космическая эра человечества.

Последовательное изучение и освоение космического пространства привело к рождению и бурному развитию таких принципиально новых направлений науки и техники, как космическая метеорология, космическая связь, космическая технология, космическая астрономия, космическая медицина, космическое природоведение и другие. Создание космической техники обеспечило почти неограниченные возможности для создания и оперативного функционирования глобальных космических систем метеорологии, связи, исследования природных ресурсов Земли и охраны окружающей среды.

Исследование природных ресурсов Земли из космоса, или дистанционное зондирование Земли из космоса, базируется на измерении энергетических и поляризационных характеристик собственного и отраженного электромагнитного излучения суши, морей, океанов и атмосферы.

За короткий период методы дистанционного зондирования Земли из космоса получили широкое развитие. От первых фотографий Земли, снятых Г. С. Титовым, и первых телевизионных снимков, полученных с искусственных спутников Земли «Тайрос-1» и «Космос-122», до спутников «Метеор—Природа» и «Лэндсат», оснащенных сложной аппаратурой с высоким пространственным и энергетическим разрешением и различными полосами обзора — таков технический прогресс в этой области.

Для получения достаточно полной, достоверной и детальной информации о природной среде, как правило, используются данные разномасштабных многозональных съемок в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах электромагнитного спектра. Результаты этих съемок по радиоканалам передаются на наземные пункты приема и обработки информации в реальном или близком к нему масштабе времени.

Использование данных дистанционного зондирования Земли для изучения природных ресурсов стало возможным благодаря огромному прогрессу в разработке методов обработки информации, представления информации в оптимальном для восприятия виде и ее интерпретации.

Предлагаемая читателю книга, посвященная исследованию природных ресурсов Земли из космоса, — необычное издание, так как, с одной стороны, это серьезное научное изложение результатов космических исследований в достаточно доступной форме, а с другой — иллюстрированный альбом, в котором широко представлены космические снимки отдельных участков поверхности Земли, в большинстве своем публикующиеся впервые. На конкретных примерах в книге показана эффективность и перспективность использования методов дистанционного зондирования Земли из космоса в различных областях науки о Земле, отдельных отраслях народного хозяйства и для контроля окружающей природной среды.

В первой главе книги кратко изложены физические основы дистанционных методов изучения Земли из космоса.

В главах 2—5 описаны отдельные составные части космической системы изучения природных ресурсов Земли. Глава 2 содержит в основном описание используемых для этого космических аппаратов. Глава 3 посвящена описанию бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли, предназначенной для съемки поверхности нашей планеты в различных интервалах электромагнитного спектра. Точность и достоверность спутниковых данных определяется с помощью подсистемы сбора информации наземного уровня, состоящей из самолетов, вертолетов, судов, наблюдательных постов и т. д. Эта составная часть космической системы описана в главе 4. Общая методика цифровой обработки на ЭВМ данных, получаемых с помощью космической системы изучения природных ресурсов Земли, рассмотрена в главе 5.

Последующие разделы книги посвящены конкретным вопросам использования спутниковых данных в различных областях науки и отраслях народного хозяйства. Вопросы районирования и изучения природно-территориальных комплексов рассмотрены в главе 6, проблемы изучения состояния почв и растительности — в главе 7. О применении спутниковых данных для изучения гидросферы Земли рассказывается в главах 8 (гидрология) и 9 (океанография). Ряд примеров использования многозональных снимков из космоса для контроля антропогенного воздействия на природную среду приведен в главе 10.

Спутниковые изображения земной поверхности дали много новых сведений о геологическом строении верхних слоев земной поверхности. Из главы 11 читатель узнает об использовании спутниковых данных для поиска полезных ископаемых.

Таким образом, составители и авторы книги стремились как можно полнее показать читателю все многообразие возможного применения спутниковых данных.

В создании книги участвовал большой коллектив авторов, являющихся ведущими специалистами, непосредственно участвующими в становлении и развитии принципов, методов и средств космического природоведения.

Авторы стремились сделать книгу полезной широкому кругу читателей, ввести их в круг тех проблем, которыми сегодня интенсивно занимаются многие специалисты самых разных профессий.

Для читателей, желающих познакомиться с проблемами космического природоведения и в дальнейшем ими заниматься, эта книга окажется полезным пособием, так как позволит им быстро и эффективно приобщиться к этой новой и чрезвычайно важной области науки и техники.

Работники различных отраслей народного хозяйства, ознакомившись с этой книгой, смогут убедиться в том, как высока эффективность использования космических методов дистанционного зондирования Земли для решения ряда прикладных задач.

Заместитель Председателя Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды д-р техн. наук, проф. Н. П. Козлов

## Введение

Со дня запуска первого искусственного спутника Земли и первого полета человека в космос прошел весьма короткий срок, однако уже сегодня космические исследования нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. Практически сформировалось новое направление изучения Земли и ее природных ресурсов — космическое природоведение, в котором органически переплелись самые разнообразные области науки и техники: почти все разделы наук о Земле, физика и математика, радиотехника и точная механика, вычислительная техника и инженерная психология, космонавтика и ракетостроение. Успех космического природоведения обеспечивается объединенными усилиями специалистов всех этих направлений науки и техники.

Крупные агро- и лесотехнические, гидротехнические мероприятия, а также другие виды индустриального использования природно-территориальных комплексов требуют оперативных данных о состоянии и динамике природной среды и в первую очередь о состоянии биосферы и гидросферы. Эти данные сложно получать на основе традиционных натурных измерений, что связано с динамичностью самих параметров био- и гидросферы и с низкой информативностью точечных разновременных натурных измерений. Последнее обстоятельство приводит в традиционном природоведении к выполнению исследований по принципу «от частного к общему». С этой точки зрения эффективность космического природоведения совершенно очевидна, так как космические съемки дают возможность практически одновременно и при сплошном покрытии наблюдать значительные регионы земной поверхности и периодически повторять эти наблюдения.

Сегодня в СССР космическое природоведение поставлено на уровень государственной научно-технической политики и успешно развивается, опираясь на мощный научный и промышленный потенциал страны и обеспечивая повышение эффективности изучения и рационального использования природных ресурсов в интересах народного хозяйства и охраны окружающей среды. Работы в этом направлении выполняются в соответствии со статьей 18 Конституции Союза Советских Социалистических Республик: «В интересах настоящего и будущих поколений в СССР принимаются необходимые меры для охраны и научно обоснованного, рационального использования земли и ее недр, водных ресурсов, растительного и животного мира, для сохранения в чистоте воздуха и воды, обеспечения воспроизводства природных богатств и улучшения окружающей человека среды».

С этой целью в СССР планомерно осуществляется специальная комплексная программа, включающая изучение пространственно-энергетических радиационных характеристик земных объектов; разработку технических средств и методов дистанционных измерений; разработку технических средств и методов обработки и интерпретации данных дистанционных измерений; разработку методов использования космической информации о природных ресурсах Земли.

В соответствии с Договором 1967 г. о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства Советский Союз осуществил целый ряд практических шагов в направлении предоставления достижений отечественной космонавтики на благо международного сообщества.

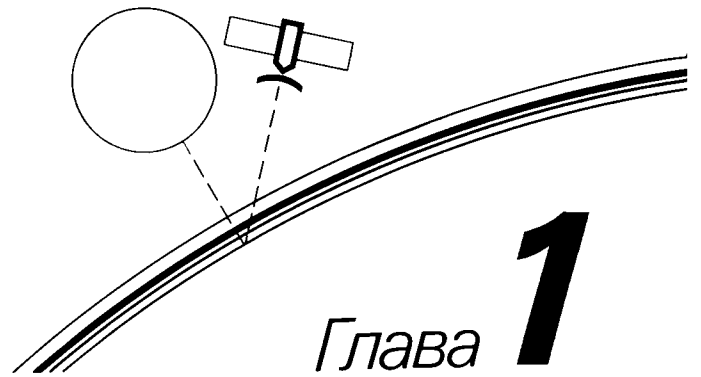
В феврале 1977 г. на сессии Научно-технического подкомитета Комитета ООН по космосу делегация СССР сообщила о готовности Советского Союза сотрудничать с заинтересованными странами в деле проведения космической съемки их территорий и передачи этим странам полученных данных на основе соответствующих соглашений. В настоящее время СССР осуществляет международное сотрудничество в области изучения природных ресурсов Земли космическими средствами, как на многосторонней основе в рамках программ «Интеркосмос», так и на основе двухсторонних соглашений.

Концепция национальной программы Советского Союза по созданию космической системы изучения природных ресурсов Земли заключается в наиболее полном обеспечении различных отраслей народного хозяйства оперативной и достоверной информацией.

Космическая система изучения природных ресурсов и окружающей среды является общегосударственной постоянно действующей многофункциональной системой с высоким уровнем автоматизации процессов получения и обработки космической информации. Эффективное функционирование системы и реализацию результатов ее работы обеспечивают специальные научные и производственные учреждения страны. Создание этой системы связано с решением ряда фундаментальных научных и технических проблем, проведением общегосударственных организационных мероприятий, довольно крупными капиталовложениями. Структурно космическая система включает в себя постоянно действующие и временно привлекаемые элементы. Основными из них являются: пилотируемые космические аппараты, космические аппараты серии «Метеор», космические аппараты серии «Космос», самолеты-лаборатории, сеть наземных и морских полигонов, межотраслевые центры приема и обработки космической информации, отраслевые и территориальные организации по целевой обработке космической информации.

Данные космических измерений, в том числе изображения поверхности Земли, могут быть доставлены на Землю двумя принципиально различными способами: либо в виде фотографических материалов, либо в форме электрических сигналов, передаваемых по радиоканалам. На оперативных искусственных спутниках Земли серии «Метеор» используется второй способ. Настоящая книга содержит краткие методические обоснования построения отдельных звеньев космической системы исследования природных ресурсов Земли применительно к космическим аппаратам, передающим данные по радиоканалам, и примеры обработки и интерпретации многозональных изображений, полученных со спутников серии «Метеор».

# Физические аспекты дистанционного изучения природной среды



## Глава 1

Возможность дистанционного изучения объектов земной поверхности с помощью космических средств основывается на объективно существующих связях между характеристиками (параметрами) природной среды и полем (отраженного и собственного) излучения земной поверхности. Измерения с искусственных спутников Земли (ИСЗ) интенсивности этого поля и лежат в основе получения космических изображений Земли. Процесс формирования космических изображений земной поверхности зависит от большого числа факторов и весьма сложен. В связи с этим определение по данным космической съемки характеристик природной среды, т. е. решение обратной задачи дистанционного зондирования, не всегда является однозначным. Поэтому изучение взаимодействия электромагнитного излучения с земными покровами и атмосферой является необходимым этапом при разработке космических методов изучения природных ресурсов Земли.

Тематическая обработка космической многозональной информации включает в себя два этапа — распознавание природных объектов и оценку параметров, характеризующих их состояние. Для решения задачи распознавания требуется либо информация о спектральных характеристиках природных образований (хранящаяся в банке данных), либо информация с «тестовых» участков земной поверхности (получаемая синхронно с космической). Решение задачи оценки состояния основывается на связях спектральных дистанционных измерений и параметров, характеризующих состояние природных образований. Для целого ряда природных объектов эти связи достаточно устойчивы и зависят от относительно небольшого числа факторов. Однако чаще наблюдаются многофакторные зависимости, что существенно затрудняет оценку состояния природных объектов. Формализованное представление состояния природных образований в виде набора физико-химических, биометрических и других параметров будем называть параметризацией результатов измерений. Параметризация результатов дистанционных спектральных измерений должны проводиться на основе физической теории с привлечением специально поставленных экспериментов. Физической основой возможности установления связей между данными дистанционных спектральных измерений и параметрами состояния природных образований является теория взаимодействия излучения со случайно-неоднородными средами.

Существует два подхода к решению задачи о распространении электромагнитных волн в случайно-неоднородных средах, какими являются ат-

мосфера и природные образования: 1) теория переноса, основанная на уравнении для средней интенсивности излучения, и 2) аналитическая теория, основанная на уравнениях электромагнитного поля Максвелла.

Первый подход является исчерпывающим при решении задач атмосферной оптики. Однако для сред с плотной упаковкой частиц, какими являются по существу все природные образования, этот подход не может иметь широкого применения. В этом случае для нахождения связей между данными дистанционных измерений и параметрами состояния природных образований следует использовать теорию электромагнитного поля. Аналитическая теория имеет более широкую область применения, чем теория переноса излучения. В данном подходе природные объекты характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью, действительная часть которой определяется поляризуемостью среды, а мнимая — проводимостью. Однако следует подчеркнуть, что применение теории поля к решению этих задач требует существенных дополнительных исследований теоретического и экспериментального характера.

### 1.1. Спектральные характеристики природных объектов в оптическом диапазоне

При изучении природных ресурсов аэрокосмическими методами физические свойства земной поверхности определяются путем спектральных измерений. Для описания свойств земной поверхности обычно используют такие оптические характеристики как спектральное альbedo  $A(\lambda)$  и коэффициент спектральной яркости  $R(\lambda)$  (рис. 1.1).

Дистанционные датчики регистрируют интенсивность излучения  $F(\lambda, \theta, \psi, \theta^*, \psi^*)$  при переменных углах Солнца  $\theta^*, \psi^*$  и углах визирования  $\theta, \psi$  (рис. 1.2).

Спектральное альbedo определяется как отношение уходящего потока излучения  $F^\dagger$  к падающему  $F^\ddagger$

$$A(\lambda) = \frac{F^\dagger(\lambda)}{F^\ddagger(\lambda)}. \quad (1)$$

Коэффициент спектральной яркости (КСЯ) определяется как отношение интенсивности (яркости) излучения, уходящего от элемента поверхности по направлению, определяемому углами  $\theta, \psi$ , к яркости ламбертовой (рассеивающей одинаково по всем направлениям) поверхности, находящейся в аналогичных условиях освещения:

$$R(\lambda, \theta, \psi) = \frac{J^\dagger(\lambda, \theta, \psi)}{J_\lambda^\ddagger(\lambda, \theta, \psi)}. \quad (2)$$



Между спектральным альбедо и коэффициентом спектральной яркости существует очевидная связь:

$$A(\lambda) = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} R(\lambda, \theta, \psi) \cos \theta \sin \psi d\psi d\theta. \quad (3)$$

Изменение спектрального хода  $R(\lambda)$  и  $A(\lambda)$  обусловлено как состоянием самой поверхности,

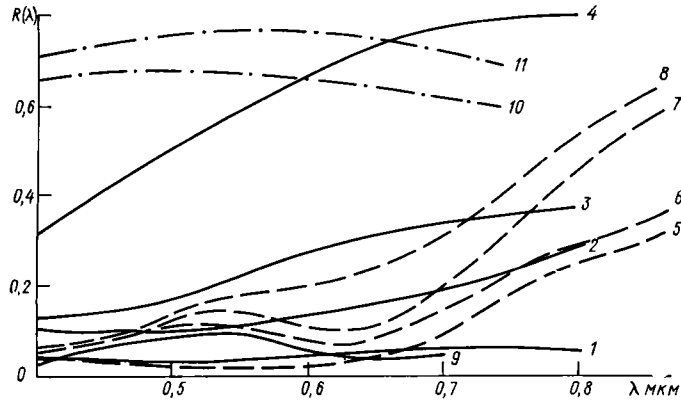


Рис. 1.1. Зависимость коэффициента спектральной яркости от длины волны для некоторых природных объектов.

1 — чернозем, супесные почвы, грунтовые дороги; 2 — оподзоленные суглинистые почвы; 3 — пески, обнажения пустынь, горные породы; 4 — известняки, глины, различные светлые объекты; 5 — хвойные леса; 6 — травянистые породы с недостаточно сочной растительностью; 7 — травянистые покровы с густой и сочной растительностью, лиственные леса; 8 — осенние леса и созревшие полевые культуры; 9 — водные поверхности; 10 — снежные поверхности; 11 — облака.

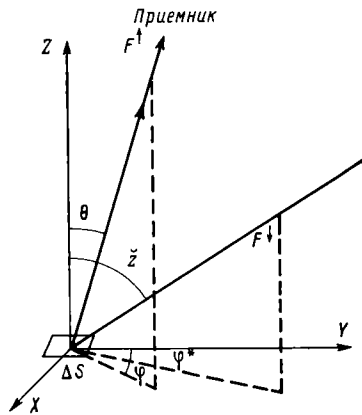


Рис. 1.2. Регистрация уходящего излучения.

так и условиями освещения, которые зависят от высоты Солнца, состояния атмосферы и уклонов поверхности. Наибольшие изменения альбедо с изменением высоты Солнца отмечаются для водных поверхностей, что связано с их зеркальными свойствами; наименьшие — для мелкозернистых, матовых поверхностей (чернозема, снега).

В сильной степени спектральное альбедо зависит от влажности. Существенно влияет на значения спектрального альбедо и коэффициента спектральной яркости растительности также величина проектного покрытия почв (рис. 1.3). Спектральные характеристики растительности зависят и от фазы вегетации. Так, для молодой растительности характерна светло-зеленая окраска, по мере развития растений она становится более темной (происходит насыщение хлорофиллом), далее происходит пожел-

тение (некоторые растения приобретают оранжевую и даже красную окраску). И, наконец, полное высыхание растений делает их похожими на светлые почвы.

Большая изменчивость спектральной яркости природных образований в зависимости от различных факторов, с одной стороны, принципиально

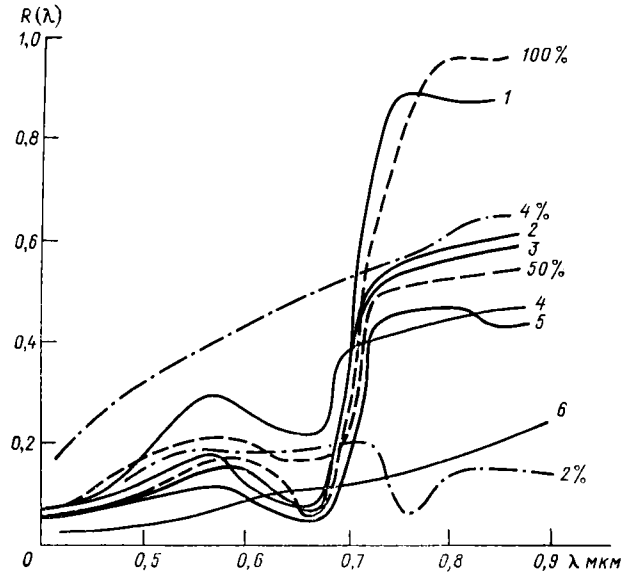


Рис. 1.3. Зависимость коэффициентов спектральной яркости от влажности (2 и 4 %), проективного покрытия почвы и растительности (50 и 100 %) и от фазы вегетации листьев осины.

1 — зеленые листья, 16 VII; 2 — зеленые, 1 VIII; 3 — зеленые, 14 IX; 4 — желтовато-зеленые, 30 IX; 5 — желтые, 11 IX; 6 — сухие серого цвета, 11 X.

позволяет определять ряд физических характеристик исследуемых поверхностей по особенностям их спектров отражения, а с другой стороны, значительно затрудняет идентификацию типов природных образований.

**1.1.1. Почвенный покров.** Интенсивность уходящего излучения, регистрируемая дистанционными датчиками, зависит от физико-химических и геометрических параметров природных объектов, а также от состояния атмосферы. При исследованиях радиационных свойств почв в оптическом диапазоне как в естественных, так и в лабораторных условиях наряду с отражательными характеристиками (альбедо, коэффициент спектральной яркости и т. д.) используются и некоторые другие характеристики, учитывающие качественное состояние почвенного покрова. Например, цвет (окраска) почв несет ценную информацию об истории их формирования и эволюции, о направлении процессов почвообразования и т. п. Цвет почв зависит от их химического и минералогического состава. Наличие у определенных типов почв преобладающего (доминантного) цвета может служить их отличительным признаком при обработке данных многозональных съемок. Однако не для всех природных образований доминантный цвет является отличительным признаком. Для единства системы обработки аэрокосмической информации для различных типов природных образований необходим учет зависимости интенсивности уходящего излучения от комплексной диэлектрической проницаемости, которая для почвенного покрова, в свою очередь, зависит от

химического, минералогического и механического состава исследуемых почв. Все цветовые особенности почв (и другие их свойства) учитываются значением комплексной диэлектрической проницаемости.

Цветность веществ, как свойство избирательно поглощать электромагнитное излучение, во многом зависит от их строения и освещенности. Почва является многокомпонентной системой; разнообразное сочетание компонентов, различная их окраска, обусловленная молекулярным строением, взаимное влияние их определяют цветность почв.

При определенных допущениях были получены зависимости коэффициентов отражения системы, состоящей из двух компонентов, от площадей и объемов, занимаемых ими. Так, для равномерно распределенных в почве двух компонентов общее количество отраженной энергии выражается формулой

$$R_{\Sigma} = R_1 S_1 + R_2 S_2,$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  — коэффициенты отражения для данной длины волны для первого и второго компонентов соответственно;  $S_1$  и  $S_2$  — доли площади, занимаемые теми же компонентами.

Уравнение, связывающее коэффициенты отражения системы из двух компонентов и занимаемые ими объемы, имеет вид

$$R_{\Sigma} = V_1 R_1 + V_2 R_2 - 1,5V' \alpha (R'_1 - R'_2)^2,$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  — объемные доли компонентов;  $V'$  — объемная доля компонента, находящегося в меньшем количестве,  $\alpha$  — постоянная, близкая к 0,59;  $R'_1$ ,  $R'_2$  — коэффициенты отражения тех же компонентов, имеющих плоскую поверхность.

Экспериментальная проверка последнего уравнения дала хорошие результаты.

Традиционным направлением использования кривых спектрального хода отраженного от почвенного покрова излучения при обработке данных дистанционных измерений является классификация типов почв по их отражательным характеристикам с целью оценки состояния растительных объектов, для которых почва является «мешающим» фактором. Делались попытки вычитания из общей яркости изображения яркости типичных почв, чтобы «по остатку» судить о состоянии растительности. В этих исследованиях основное внимание уделялось яркостным преобразованиям изображений. Минералогический или механический состав почв по данным дистанционных измерений при этом оценить не представляется возможным. Однако известны достоверные связи уходящего излучения с физико-химическими свойствами почв. Отражательная способность почв зависит от содержания в них гумуса (перегнойных веществ), соединений железа и других химических соединений, а также влажности, механического (дисперсного) состава, минералогического состава, горизонтальной и вертикальной неоднородности (строения) земной поверхности.

В табл. 1.1 приведено описание этих факторов и их влияния на уходящее излучение в оптическом диапазоне длин волн.

Здесь и в дальнейшем термином «отражательная способность» будем характеризовать инте-

Таблица 1.1  
Влияние некоторых факторов на спектральные характеристики почв

Влияющий фактор	Проявление влияния
Гумус, соединения железа	С увеличением содержания гумуса спектральная яркость почв убывает; с увеличением содержания соединений железа возрастает отражательная способность почв в красной области спектра
Влажность	Спектральная яркость почв убывает с увеличением влажности до уровня предельной полевой влагоемкости — максимальной водоудерживающей способности почв
Механический состав	При увеличении шероховатости почв отражательная способность убывает

гральное по углам отражение излучения в отличие от угловых распределений отраженного излучения, которые представляют самостоятельный интерес.

Все описанные в табл. 1.1 качественные различия состояния почв проявляются в значениях спектрального и пространственного распределения комплексной диэлектрической проницаемости — основной характеристики состояния почв. Рассмотрим более подробно зависимости характеристик отражения излучения почвами от различных факторов.

Во многих работах, например, [11, 12], отмечается зависимость отражательной способности почв от содержания гумуса, соединений железа, карбонатов, солей и других химических соединений. Особенно большое влияние оказывают на интенсивность и спектральный состав отраженного излучения следующие группы соединений: гумусовые вещества (обуславливают слабое и равномерное отражение по спектру); соединения железа (различные соединения отражают свет неравномерно, что определяет спектральный состав отраженного излучения); светлоокрашенные соединения: карбонаты, соединения кремния и алюминия, лишённые примесей (отражают свет сильно и равномерно по спектру).

Кроме этих основных групп, на цветовые свойства почв влияют и другие соединения. Проведенные исследования показали, что для наиболее широко встречающихся в почвах солей, таких, как  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KHSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  интенсивность отраженного излучения высокая, но практически постоянная по спектру. Увеличение содержания в почве  $\text{CaCO}_3$  ведет к повышению общей яркости.

Гуминовая кислота характеризуется малой яркостью, постоянной во всем видимом диапазоне спектра. Фульвокислотам соответствует значительный подъем кривых яркости в зеленой и красной областях спектра. Кривая спектральной яркости  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  имеет плавный характер, незначительное повышение отмечается в диапазоне длин волн 400—500 нм. Ярко выраженное увеличение спектральной яркости в красной области спектра присуще  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Окисные соединения железа в почвах можно обнаружить по кривым спектральной яркости: отра-

жательная способность резко возрастает в диапазоне от 500 до 640 нм. Следует отметить, что на излучательную способность естественных образцов оказывают влияние только те соединения железа, которые находятся на поверхности почвенных агрегатов. Если железо входит в состав алюво-

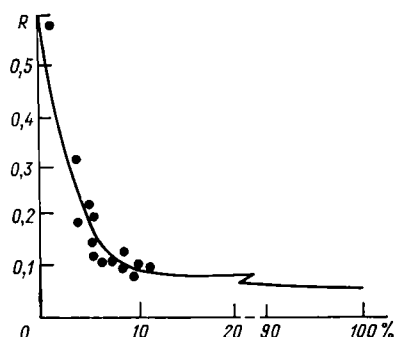


Рис. 1.4. Зависимость общей яркости ( $R$ ) тяжелосуглинистых почв от содержания (%) гумуса и окислов железа.

ферросиликатов, образует соединения с гумусовыми веществами, или его окислы покрыты пленкой гумусовых веществ, то эти соединения железа не влияют на характер спектральных кривых. Суммарное влияние на яркость почв гумуса и окислов железа показано на рис. 1.4.

На основании лабораторных исследований спектральной отражательной способности основных

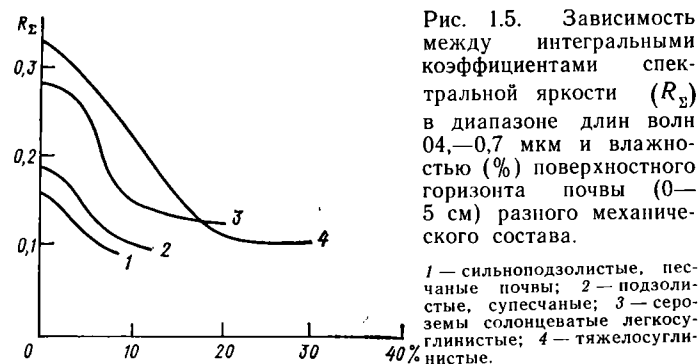


Рис. 1.5. Зависимость между интегральными коэффициентами спектральной яркости ( $R_{\lambda}$ ) в диапазоне длин волн 0,4—0,7 мкм и влажностью (%) поверхностного горизонта почвы (0—5 см) разного механического состава.

1 — сильноподзолистые, песчаные почвы; 2 — подзолистые, супесчаные; 3 — сероземы солонцеватые легкосуглинистые; 4 — тяжелосуглинистые.

типов почв получена линейная зависимость между валовым содержанием железа и величиной

$$\Delta R = R_{650} - R_{450};$$

$$\Delta R = A + KC,$$

где  $C$  — содержание  $Fe_2O_3$  в процентах,  $A$ ,  $K$  — постоянные коэффициенты для данного типа почв.

Значительные изменения отражательной способности почв наблюдаются при повышении влажности. В общем с повышением влажности яркость почв понижается. Дополнительным фактором является влияние механического состава почв (рис. 1.5).

Общей закономерностью является возрастание отражательной способности почв с уменьшением размера почвенных агрегатов. Бесструктурные почвы отражают на 15—20% больше световой энергии, чем почвы с хорошо выраженной структурой. Исследование отражательной способности вспаханной (размеры комков от нескольких миллиметров до 10 см) и неспаханной почв показало,

что КСЯ необработанной почвы значительно выше, чем обработанной.

Ход кривых спектральной яркости частиц разных размеров, выделенных из одного почвенного образца, практически одинаков; размеры почвенных агрегатов влияют только на величину интегрального отражения. Максимальные коэффициенты отражения имеют почвы, размеры агрегатов которых меньше 0,25 мм. При размерах 2—3 мм и выше отражательная способность практически остается постоянной (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Почва (горизонт А)	Размеры частиц, мм							
	0,25	0,25—0,5	0,5—0,1	1—1	2—3	3—5	5—7	7—10
Светло-каштановая, тяжелосуглинистая	21,5	15,0	12,0	10,0	9,0	9,0	8,5	8,5
Светлый слабосолончаковый, среднесуглинистый чернозем	56,5	46,0	41,0	38,5	37,5	37,8	36,6	36,5

Экспериментальная зависимость отражательной способности от размеров частиц  $d$  имеет вид

$$R = k \cdot 10^{-nd} + R_{\infty},$$

где  $R$  — коэффициент отражения;  $k$ ,  $n$  — константы, выражающие форму кривой;  $R_{\infty}$  — коэффициент отражения агрегатов максимального размера.

Уменьшение отражательной способности с увеличением размеров частиц объясняется неодинаковым строением поверхности агрегатов, их взаимным расположением на поверхности. Наиболее вероятным является влияние последнего фактора.

Для почв в естественном состоянии коэффициенты отражения совпадают с коэффициентами отражения для фракций 0,25—1,0 и 5—7 мм, а спектральные распределения чаще всего совпадают с результатами, полученными для фракций 1—2 и 2—3 мм.

Тон изображения зависит также от соотношения освещенных и затененных участков поверхности почвы. Общая яркость поверхности зависит не только от количественных соотношений элементов фактуры, но и от их строения и взаимного расположения.

**1.1.2. Растительный покров.** В существующих оптических моделях листа отражение и пропускание через границы раздела воздух — лист в области фотосинтетически активной радиации (0,38—0,71 мкм) практически неселективны и описываются законами Френеля. Неровная поверхность подразделяется на элементы, ориентации нормалей которых задаются функцией распределения. Распространение радиации внутри листа описывается уравнением переноса для горизонтально-однородной мутной среды. Такой подход, конечно, очень упрощен, так как не учитывается внутреннее строение листа и неселективность оптических характеристик. Характер же кривой спектрального отражения листьев растений определяется взаимодействием их с падающей радиацией и зависит от пигментной системы листа, толщины, плотности

и анатомической структуры листовой пластинки. Например, отличительными особенностями спектра листа кукурузы являются высокое поглощение (соответственно низкое отражение) в ультрафиолетовом и синем диапазонах (до 0,51 мкм), снижение поглощения и повышение отражения в зеленом (0,50—0,61 мкм), высокое поглощение в красном (0,61—0,72 мкм), очень низкое поглощение и высокое отражение в ближнем инфракрасном диапазоне (0,7—1,5 мкм) и очень высокое поглощение в дальнем инфракрасном участке спектра.

В ультрафиолетовой области спектра лежат характерные полосы поглощения многих физиологически активных соединений и связывающей среды (белки, нуклеиновые кислоты, фенольные соединения, клетчатка, многие ферменты и др.). В видимом диапазоне поглощение обусловлено пигментами, в первую очередь хлорофиллом, *a*, а также хлорофиллом *b* — каротином и др. Поглощение энергии электромагнитного спектра в инфракрасной области обусловлено молекулами воды листа. Сильное отражение в ближней инфракрасной области определяется различиями преломляющего индекса на внутренних поверхностях составных частей клетки, стенки клетки и т. д.

Таким образом, любой фактор, влияющий на содержание пигментов (в первую очередь хлорофилла), должен влиять на коэффициент отражения от листовой поверхности в видимой области спектра. Различия в отражении в ближней инфракрасной области для различных видов сельскохозяйственных культур могут быть отнесены за счет различной толщины листа и внутренних его особенностей.

Индивидуальное отражение от листа изменяется в течение всего вегетационного периода. Молодые листья имеют меньше воздушных камер на внутренней стороне по сравнению со старыми листьями. Таким образом, отражение в ближней инфракрасной области увеличивается по мере старения листа. В тепловом инфракрасном диапазоне листья имеют низкое отражение (высокая излучаемость) практически во всех случаях и поэтому выделенное излучение является функцией действительной температуры поверхности растительности.

Спектральные коэффициенты отражения сельскохозяйственных объектов, в первую очередь посевов сельскохозяйственных культур, формируются под влиянием большого числа факторов: тип и состояние почв, вид, структурные характеристики и состояние сельскохозяйственных культур, условия съемки, атмосферные условия и др. (рис. 1.6).

Отраженный сигнал от посевов сельскохозяйственных культур представляет собой сложную комбинацию отражения от почвы и элементов растительности. С ростом и развитием посевов отраженный сигнал будет существенно меняться в зависимости от того, насколько элементы растительности будут закрывать почву.

Наибольшие изменения КСЯ происходят в ближней инфракрасной области, где они существенно увеличиваются с увеличением площади листовой поверхности, биомассы, проективного покрытия и достигают 70—80 %. На рис. 1.7 показаны спектральные кривые для посевов озимой пшеницы в фазе колошения при различных значениях проективного покрытия. Наличие тесной зависимости

между увеличением биометрических характеристик посевов сельскохозяйственных культур и увеличением КСЯ позволяет использовать ближнюю инфракрасную область для определения биомассы, проективного покрытия, площади листовой поверхности и других биометрических характеристик.

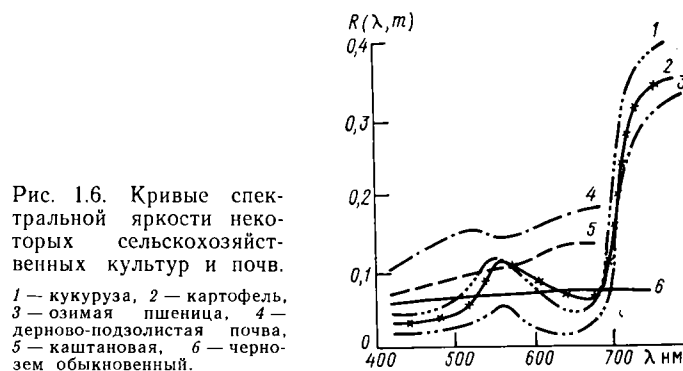


Рис. 1.6. Кривые спектральной яркости некоторых сельскохозяйственных культур и почв.

1 — кукуруза, 2 — картофель, 3 — озимая пшеница, 4 — дерново-подзолистая почва, 5 — каштановая, 6 — чернозем обыкновенный.

Геометрия растений, являясь переменной величиной, также влияет на общее отражение, независимо от спектральной области. Так, высота растений оказывает доминирующее влияние на общее отражение, изменяя процентное соотношение площади почвы, находящейся в тени, и площади, освещенной Солнцем.

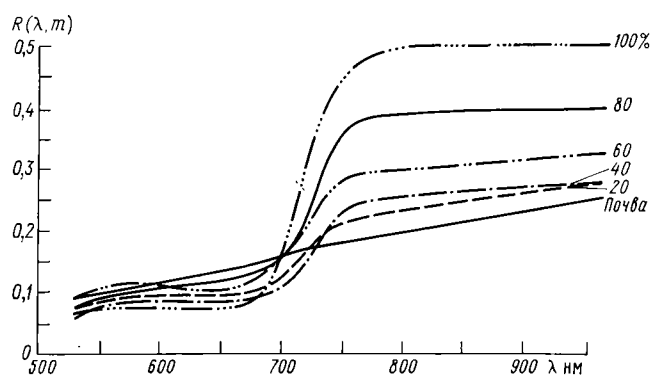


Рис. 1.7. Кривые спектральной яркости посевов озимой пшеницы в фазе колошения при различных значениях проективного покрытия (%) на обыкновенном черноземе.

По мере роста сельскохозяйственных культур затеняется больший процент почвы и область почвы, непосредственно освещенная Солнцем, уменьшается, таким образом, большая часть общего отраженного излучения приходится на посевы. Низкие растения не имеют достаточно большой массы и большого листового индекса и не затеняют больших участков земли. Следовательно, в этой стадии отражение почвы является основным фактором, влияющим на общую картину отражения.

Направление рядков (восток—запад, север—юг) также сказывается на общей картине отражения в разное время дня. Например, в солнечный полдень при рядках, ориентированных с востока на запад, затенена большая часть почвы, чем при ориентации с севера на юг, а сразу после восхода и перед заходом солнца при рядках, ориентированных с севера на юг, затенена большая часть почвы, чем при рядках, ориентированных с востока на запад.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, применительно к посевам сельскохозяйственных культур можно сказать, что каждый вид имеет свое собственное спектральное изображение или свой набор признаков, который зависит от морфологии растений, вегетационного периода, геометрии покрова и др. Более точная классификация может быть получена при помощи многоспектрального анализа. Опыт показывает (рис. 1.6, 1.7), что наиболее оптимальными диапазонами являются зеленый, красный и ближний инфракрасный участки спектра.

Качество классификации улучшается, если использовать естественное различие во времени прохождения фаз развития некоторых сельскохозяйственных культур. В частности, в осенний и ранневесенний период могут быть выявлены поля с посевами озимой пшеницы, когда другие культуры не вегетируют. Наибольшую проблему при распознавании составляют сорняки. При этом важную роль играет соотношение высоты сорняков и культурной растительности.

Как было указано выше, биометрические параметры, характеризующие состояние посевов сельскохозяйственных культур, такие, как проективное покрытие, биомасса, площадь листовой поверхности, могут быть определены по измерениям в красной и ближней инфракрасной областях спектра или по соотношениям результатов измерений в этих двух участках спектра. Перечисленные параметры во многом определяют урожай сельскохозяйственных культур. Однако последние исследования показали, что одним из факторов, влияющих на урожай, является наличие воды в растениях, которое может быть оценено по измерениям КСЯ вблизи участков спектра 1,45 или 1,93 мкм.

Это объясняется тем, что для поддержания обменных функций листьев требуется критический водный потенциал. Если водный потенциал опускается ниже критического уровня, функции фотосинтеза и дыхания нарушаются и растение может погибнуть. Температура такого стрессового растительного покрова на 10—20° выше температуры окружающей среды.

Недостаток питательных веществ также влияет на внутреннюю структуру листьев и обменные процессы, что в свою очередь влияет на отражение и поглощение на различных длинах волн. Подобное воздействие оказывают и болезни растений, поэтому многие заболевания могут быть обнаружены на различных длинах волн.

**1.1.3. Ледяной покров.** Чистый лед полностью прозрачен для лучей видимого света. Поглощающая способность льда определяется по экспоненциальному закону

$$I = I_0 \exp(-kx),$$

где  $I$  — интенсивность света после прохождения им льда толщиной  $x$  см,  $I_0$  — интенсивность падающего света,  $k$  — коэффициент ослабления.

Так как лед в естественном состоянии содержит инородные включения, на которых происходит рассеяние световых лучей, то прозрачность такого льда сравнительно невелика.

Важным свойством льда является двойное лучепреломление. Как известно, лед представляет собой одноосевой кристалл. Для морского льда харак-

терна следующая кристаллическая структура: у поверхности морского льда преобладают кристаллы с вертикальными с-осями, на глубине с-оси почти

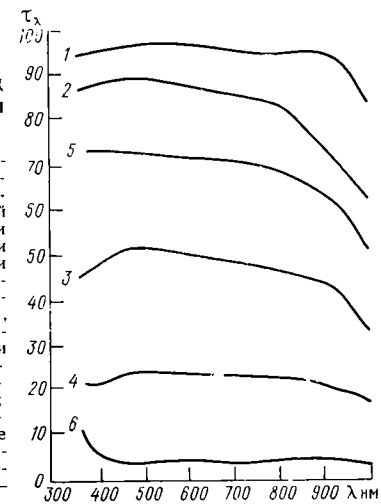


Рис. 1.8. Спектральный ход коэффициентов пропускания льда и снега.

1 — монолитный крупнокристаллический лед, лишенный каких-либо включений,  $\rho=0,9170$ , температура — 16,4 °С; 2 — пресный лед с трубчатыми воздушными включениями, сильно развитыми в вертикальном направлении и имеющими вид трубок, цилиндров, цепочек пузырьков, капилляров с сечением около 1 мм,  $\rho=0,8948$ ; 3 — пресный мелкопузырчатый лед с включениями в виде пузырьков воздуха круглой и овальной формы размерами менее 2 см,  $\rho=0,8765$  г/см<sup>3</sup>; 4 — поверхностный слой пакового льда; 5 — нижележащие слои пакового льда с вертикально-волокнистыми включениями,  $\rho=0,91$  г/см<sup>3</sup>; 6 — снег,  $\rho=0,28$  г/см<sup>3</sup>.

полностью ориентированы горизонтально. Ледяной покров пресноводных озер либо имеет кристаллическую структуру, аналогичную структуре морского льда, либо состоит полностью из кристаллов с вертикальными осями.

Результаты исследования спектральной прозрачности снега и некоторых разновидностей льда приведены на рис. 1.8. Значение коэффициентов пропу-

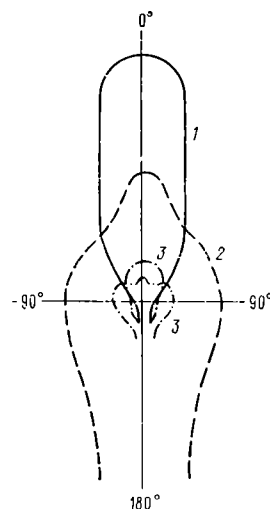


Рис. 1.9. Индикатрисы рассеяния для льда.

1 — монолитный пресный лед; 2 — пузыристый пресный; 3 — морской лед двух типов.

скания  $\tau$  в видимой области для различных видов льда лежат в пределах от 95 до 23 %. Ход кривых коэффициента пропускания показывает, что в видимой области спектра лед практически неселективен. Тенденция к уменьшению величины  $\tau$  наблюдается при переходе к близкой инфракрасной области спектра.

Вид индикатрис рассеяния для различных образцов льда зависит от размеров, формы и концентраций инородных включений (рис. 1.9). Едва различимые изменения в структуре значительно влияют на вид индикатрис рассеяния.

Ледяной покров на морях обладает почти такими же яркостными характеристиками, как и снежный покров в ближнем ИК интервале спектра, вследствие сильного поглощения этих световых волн увлажненным льдом (рис. 1.10—1.11).

Лед на реках и водохранилищах в отличие от морского льда характеризуется относительной однородностью, большей прозрачностью и более глад-

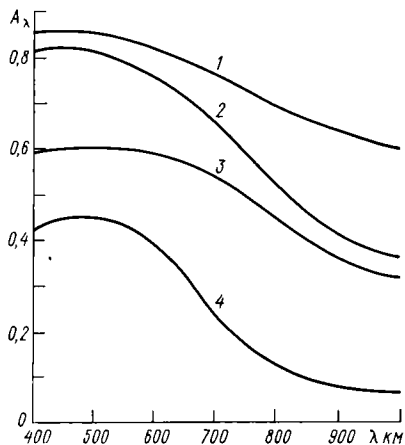


Рис. 1.10. Спектральное альbedo чистого морского льда.

1 — многолетний лед, 2 — тающий многолетний лед, 3, 4 — предельные кривые для тающего однолетнего льда.

кой поверхностью. Альbedo такого ледяного покрова составляет 0,36—0,40. Присутствие на нем слоя воды 15—20 см снижает альbedo смеси до 0,26. Отметим также, что ледоход и ледостав на реках связаны с образованием шуги, альbedo которой приближается к альbedo сильно пористого речного льда (0,40). Коэффициент поглощения лучистой энергии для шуги близок к значению коэффициента

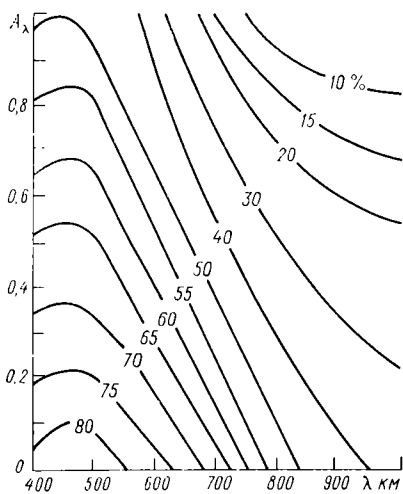


Рис. 1.11. Спектральное альbedo многолетнего льда в зависимости от содержания (%) на нем снежинок (разводья отсчитывают).

поглощения снега, пропитанного водой, и составляет примерно 0,53.

**1.1.4. Снежный покров.** Отражательные характеристики снега зависят от многих факторов: возраста, влажности, кристаллизации, фактуры поверхности и ее загрязненности, высоты и азимута освещения и т. д. (табл. 1.3—1.4).

Лабораторные эксперименты по исследованию оптических свойств снега показали, что на длинах волн 0,63, 1,15, 3,39, 10,6 мкм отражение сухого рыхлого снега близко к диффузному, что также справедливо и для уплотненного снега при зенитных углах Солнца, меньших 45°. Установлено, что в процессе таяния значения КСЯ снега уменьшаются (рис. 1.12).

**1.1.5. Водные объекты.** При дистанционном зондировании водных объектов применяются активные и пассивные методы. В первом случае с ИСЗ на зондируемую водную поверхность направляется

Таблица 1.3  
Средние значения интегрального альbedo (A) в видимой части спектра снежного покрова

Характеристика снега	A	Характеристика снега	A
Чистый, сухой свежавывающий	0,75—0,85	Влажный	0,60
Чистый, в начале таяния	0,70	Чистый влажный	0,55
Чистый тающий влажный	0,65	Тающий, мокрый	0,50
Старый чистый	0,60	Старый слабозагрязненный	0,45
Перелетовавший	0,60	Грязный влажный	0,40

излучение определенного спектрального состава и регистрируется отраженное излучение. Во втором

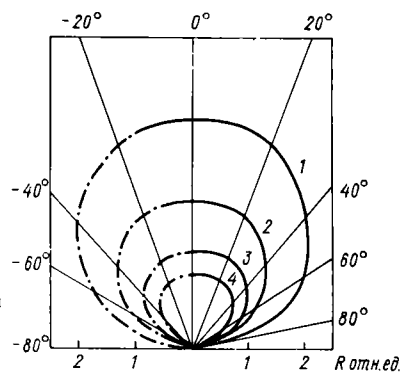


Рис. 1.12. Угловое распределение излучения, отраженного сухим и тающим снегом.

1 — сухой свежавывающий снег, 2 — слегка подтаявший снег, 3 — тающий снег, 4 — растаявший снег (зенитный угол Солнца  $i=30^\circ$ ).

случае регистрируется тепловое излучение водной поверхности или отраженная и рассеянная солнечная радиация. Интенсивность солнечного света (излучение Солнца и рассеянное небом излучение), попадающего в воду, уменьшается в результате поглощения и рассеяния, обусловленных свойствами собственно воды, а также в результате дифракции и отражения, вызванных присутствием в воде взвешенных частиц. Морская вода содержит три оптически активных компонента — чистую воду, растворенные вещества (неорганические и органические) и взвесь (минеральную и органическую). Общая типичная зависимость показателя ослабления  $\gamma$  от длины волны  $\lambda$  для разных составляющих морской воды приведена на рис. 1.13. Наиболее подробно изучены изменения свойств воды в зависимости от солености и температуры

Таблица 1.4  
Коэффициент спектральной яркости снежного покрова

Характеристика снега	Длина волны, мкм					
	0,380	0,450	0,550	0,612	0,660	0,900
Чистый сухой	0,91	0,95	0,94	0,95	0,88	—
Мокрый	0,70	0,77	0,78	0,80	0,77	—
Засоренный мокрый	0,56	0,63	0,65	0,67	0,58	0,46
Пятнистый (80%), старая трава (20%)	0,81	0,49	0,50	0,53	0,40	0,31
Пятнистый (20%), старая трава (80%)	0,08	0,21	0,26	0,29	0,20	0,22

в области длин волн до 20 мкм. Влияние нефтяных и биологических загрязнений на оптические свойства воды изучены еще недостаточно.

Цвет моря зависит не только от оптических свойств воды, но и от условий освещенности моря прямым солнечным и рассеянным светом неба, от угла зрения, волнения и других причин. Характерной особенностью индикатрис рассеяния морской воды является их резкая вытянутость в направлении падающего пучка. Это связано с при-

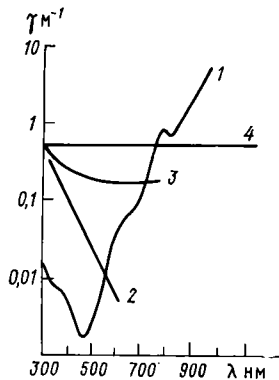


Рис. 1.13. Спектральная зависимость показателя ослабления для морской воды.

1 — показатель ослабления света в идеально чистой воде; 2 — показатель ослабления света растворенными органическими веществами; 3 — показатель ослабления света малыми, главным образом минеральными частицами; 4 — показатель ослабления света крупными частицами биологического происхождения (диатомовые водоросли, фораминиферы, органический детрит и др.). Кривая 1 дана в абсолютном масштабе, масштаб других кривых зависит от концентрации соответствующего компонента.

сутствием в морской воде большого количества крупных прозрачных частиц, показатель преломления которых близок к единице. Индикатрисы рассеяния в чистых водах заметно изменяют свою форму при изменении длины волны — при уменьшении  $\lambda$  их вытянутость уменьшается, что происходит за счет вклада молекулярного рассеяния.

Распределение энергии прямых солнечных лучей между отраженным от поверхности светом и светом, вошедшим в водную среду после преломления у ее поверхности, зависит от двух факторов: угла падения, который в данном случае дополняет до  $90^\circ$  высоту Солнца, и от показателя преломления воды. По мере уменьшения высоты Солнца энергия отраженного света возрастает, а энергия света, входящего в воду, уменьшается. Большие трудности возникают при учете распределения энергии диффузного света, так как необходимо учитывать как разнообразие углов падения, так и неодинаковую яркость света, исходящего от различных участков небесного свода.

Морская вода рассеивает свет по разным направлениям очень неравномерно. Большая часть рассеянного света сосредоточена под малыми углами.

При исследовании различных факторов, определяющих закономерности альbedo для прямой и рассеянной радиации, видно, что основной из них — высота Солнца. Влияние облачности на альbedo для суммарной радиации проявляется главным образом при малых (до  $30^\circ$ ) высотах Солнца: альbedo при пасмурном небе меньше, чем при безоблачном. При высотах Солнца больше  $30^\circ$  зависимость альbedo от облачности выражена слабее и является обратной; значения альbedo при облачном небе несколько больше, чем при ясном.

Обратное рассеяние радиации морем практически не зависит от высоты Солнца, но существенно меняется в зависимости от прозрачности до 4% при малой прозрачности по отношению воды: от 0,4% при хорошей прозрачности к па-

дающему на поверхность потоку суммарной радиации.

Наиболее сложно учесть влияние волнения на величину альbedo для суммарной радиации. Большинство данных измерений и теоретических расчетов показывает, что альbedo взволнованной поверхности при малых высотах Солнца уменьшается, а при больших увеличивается по сравнению с альbedo для гладкой поверхности.

## 1.2. Искажающее влияние атмосферы

Влияние атмосферы на результаты дистанционных измерений проявляется в увеличении яркости темных объектов и уменьшении яркости светлых объектов, в сложном преобразовании спектра отраженного и собственного излучения природных

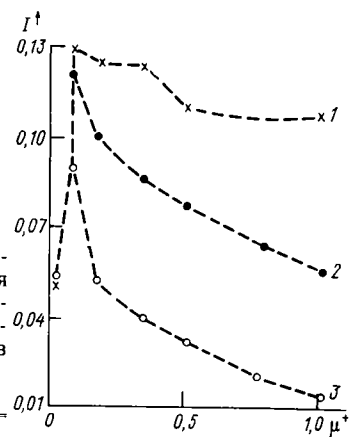


Рис. 1.14. Зависимость интенсивности уходящего излучения от угла визирования однородного природного объекта с альbedo  $A=0,30$  для разных углов Солнца.

1)  $\cos \tilde{z}=0,9$ ; 2)  $\cos \tilde{z}=0,5$ ; 3)  $\cos \tilde{z}=0,1$ .

образований, а также в изменении структуры поля уходящего излучения. Например, даже в случае равновероятного по углам отражения на уровне земной поверхности (по закону Ламберта) яркость визируемых через атмосферу объектов может возрастать или убывать (в зависимости от состояния атмосферы) при переходе от надирных углов визирования к наклонным.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования в области атмосферной оптики указывают на возможность применения теории переноса для учета искажающего влияния атмосферы. На трансформацию уходящего излучения в видимой и ближней ИК областях спектра оказывает влияние рассеяние и поглощение излучения газовыми и аэрозольными субстанциями атмосферы, степень поляризации отраженного и рассеянного излучения, турбулентные пульсации плотности атмосферы и т. п. Большинство этих эффектов учитывается при решении соответствующей краевой задачи переноса излучения.

Для учета искажающего влияния атмосферы требуется знание параметров атмосферы, влияющих на перенос излучения: химического состава, концентраций и функций распределения аэрозольных частиц по размерам, а также концентраций газовых компонентов атмосферы.

На рис. 1.14—1.18 приведены некоторые спектральные и угловые ( $\mu^\dagger = \cos \theta$ ) зависимости нормированной на солнечную постоянную интенсивности излучения, уходящего с верхней границы

атмосферы, для некоторых моделей атмосферного аэрозоля. Для расчетов использовались как средние статистические данные об атмосферных параметрах, так и экспериментальные данные пря-

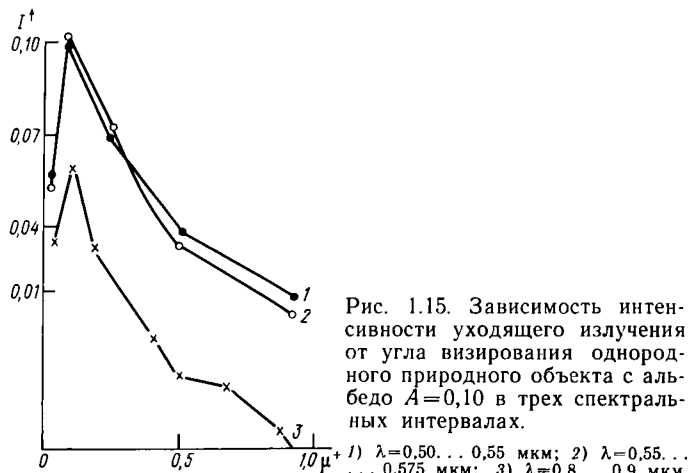


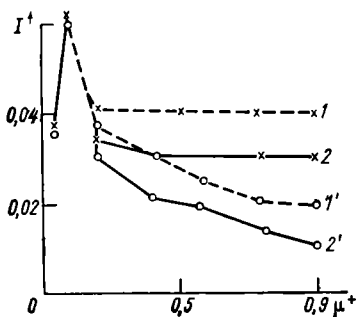
Рис. 1.15. Зависимость интенсивности уходящего излучения от угла визирования однородного природного объекта с альбедо  $A=0,10$  в трех спектральных интервалах.

1)  $\lambda=0,50 \dots 0,55$  мкм; 2)  $\lambda=0,55 \dots 0,575$  мкм; 3)  $\lambda=0,8 \dots 0,9$  мкм.

мых измерений, проведенных ЛГУ (модель сильного влияния аэрозоля), ИФА (модель слабого влияния аэрозоля).

Рис. 1.16. Влияние атмосферной индикатрисы рассеяния на угловое распределение интенсивности уходящего излучения.

$I$  — релеевская индикатриса рассеяния каждого слоя атмосферы при  $A=0,80$ ,  $I'$  — при  $A=0$ ; 2 — реальная индикатриса при  $A=0,80$ ,  $2'$  — при  $A=0$ .



На рис. 1.19 приведены примеры искажающего влияния атмосферы для трех типов природных образований.

С задачей учета искажающего влияния атмосферы тесно связана задача учета влияния неоднородности земной поверхности на данные дистанционных измерений.

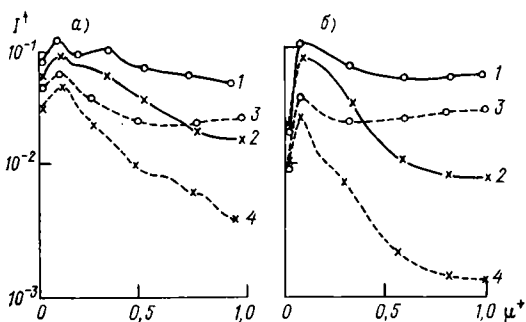


Рис. 1.17. Зависимость интенсивности уходящего излучения от угла визирования.

$a$  — идеально прозрачная атмосфера без аэрозоля,  $b$  — атмосфера над континентом; 1, 2 — при  $\Delta\lambda=0,50 \dots 0,55$  мкм, 3, 4 — при  $\Delta\lambda=0,8 \dots 0,9$  мкм, 1, 3 — при  $A=0,80$ , 2, 4 — при  $A=0$ .

родности земной поверхности на данные дистанционных измерений. Как правило, учет искажающего влияния атмосферы сводится к решению краевой задачи переноса излучения над ортотропной и горизонтально-однородной поверхностью Земли.

При этих ограничениях опробовано большинство существующих методов обработки данных дистанционных измерений.

Приведенные выше примеры зависимостей отражательной способности почвенного, расти-

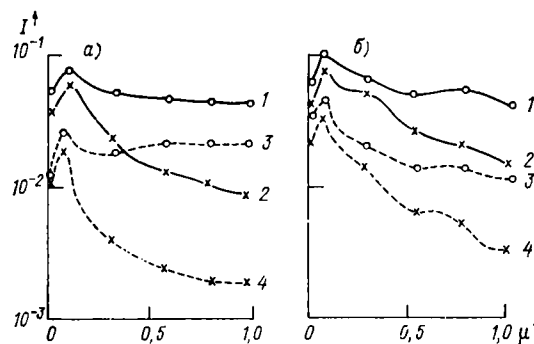


Рис. 1.18. Зависимость интенсивности уходящего излучения от угла визирования.

$a$  — атмосфера над океаном,  $b$  — атмосфера над континентом зимой; 1, 2 — при  $\Delta\lambda=0,50 \dots 0,55$  мкм, 3, 4 — при  $\Delta\lambda=0,8 \dots 0,9$  мкм, 1, 3 — при  $A=0,80$ , 2, 4 — при  $A=0$ .

тельного, ледяного и снежного покровов, а также водных объектов от различных факторов указывают на разнообразие соответствующих зависимостей и сложность законов формирования поля отраженного излучения [1—12]. Дистанционные методы изучения природной среды характерны тем, что в этом случае затруднительно точное

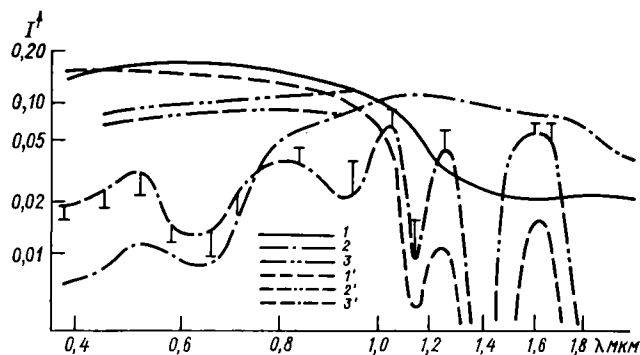


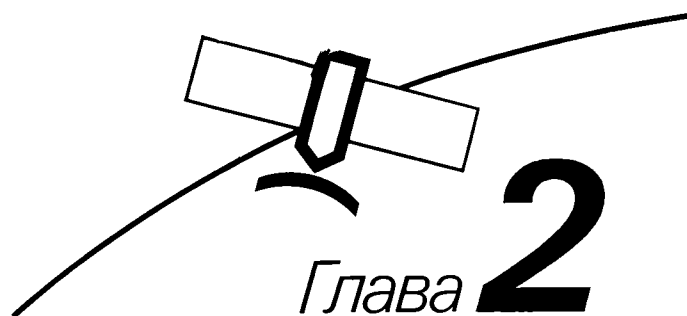
Рис. 1.19. Спектральная яркость природных образований ( $\cos z=0,6$ ).

1 — снежный покров, 2 — растительный покров (трава), 3 — геологические обнажения (светлый песок),  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  — соответственно яркость этих объектов, регистрируемая с ИСЗ в надири.

повторение эксперимента вследствие существенной пространственной и временной изменчивости самой среды, условий ее освещения Солнцем, условий регистрации и т. д. Поэтому физико-математической основой изучения природной среды являются статистические методы взаимодействия излучения со случайно-неоднородными средами, статистические методы распознавания и оценки состояния. Наряду с разработкой указанных методов требуется формализованное описание природной среды с помощью наборов параметров. В целом можно отметить, что необходимо дальнейшее развитие теоретических методов и постановка специальных экспериментов для учета основных закономерностей и формирования поля отраженного излучения при анализе данных дистанционных измерений.



# Искусственные спутники Земли „Метеор” и „Метеор—Природа”



## 2.1. Требования к космическим аппаратам, предназначенным для изучения природных ресурсов Земли

На первых порах применения спутников для метеорологии главным считалось получить из космоса геометрические изображения облачного, ледяного и снежного покровов и выполнить их географическую привязку. Это делалось с помощью телевизионных кадровых систем. В современной космической технике применяются в основном приборы (радиометры и спектрометры), использующие принцип сканирования по местности и по спектру, суть которого поясняется на рис. 2.1. Принцип оптико-механического сканирования по местности заключается в последовательном просмотре отдельных элементов поверхности Земли поперек траектории спутника специальным качающимся или вращающимся зеркалом. Применяется также и электронное сканирование. Воспринятое объективом прибора излучение через специальные фильтры, разделяющие его на необходимые поддиапазоны, фокусируется на фотоприемниках, преобразуется в элек-

трические сигналы, кодируется и затем передается на Землю. В приборы вводятся специальные калибровочные сигналы (от эталонных излучателей или из космоса), позволяющие не только получать изображения, но и поэлементно измерять распределение спектральных интенсивностей излучения различных природных образований. Высота орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ) и угол качания зеркала относительно вертикали определяют ширину полосы обзора земной поверхности. Беспрерывный обзор Земли (строка за строкой) обеспечивается за счет движения спутника вдоль траектории полета. Как правило, за один шаг сканирования просматривается сразу несколько строк. Сканирование по спектру обеспечивается специальными управляемыми фильтрами (см. раздел 3).

Для решения комплекса задач изучения Земли из космоса методами дистанционного зондирования необходимо, чтобы спутниковая измерительная подсистема и сам космический аппарат обеспечивали [4]:

- постоянную или регулируемую периодичность получения информации об одних и

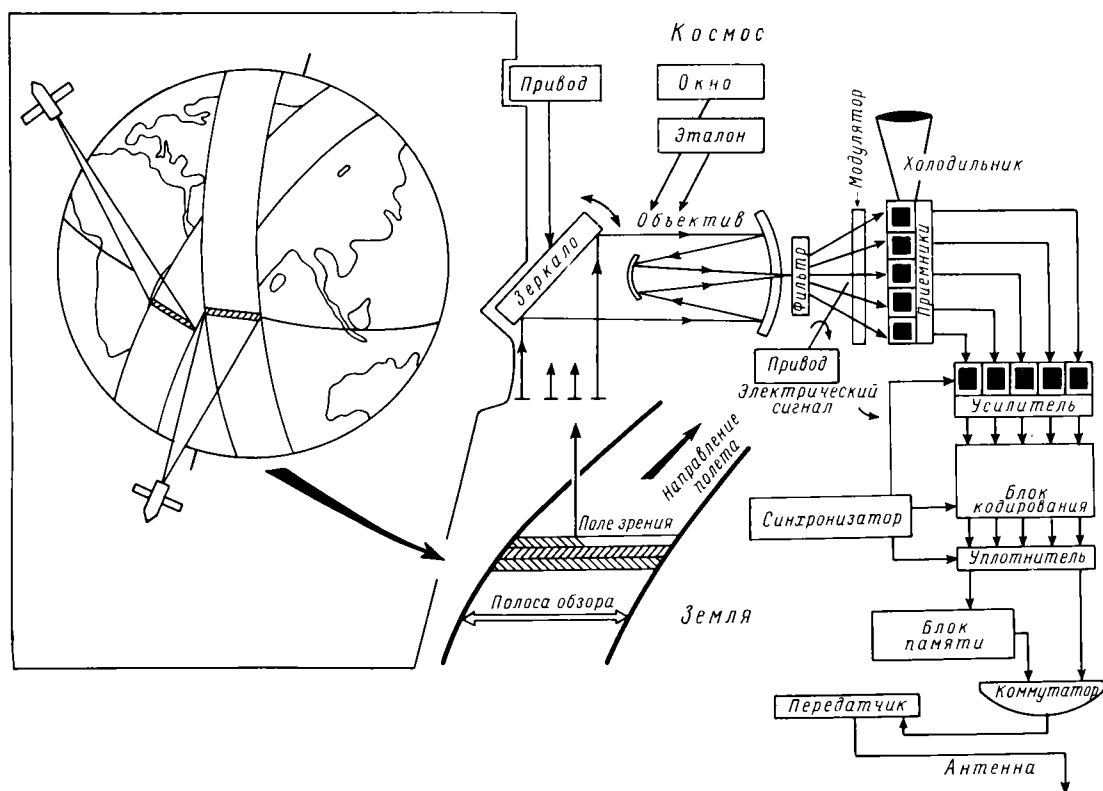


Рис. 2.1. Принципиальная схема работы многозональной оптико-механической сканирующей аппаратуры.

- тех же регионах Земли при приблизительно одинаковых условиях освещенности;
- оптимальное сочетание глобального обзора земной поверхности с возможностями получения локальной информации детального осмотра;
  - возможность одновременного (синхронного) проведения комплексных измерений;
  - возможность получения многозональной информации с заданным пространственным и спектральным разрешением;
  - возможность осуществления географической привязки изображений к местности с заданной точностью и т. п.

С этой целью на космических аппаратах (КА) для дистанционного зондирования устанавливаются бортовой информационно-измерительный радиотехнический комплекс (БИРК). В БИРК входят несколько датчиков информации (многозональных сканеров), работающих одновременно, блок управления, общее устройство синхронизации, кодирования и уплотнения, объединяющее отдельные виды информации в единый информационный поток, запоминающие устройства для регистрации информации вне зон радиовидимости и необходимые радиолинии (передатчики и антенно-фидерные устройства). Датчики информации различаются диапазонами спектральных измерений, значениями разрешений и размерами полос обзора на местности.

Анализ системных требований и принципов построения информационной аппаратуры дистанционного зондирования для космических аппаратов показывает, что и сами КА должны обладать рядом специфических особенностей.

Чтобы обеспечить постоянное наблюдение за Землей с необходимой точностью географической привязки измерений, космические аппараты должны прежде всего иметь высокую точность ориентации (на Землю и по вектору скорости спутника) и стабилизации собственных угловых скоростей вращения аппарата вокруг центра масс. Точность ориентации и стабилизации должна быть тем выше, чем выше пространственная разрешающая способность аппаратуры дистанционного зондирования и чем точнее требования географической привязки. Особое внимание должно быть уделено динамическим характеристикам космического аппарата, чтобы не допустить ухудшения качества информации, вызванного некомпенсированными возмущающими моментами в аппаратуре спутника.

Программа исследования природных ресурсов методами дистанционного зондирования предусматривает возможность установки на космическом аппарате комплекса информационных приборов, нескольких радиолиний и обеспечения одновременного включения этих приборов в различных режимах. Поэтому для такого космического аппарата требуется достаточно мощная система энергоснабжения с большим динамическим диапазоном нагрузок и сложной логикой управления. Многорежимность работы съемочной аппаратуры в совокупности с выбором определенных сочетаний районов получения и передачи данных вызывает потребность в специальном программно-временном устройстве с долговременной памятью или

в использовании управляющей ЭВМ на борту космического аппарата. Большие массивы накапливаемой и передаваемой информации в сочетании со стремлением экономить бортовые энергоресурсы и ограниченностью зон радиовидимости наземных пунктов приема требуют применения узконаправленных ориентированных бортовых антенн, иногда со специальными электроприводами наведения. Поскольку аппаратура является измерительной, то требуется обеспечить постоянство температурного режима, а иногда и «глубокое» охлаждение ее датчиков. Кроме того, необходимо защитить чувствительную аппаратуру от помех и влияния сравнительно мощных электротехнических систем в широком диапазоне спектра электромагнитных волн.

Срок службы космического аппарата (КА) и его систем должен быть не менее двух лет. Такие космические аппараты должны обладать способностью достаточно длительное время, особенно в эксплуатационном режиме, работать автономно, без информационных связей с наземными комплексами управления.

Конструкция космического аппарата должна обеспечивать высокую динамическую точность и температурную стабильность установки измерительных приборов относительно осей аппарата, быть достаточно универсальной и позволять сравнительно легко устанавливать различные наборы измерительной и информационной аппаратуры. Конструкция аппарата должна быть рассчитана на использование специальных двигателей для начальной установки необходимой орбиты и ее коррекции в процессе эксплуатации.

Всеми этими качествами в значительной степени обладают космические аппараты серии «Метеор» первого и особенно второго поколения. Созданные первоначально для метеорологических целей, они удовлетворяют большинству требований дистанционного зондирования Земли и поэтому были положены в основу реализации экспериментальной программы изучения природных ресурсов Земли (ИПРЗ) из космоса, получившей название «Метеор — Природа».

## 2.2. Конструкция космических аппаратов

Обобщенная структурная схема космического аппарата, предназначенного для исследования природных ресурсов Земли [4], дана на рис. 2.2. В этой схеме выделен бортовой комплекс управления (БКУ), включающий в себя системы, необходимые для обеспечения энергоснабжения и терморегулирования космического аппарата (система энергетика), для поддержания определенного положения космического аппарата относительно ориентиров (система ориентации), для поддержания стабильных орбитальных параметров (система коррекции), для контроля состояния спутника и управления его работоспособностью и программой бортовых информационных систем (система контроля и управления), а также бортовой информационный радиотехнический комплекс (БИРК), который осуществляет основную целевую функцию — получение и передачу на наземные приемные пункты информации дистанционного зондирования.

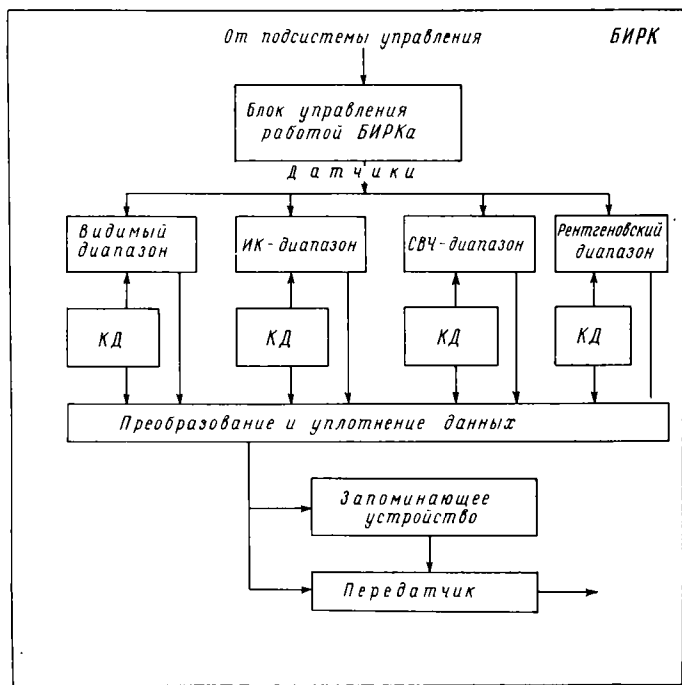
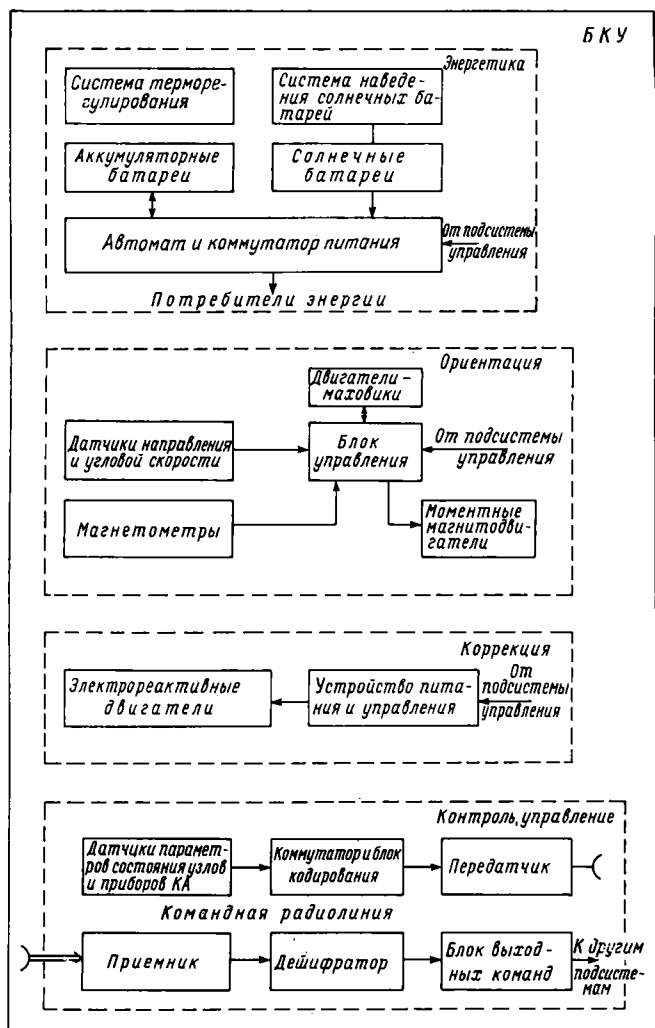


Рис. 2.2. Структурная схема космического аппарата, предназначенного для исследования природных ресурсов. Информация рентгеновского и СВЧ диапазона в настоящей книге не рассматривается. КД — калибровочные данные.

Энергопитание космических аппаратов осуществляется от плоских солнечных батарей, автономно (независимо от корпуса спутника) ориентируемых на Солнце с помощью специального датчика и приводного устройства. Важной особенностью системы ориентации солнечных батарей является компенсация возмущающего момента,

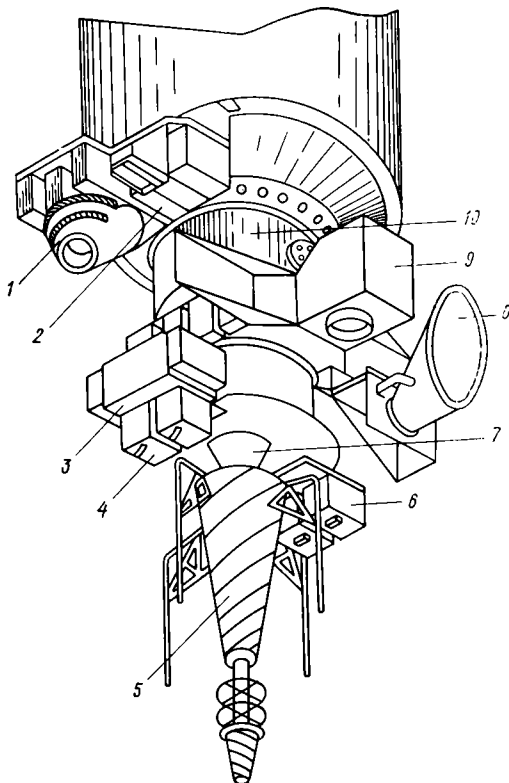


Рис. 2.3. Конструктивная схема приборного комплекса космического аппарата «Метеор—Природа».

1 — экспериментальный сканер среднего разрешения, 2 — экспериментальный сканер на ПЭС-структурах, 3 — моноблок автоматики информационного комплекса, 4 — сканер малого разрешения РТВК, 5 — комплекс АФУ, 6 — сканер среднего разрешения РТВК, 7 — построитель местной вертикали, 8 — радиационный холодильник, 9 — телевизионный многозональный комплекс «Фрагмент», 10 — отсек газореактивной системы успокоения.

образующегося при движении батарей, за счет использования специального маховика. Питание бортовых систем в тени Земли, а также в период «пиковых» нагрузок, производится от аккумуляторных батарей. Регулирование процесса заряда и разряда этих батарей, поддержание необходимых уровней напряжения и распределение питания производится автоматом и коммутатором питания. Система терморегулирования поддерживает необходимый тепловой режим аппаратуры спутника, управляя процессами поглощения и отражения радиационной поверхностью космического аппарата тепла, приходящего от Солнца и Земли, а также излучения тепла, выделяемого аппаратурой спутника. Для выравнивания внутреннего температурного поля служат вентиляторы, обеспечивающие движение охлаждающего газа внутри герметичного корпуса космического аппарата при отсутствии конвекции в невесомости. Для поддержания стабильности температуры аппаратуры, установленных вне корпуса космического аппарата в условиях открытого космоса используются также тепловые трубы и специальные нагреватели.

Важную роль в обеспечении высокого качества, минимизации геометрических искажений, в повышении точности географической привязки получаемой информации играет система ориентации и стабилизации спутника. Эти функции осуществляет активная электромеханическая система ориентации и стабилизации корпуса аппарата. Чувствительные элементы системы вырабатывают сигналы, пропорциональные угловым отклонениям осей космического аппарата от заданных направ-

ветствующий поворот корпуса КА и восстановление его ориентации. Одновременно, в соответствии с законом о постоянстве кинетического момента (момента импульса), угловая скорость движения корпуса аппарата понизится до нужного предела, система управления прекратит подачу управляющего воздействия на маховик. После возрастания скорости маховика, а следовательно, и его кинетического момента до максимального значения маховик теряет управляющие свойства

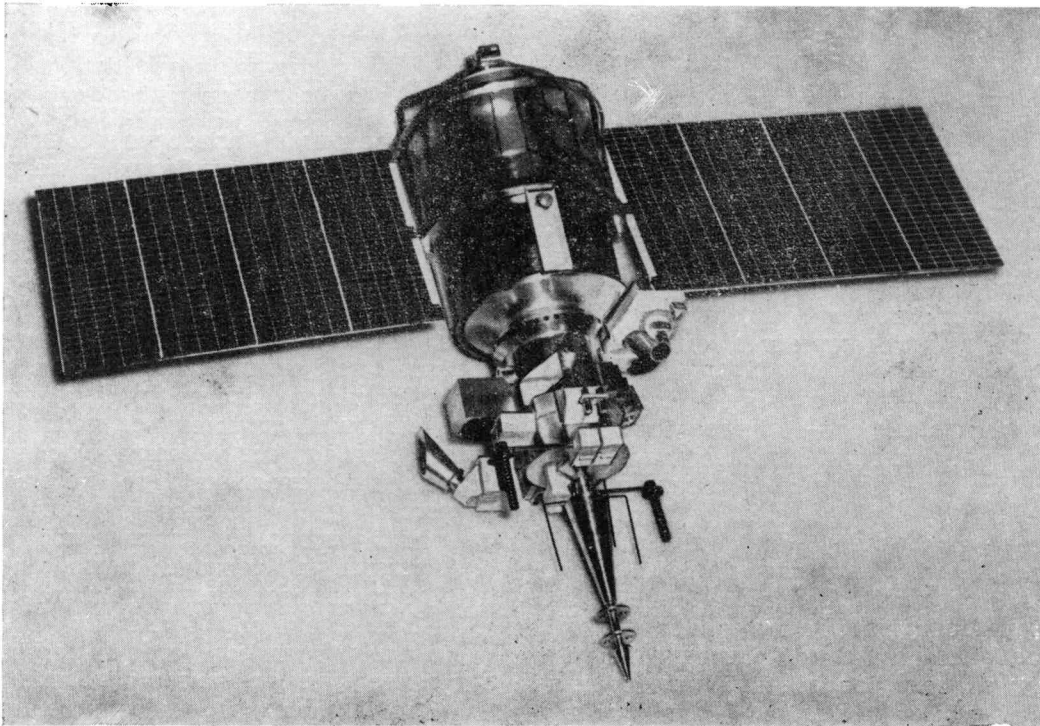


Рис. 2.4. Общий вид одного из космических аппаратов «Метеор—Природа».

лений и угловым скоростям движения аппарата вокруг центра масс. Датчиком направления на Землю является построитель местной вертикали, который «осматривает» видимый со спутника горизонт Земли в инфракрасном диапазоне спектра и при отклонении продольной оси спутника от направления к центру Земли («местной вертикали») выдает соответствующие сигналы в блок управления. В основе определения курса (направления полета) с помощью так называемого гироскопа лежит свойство специального гироскопа устанавливать ось вращения вдоль направления, перпендикулярного к направлению полета КА (по бинормали к орбите). Для измерения скоростей вращения спутника по трем осям служат гироскопические датчики угловых скоростей. Сигналы от совокупности датчиков обрабатываются по специальным алгоритмам в блоке управления и, если под действием внешних возмущающих моментов они превышают заданные пределы, то включаются исполнительные органы системы — электродвигатели-маховики, расположенные по соответствующим осям космического аппарата. Реактивный управляющий момент, возникающий при нарастании скорости вращения маховика, вызывает соот-

и его необходимо «разгрузить», т. е. рассеять накопленную кинетическую энергию. Для этой цели используются специальные магнито-двигатели (магнитные катушки), взаимодействующие с магнитным полем Земли и создающие при этом возмущающий момент соответствующего направления. Таким образом, электромеханическая система ориентации, управляющая движением космического аппарата вокруг центра масс, действует без расхода «рабочего тела» и срок ее службы практически неограничен.

Для информационных комплексов, работающих на КА программы «Метеор—Природа», характерно одновременное использование приборов, различных по следующим основным признакам:

- по используемым для получения информации диапазонам спектра электромагнитных излучений;
- по принципам наблюдения — электромеханическое и электронное сканирование по местности и спектру, трассирование и т. д.;
- по ориентации и геометрическим формам полей обзора приборов;
- по способам передачи информации — цифровым и аналоговым с помощью телеметрических

и специальных информационных радиолиний в метровом и дециметровом диапазонах.

Стремление к реализации таких разнородных экспериментов на одном космическом аппарате потребовало решения ряда как электротехнических, так и конструктивных проблем. Среди электротехнических, помимо уже упоминавшихся вопросов обеспечения энергопитания и программно-временного управления процессами сбора и передачи информации, важное место в ходе создания и отработки КА занимало обеспечение электромагнитной совместимости столь разнообразных приборов, т. е. устранение их взаимовлияния в целях минимизации как низкочастотных помех по цепям питания, так и радиотехнических (высокочастотных) помех по эфиру. Эта проблема была наиболее острой, поскольку использование высокочувствительных приборов, измерявших в достаточно широких интервалах частот сигналы, оцениваемые в микровольтах и микроамперах, было по существу на грани тонких физических экспериментов. Найденные технические решения, позволили настолько минимизировать помехи, что серьезного влияния на конечный исход экспериментов они не оказали.

Особое внимание при разработке комплексов для КА программы «Метеор—Природа» было уделено проблеме надежности. Известно, что комплексы управления, энергетики и сама конструкция обладают высокой надежностью. Фактический срок службы в полете составляет, как правило, два-три года. Поэтому при разработке информационных приборов были реализованы принципы надежности, использованные при создании КА «Метеор», — единая программа обеспечения надежности на всех этапах разработки, изготовления наземных и летных испытаний, специальные облегченные режимы работы электрорадиоэлементов, обеспечение резервирования и функциональной избыточности, применение термостабилизационных испытаний и другие способы. В большинстве случаев это дало хороший эффект и заложило основу для создания высоконадежных информационных приборов последующих поколений.

При создании космического аппарата «Метеор—Природа» размещение и нормальная работоспособность сложных приборных комплексов были обеспечены в рамках имевшихся конструктивных основ (рис. 2.3, 2.4). При решении конструктивно-компоновочных задач реализованы следующие принципы:

— расположение на единой унифицированной платформе всех приборов с целью обеспечения максимального совпадения направлений оптических осей приборов, требующих точного наведения на Землю;

— расположение большинства приборов или их чувствительных элементов (датчиков) вне герметичного контейнера, что позволяет избавиться от иллюминаторов, снижающих общий уровень полезного сигнала; при этом приборы имеют свой собственный микроклимат, а электронные и электротехнические блоки и узлы, не рассчитанные на открытое исполнение, komponуются в виде герметичных моноблоков.

Особые трудности возникли при стремлении

совместить жесткие габаритные ограничения при размещении многоприборного комплекса с необходимостью обеспечить непересекающиеся в трехмерном пространстве разнообразные поля обзора информационной аппаратуры и достаточно широкие диаграммы направленности нескольких антенн радиотехнических передающих систем. С целью повышения надежности применялись только стационарные антенны без использования каких-либо раскрывающихся механизмов.

Работоспособность информационных приборов, качественные характеристики информации дистанционного зондирования во многом определяются соблюдением заданной термостабильности. Как известно, при установке приборов вне герметичного отсека трудности в обеспечении требуемых тепловых режимов приборов связаны с тем, что при отсутствии в приборах и между ними газовой среды исчезает возможность использования принудительной конвекции газа для выравнивания температур элементов приборов и конструкции спутника. Главную роль в указанных процессах играют теплопроводность конструкций и излучение. На основе постоянства ориентации объекта по отношению к Земле и стабильной цикличности ориентации по отношению к Солнцу, определяемых синхронно-солнечной орбитой, решены задачи теплообмена сложных систем приборов, расположенных вне герметичного отсека, с учетом их взаимных переменных затенений, реальных программ включений той или иной аппаратуры в течение витка и ее внутреннего тепловыделения. Разработаны конструкторские решения для обеспечения с точностью до нескольких градусов стабильности температуры чувствительных элементов приборов.

Комплексное использование специальных терморегулирующих покрытий, плоскостных нагревателей и радиаторов, создание конструктивных мостиков для тепла по элементам конструкций, а также отработанная и экспериментально проверенная методика тепловых расчетов каждого прибора в отдельности и их совокупности, позволили успешно решить сложную задачу обеспечения заданных, достаточно узких диапазонов температуры информационных приборов. В некоторых случаях при низких температурах ( $-40$ ,  $-50$  °C) для чувствительных элементов аппаратуры высокого разрешения использовались специальные тепловые трубы и связанные с ними охлаждающие экраны, установленные на теневой стороне космического аппарата.

Важнейшее значение для решения задач дистанционного зондирования имеет баллистическое построение космической системы, т. е. характеристики орбит ИСЗ, количество спутников на орбитах и их относительное положение и движение. Как известно, орбита искусственного спутника Земли определяется наклоном, средней высотой, эксцентриситетом и долготой восходящего узла. Для спутников ИПРЗ прежде всего необходимо, чтобы орбита была близка к круговой, т. е. чтобы расстояние от спутника до поверхности Земли было по возможности одинаково во всех точках орбиты. Тогда полученные одним и тем же прибором изображения будут иметь одинаковые масштабы и разрешения. Тре-

бования к орбитам достаточно противоречивы. Так, например, чем выше орбита, тем шире полоса обзора со спутника, выше частота наблюдений, но меньше разрешение на местности. Если увеличивать полосу обзора при той же высоте орбиты с сохранением разрешения, то повышается информативность, но увеличиваются геометрические искажения. Рост информативности ограничен мощностью бортовых передатчиков и размерами антенн.

Для спутников изучения природных ресурсов Земли при съемочной аппаратуре, имеющей пространственное разрешение 50 и 250 м и полосы обзора 200 и 600 км, выбираются орбиты высотой 600—800 км. Точное соотношение между высотой орбиты и полосой обзора выбирается так, чтобы через определенное количество суток след орбиты на Земле совпал с начальным, а за этот период весь Земной шар был осмотрен аппаратурой. Так, при полосе обзора шириной 200 км, высоте круговой орбиты около 640 км период повторных наблюдений за одними и теми же районами Земного шара будет составлять для экваториальных широт примерно 14 суток. Для средних широт, естественно, повторения будут чаще. Такие орбиты называются кратными. Высокая вероятность (60—70 % для средних широт) наличия облачности над районами наблюдения также ограничивает обзор со спутника.

Если для выполнения задачи необходим более оперативный обзор всей поверхности Земли или более частое наблюдение одних и тех же районов, то создаются космические системы из нескольких спутников.

Чтобы удовлетворить всему комплексу баллистических требований к системе ИСЗ для изучения природных ресурсов земли, нужно с достаточно высокой точностью выдерживать такие расчетные параметры орбит, как наклонение эксцентриситет и период обращения, причем не только после вывода ИСЗ на орбиту, но в течение всего периода активного существования (два — три года).

Для осмотра всего земного шара используются полярные и околополярные орбиты, плоскости которых наклонены к плоскости экватора под углом, близким к  $90^\circ$ , так как только в этом случае осматриваются и полярные районы. Желательно также проводить измерения при одинаковых высотах Солнца. Такие возможности дают солнечно-синхронные орбиты, плоскость которых поворачивается (прецессирует) синхронно с обращением Земли вокруг Солнца со скоростью около  $1^\circ$  в сутки. При этом орбитальная плоскость спутника сохраняет постоянный угол к направлению Земля—Солнце. По отношению к плоскости экватора солнечно-синхронные орбиты наклонены на  $98$ — $100^\circ$ . Выведенный на такую орбиту космический аппарат проходит над одними и теми же широтами в одно и то же местное солнечное время, т. е. при примерно одинаковых условиях освещения. Местное время, когда производится наблюдение, устанавливается путем выбора необходимого угла между плоскостью орбиты и направлением на Солнце. При угле, равном нулю, спутник проходит над наблюдаемым районом в местный полдень. Со спутника ИПРЗ целесообразно вести наблюдения в  $9$ — $11$  ч по местному времени, т. е. в период минимальной облачности.

Реализация синхронно-солнечной орбиты в СССР была впервые осуществлена при запуске космического аппарата «Метеор—Природа» в июле 1977 г. Необходимо отметить, что основные принципы конструкции космического аппарата «Метеор» позволили вывести его на орбиту и обеспечить нормальную длительную работоспособность на ней практически без особых конструктивных изменений. Доработке подверглись лишь элементы системы ориентации и программно-управляющие устройства в связи с изменением высоты полета.

Большой интерес для решения задач дистанционного зондирования представляет установка не просто кратной орбиты, а такой, при которой трасса космического аппарата с заданной периодичностью проходит через определенный район, например через тестовый (измерительный) полигон, где одновременно проводятся подспутниковые (самолетные и наземные) наблюдения с целью разработки единых методик интерпретации космической информации. Пути решения такой задачи были отработаны в процессе эксперимента с КА «Метеор—Природа», осуществленного по программе «Болгария-1300», причем точность наведения трассы на нужный район составила  $5$ — $10$  км при четырехсуточном периоде повторения наблюдений.

Практически все современные ракеты-носители, выводящие КА на орбиты, обладают ограниченными точностями, т. е. параметры начальных орбит имеют значительные пределы возможных отклонений от расчетных значений. Например, американская ракета-носитель «Атлас-Е» выводит КА «Тайрос-Н» на орбиту со средним разбросом высот до  $37$  км (при нормальной высоте  $830$  км), с разницей между высотой перигея и апогея до  $56$  км и отклонениями в периоде обращения до  $1$  мин. Параметры орбиты значительно изменяются под действием различных периодических и постоянных факторов, вследствие чего достаточно быстро нарушаются необходимые соотношения орбитальных параметров КА.

Для поддержания стабильности космических систем дистанционного зондирования используются корректирующие двигательные установки, которые осуществляют начальную коррекцию орбит, т. е. исправление ошибок выведения КА на начальную орбиту ракетой-носителем, и периодическую коррекцию для компенсации возмущений, накапливающихся в процессе полета.

В настоящее время для этих целей все большее применение получают так называемые электрореактивные двигатели (ЭРД) различных типов, в которых используется принцип ускорения и выброса ионизированного и нагретого до высокой температуры газа (в состоянии плазмы) с помощью электромагнитного или электростатического поля. В электрореактивных двигателях ионы газа, пройдя ускоритель, приобретают скорости в десятки км/с, тогда как в наиболее совершенных кислородно-водородных ракетных двигателях максимальная скорость составляет  $4$ — $5$  км/с. За счет большой скорости истечения ЭРД расходуют в  $5$ — $10$  раз меньше топлива при одной и той же тяге, благодаря чему уменьшается необходимый запас топлива на борту КА, а следовательно, и общий вес установки. Таким образом,

при длительных сроках службы КА применение ЭРД для обеспечения стабильности космической системы оказывается более выгодным, чем применение жидкостно-реактивных микродвигателей.

Одним из важных результатов программы «Метеор—Природа» были успешные летные испытания ЭРД и отработка методик коррекции орбит [1, 5], эксперименты вначале проводились с несколькими типами ЭРД, созданных в СССР, и по ряду показателей для дальнейших работ был выбран стационарный плазменный двигатель, который относится к классу ЭРД с замкнутым электронным дрейфом и протяженной зоной ускорения. Двигатели имели среднюю тягу 2—2,5 г. На этапе летных испытаний в 1973—1975 гг. были отработаны принципиальные вопросы работоспособности таких двигателей в космосе, надежности, стабильности тяги, исследована их электромагнитная совместимость с электрорадиотехническими системами спутника, а также проведены пробные коррекции орбит КА, в ходе которых была подтверждена возможность значительного уменьшения эксцентриситета и поддержания стабильности орбиты. Создана и отработана методика проведения оптимальных по времени и расходу электроэнергии коррекций, имевших целью установление кратных орбит (в одном из экспериментов была установлена кратная синхронно-солнечная орбита с пятисуточным периодом повторения), при этом была определена оптимальная стратегия определения участков включения корректирующей двигательной установки.

### 2.3. Этапы развития программы «Метеор—Природа»

Советская программа изучения природных ресурсов Земли из космоса с помощью спутников-автоматов «Метеор—Природа» началась в 1974 г. запуском экспериментального космического аппарата типа «Метеор», оснащенного многозональной телевизионной аппаратурой. До 1981 г. были выведены на орбиты еще четыре подобных космических аппарата: два первых выводились на орбиты высотой 900 км и наклоном  $82^\circ$ , а три последующих — на синхронно-солнечную орбиту со средней высотой 650 км и наклоном  $98^\circ$ . Все спутники программы «Метеор—Природа» успешно работали на орбитах, по полтора—два года обеспечивая регулярную передачу на Землю многозональной телевизионной информации.

Главными задачами программы «Метеор—Природа» являются:

- создание и отработка специальной аппаратуры, методов получения, передачи и обработки многозональной телевизионной информации разных классов разрешения для изучения природных ресурсов;

- отработка аппаратуры и методов коррекции траектории КА с целью обеспечения нужных орбит и наведения трасс КА на тестовые полигоны;

- создание и отработка методик обработки и интерпретации многозональной телевизионной информации в интересах различных отраслей народного хозяйства и наук о Земле;

- создание научно-технического задела для развития и усовершенствования космических аппаратов для ИПРЗ и их аппаратуры;

- накопление опыта экспериментальной эксплуатации космических аппаратов для ИПРЗ.

Основой выполнения этой программы стал установленный на всех КА «Метеор—Природа» информационный радиотелевизионный комплекс (РТВК), состоящий из двух многозональных сканеров малого (МСУ-М) и среднего (МСУ-С) разрешения, устройств запоминания информации, аппаратуры автоматики и синхронизации и двух передатчиков — дециметрового и метрового диапазонов. Все устройства РТВК дублированы. Прием многозональной информации в полном объеме производится на основных пунктах приема информации Госкомгидромета в Москве, Новосибирске и Хабаровске, а информация малого разрешения в одном из поддиапазонов принимается также на автономных (упрощенных) пунктах приема, расположенных в разных районах СССР и на некоторых научно-исследовательских судах.

С целью поэтапной проверки и отработки в реальных условиях новых информационно-измерительных средств получения многозональной космической информации высокого и среднего разрешения, а также для решения методических вопросов обработки и интерпретации измерительной космической информации для ИПРЗ в 1980—1982 гг. проводился комплексный эксперимент [2]. В этом эксперименте имелась возможность осуществлять одновременную съемку земной поверхности с помощью сканирующих устройств различного типа в 10 поддиапазонах спектра от 0,4 до 2,4 мкм с разрешением от 50 до 800 м в полосах обзора от 30 до 2000 км.

Эксперимент проводился с использованием трех комплексов бортовой и наземной информационной аппаратуры, предназначенной для наблюдения земной поверхности в интересах изучения природных ресурсов Земли [3]. На космическом аппарате второго поколения, который 18 июня 1980 г. выведен на синхронно-солнечную орбиту со средней высотой 634 км, были установлены:

- 1) экспериментальный бортовой информационный комплекс БИК-Э, в составе многозонального сканера среднего разрешения с конической оптико-механической разверткой (МСУ-СК), многозонального сканера высокого разрешения с электронной разверткой (МСУ-Э), устройства преобразования и уплотнения информации, цифрового радиопередающего устройства в диапазоне 460—470 МГц;

- 2) экспериментальная многозональная система «Фрагмент» в составе оптико-механического сканера с устройствами калибровки, системы фотоприемников с волоконно-оптическим коллектором, цифрового радиопередающего устройства в диапазоне 1000 МГц;

- 3) эксплуатационный радиотелевизионный комплекс.

На рис. 2.5 дана схема расположения полей обзора на Земле для всех приборов бортового информационного комплекса в данном эксперименте в совокупности с зоной радиовидимости одного из наземных пунктов приема информации.

В качестве базового космического аппарата

в эксперименте использовался КА второго поколения «Метеор-2», который отличается от КА «Метеор» следующими основными качествами:

— дополнительными конструктивно-компоновочными и весо-габаритными возможностями, позволившими разместить многодиапазонный при-

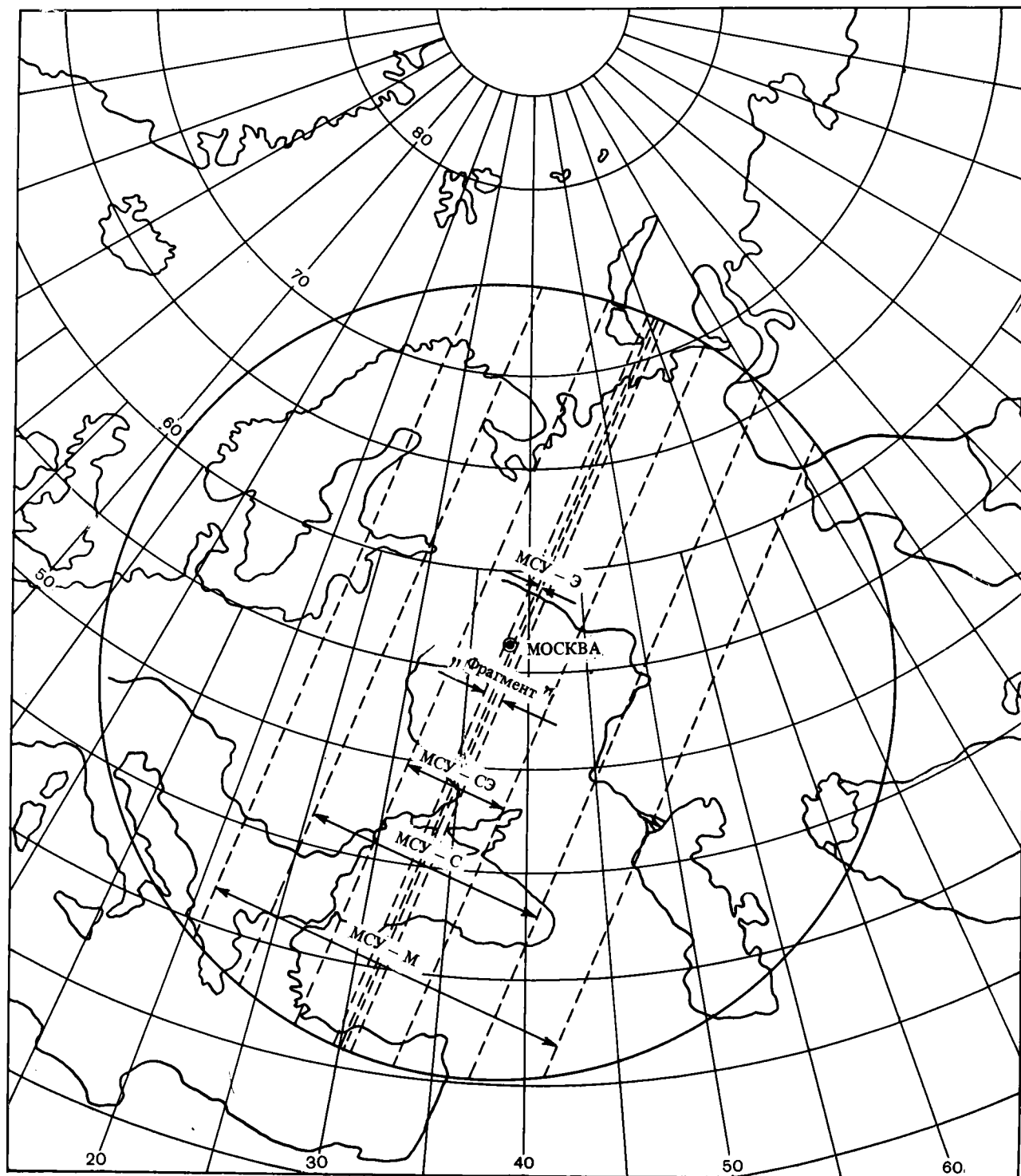


Рис. 2.5. Поля обзора для различного типа съемочной аппаратуры.

— повышенной точностью трехосной ориентации и стабилизации угловых скоростей, а также увеличенной мощностью системы энергоснабжения;

— расширенными возможностями автоматического программно-временного управления процессами получения и передачи информации, включая управление световыми режимами и уровнями чувствительности измерительной аппаратуры;

борный комплекс и несколько информационных радиолиний;

— универсальной системой автоматизированных испытаний, использующей аппаратные и программные средства и позволившей с высокой достоверностью осуществить наземные проверки добавочных приборно-информационных комплектов и обеспечить их надежную работу на орбите.



Использование более совершенного космического аппарата позволило одновременно с решением значительного количества экспериментальных задач продолжить эксплуатацию радиотелевизионного комплекса РТВК.

На космическом аппарате «Метеор—Природа», выведенном на орбиту 10 июля 1981 г., кроме аппаратуры РТВК, был установлен комплекс научной аппаратуры, созданный болгарскими учеными по программе «Болгария-1300», состоящий из многоканального спектрометра СМП-32, микроволнового трехканального радиометра РМ-2, микроволнового одноканального радиометра РМ-1, аппаратуры управления и запоминания информации.

Экспериментальные КА ИПРЗ, выведенные на орбиты в 1980 и 1981 гг., успешно работали более четырех и трех лет соответственно, при этом, хотя не все приборы оправдали возлагавшиеся на них надежды, в целом получен весьма ценный опыт по разработке и созданию перспективных приборов для дистанционного зондирования.

Для всех экспериментов с использованием КА «Метеор—Природа» характерна комплексность изучения как земной поверхности, так и атмосферы. Поэтому совместно с упомянутыми многозональными телевизионными приборами на КА «Метеор—Природа» испытывались в разных соче-

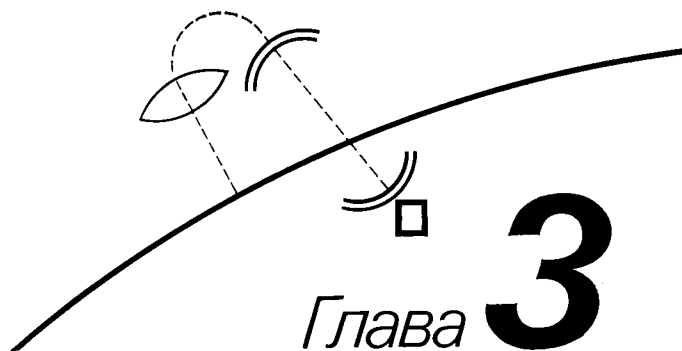
таниях еще десять приборов, работающих в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра, а также восемь приборов для исследования корпускулярных излучений и других параметров космического пространства. Большинство из них испытывалось в космическом полете впервые.

Главным итогом отработки основной информационной системы КА «Метеор—Природа» — многозонального комплекса — и космического аппарата в целом явился переход от отдельных экспериментов к опытной эксплуатации этой космической системы в составе одного-двух космических аппаратов и трех наземных пунктов приема и обработки в течение четырех-пяти суток.

За время эксплуатации этой системы с помощью многозональной аппаратуры малого и среднего разрешения территория Советского Союза снята более 600 раз, т.е. практически общий обзор территории осуществлялся в среднем информации.

Одновременно с получением информации в интересах народного хозяйства, при разработке и летных испытаниях КА «Метеор—Природа» впервые в отечественной практике был решен ряд проблем, важных для развития космической техники дистанционного зондирования.

# Радиотелевизионные комплексы спутников „Метеор—Природа”



Разнообразие задач природоведения требует создания и оптимального использования при съемке поверхности Земли со спутника телевизионной аппаратуры, различающейся по таким параметрам, как ширина обзора и разрешение на местности, спектральные съемочные диапазоны, оперативность получения информации и т. п.

из которых являются четырехзональные оптико-механические сканирующие устройства малого разрешения МСУ-М и двухзональные оптико-механические устройства среднего разрешения МСУ-С. Синхронный привод сканирующих устройств осуществляется сигналами, сформированными в хронизаторе, где также формируются опорные

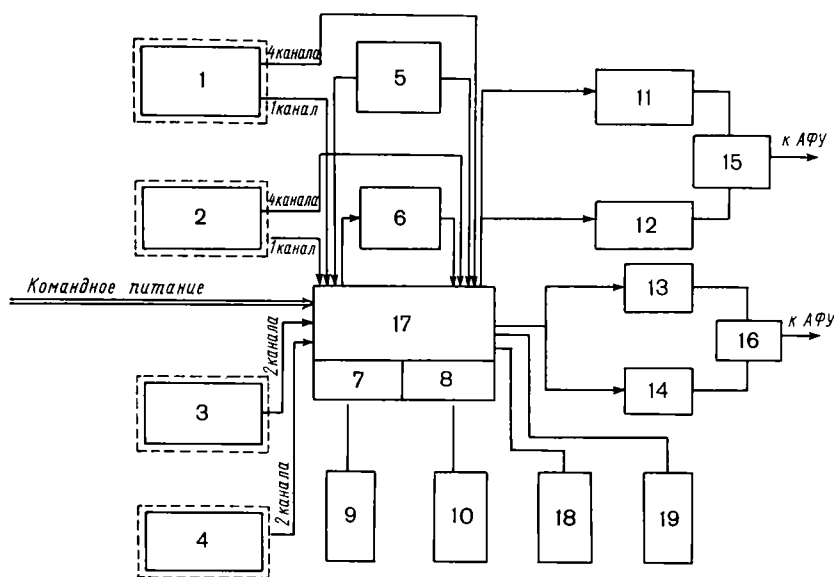


Рис. 3.1. Функциональная блок-схема радиотелевизионного комплекса «Природа».

1, 2 — четырехзональные оптико-механические сканирующие устройства малого разрешения; 3, 4 — двухзональные оптико-механические сканирующие устройства среднего разрешения МСУ-С; 5, 6 — устройства магнитной регистрации; 7, 8 — хронизаторы; 9, 10 — задающие генераторы; 11, 12 — передающие устройства дециметрового диапазона; 13, 14 — передающие устройства метрового диапазона; 15, 16 — антенные переключатели; 17 — блок автоматики; 18, 19 — устройство отображения бортового времени.

Для исследования возможностей различных типов аппаратуры был разработан радиотелевизионный комплекс (РТВК) «Природа» [4]. На основании опыта, накопленного в процессе эксплуатации радиотелевизионного комплекса спутника «Метеор—Природа», был сделан следующий шаг в развитии средств дистанционного зондирования—создан экспериментальный бортовой информационный комплекс (БИК-Э) [5] и аппаратура «Фрагмент» [1—3], обладающие качественно новыми параметрами и соответственно более широкими возможностями практического использования. Целью разработки этих приборов была проверка аппаратных решений и методов наблюдения для перспективных систем изучения природных ресурсов. Аппаратура БИК-Э и «Фрагмент» была установлена в дополнение к РТВК на спутнике «Метеор—Природа», запущенном 18 июня 1980 г.

### 3.1. Эксплуатационный радиотелевизионный комплекс «Природа»

В состав аппаратуры спутника «Метеор—Природа» входит полностью дублированный радиотелевизионный комплекс приборов (рис. 3.1), основными

частоты для других приборов комплекса. Для работы хронизаторов используется задающая частота высокостабильных кварцевых генераторов. Одновременно в хронизаторе выполняются операции уплотнения канала связи. Для передачи информации от нескольких спектральных каналов в один канал связи здесь используется принцип временного уплотнения, реализуемый путем коммутации каналов и формирования амплитудно-импульсного модулирования последовательности сигналов. В основной дециметровый канал связи может передаваться информация непосредственно по всем четырем каналам МСУ-М. При этом частота коммутации в несколько раз превышает максимальную частоту видеосигнала, поэтому преобразование сигнала не сказывается на четкости изображения. С прибора МСУ-С возможна передача либо по одному каналу, либо по двум с чересстрочной коммутацией. В последнем случае четкость изображения в направлении полета уменьшается в два раза, но в то же время выравнивается с четкостью вдоль строки.

Для синхронизации наземной системы по единому каналу передается пилот-сигнал, сложенный с основным сигналом. Запоминающие устройства в последних спутниках обеспечивают запись и вос-

произведение четырех спектральных каналов на каждый прибор. Время записи и воспроизведения одинаково и составляет 6 мин в полосе 5 кГц по каждому каналу. Устройство отображения дает возможность получать на снимке от МСУ-М ряд оперативных телеметрических параметров, бор-

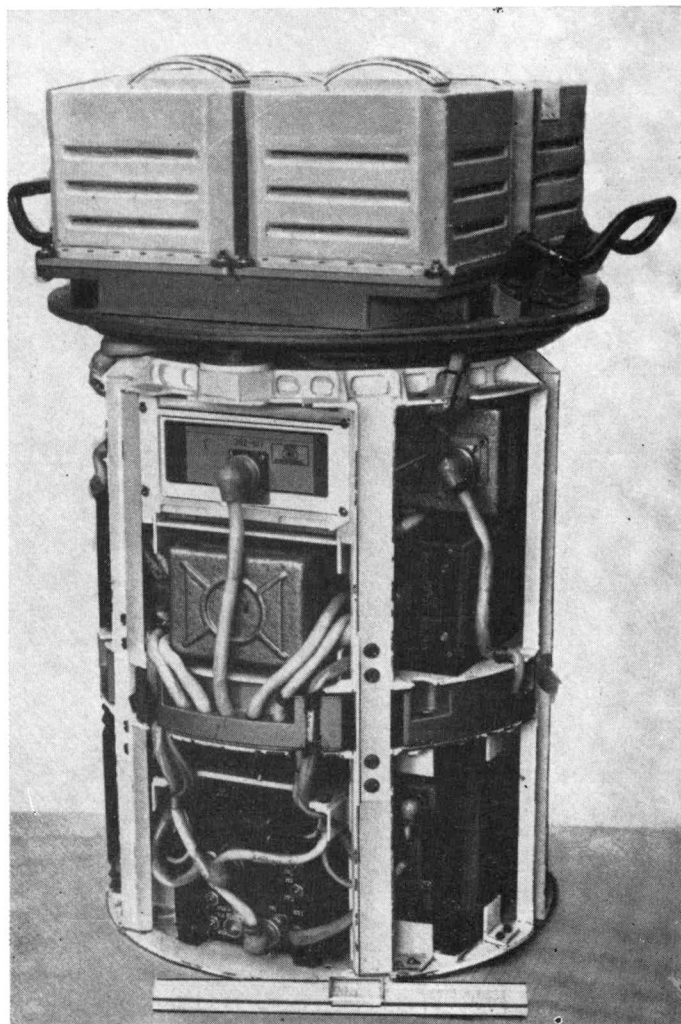


Рис. 3.2. Внешний вид радиотелевизионного комплекса.

товое время в минутах и градационный клин, по которому контролируется линейность канала и процесс фотообработки. Таким образом, амплитудно-импульсно-модулированный сигнал в режиме непосредственной передачи или в режиме считывания с запоминающего устройства поступает на вход одного из передающих устройств, работающих в международном диапазоне волн 460—470 МГц в режиме частотной модуляции. Величина девиации  $\pm 160$  кГц. Мощность передающего устройства около 5 Вт. В системе кроме дециметрового диапазона имеется метровый (около 137 МГц), предназначенный для передачи одного из спектральных каналов (по выбору) с низким разрешением (3 км) на упрощенные автономные пункты приема. В метровом диапазоне видеoinформация передается по общепринятому в фототелеграфии стандарту. Номинал поднесущей 2,4 кГц, девиация частоты 9,6 кГц. Уровню белого в изображении соответствует максимальный размах амплитудно-

модулированного сигнала. Масса РТВК (рис. 3.2) составляет 60 кг.

По принципу действия сканирующие устройства (сканеры) — оптико-механические системы с однострочной разверткой и с одноэлементными приемниками, кадровая развертка у которых осуществляется за счет движения спутника. На рис. 3.3 приведены спектральные характеристики сканеров РТВК. Более подробные параметры сканеров приведены в табл. 3.1.

В однострочных сканерах разрешение по кадру определяется отношением скорости полета к скорости сканирования. Особенностью широкоугольных сканирующих устройств с фиксированным мгновенным полем зрения является непостоянство разрешения на местности вдоль строки, обусловленное перспективными искажениями и кривизной поверхности Земли. Так, в МСУ-М разрешение на краю строки почти в 4 раза хуже, чем

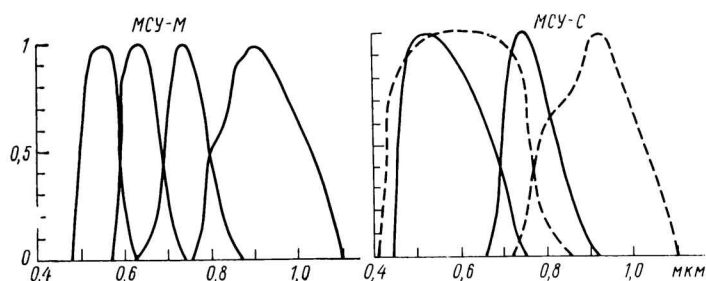


Рис. 3.3. Спектральные характеристики МСУ-М и МСУ-С.

в центре; в МСУ-С — 2,5 раза. Для выравнивания разрешения по кадру и строке целесообразно иметь в надире некоторое превышение разрешения вдоль строки, что и предусмотрено в МСУ-С; оптимальные соотношения выполняются только для режима одновременной передачи по двум каналам с коммутацией через строку.

Существенное различие скоростей привело к использованию различных принципов сканирования. В МСУ-М сканирование производится с помощью зеркала качания, приводимого в движение кулачковым механизмом, в МСУ-С — с помощью вращающейся зеркальной пирамиды.

Основным элементом схемы, формирующим изображение, является объектив с фокусным расстоянием  $f = 75$  мм и диаметром зрачка входа 18,75 мм. В фокальной плоскости объектива установлены диафрагмы, формирующие мгновенное

Таблица 3.1

Параметры сканирующих устройств МСУ-М и МСУ-С

Параметр	МСУ-М	МСУ-С
Номинальная высота орбиты, км	650	650
Разрешение на местности в надире, км		
по направлению полета	1,7	0,142
вдоль строки	1	0,24
Угол сканирования, градус	106	90
Полоса захвата, км	1930	1380
Число спектральных каналов	4	2
Масса с приводом, кг	4,5	5,5

поле зрения сканеров в соответствии с требуемым разрешением на местности.

Оптическая схема сканеров представлена на рис. 3.4. Поток излучения, отразившись от зер-

стоит из ламп накаливания СМН-10-50 21, диафрагмы 22, линзы 23, повторной призмы 24, собирающей линзы 25 и световодов 26, направляющих калибровочный поток на фотоприемники. Внешний вид сканеров показан на рис. 3.5.

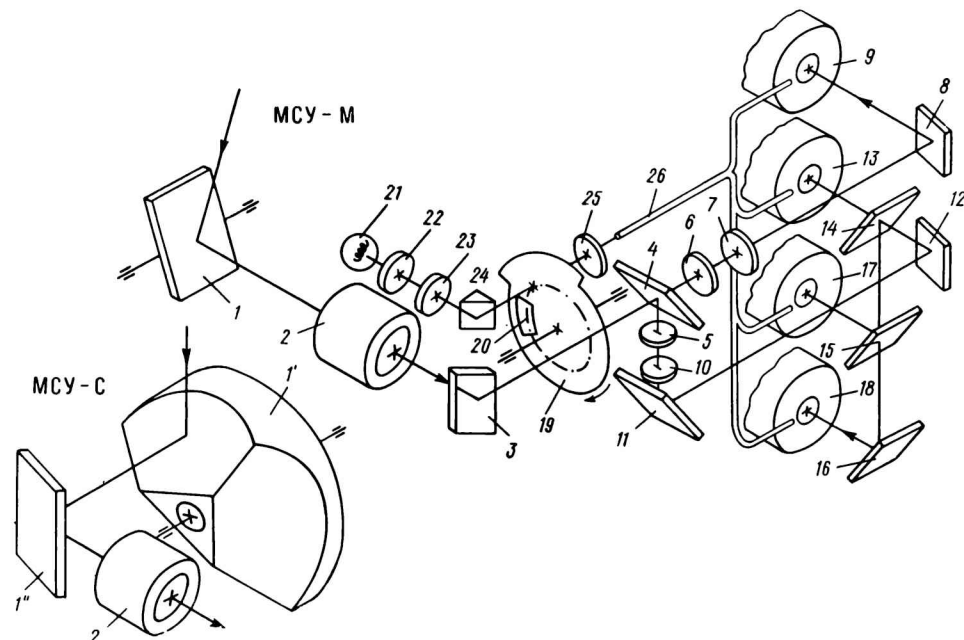


Рис. 3.4. Оптические схемы МСУ-М и МСУ-С.

кала 1 либо от одной из граней пирамиды 1' и зеркала 1'' и пройдя через объектив 2, направляется зеркалом 3 на спектроразделительное зеркало 4. Последнее отражает поток излучения в видимом диапазоне на диафрагму 5, а излучение в инфракрасном диапазоне пропускает на диафрагму 6. Пройдя через нее, этот поток собирается линзой 7 и с помощью зеркала 8 направляется на фотозлектронный умножитель (ФЭУ).

Видимое излучение после прохождения диафрагмы 5 и собирающей линзы 10 делится на три зоны интерференционными зеркалами 11, 12, 14, 15, 16 и направляется на ФЭУ 13, 17, 18. В приборе МСУ-С устанавливаются лишь оптические элементы для двух каналов 9, 13 и вместо ФЭУ используются лавинные фотодиоды.

Спектральные диапазоны и некоторые другие параметры сканеров приведены в табл. 3.2. Ширина спектральных каналов дана на уровне 0,5 с точностью  $\pm 0,01$  мкм. Приведены осредненные значения отношения сигнал/шум, соответствующие объекту с максимальной яркостью (коэффициент отражения равен единице, Солнце в зените). Фотометрическая калибровка приборов осуществляется путем перекрытия основного светового потока с помощью «гребешка» на обтюраторе 19, при этом на ФЭУ поступает световой пучок калибровочного канала через окно 20, закрытое оптическим клином. Обтюратор вращается синфазно со строчной разверткой. Калибровочный канал со-

В режиме непосредственной передачи в дециметровом диапазоне волн обеспечивается получение наиболее качественной информации от сканеров среднего и малого разрешения. Расположение приемных пунктов (Москва, Новосибирск, Хабаровск) дает возможность охватить непосредственной передачей большую часть территории Советского Союза, так как зона уверенного приема каждого пункта имеет радиус около 2500 км. Наблюдение остальной территории Земли возможно с помощью сканера малого разрешения при записи сигнала на бортовое запоминающее устройство. Один сеанс записи (6 мин) захватывает район около  $1930 \times 2500$  км.

Оказалась полезной непосредственная передача информации на упрощенные пункты приема (в метровом диапазоне волн) в одной из четырех узких зон спектра по выбору. В то же время получение этой информации доступно в любом месте, включая отдаленные районы, большие суда и т. п.

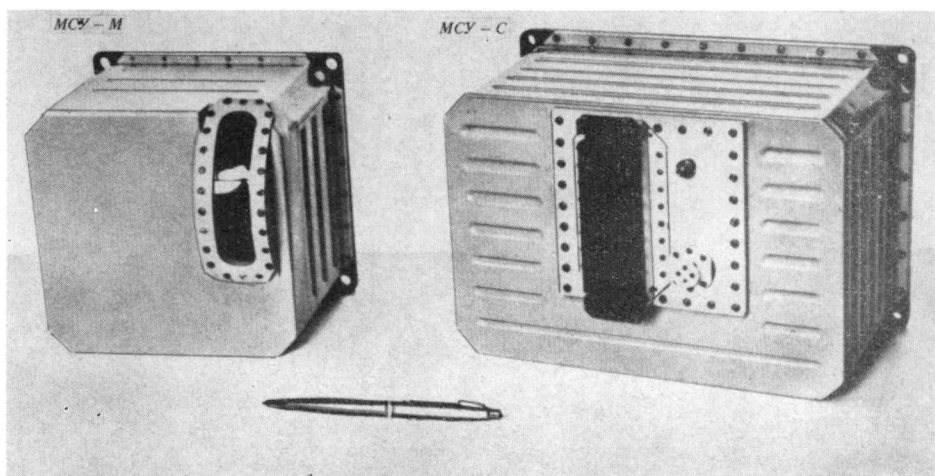


Рис. 3.5. Внешний вид МСУ-М и МСУ-С.

Таблица 3.2

Спектральные диапазоны сканирующих устройств		
Прибор	Спектральный диапазон, мкм	Отношение сигнал/шум (среднее)
МСУ-М	0,5—0,6	115
	0,6—0,7	77
	0,7—0,8	58
	0,8—1,0	35
МСУ-С	0,58—0,7	24
	0,7—1,0	41

Метровая и дециметровая радиолнии могут работать раздельно и совместно. На пунктах приема информация регистрируется на магнитную пленку и фотопленку.

### 3.2. Экспериментальный бортовой информационный комплекс (БИК-Э)

Для решения некоторых задач исследования природных ресурсов требуется повышенное разреше-

разверткой МСУ-СК (1) и оптико-электронный сканер высокого разрешения с плоскостной разверткой МСУ-Э (2), параметры которых приведены в табл. 3.3. Сигналы от этих устройств последовательно поступают на блок восьмиразрядных аналого-цифровых преобразователей и формирования цифрового потока (3), радиопередатчик (4) и антенну спутника. Синхронизация устройств комплекса осуществляется от высокостабильного опорного генератора (5). Управление комплексом, сбор телеметрических параметров от приборов производится блоком автоматики (6). Блоки 3, 4,

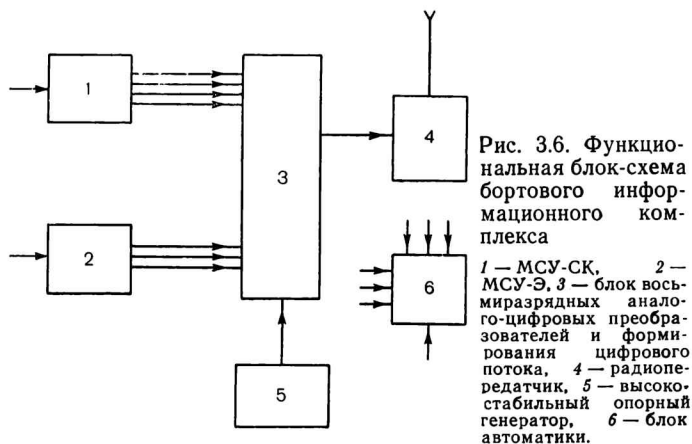


Таблица 3.3

Параметры сканирующих устройств МСУ-СК и МСУ-Э

Параметр	МСУ-СК	МСУ-Э
Размеры проекции полевой диафрагмы на земную поверхность в надире, м		
по направлению полета	243	28
вдоль строки	175	28
Угол сканирования, градус	66,5	2,5
Полоса обзора (км) для высоты полета 650 км	600	28
Угол наклона линии визирования, градус	38,9	0
Число спектральных каналов	4	3
Масса, кг	47	17

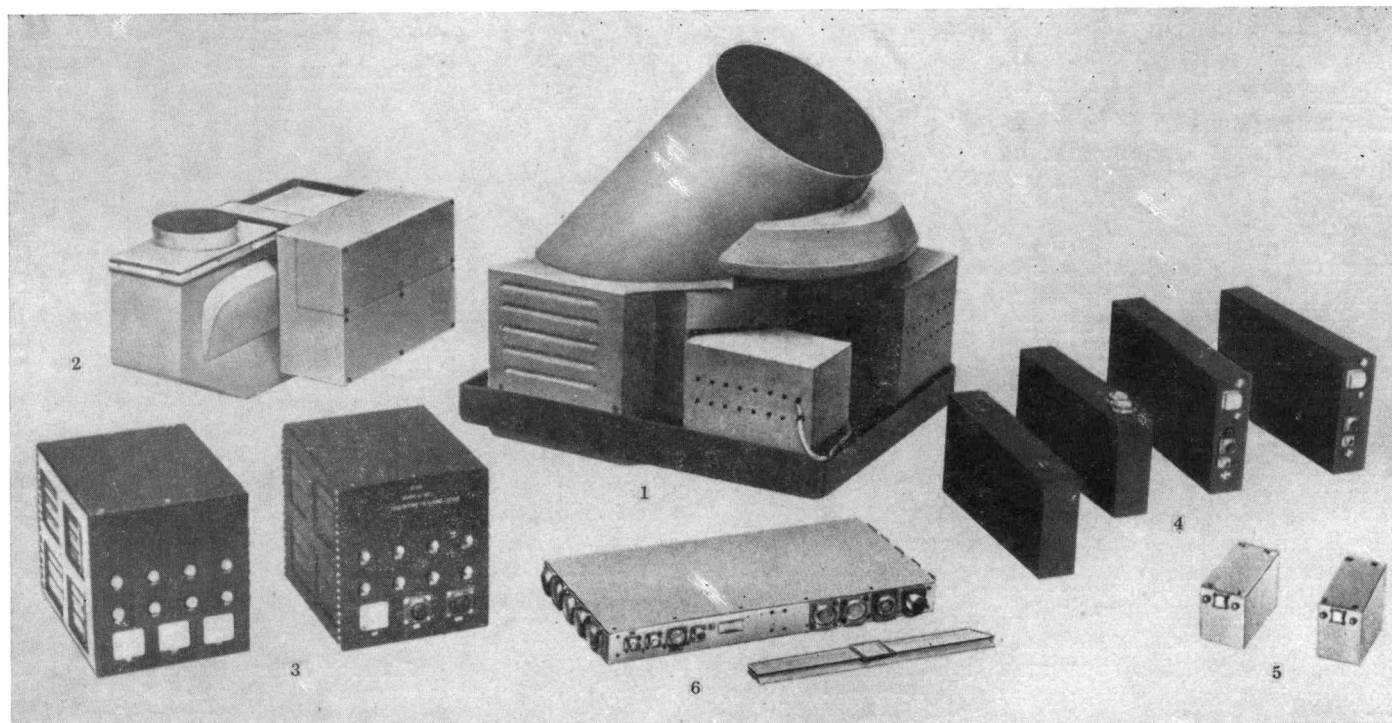


Рис. 3.7. Внешний вид приборов БИК-Э.

Усл. обозначения см. рис. 3.6.

ние сравнительно небольших наблюдаемых участков. Поэтому в состав аппаратуры БИК-Э (рис. 3.6) были введены два устройства передачи спектрональных изображений: оптико-механический сканер среднего разрешения с конической

5 имеют холодный резерв. Все приборы комплекса работают вне герметичного отсека спутника (рис. 3.7).

Сканирующие устройства работают не одновременно, их включение производится по командам

с Земли. Параметры системы подобраны так, что при работе каждого из этих устройств информативность цифрового потока составляет 7,68 Мбит/с. Передача осуществляется на несущей частоте 466,7 МГц методом двойной относительной фазовой манипуляции. Указанная частота выбрана из

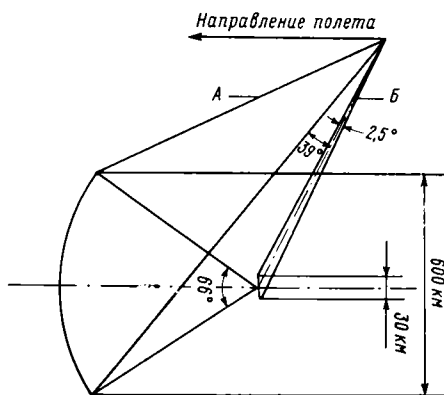


Рис. 3.8. Схема обзора поверхности Земли сканирующими устройствами.

А — прибор МСУ-СК, Б — прибор МСУ-Э.

соображения максимального использования приемной аппаратуры существующих в системе Госкомгидромета наземных пунктов для космической

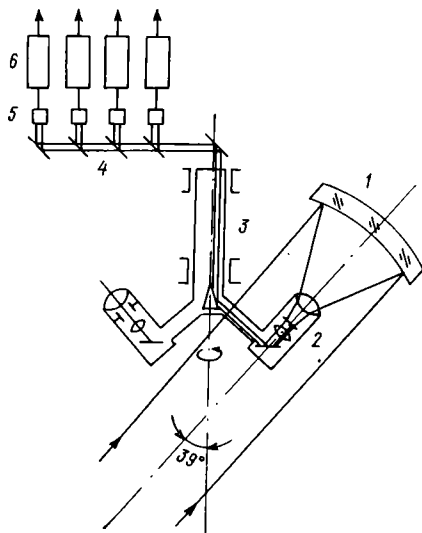


Рис. 3.9. Функциональная блок-схема МСУ-СК.

метеорологической системы «Метеор», позволяющих вести наблюдение практически за всей территорией СССР в режиме непосредственной передачи. Схема обзора поверхности Земли сканирующими устройствами показана на рис. 3.8.

Повышение точности измерения световых потоков требует повышения отношения сигнал/шум на выходе сканирующего устройства, что достигается применением более совершенных фотоприемников и необходимым увеличением эффективного диаметра выходного отверстия оптической системы, которое в случае МСУ-СК составляет 200 мм. При таком диаметре широкоугольное сканирование уже не может быть осуществлено традиционными способами. При создании сканера среднего

разрешения МСУ-СК использован принцип конического сканирования, несмотря на известные трудности приема изображений, передаваемых такими устройствами. Немаловажным аргументом в пользу конического сканирования служат свойственные ему постоянство геометрических и фото-

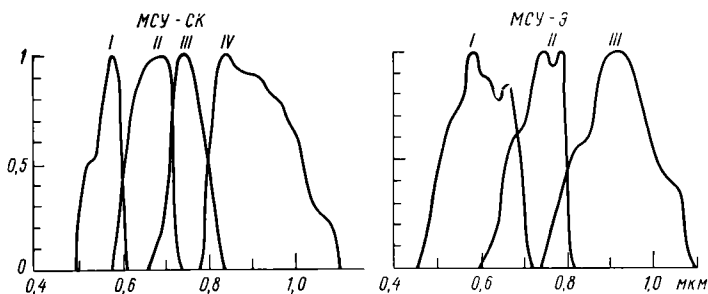


Рис. 3.10. Спектральные характеристики МСУ-СК и МСУ-Э.

метрических условий наблюдения, постоянство разрешения по строке.

Согласно упрощенной схеме (рис. 3.9) МСУ-СК работает следующим образом: излучение от подстилающей поверхности под углом 39° к вертикали собирается сферическим зеркалом (1) и направляется на одну из четырех оптических ветвей (2), расположенных на вращающемся вокруг вертикальной оси сканирующем колесе (3). В оптической ветви поток излучения с помощью ряда оптических узлов фокусируется, затем из него выделяется поток, соответствующий одному телевизионному элементу, и направляется к оси вращения сканирующего колеса, преломляется и далее расщепляется в спектроделительной системе (4), фотоприемник (5) преобразует его в видеосигнал, который после формирования в усилителях (6) поступает на выход прибора.

За один оборот сканирующего колеса просматриваются четыре строки изображения, причем ось визирования описывает в пространстве коническую поверхность, а след ее на поверхности Земли (строка) представляет дугу окружности с центральным углом 66°.

Калибровка каналов производится как по внутреннему эталону, так и по Солнцу. Спектральные характеристики МСУ приведены на рис. 3.10.

Многоканальное сканирующее устройство высокого разрешения (МСУ-Э) построено по наиболее перспективному для таких устройств принципу использования линейных приемников излучения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС) с 1024 элементами в строке. На рис. 3.11 показан основной принцип построения МСУ-Э. Изображение поверхности Земли с помощью объектива (1) через спектроделительную систему (2) проектиру-

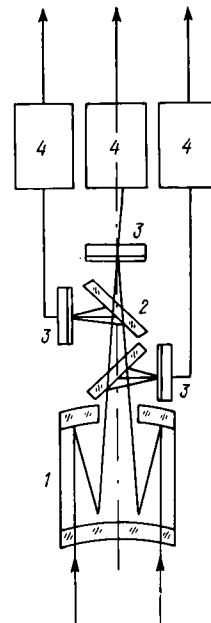


Рис. 3.11. Функциональная блок-схема МСУ-Э.



Рис. 3.12. Фрагмент изображения шириной 400 км в спектральном диапазоне 0,6—0,7 мкм, полученный с помощью МСУ-СК.

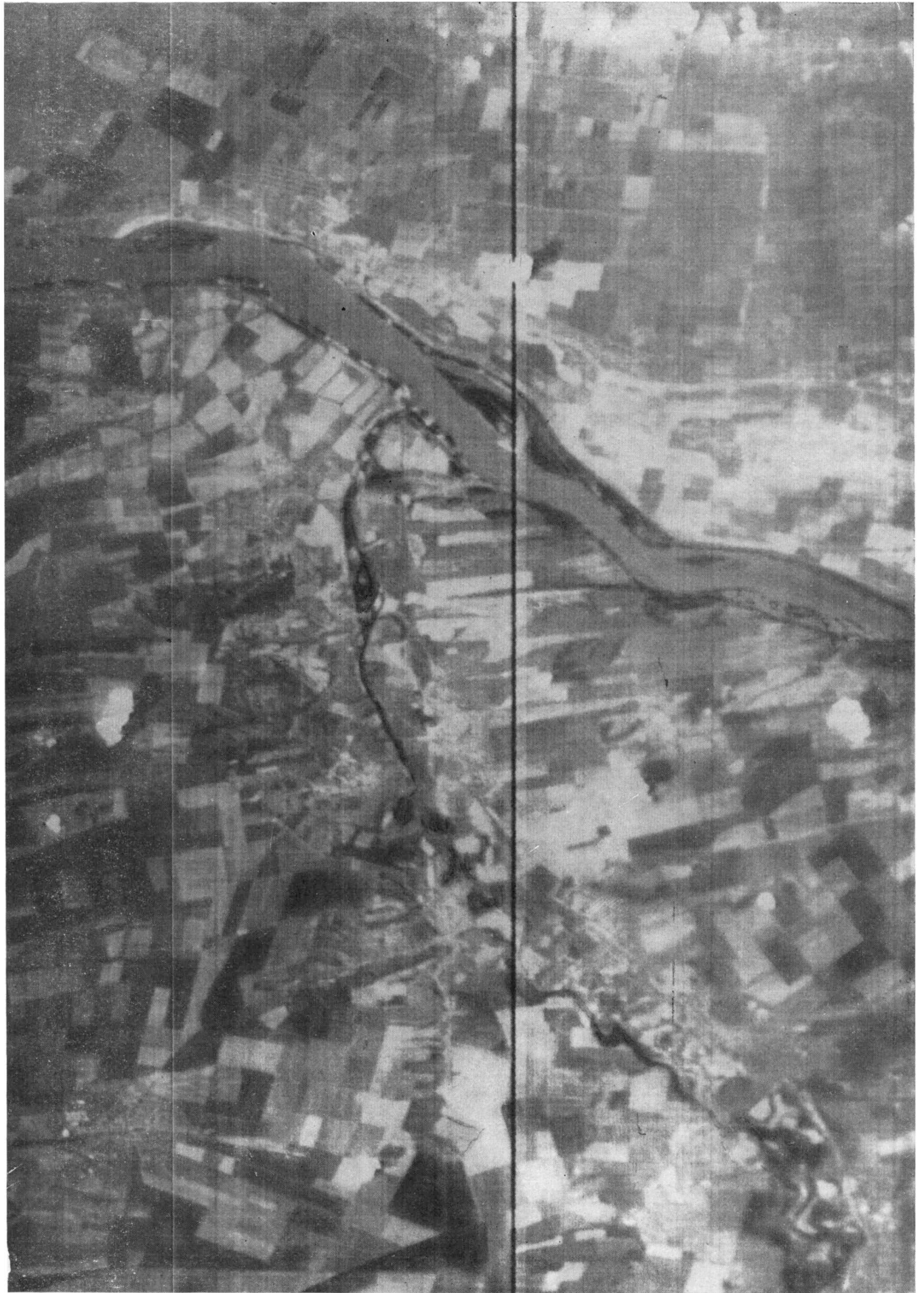


Рис. 3.13. Изображение сельскохозяйственных угодий в диапазоне 0,5—0,7 мкм, полученное с помощью МСУ-Э.



ется на три линейки ПЗС (3), каждая из которых работает в своем спектральном диапазоне. После линейных фотоприемников видеосигнал поступает на каналные блоки усиления и формирования сигналов (4). Все линейки ПЗС располагаются перпендикулярно направлению полета. Развертка по строке осуществляется электронным способом, по кадру — за счет движения спутника. Необходимым элементом устройства является радиационный холодильник, обеспечивающий температуру в области ПЗС около  $-30^{\circ}\text{C}$ , что позволяет значительно снизить структурный шум приемников на ПЗС.

Прием информации от БИК-Э осуществляется на экспериментальной системе выделения и приема информации с использованием штатной антенны системы «Метеор», которая дополнительно оснащается малозумящим приемником. Принятый сигнал в цифровой форме ретранслируется по радиорелейной линии на пункте приема в главный центр приема и обработки данных.

Испытания БИК-Э в полете показали устойчивую работу радиотехнической части комплекса и перспективность выбранного канала передачи для территориальных пунктов приема информации.

Качество изображения МСУ-СК было высоким, и специальные измерения подтвердили, что рассчитанные точности измерений практически реализуются. Наклонное зондирование поверхности, свойственное методу конического сканирования, способствовало получению интересной информации о водных поверхностях (рис. 3.12). Работа МСУ-Э на ПЗС подтвердила эффективность этого способа наблюдения для природных и народнохозяйственных объектов, требующих повышенного разрешения на местности, например для сельскохозяйственных угодий (рис. 3.13). Ограниченные возможности этого устройства, вызванные малой полосой захвата на местности ( $\sim 30$  км), в дальнейшем могут быть преодолены увеличением числа элементов в линейке ПЗС, введением дистанционного управления положением линии визирования и разработкой методик, позволяющих распространить результаты дешифрирования и интерпретации участков, захватываемых МСУ-Э, на большие площади, обзор которых обеспечивает МСУ-СК.

### 3.3. Экспериментальный информационно-измерительный комплекс на основе многозональной сканирующей системы «Фрагмент»

Многозональная сканирующая система (МСС) «Фрагмент» обеспечивает сканирование земной поверхности поперек трассы полета в полосе 85 км одновременно в восьми зонах видимой и ближней ИК областях спектра, преобразование принятого излучения в электрический сигнал и затем в цифровую форму, сопровождение основного сигнала служебной информацией о состоянии подсистем, режимах их работы, введение сигналов синхронизации и формирование телеметрического кадра. Управление режимами съемки осуществляется по командной радиолнии.

В системе цифровой передачи видеoinформации передача данных производится методом фазовой

манипуляции в дециметровом диапазоне электромагнитных волн. Пропускная способность радиолнии 4 Мбит/с.

Функциональная схема и общий вид МСС «Фрагмент» показаны на рис. 3.14 и рис. 3.15, общая масса аппаратуры 280 кг.

Преобразование измеряемых величин спектральных яркостей земной поверхности в пределах полосы обзора в эквивалентные числовые значения реализуются МСС «Фрагмент» с помощью последовательных операций в следующих преобразователях: оптическом линейном масштабном преобразователе — приемной оптической системе (ПОС), пространственно-временном оптическом преобразо-

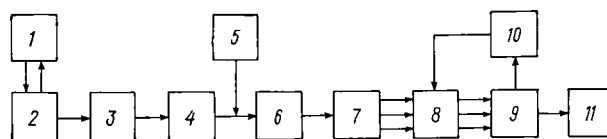


Рис. 3.14. Функциональная блок-схема МСС «Фрагмент».

1 — привод, 2 — сканирующее зеркало, 3 — объектив приемной оптической системы, 4 — оптико-механический коммутатор, 5 — опорный излучатель с рабочей и эталонной группами источников света, 6 — волоконно-оптический разветвитель, 7 — полосовые спектральные фильтры, 8 — фотообразующие звенья, 9 — устройство кодирования, 10 — цепь автокоррекции, 11 — система передачи данных.

вателе (сканирующий элемент и анализирующая диафрагма), оптическом селекторе (волоконно-оптический разветвитель и полосовые спектральные фильтры), фотоэлектрическом линейном масштабном преобразователе (приемник излучения и усилитель постоянного тока), аналого-цифровом преобразователе.

Приемная оптическая система «Фрагмент» сопрягает пространство объектов и изображений, преобразуя исходное распределение яркости в распределение освещенности. Она реализована народным предприятием «Карл Цейс Йена» (ГДР) в виде объектива Кассегрена с кольцевым входным зрачком диаметром 0,24 м и фокусным расстоянием 1 м, обладающим на длине волны 0,5 мкм кружком рассеяния  $\sim 30 \cdot 10^{-6}$  мкм. Отражающие поверхности ПОС алюминированы. В ПОС введено также устройство термокомпенсации, устраняющее расфокусировку ПОС в диапазоне температур от  $-40$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Пространственно-временной оптический преобразователь трансформирует распределение освещенности в координатном пространстве изображений во временные изменения потока излучения на входах измерительных каналов. Функции этого звена в системе выполняют сканирующие устройство и анализирующие полевые диафрагмы. При этом сканирующее устройство перемещает поле зрения системы, являющееся изображением анализирующей диафрагмы, относительно пространства объектов (или, что равнозначно, изображение пространства объектов относительно анализирующей диафрагмы).

В системе «Фрагмент» используется прямолинейная траектория сканирования, складывающаяся из движения ИСЗ и перемещения мгновенного поля зрения, производимого сканирующим устройством.

Эта траектория характеризуется постоянством скорости перемещения мгновенного поля зрения на

рабочем участке скана и постоянным азимутальным углом плоскости сканирования. Соответствующее сканирующее устройство реализовано в виде метал-

числу спектральных интервалов (рис. 3.16) чувствительности: 0,4—0,7; 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1; 1,2—1,3; 1,5—1,8; 2,1—2,4 мкм. Каждый

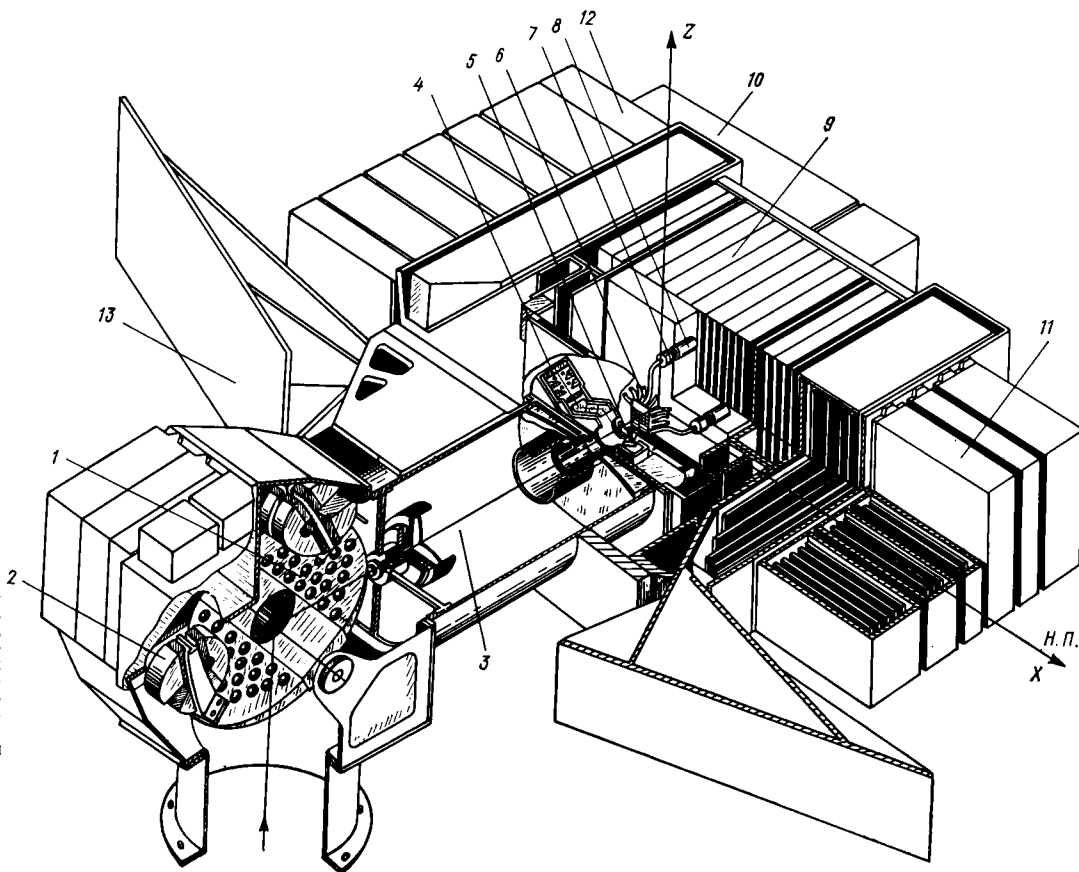


Рис. 3.15. Общий вид МСС «Фрагмент».

1 — сканирующее зеркало, 2 — привод зеркала, 3 — объектив, 4 — опорные источники света, 5 — оптико-механический коммутатор, 6 — волоконно-оптический разветвитель, 7 — полосовые спектральные фильтры, 8 — фотоприемники, 9 — блоки усилителей постоянного тока и высоковольтных источников питания фотоприемников, 10 — блок аналого-цифрового преобразования, 11 — блоки системы управления, сбора, обработки информации, 12 — блоки системы электропитания, 13 — радиаторы охлаждения фотоприемников.

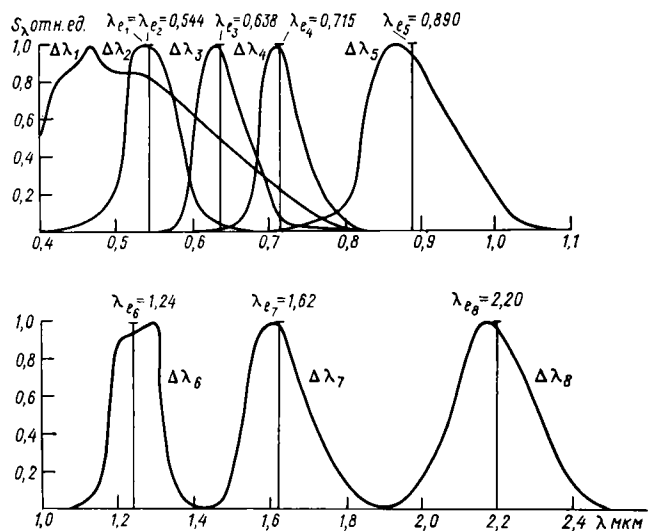


Рис. 3.16. Относительные спектральные характеристики чувствительности МСС «Фрагмент», осредненные для  $\lambda_1$ — $\lambda_5$  по шести, а для  $\lambda_6$ ,  $\lambda_7$  и  $\lambda_8$  по трем измерительным каналам.

ло-стеклянного сканирующего зеркала и магнито-электрической колебательной системы, состоящей из связанной с зеркалом и помещенной в постоянное магнитное поле рамки, в которой протекает регулируемый необходимым образом электрический ток.

Мгновенное поле зрения МСС «Фрагмент» образовано матрицей, состоящей из восьми столбцов по

столбец содержит от одной до шести анализирующих диафрагм, соотношение размеров этих диафрагм компенсирует существенное различие измеряемой в выделяемых спектральных интервалах яркости земной поверхности. При таком мгновенном поле зрения видеосигналы каждого спектрального интервала, соответствующие одной и той же точке исследуемой поверхности, сдвинуты во времени относительно друг друга, что учитывается при обработке получаемых данных.

Основной функцией оптического селектора является выделение из сформированного приемным оптическим трактом потока излучения требуемых спектральных интервалов и перенос его к приемникам излучения соответствующих измерительных каналов. Для этого использованы полосовые спектральные фильтры и волоконно-оптический разветвитель, входные торцы световодов которого образуют матрицу анализирующих диафрагм. Разветвитель представляет собой жесткую пространственную конструкцию, в которой при общей минимизации длин световодов с целью сокращения светопотерь, длины световодов, стыкуемых с определенными спектральными полосовыми фильтрами и приемниками, распределены в порядке, соответствующем распределению яркости диска Солнца в спектральных интервалах чувствительности системы. Такая конструктивная мера позволяет улучшить энергетическое выравнивание сигналов в измерительных каналах.

Фотоэлектрический линейный масштабный преобразователь выполняет функции преобразования поступающего с входа селектора потока в электрический сигнал, ограничения полосы частот и электрического масштабного преобразования для согласования с кодирующим звеном. Процесс преобразования электрического сигнала в соответствующее ему условное числовое значение осуществляется с помощью звена аналого-цифрового преобразователя. Условность результата устраняется путем градуировки.

Допустимая случайная погрешность измерений — один из заданных съемочных параметров системы «Фрагмент» — обеспечивается реализацией метрологических характеристик ее звеньев, определяющих необходимое соотношение сигнала и шума в измерительном видеоканале. С этой целью в измерительный видеоканал системы «Фрагмент» введены оптико-механический коммутатор, опорный излучатель с рабочей и эталонной группами источников света и цепь компенсации, охватывающая блок кодирования и фотопреобразующие звенья.

МСС «Фрагмент» метрологически аттестована как измеритель спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) земной поверхности в диапазоне длин волн 0,4—2,5 мкм.

По цифровым кодам МСС «Фрагмент» могут быть определены с точностью до 5 % значения абсолютной СПЭЯ участков земной поверхности, наблюдаемой с ИСЗ, на эффективных длинах волн, лежащих внутри восьми спектральных интервалов чувствительности, причем влияние спектрального распределения яркости исследуемого участка на результат измерений, минимизированное за счет выбранного способа градуировки, может быть исключено за счет использования при обработке дан-

ных специально разработанной вычислительной процедуры, позволяющей восстановить истинный характер спектрального распределения яркости неизвестного исследуемого объекта.

При подготовке МСС «Фрагмент» к полету была проведена фотограмметрическая калибровка, позволяющая достаточно точно определить геометрические характеристики системы, знание которых необходимо при обработке получаемой видеоинформации и ее географической координатной привязке.

Система приема и магнитной регистрации осуществляет первичное декодирование сигналов, заключающееся в разделении сигналов по каналам, и запись информации на высокоскоростном магнитофоне. После каждого сеанса связи производится перезапись информации в параллельно-последовательном коде на цифровые телеметрические магнитофоны.

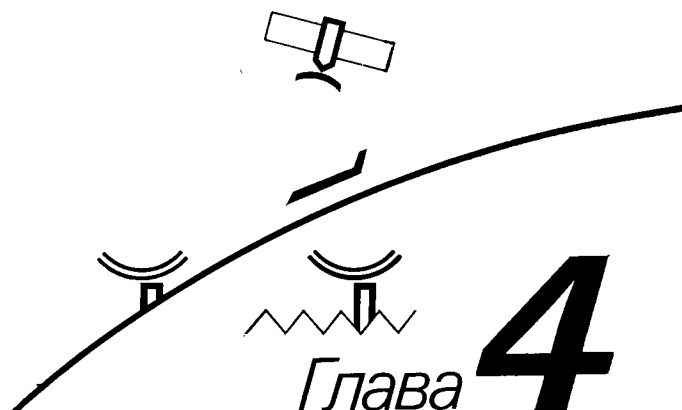
Система цифровой обработки видеоинформации обеспечивает быстрый просмотр цифровых видеозаписей на цветном полутонном дисплее, перезапись видеоинформации на магнитную ленту в структуре ЭВМ единой серии и воспроизведение цифровых видеозаписей на черно-белом фотоносителе в масштабе 1 : 1 600 000.

Длительная и безотказная работа бортовых систем, функционирующих в условиях открытого космоса, свидетельствует о правильности принятых конструкторско-технологических решений.

Снимки, полученные аппаратурой «Фрагмент» (рис. 3.17, вкладка), обладают высокими информационными возможностями.

Примеры использования информации, полученной с помощью экспериментальных съемочных комплексов, приведены в последующих разделах книги.

# Сбор подспутниковой информации



Данные, полученные с помощью спутниковой измерительной подсистемы, содержат для каждого отдельного элемента дискретизации (или их некоторой совокупности) информацию как о типе природного объекта, сопряженного с этим элементом, так и о характеристиках его физического состояния. Задача обработки сводится к нахождению такой функции преобразования данных, которая в качестве значений функции имеет искомые характеристики отображенного объекта. Аргументами этих функций, кроме измеренных с ИСЗ спектральных яркостей, в подавляющем большинстве случаев выступают и некоторые значения характеристик самих объектов или окружающей их среды, задаваемых или априори или собираемых со специальных платформ в периоды проведения космических съемок.

Таким образом, задачи обработки данных дистанционных измерений чаще всего принадлежат к классу некорректных задач. Эта ситуация приводит к необходимости иметь дополнительные данные, различные для разных задач обработки. Например, для точной пространственной привязки необходимо знать геодезические координаты контурных точек, для учета влияния атмосферы — определенные параметры ее состояния, для решения задач распознавания — данные о тестовых участках и т. п. Поэтому космическая система измерения природных ресурсов включает, как неотъемлемый элемент, подсистему сбора дополнительной (опорной и априорной) информации. Составной частью этой космической подсистемы является банк опорной и априорной информации, состоящий из базы данных и системы управления ею.

## 4.1. Банк дополнительной информации

Под априорной подразумевается информация, полученная, как правило, до конкретных съемок с ИСЗ. Опорная информация — это совокупность результатов синхронных (квазисинхронных) измерений, проведенных в дополнение к спутниковой съемке с авиационных, судовых, других мобильных носителей аппаратуры и стационарных технических средств, расположенных на поверхности земли (воды) или вблизи нее. База данных может содержать: картографические материалы, статистические данные, характеристики измерительной аппаратуры, материалы аэрофотосъемок и выборочные космические снимки, результаты натурных измерений (выполненных синхронно с космическими

съемками) параметров состояния природной среды в отдельных пунктах земной поверхности и т. п.

Спецификой банка априорных и опорных данных является обеспечение взаимодействия двух потоков информации — космического и дополнительного. Представляется естественным, что база данных должна состоять из стационарной и нестационарной (оперативной) частей. При этом структура банка данных должна допускать как оперативный обмен информацией между его частями, так и оперативный доступ к нему со стороны основного процессора подсистемы обработки, в том числе в интерактивном режиме.

Рассмотрим для примера информационное содержание базы данных на примере обработки спутниковой радиометрической информации ИК диапазона при определении поля температуры поверхности моря [2]. В стационарной части базы данных могут содержаться:

- данные лабораторных калибровок бортовой аппаратуры;
- координаты границ береговой линии, степень подробности которой зависит от точности географической привязки данных спутниковых измерений, района акватории и т. д.;
- таблицы радиационных поправок, соответствующих различным моделям атмосферы и зависящих от сезона, срока и района измерения;
- значения уровня дискриминации облачного покрова;
- информация о температуре, измеренной в предыдущем сеансе, данные о тренде облачности, набор гистограмм, соответствующих разным ситуациям по облачности для данной совокупности точек измерения; а также элементы структуры видеоинформации о данном районе;
- данные средних значений температуры за сезон (месяц), данные об измерениях температуры в предыдущих сеансах, данные о трендах температуры и ее градиентах;
- набор формул для перехода от температуры поверхности моря  $T_{\text{пм}}$  к температуре поверхностного слоя воды  $T_{\text{псв}}$ , соответствующих различным сезонам и срокам измерений, различным районам;
- координаты полигонов, где, в частности, производятся опорные измерения  $T_{\text{пм}}$ ,  $T_{\text{псв}}$ ;
- контурные карты разных районов Мирового океана, бланки таблиц выходной информации, шифры условных цветов, а также условные адреса потребителей информации, получающих ее в разных формах.

В оперативной части базы данных могут содержаться результаты измерений  $T_{\text{пм}}$ ,  $T_{\text{псв}}$ , выпол-

ненных синхронно с пролетом ИСЗ на буйах, судах, данные аэрологического зондирования атмосферы и др. Условный характер деления базы данных на две части заключается в том, что часть информации со временем переходит из оперативной части в стационарную. Например, данные о температуре за  $n$ -й сеанс из оперативной части базы данных перейдут в стационарную часть перед обработкой информации  $(n+1)$ -го сеанса.

Полнота обеспеченности базы данных картографической информацией во многом определяет эффективность работы системы ИПРЗ в целом. Так, например, решая задачу оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур, можно исследовать статистические свойства многозонального изображения, заранее зная, на каком поле что растет. Эти сведения будут почерпнуты из карты нарезки полей и сельскохозяйственного календаря.

Информативная часть базы данных в части картографической информации состоит из общегеографических карт, карт растительности, почв, рельефа, карт гидрологических (гидрографических) объектов, карт районирования территорий по различным показателям и т.п. Здесь можно отметить такие сложные проблемы, как определение видов и содержания картографических материалов, определение точности и детализации представления на них тематической нагрузки, разработка форм представления карт, пригодных для хранения и использования в цифровом виде, разработка совершенно новых типов карт, отображающих спектральные особенности поверхности в различных диапазонах съемки.

Весьма специфический характер имеет использование в рассматриваемой подсистеме информации с авиационных, наземных и морских платформ сбора опорных данных. В настоящее время важное место занимает организация и проведение комплексных экспериментальных исследований на специальных полигонах, обеспечивающих сопровождение ИСЗ с целью отработки методов тематической интерпретации космической информации и выявления условий, ограничивающих или препятствующих получению информации с заданной точностью. Первостепенной задачей этих исследований является разработка оптимальной методологии проведения наблюдений на подспутниковых трассах с помощью авиационных, судовых и полигонных средств, включая исследование вопроса о совместном использовании разномасштабных измерений. По разработанной и принятой методике могут проводиться регулярные комплексные опорные измерения.

#### 4.2. Технические средства для сбора информации

Авиационные средства дистанционного зондирования земной поверхности по принципу работы и спектру измеряемых данных аналогичны космическим средствам, но работают на значительно меньших высотах. Использование авиационных измерений позволяет выявить влияние атмосферы на результаты измерений, а также экстраполировать результаты локальных наземных измерений на значительные участки земной поверхности, облегчая идентификацию результатов

подспутниковых и космических измерений [3, 5, 7, 9]. Авиационные средства обладают достаточной мобильностью и дают возможность оперативно обследовать различные природные явления, выявленные на основе космических измерений, или оперативно дообследовать участки территории, пропущенные по каким-либо причинам при космических измерениях. В ряде случаев методы оперативного дистанционного зондирования Земли с авиационных носителей могут полностью заменить космические измерения. К таким случаям, в первую очередь, следует отнести изучение небольших территорий, для которых прием или доставка оперативной космической информации оказывается нерентабельной. Кроме того, на этапе разработки технических средств дистанционного зондирования, авиационные носители позволяют детально исследовать особенности работы аппаратуры и ее характеристики, а также получать реальные результаты измерений, необходимые для отработки наземных средств и программ обработки аэрокосмической информации.

Для сбора опорных данных используются оснащенные специальной аппаратурой самолеты и вертолеты. Высота зондирования поверхности Земли с них может колебаться в самых широких пределах: от нескольких десятков километров до десятков метров и зависит от вида собираемых данных и состава бортовой измерительной аппаратуры. Однако в самом общем виде уровни зондирования по высоте сбора разделяют на высокий (8—20 км), средний (1—6 км) и низкий (50—1000 м).

Благодаря возможности «зависания» над изучаемым природным объектом, вертолет с комплексом измерительной аппаратуры может обеспечить сбор как мгновенных, так и динамических характеристик по разным высотам зондирования. Самолеты же в основном используются для получения мгновенных характеристик различных типов объектов на значительных площадях. Однако и в том, и в другом случае состав измеряемых характеристик и их объем определяются содержанием конкретно решаемой задачи дистанционного зондирования. Этими же требованиями определяется и состав измерительной аппаратуры.

В состав аппаратуры самолета-лаборатории АН-30 ГосНИЦИПРа входит многозональная камера МКФ-6М (рис. 4.1), тепловизор, различные спектрометры и радиометры, комплект аэрофотоаппаратов и другая аппаратура.

На самолете Ил-14 в составе аппаратного комплекса Ленинградского отделения Государственного океанографического института используется несколько аэрофотосъемочных аппаратов с различным фокусным расстоянием, набор ИК радиометров для определения температуры водной поверхности, термогигрометр, определяющий температуру и влажность воздуха на высоте полета, ИК лидар для картирования нефтяных пленочных загрязнений морской поверхности, спектрофотометр, предназначенный для определения спектральной яркости моря и другая аппаратура. Для наблюдения и оперативного документирования явлений на водной поверхности служит телевизионный комплекс.

Достоинства наземных измерений заключаются в их достоверности и точности. Однако они

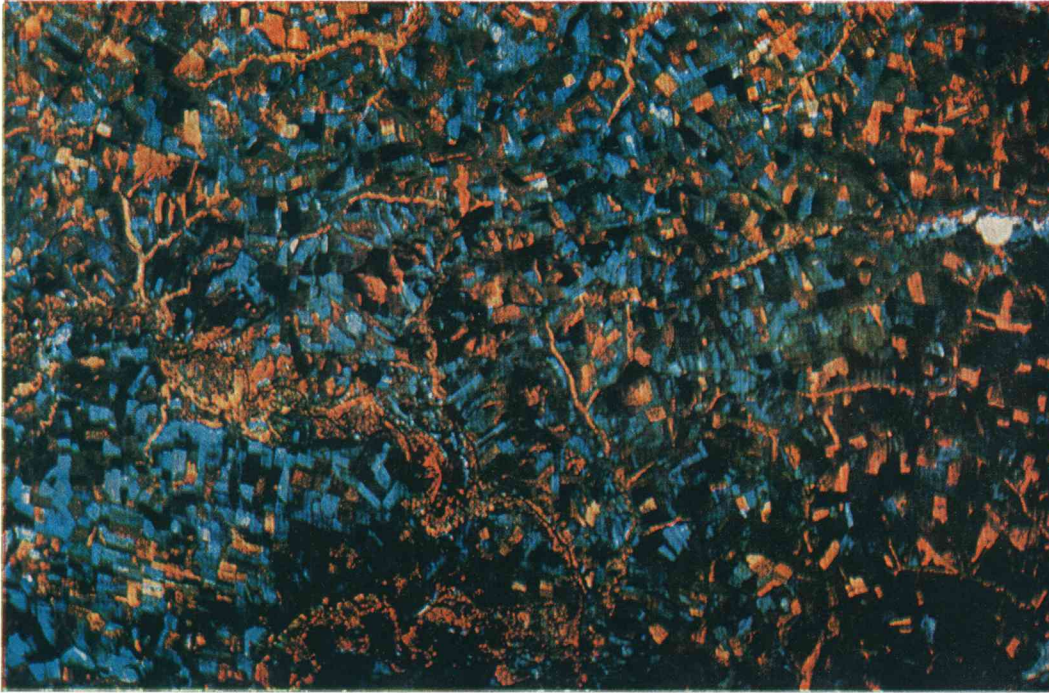


Рис. 3.17. Синтезированное в условных цветах многозональное изображение, полученное аппаратурой „Фрагмент“.

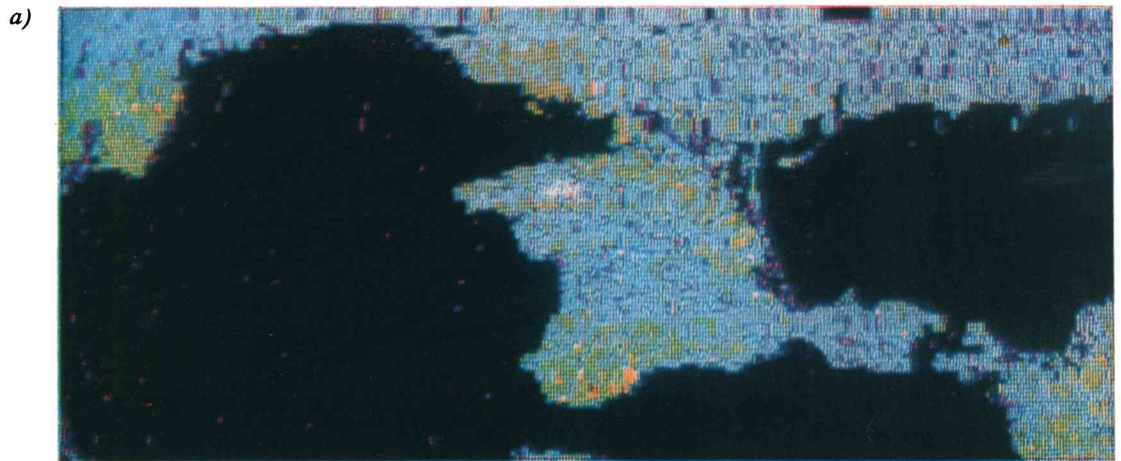


Рис. 5.6. Трансформирование снимка в проекцию карты.

*a* — фрагмент исходного снимка, полученного с ИСЗ „Метеор“ аппаратурой МСУ-М; *б* — этот же фрагмент в проекции Каврайского.

Рис. 5.9. Фильтрация облачности.

*а, в* — до фильтрации; *б, г* — после нее (*в г* — результат цветного синтеза по трем каналам).

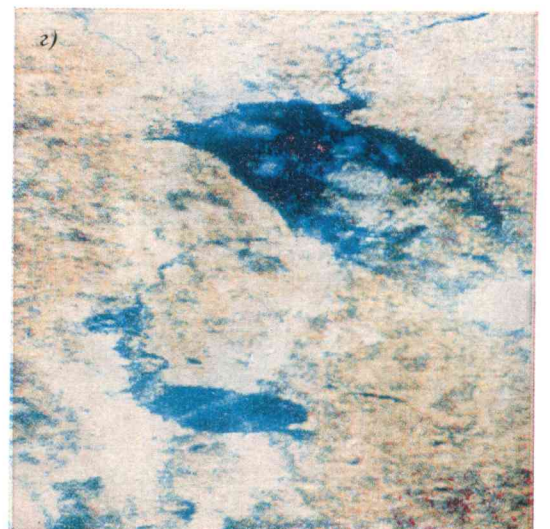
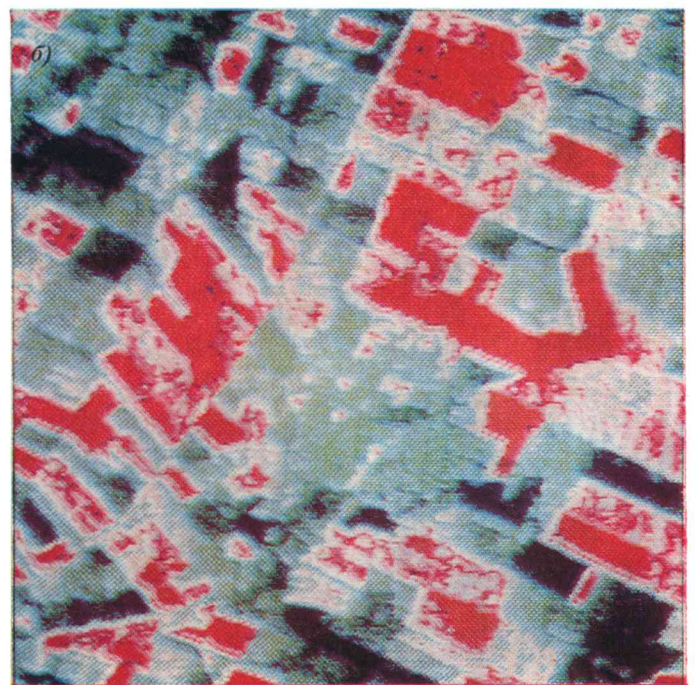
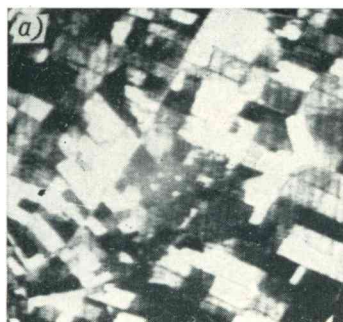


Рис. 5.11. Окрашивание черно-белого изображения в псевдоцвета.

*а* — исходное изображение, *б* — изображение в псевдоцветах.



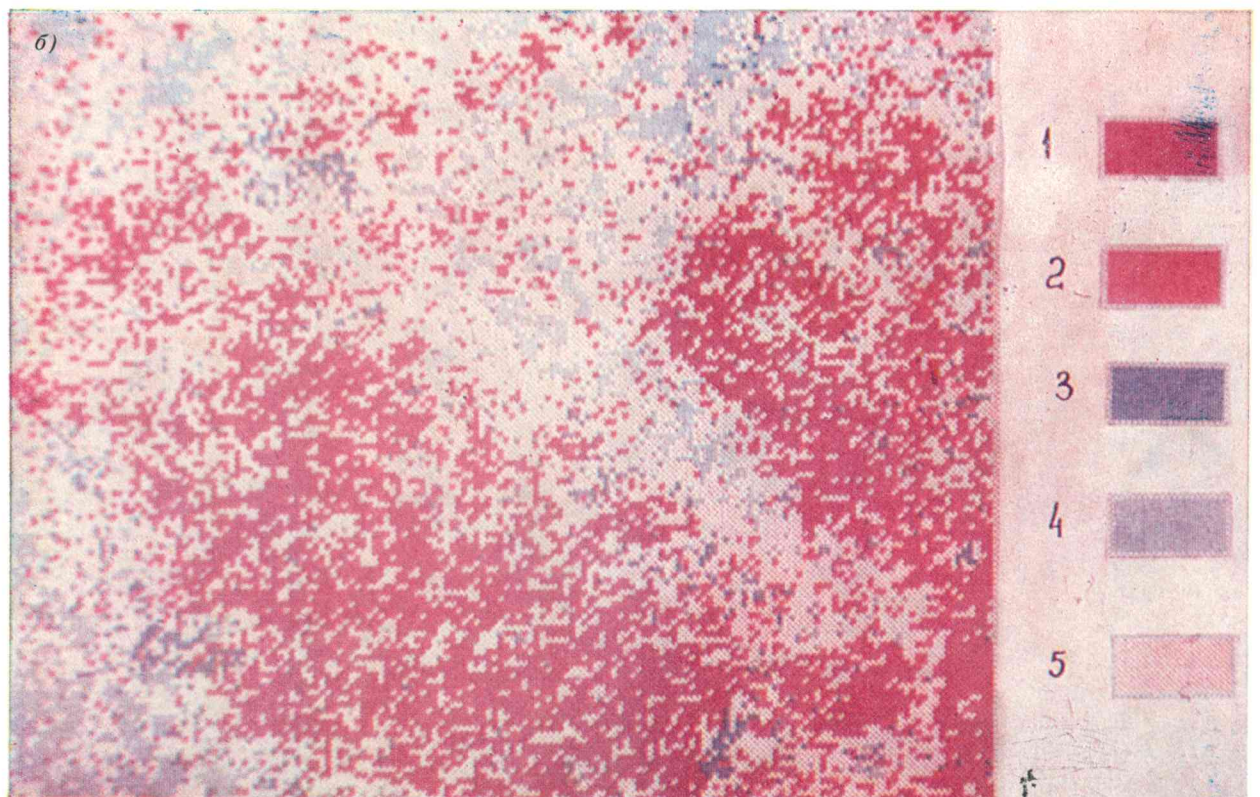
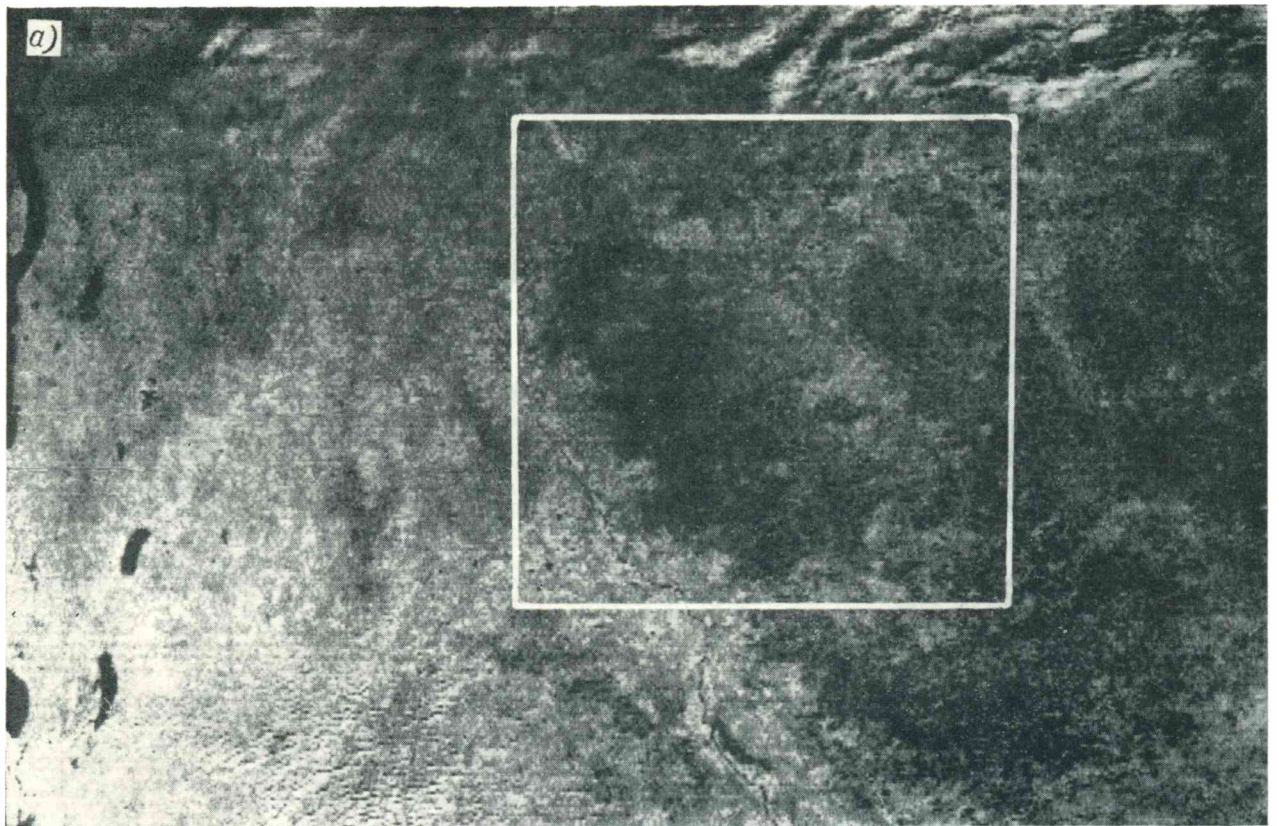


Рис. 7.10. Распознавание лесов.  
*a* — исходное космическое изображение в одном из спектральных каналов (выделен распознаваемый участок), *б* — результат распознавания; 1 — темнохвойные (еловые) леса, 2 — светлохвойные (сосновые) леса, 3 — лиственные (берзовые и осиновые) леса, 4 — болота, 5 — прочие территории.



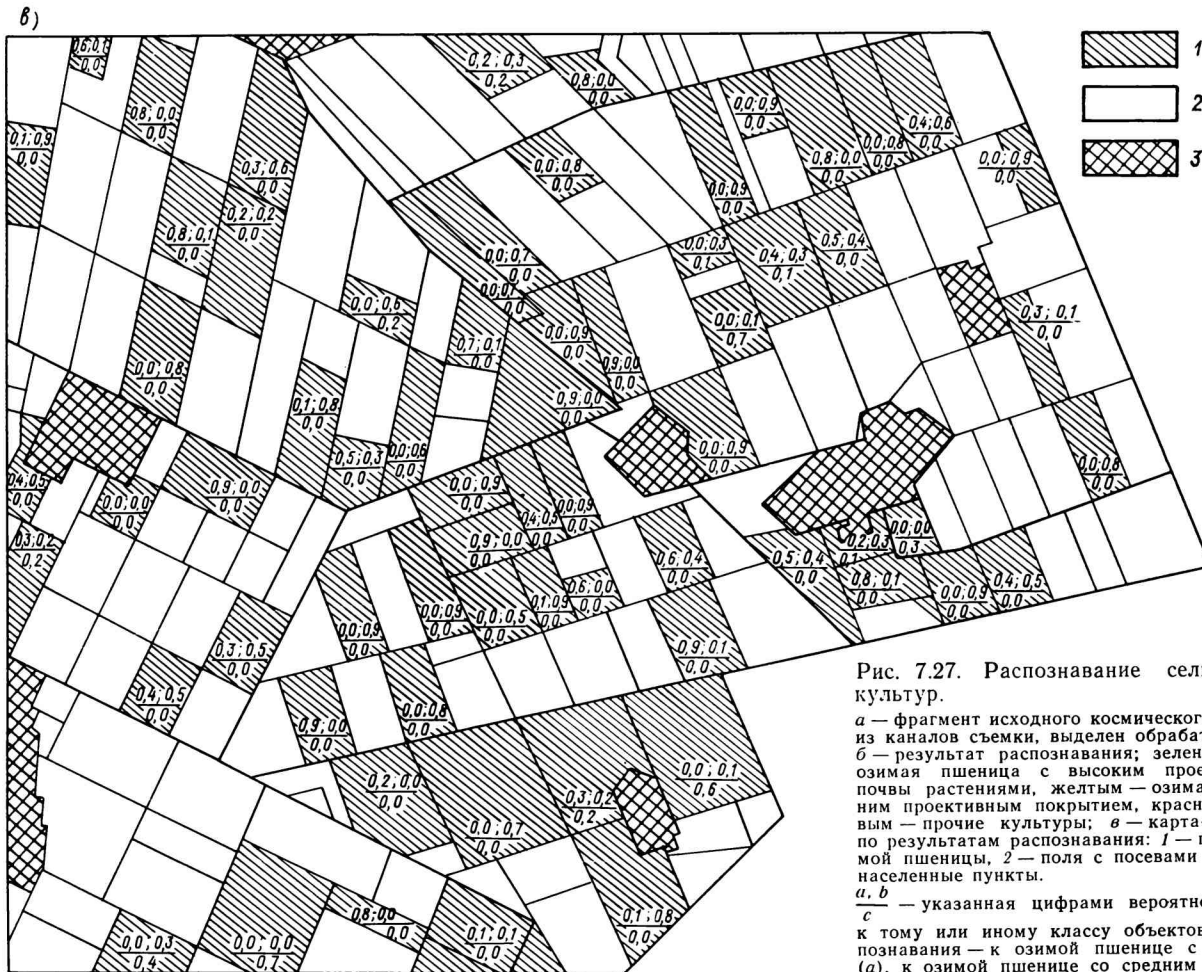
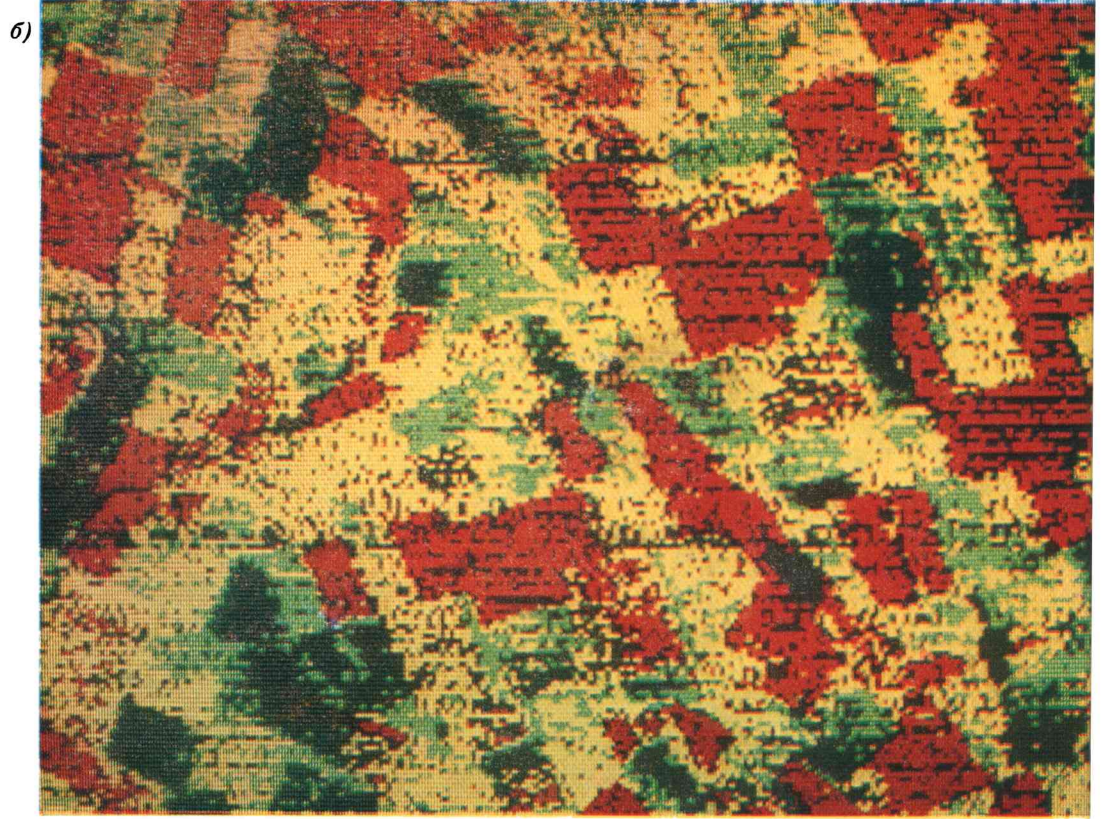
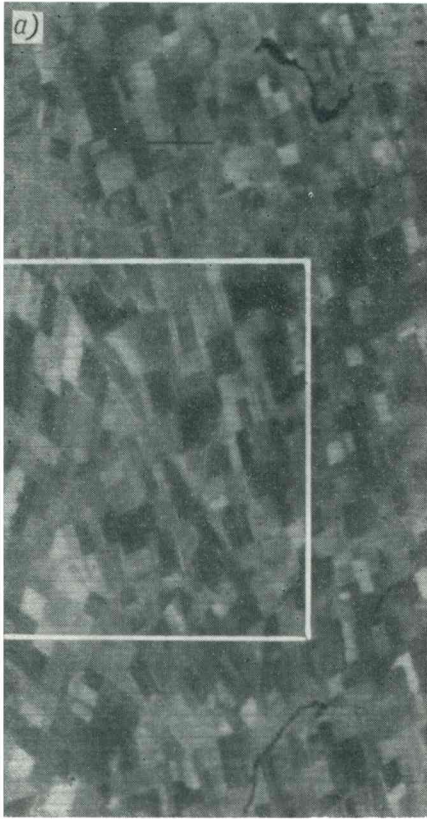


Рис. 7.27. Распознавание сельскохозяйственных культур.

*a* — фрагмент исходного космического изображения (один из каналов съемки, выделен обрабатывавшийся участок);  
*б* — результат распознавания; зеленым цветом показана озимая пшеница с высоким проективным покрытием почвы растениями, желтым — озимая пшеница со средним проективным покрытием, красным — пары, фиолетовым — прочие культуры; *в* — карта-схема, составленная по результатам распознавания: 1 — поля с посевами озимой пшеницы, 2 — поля с посевами прочих культур, 3 — населенные пункты.

*a, б* — указанная цифрами вероятность отнесения поля к тому или иному классу объектов по результату распознавания — к озимой пшенице с высоким покрытием (*a*), к озимой пшенице со средним проективным покрытием (*б*), к парам (*в*).



Рис. 8.7. Синтезированное изображение Онежского озера в период вскрытия, полученное на МСП-4 при использовании негативов и позитивов с ИСЗ „Метеор“ в двух диапазонах 0,5—0,6 и 0,7—1,1 мкм. 14 мая 1981 г.

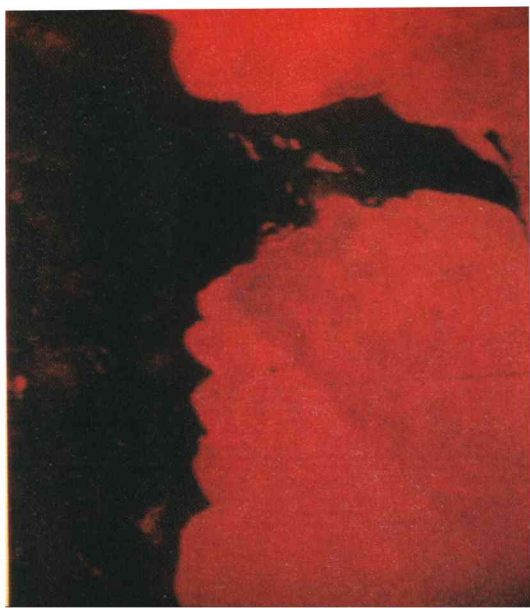


Рис. 9.13. Изображение западной части Каспийского моря, полученное 29 июля 1981 г. со сканера МСУ-С (ИСЗ „Метеор“ канал 0,5—0,7 мкм).



Рис. 9.14. Схема распределения зон с различным содержанием взвешенных частиц грунта в восточной части Финского залива (по результатам интерпретации изображений, полученных 27 сентября 1982 г. сканера МСУ-С ИСЗ „Метеор“).

1 — чистая вода, 2 — значительное загрязнение, 3 — среднее, 4 — слабое.

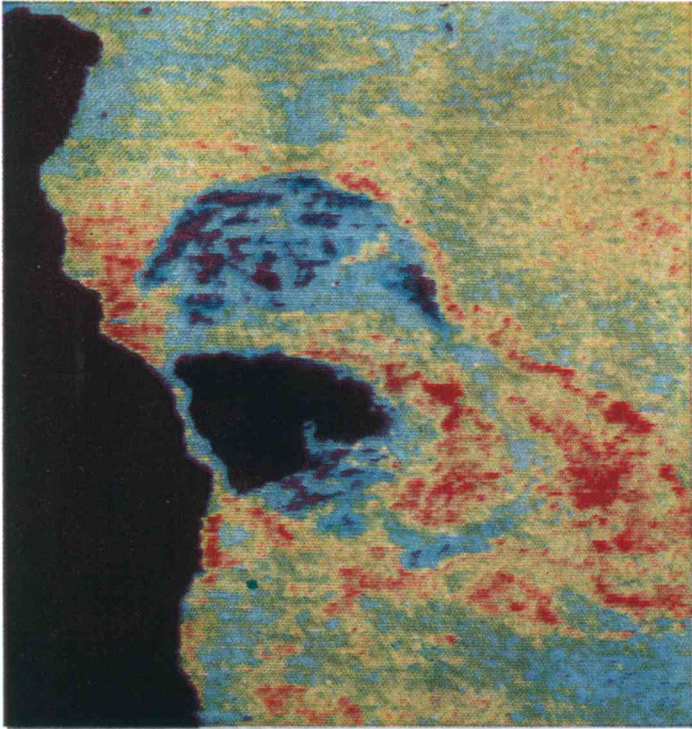


Рис. 9.15. Синтезированное (в условных цветах) на устройстве МСП-4 изображение восточной части Финского залива. 27 сентября 1982 г.

a)



б)



в)

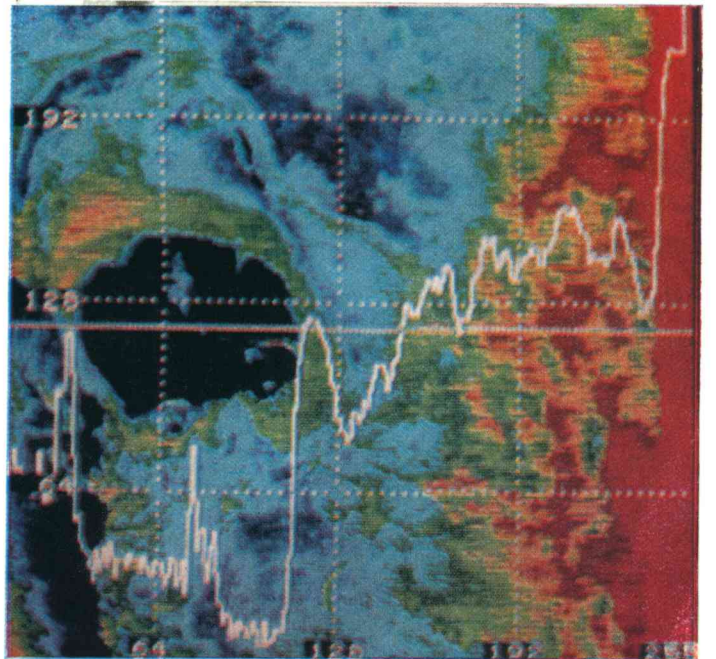


Рис. 10.1. Результат обработки космического изображения залива Кара-Богаз-Гол с ИСЗ „Метеор-Природа“. Диапазон 0,8—1,1, мкм.  
а — 11 декабря 1981 г., б — 24 апреля 1982 г., в — 1 сентября 1982 г.

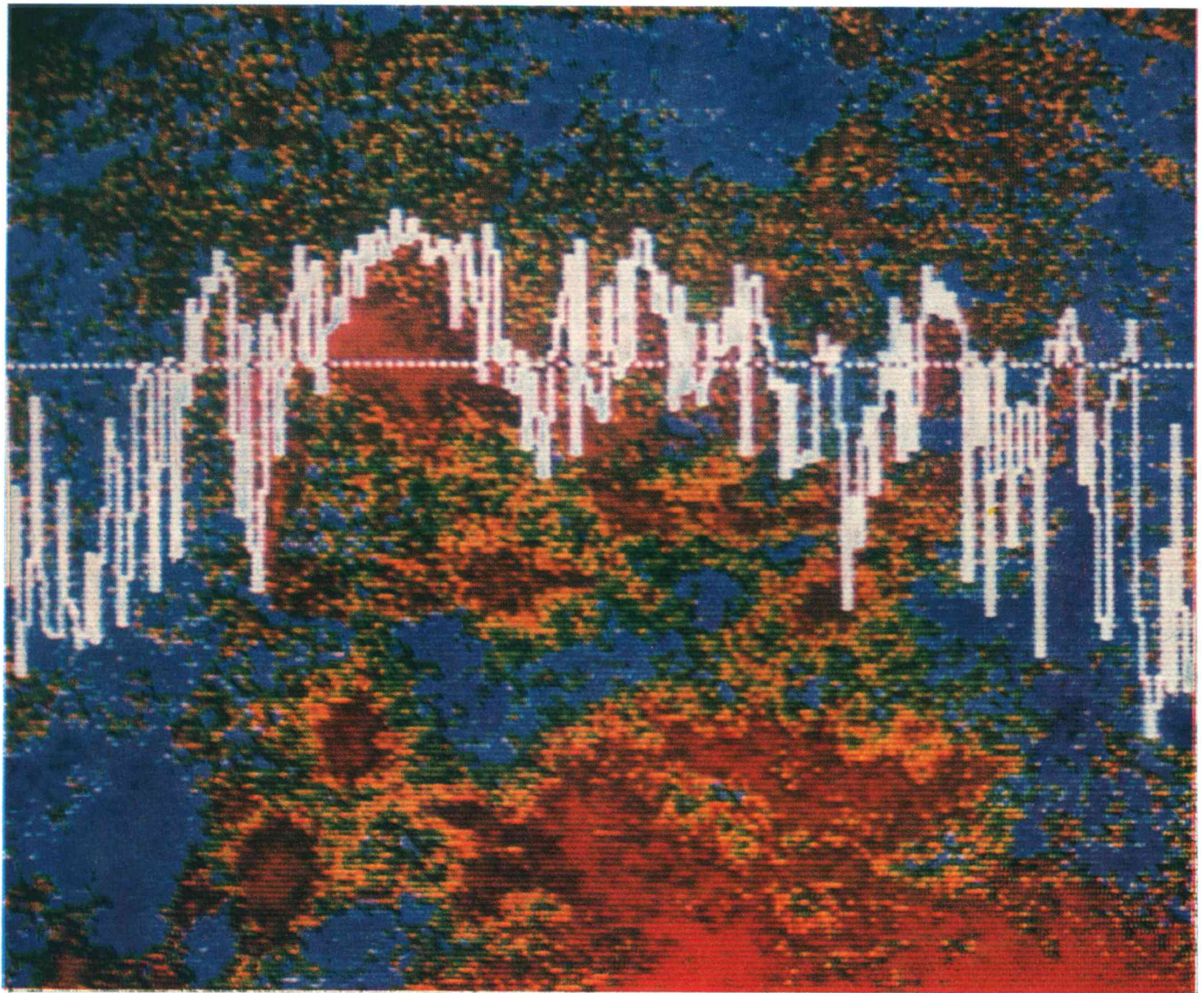


Рис. 10.3. Космическое изображение в видимом диапазоне с регистрограммой, проходящей через крупный промышленный центр.

позволяют охватить лишь незначительные участки земной поверхности. Как правило, наземные измерения производятся на постоянных, заранее выбранных тестовых участках контрольно-измерительных полигонов (КИП) и к ним предъявляются особые требования. КИП представляет собой ограниченную по площади территорию, репрезентативную по физико-географи-

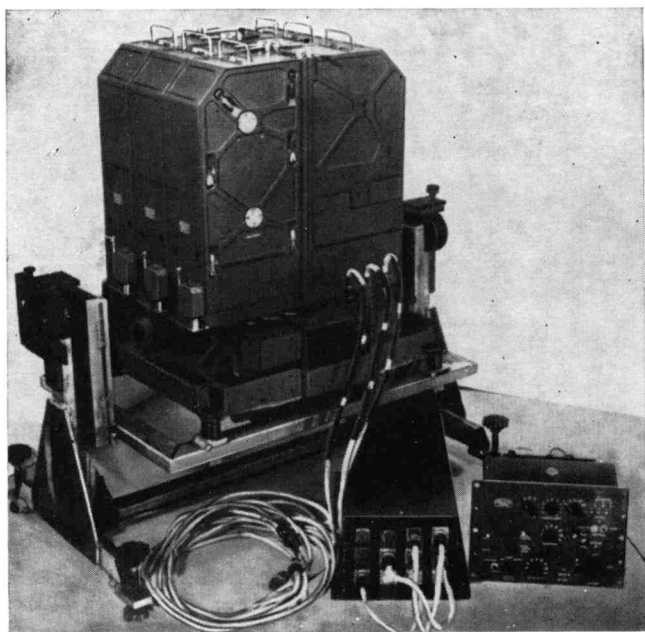


Рис. 4.1. Общий вид многозональной фотокамеры МКФ-6М. Съемочный диапазон 480—840 нм.

ческим условиям для данной зоны. В пределах полигона имеется типичный набор природных комплексов, как находящихся в естественном состоянии, так и подвергающихся антропогенным воздействиям. Территория полигона должна быть легко доступной для экспедиционных обследований и иметь хорошую обеспеченность картографическими и аэрофотосъемочными материалами. Обязательным требованием к любому полигону должно быть наличие на его территории так называемых тестовых участков, на которых проводятся детальные стационарные или полустационарные исследования природных объектов. Такие тестовые участки служат базой для проведения необходимых методических работ, связанных с проблемой идентификации природных объектов и изучения их свойств на основе сопоставления и корреляции разного вида данных дистанционного зондирования с данными непосредственных измерений наземного уровня. Тестовые участки должны быть репрезентативны по своим физико-географическим условиям для данного полигона, чтобы можно было полученные результаты экстраполировать на территорию полигона. Они должны иметь оптимальные размеры, с одной стороны, для того, чтобы их характерные черты отразились на используемых в работе мелко-масштабных космических снимках, а с другой стороны, чтобы можно было проводить подробные наземные исследования. Конкретный размер каждого тестового участка в каждом данном случае зависит от поставленной задачи в том или ином спутниковом эксперименте.

Ввиду значительной временной изменчивости океанографических параметров сбор опорной информации на морях имеет свои особенности [1, 4, 8, 10].

Получаемую на полигонах информацию, накапливаемую в «банках данных», целесообразно, в первую очередь, использовать для создания и совершенствования методов тематической интерпретации космической информации. Вместе с тем значительный объем регулярно получаемой природно-ресурсной и гидрометеорологической информации позволяет рассматривать подспутниковые полигоны и как самостоятельные средства сбора режимной информации.

Следует иметь в виду, что сама постановка вопроса о проведении подспутниковых (самолетных и наземных) измерений корректна лишь в том случае, когда самолетная и наземная информация совместима со спутниковой и может быть эффективно использована при анализе и интерпретации последней.

Для того чтобы обеспечить такую совместимость, необходимо обеспечить:

- синхронность (или квазисинхронность) получения всех видов информации,
- метрологическое единство всех видов измерений,
- репрезентативность наземных и самолетных измерений относительно территории, охватываемой космической съемкой,
- сопоставимость масштабов и разрешающей способности всех видов измерений,
- оперативность доставки самолетной и наземной информации в центры приема и обработки спутниковой информации.

Остановимся более подробно на некоторых из них.

Требование синхронности особенно важно при изучении динамичных (быстроменяющихся) параметров природных образований и явлений. Так, например, задержка в 2—3 дня выполнения самолетных и наземных работ относительно даты космической съемки агрометеорологических параметров в период смены фаз вегетации, может привести к полной несовместимости этой информации со спутниковой. Особенно жесткие требования по синхронности сбора информации при исследовании поверхности морей и океанов ввиду их значительной временной изменчивости. В то же время для целого ряда приложений синхронность не является жестким требованием, например, при картировании ледников, границ водоемов и т. п.

Большое внимание должно быть уделено вопросам метрологического контроля всей совокупности контактных и неконтактных, спутниковых и полигонных измерений. Обеспечение единства, достоверности и точности измерений, несомненно, требует разработки теоретических основ метрологии дистанционных определений параметров природной среды. Метрологическое обеспечение измерений, выполненных наземной, самолетной и спутниковой аппаратурой, является одним из основных и самых сложных требований. Для выполнения этого требования необходимо проводить взаимную привязку энергетических шкал и спектральных каналов аппаратуры с помощью унифицированных стенов и эталонов и по единой методике. Несоблюдение

этого требования приводит к тому, что спутниковые, самолетные и наземные измерения сопоставляются лишь качественно. При этом невосполнимо теряется и не используется значительная часть собранной информации.

Для функционирования сети сбора и первичной обработки измерений на контрольно-измерительных полигонах и тестовых участках, а также для пере-

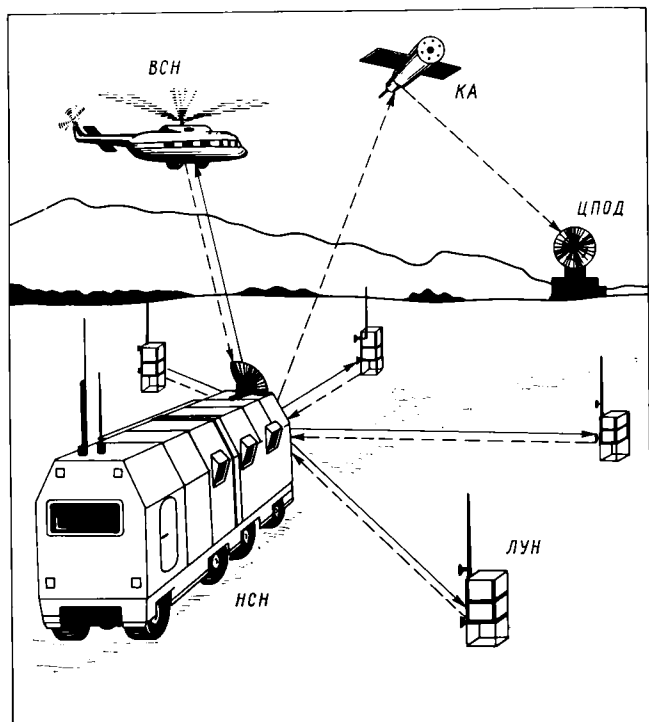


Рис. 4.2. Автоматизированный информационно-измерительный комплекс.

дачи этих данных в региональные центры обработки предназначены автоматизированные информационно-измерительные комплексы (АИИК) [6].

Автоматизированный информационно-измерительный комплекс, разработанный АН Азербайджанской ССР, способен производить регулярные, квазисинхронные с аэрокосмическими измерения параметров природной среды на тестовых участках и передавать эти данные с помощью аппаратуры радиосвязи через ИСЗ или стандартные каналы связи в региональный центр.

Комплекс состоит из локальных узлов наблюдения (ЛУН), наземной станции наблюдения (НСН) и воздушной станции наблюдения (ВСН) (рис. 4.2). Базовым элементом является наземная станция наблюдений, выполняющая функцию управле-

нию комплексом. Она является передвижной станцией, снабженной средствами измерения, первичной обработки, документирования и передачи обработанной измерительной информации через ИСЗ в региональный центр приема и обработки данных (ЦПОД). Аппаратура наземной станции, размещенная на подготовленном для исследования тестовом участке, осуществляет дистанционное управление процессами измерения на локальных узлах наблюдения, проводит как собственные измерения, так и сбор информации с локальных пунктов наблюдений. Воздушная станция наблюдений предназначена для дистанционных измерений оптико-физических параметров объектов земной поверхности, регистрации измеренной информации и передачи ее по радиоканалу.

#### 4.3. Комплексные подспутниковые эксперименты

В интересах различных направлений космического землеведения было выполнено несколько крупных комплексных подспутниковых экспериментов. Так, в 1975 г. в бассейне р. Вятки проведен подспутниковый эксперимент с целью отработки методики получения данных о состоянии снежного покрова. В 1981 г. на территории Херсонской области выполнен комплексный эксперимент в интересах агрометеорологии и управления сельскохозяйственным производством. В этих экспериментах синхронно со спутниковыми измерениями проводились обширные работы по фотографированию и спектрометрированию поверхности в различных участках электромагнитного спектра с самолетов и вертолетов, выполнен широкий круг измерений непосредственно на земной поверхности. В 1982 г. на акватории Балтийского моря проведен комплексный подспутниковый океанографический эксперимент, в котором, наряду со специалистами СССР, участвовали специалисты ГДР. В этом эксперименте для определения океанографических параметров использовались полеты самолетов на средних и малых высотах, проведены судовые измерения характеристик моря и атмосферы, привлекались данные береговых пунктов и станций аэрологического зондирования. Материалы синхронных спутниковых съемок и подспутниковых измерений и наблюдений использовались для создания и усовершенствования методик сбора опорной информации и интерпретации спутниковых данных, а также для отработки элементов технологической схемы взаимодействия спутниковых и наземных комплексов в рамках космической системы изучения природных ресурсов.

# Цифровая обработка многозональной космической видеоинформации



650604501824360

## Глава 5

Эффективность процесса изучения природных ресурсов космическими средствами во многом зависит от методов обработки получаемой информации [1—12]. Общую задачу обработки многозональной космической информации можно сформулировать как задачу определения свойств природных объектов по результатам измерения их спектрального излучения. Решение этой сложной комплексной задачи можно подразделить на различные более или менее независимые друг от друга процедуры (блоки обработки). В зависимости от темы решаемой задачи алгоритм обработки организуется как та или иная последовательность изложенных ниже процедур.

**5.1. Процедуры улучшения качества многозональной информации** предназначены для устранения различного рода помех систематического и случайного характера. С этой целью обычно используются методы фильтрации и коррекции. Фильтрацией называют селективную обработку данных, заключающуюся в их разложении на компоненты. Методы фильтрации могут применяться не только для снятия искажений, но и непосредственно в тематическом анализе. При математической постановке задач фильтрации необходимо предположение о случайной природе искажающих факторов. Коррекцией называют введение систематических поправок в информацию. При постановке задач коррекции предположение о случайном характере искажений не требуется.

Основная задача, решаемая в этом блоке, — радиометрическая коррекция спутниковых измерений, т. е. устранение искажений, которые возникают из-за несовершенства регистрирующей аппаратуры и шумов каналов связи. Возможность проведения радиометрической коррекции данных при наличии сложных нелинейных искажений обычно обеспечивается эталонными сигналами. Приведем пример типичной задачи радиометрической коррекции. С целью повышения разрешения и улучшения соотношения сигнал/шум в некоторых сканерах помещают линейку детекторов излучения, сканируя одновременно несколько строк поперек трассы полета ИСЗ. Точная калибровка детекторов и сохранение этой калибровки в процессе эксплуатации прибора задача технически сложная. Несовершенство калибровки проявляется на изображениях в виде эффекта «полосатости». Рассчитав по полученным «полосатым» данным характеристики для каждого из детекторов, этот нежелательный эффект можно компенсировать. (рис. 5.1).

В этом же блоке фильтруются помехи случайного характера — сбойные строки, импульсные по-

мехи, наложение частот, смаз, расфокусировка и т. п. На рис. 5.2 *а* приведено изображение, зашум-

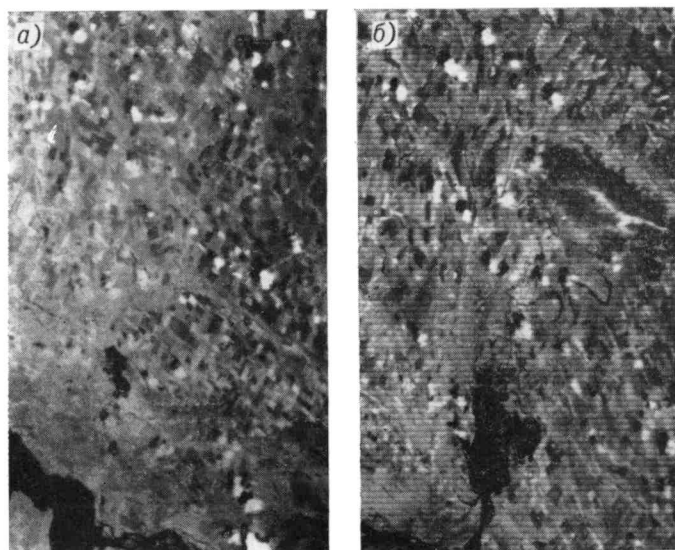


Рис. 5.1. Радиометрическая коррекция спутниковых данных. *а* — до коррекции, *б* — после коррекции.

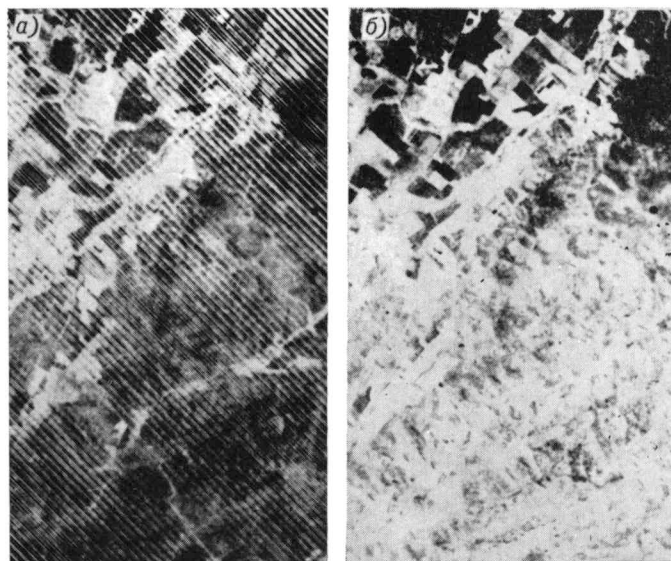


Рис. 5.2. Фильтрация периодической помехи. *а* — до фильтрации, *б* — после фильтрации.

ленное при приеме наложением двух частот из-за неисправной линии связи, а на рис. 5.2 *б* — результат фильтрации этой периодической помехи. Алго-



ритм фильтрации включал расчет спектра мощности зашумленных данных при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Затем паразитные гармоники, присутствующие в спектре в виде острых пиков, устранялись путем осреднения соответствующих частот, далее производилось обратное БПФ.

**5.2. Процедуры сжатия и кодирования** предназначены для повышения эффективности передачи, хранения и обработки многозональных данных путем устранения информационной избыточности. Возможность «сжатия» информации, т. е. представления ее меньшим числом бит по полю яркости (пространственные координаты) и по съемочным диапазонам (спектральные координаты) обеспечивается наличием сильных межэлементных и межзональных связей. Эти связи существуют в силу того, что многозональные космические снимки несут в себе информацию о достаточно однородных природных образованиях, размеры которых намного превосходят размеры элемента разрешения съемочной аппаратуры, и информацию о достаточно монотонных спектральных характеристиках этих образований. Кроме того, если дешифрирование снимков ведется визуально, то особенности психофизических свойств человека позволяют преднамеренно исключить часть информации, не вызвав при этом заметной для дешифровщика потери качества изображения.

Способы сжатия видеоинформации условно можно подразделить на три группы: кодирование с предсказанием, кодирование с преобразованием и статистическое кодирование. Алгоритмы, в которых соединено несколько способов сжатия, принято называть гибридными.

Наиболее распространенным алгоритмом первой группы является алгоритм дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ). Сущность метода ДИКМ состоит в том, что вместо абсолютного значения яркости элемента разрешения в канал связи передается лишь разность между текущим значением яркости и его предсказанным значением на приемнике. Учитывая особенности человеческого зрения, в частности, малую чувствительность к искажениям при больших по величине перепадах яркости, а также малую вероятность таких перепадов в изображениях земной поверхности, в ДИКМ используется неравномерная шкала квантования, позволяющая существенно уменьшить число возможных комбинаций. Так, если исходное изображение имело  $N$  градаций яркости, а разности квантовались на  $M$  градаций, то коэффициент сжатия будет равен  $\log_2 N / \log_2 M$ , поскольку на хранение числа  $K$  требуется  $\log_2 K$  бит. Обычно корреляционные связи в изображениях столь сильны, что предсказание следующего отсчета можно вести по 2—3 предыдущим отсчетам. Декодирование изображения производится последовательным сложением квантованных разностей.

Идея методов кодирования с преобразованием заключается в разложении многомерных данных по некоторому ортогональному базису таким образом, чтобы проекции на некоторые оси оказались пренебрежимо малыми. В этом случае вместо  $p$  компонент исходного вектора хранится лишь  $q$  ( $q < p$ ) его проекций на оси новой системы координат. Известно, что минимум средней квадратической ошибки при такого рода аппроксимации

достигается при разложении по собственным векторам ковариационной матрицы (метод главных компонент). Разложение по методу главных компонент (МГК) приводит к некоррелированным компонентам. Однако с вычислительной точки зрения данный метод не эффективен, поэтому на практике используются квазиоптимальные способы разложения, которые быстро и удобно реализуются на ЭВМ. Речь идет о быстрых преобразованиях Фурье (БПФ), Адамара (БПА), косинусов (БПК) и др. Компоненты разложения по этим преобразованиям более зависимы (и, следовательно, у них большая избыточность), так как базисные системы функций (тригонометрическая система для БПФ и БПК, система функций Уолша для БПА) в отличие от системы собственных векторов в МГК, не зависят от статистических свойств изображения. Восстановление изображения по его проекциям производится путем обратного преобразования.

Статистическое кодирование обычно является заключительным этапом в процедурах сжатия информации. Экономия в объеме цифрового описания изображения достигается при этом за счет использования неравномерности в частоте появления отдельных значений отсчетов. В основе методов статистического кодирования лежит принцип обратной пропорциональности длины кода яркости частоте появления отсчета с этой яркостью.

Из рассмотрения рис. 5.3—5.5 видно, что «сжатие» приводит к некоторому ухудшению разрешения за счет потери высоких частот. Это происходит потому, что свойственная изображениям корреляция отсчетов яркостей приводит к концентрации энергии в области нулевых пространственных частот и сжатие ведется за счет усечения высокочастотных компонент, вклад которых невелик.

**5.3. Процедуры геометрических преобразований.** Многозональные космические съемки могут выполняться различной съемочной аппаратурой, с разных орбит и при разных углах ориентации ИСЗ. Естественно, возникает необходимость привязки полученных таким образом снимков к единой системе координат. Чаще всего привязку осуществляют в географической системе координат.

Процедуры геометрических преобразований предназначены также для решения задачи географической привязки. Кроме того, такой блок с помощью алгоритмов совмещения и стыковки снимков должен обеспечивать выполнение различных геометрических измерений — измерение расстояний между точками, углов между направлениями, периметров, площадей и т. п.

Географическую привязку можно выполнить двумя способами. Первый способ заключается в трансформировании снимков в заданную картографическую проекцию с указанием основного масштаба. В результате получается новое изображение, составленное по данным исходного снимка. При выборе проекции учитывают назначение тематической карты, а также критерии точности и простоты измерений соответствующих параметров. При трансформировании в проекцию карты снимок может претерпевать значительные геометрические изменения (рис. 5.6, вкладка).

Второй способ географической привязки состоит в расчете и «замешивании» в изображение

Рис. 5.3. Сжатие методом ДИКМ.

*a* — исходное изображение, *б* — сжатие в 2 раза, *в* — в 2.7 раза, *г* — в 4 раза, *д* — в 8 раз.

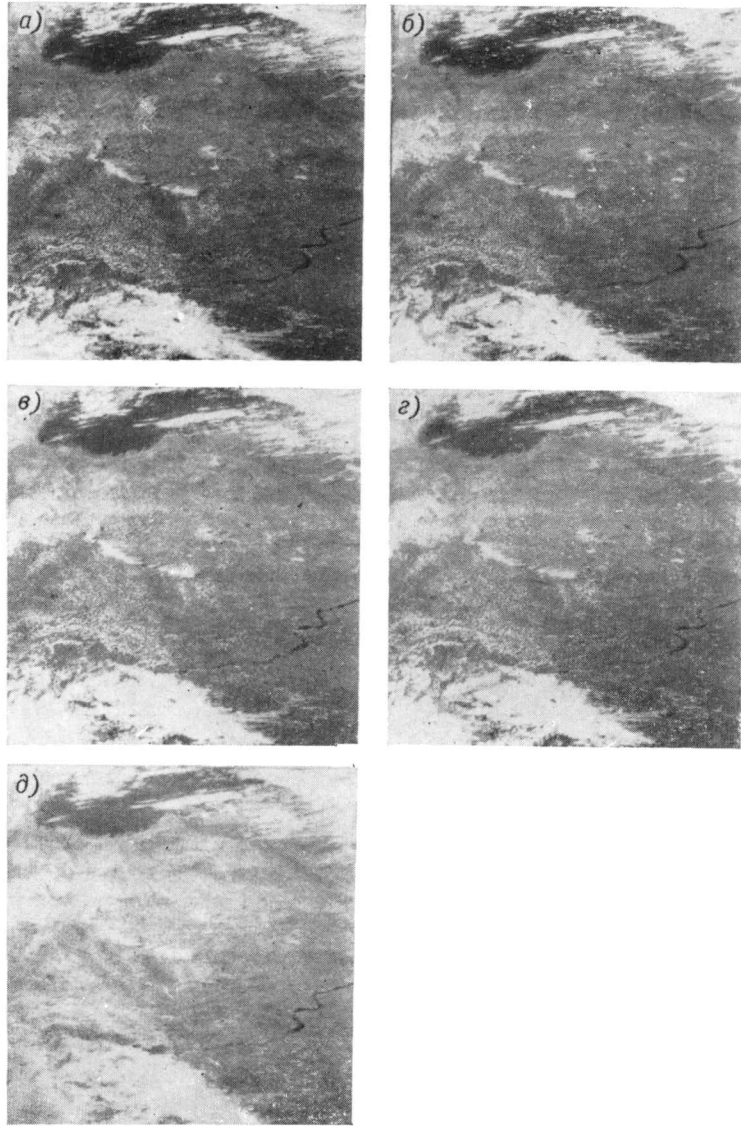
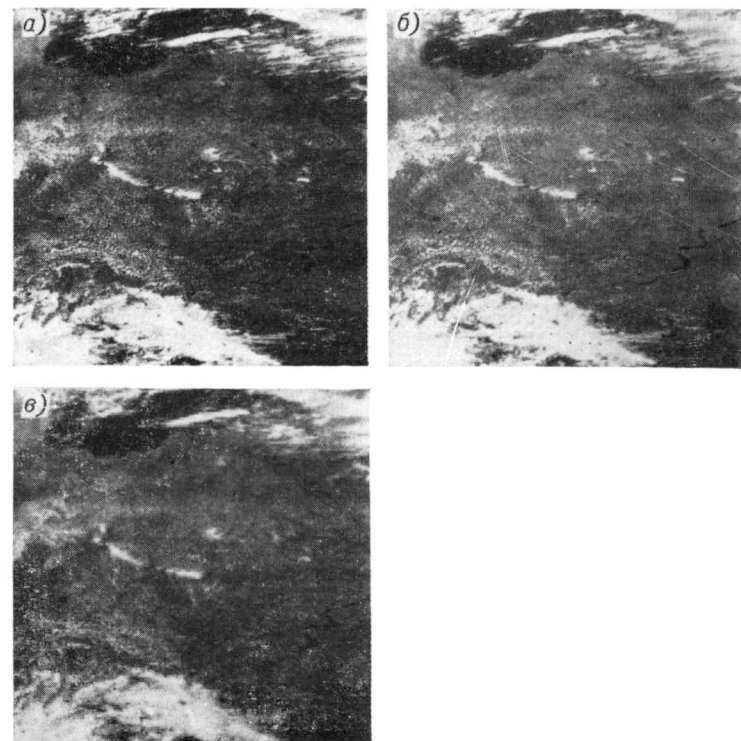


Рис. 5.4. Сжатие методом БПА.

*a* — сжатие в 2.7 раза, *б* — в 4 раза, *в* — в 8 раз.



сетки заданных параллелей и меридианов. В этом способе для снимка определяются те же его элементы, географические координаты которых совпадают с широтами и долготами заданной сетки параллелей и меридианов (или другой системы координат, однозначно связанной с географической).

В любом случае необходимо иметь уравнения

а также контуры береговой линии Каспийского и Черного морей, рассчитанные на основе первого подхода. Несовпадение на этом снимке изображенной береговой линии с замешанными контурами (пунктирная линия) вызвано ошибками исходных данных (в параметрах траектории и ориентации ИСЗ, в параметрах съемочной аппаратуры и т. п.), использованных при детерминированном

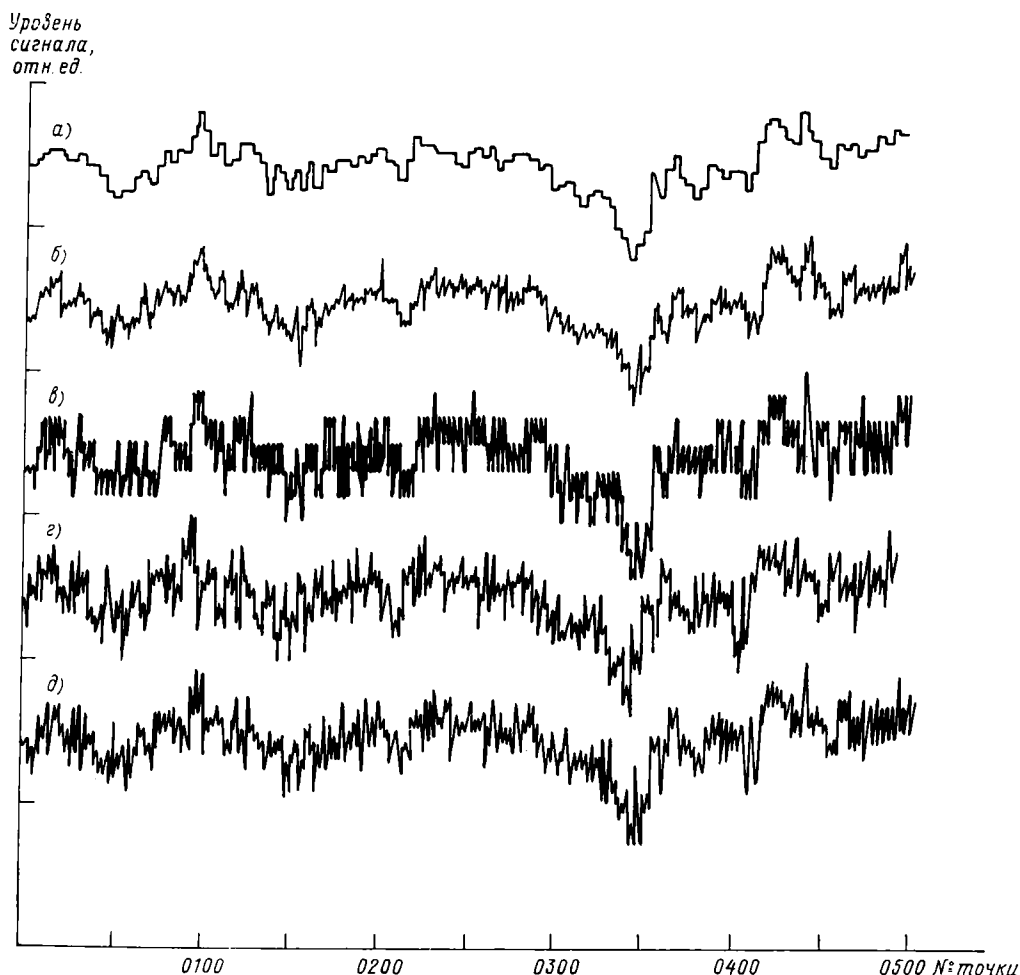


Рис. 5.5. Профили строки изображения при различных коэффициентах сжатия.

а — сжатие в 8 раз методом БПА. б — сжатие в 2,7 раза методом БПА. в — сжатие в 8 раз методом ДИКМ. г — сжатие в 2,7 раза методом ДИКМ. д — исходная информация.

связи между системой координат снимка и географической системой координат. При получении уравнений связи возможны два подхода: при первом устанавливаются детерминированные зависимости, основанные на законах движения ИСЗ по орбите и его вращения вокруг центра масс, вращения Земли, работы съемочной аппаратуры и т. п.; при втором эти уравнения определяются в виде полиномиальных зависимостей между вышеуказанными системами координат, причем коэффициенты полиномов определяются по измерениям координат опорных точек (или контуров), т. е. точек снимка, для которых заранее известны их географические координаты.

Большой ряд изучения природных ресурсов Земли требует высокой точности привязки — порядка одного-двух элементов пространственного разрешения съемочной аппаратуры. Для достижения такой точности привязки целесообразно последовательно применение первого и второго подходов. На рис. 5.7а представлен снимок, в котором «замещена» сетка параллелей и меридианов,

решении. Естественно, что ошибку построения сетки параллелей и меридианов можно оценить по несоответствию «замешанных» контуров с контурами, изображенными на снимке и уменьшить (рис. 5.7 б), используя полиномиальную зависимость.

**5.4. Процедуры радиационной коррекции** предназначены для коррекции яркостных и пространственно-частотных искажений отраженного излучения, вызванных влиянием атмосферы. Цель радиационной коррекции можно определить как получение новых дешифровочных признаков, которые являются устойчивыми относительно меняющихся условий съемки (углов Солнца, углов визирования, состояния атмосферы). Сигнал, регистрируемый на ИСЗ, представляет собой некоторое функциональное преобразование отражательных свойств подстилающей поверхности. Отыскание вида этого преобразования сводится к задаче переноса излучения в атмосферу. Методы приведения измерений к стандартным условиям съемки можно разбить на две группы.

Методы первой группы на основе физических моделей переноса излучения предполагают расчет корректирующего преобразования для всего набора значений аргументов и коррекцию данных по этим коэффициентам. Таким образом осуществляется переход к отражательным характеристикам природных образований. Эффект коррекции выражается в некотором усилении контраста изображения. Этот так называемый абсолютный метод радиационной коррекции имеет ограниченные возможности применения, поскольку для его реализации нужны сведения о прозрачности атмосферы.

К методам абсолютной коррекции примыкает ряд эмпирических приемов, дающих возможность построить новое изображения, слабо зависящие от атмосферных условий. Так, например, если влияние атмосферы можно объяснить мультипликативным фактором, то хорошие результаты дает метод «отношения каналов». Для более сложных моделей возможно применение дробно-линейных преобразований.

В методах второй группы используется оценка коэффициентов корректирующего преобразования статистическими способами путем построения регрессионных связей между наборами многозональных данных. При этом один из наборов данных берется в качестве эталонного. Таким образом, в результате мы можем получать инварианты по отношению к изменениям внешней среды без учета ее влияния для эталонного набора данных. Коррекцию такого вида обычно называют относительной. Относительная коррекция широко применяется при обработке многозональных данных, поскольку при этом не требуется никакой дополнительной информации, кроме самих многозональных данных.

Относительная коррекция тесно связана с задачей, которую часто называют задачей адаптации данных. Дело в том, что оценка параметров природной среды по многозональной космической видеоинформации так или иначе требует использования обучающих данных. Создание же стационарного банка данных, достаточно полного по классам природных объектов и учитывающего переменные условия съемки, представляется нереальным. В то же время при спутниковых измерениях, выполняемых с большой частотой, получение синхронных обучающих данных на основе подспутниковых наблюдений встречает существенные трудности. Если выявить функциональные связи между обучающей и распознаваемой информацией, то сбор обучающих данных можно минимизировать по частоте и объему путем адаптации сведений из банка данных к новым условиям съемки. Очевидно, что задача адаптации разновременных наблюдений, как и задача использования обучающих данных из одного географического региона для распознавания подобных объектов в другом регионе непосредственно связана с задачей относительной радиационной коррекции. Кроме того, использование статистических методов совместно с методами, основанными на расчете физических моделей, дает возможность осуществлять абсолютную радиационную коррекцию путем экстраполяции сведений об атмосфере из банка данных.

Для иллюстрации влияния атмосферы решим задачу распознавания для двух четырехзональных изображений одного и того же участка (Рыбинское водохранилище), полученных с ИСЗ «Метеор» в разное время. Сначала по «обучению» на первом снимке проводим распознавание водных поверхностей на втором снимке (рис. 5.8а), а затем повторим распознавание, но уже после адаптации обучающих данных статистическими методами (рис. 5.8б). И, наконец, проводим обучение и распознавание только по второму снимку (рис. 5.8в). Такая стратегия моделирует подход к распознаванию на основе банка сигнатур, когда из банка берут обучающие данные и адаптируют их к конкретным условиям. Рассмотрение рис. 5.8 позволяет сделать вывод, что результаты распознавания по данным из банка (после относительной радиационной коррекции) практически мало отличимы от результатов распознавания по статистическим данным самого снимка. Оценка изменчивости данных есть разница в точности распознавания (см., например, рис. 5.8а и 5.8в).

К кругу задач атмосферной коррекции относится и задача фильтрации полупрозрачной облачности. Известно, что для получения свободного от облачности изображения того или иного представляющего интерес участка земной поверхности иногда нужны недели регулярной работы ИСЗ. Это создает большие трудности при изучении динамики природных объектов. В то же время, если облачность, которая закрывала земную поверхность в момент съемки, была полупрозрачна, то видеосигнал будет содержать в себе информацию и о земной поверхности. Естественно попытаться освободить эту информацию от искажений, возникающих при прохождении излучения через облачность. Задача фильтрации облачности является достаточно сложной, поскольку кроме отражающей нижней границы (земная поверхность) появляется частично прозрачная верхняя граница (облака). Линеаризовав задачу и воспользовавшись теорией оптимальной линейной фильтрации, были построены фильтры Колмогорова — Винера и произведена процедура фильтрации полупрозрачной облачности по снимкам с ИСЗ «Метеор». Рисунки 5.9а, в (вкладка) иллюстрируют фильтрацию полупрозрачной облачности для снимка в одном из спектральных диапазонов. На рис. 5.9б, г представлены результаты фильтрации для трех спектральных диапазонов. Многозональные изображения представлены в цветосинтезированном виде, т. е. первый диапазон был пропущен через красный фильтр, второй через зеленый и третий через синий, затем было произведено поэлементное сложение всех цветов. Цветной синтез является одним из способов представления нескольких изображений одним изображением, содержащим весь полезный объем информации. Сравнивая рис. 5.9а, в с рис. 5.9б, г, можно заметить, что там, где облачность была плотной (уровень шума велик и полезной информации в сигнале почти не было), никаких улучшений фильтрация не дала. Однако большая часть снимков практически оказалась «освобожденной» от полупрозрачной облачности.

Вышеперечисленные процедуры обработки многозональной космической видеоинформации можно

назвать процедурами нормализации, поскольку с их помощью выполняются преобразования, приводящие информацию к некоторому стандартизованному виду.

ческих операций новых изображений (взятие взвешенных сумм, отношений, произведений), цветокодирование и т. п. Анализ рис. 5.10 показывает, что новое изображение, являющееся взвешенной

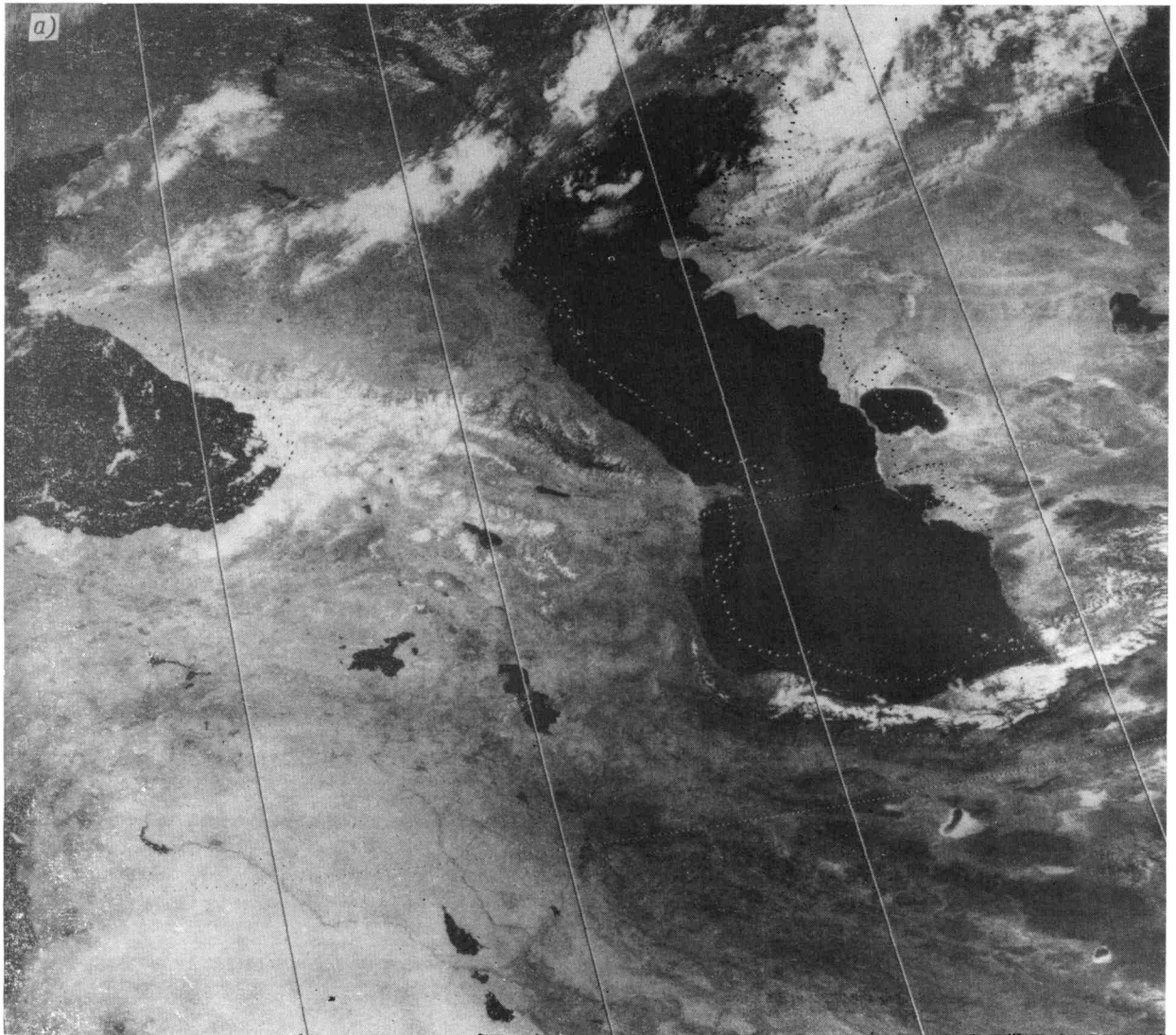


Рис. 5.7. Замешивание в снимок координатных сеток и контуров.

*a* — снимок малого разрешения с ИСЗ «Метеор» с замешанной сеткой параллелей и меридианов, а также с контурами береговых линий Каспийского и Черного морей, рассчитанными на основе детерминированных зависимостей; *б* — этот же снимок после коррекции, выполненной на основе использования полиномиальных зависимостей.

Рассмотрим теперь процедуры, предназначенные непосредственно для решения задач интерпретации.

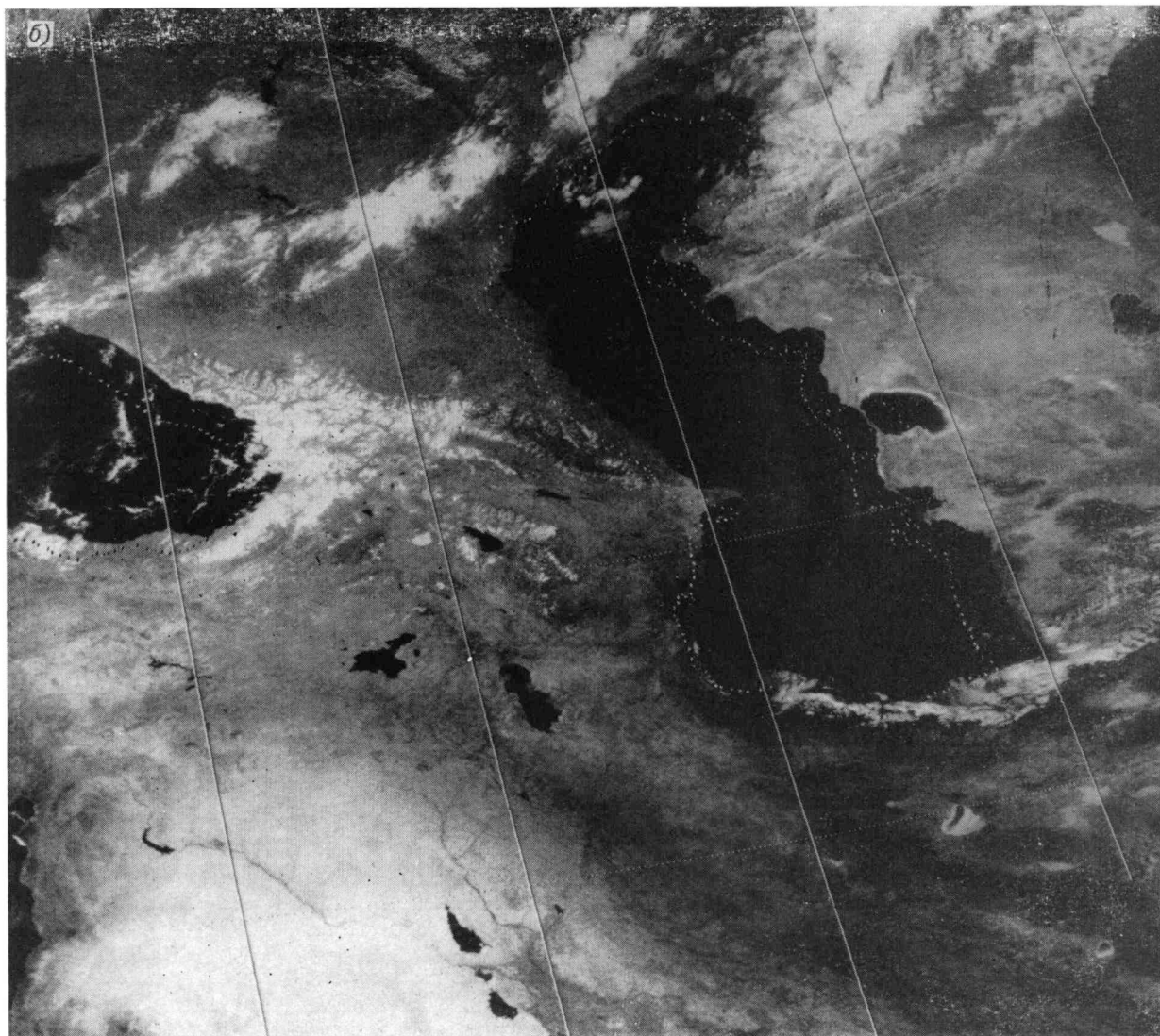
**5.5. Процедуры тематически-ориентированных преобразований** предназначены для облегчения дешифрирования путем частичного выделения полезной информации. Издавна известны и широко применяются фотохимические способы выделения полезной информации на снимках. С развитием цифровых методов обработки видеоинформации на ЭВМ, позволяющих адресоваться непосредственно к каждому элементу изображения, появилась возможность не только формализовать решения старых задач, но и решать принципиально новые задачи. Так, например, «подчеркивание» контуров, построение по многозональным изображениям на основе поэлементных логических и арифмети-

суммой исходных, позволяет уточнить границы ледяного покрова.

Человеческий глаз может уверенно различать более 100 цветовых оттенков и лишь 8—10 черно-белых градаций. Поэтому часто целесообразно окрашивание черно-белых изображений в псевдоцвета. Окрашивание производится путем подразделения диапазона яркости исходного изображения на интервалы и кодирования интервалов с помощью различных цветов. Цвета подбираются так, чтобы интересующие нас объекты становились как можно более различными. Пример такого раскрашивания приведен на рис. 5.11. Подобный прием используется и в черно-белом варианте: исходный снимок (*a*), имеющий обычно суженный диапазон яркости, подвергается преобразованию, которое растягивает диапазон на всю шкалу,

подразделяет его на интервалы и кодирует каждый интервал одним значением яркости. На рис. 5.12 приведен пример линейного повышения контраста изображения с квантованием на 2, 3

так как при дешифрировании внимание человека концентрируется в основном на границах между более или менее однородными областями. Очевидно, контурное изображение может быть полу-



и 5 градаций яркости. Изображения типа 5.12 б, имеющие две градации яркости, принято называть бинарными.

Для получения цветов, близких к естественным, используется цветное синтезирование, о котором речь шла выше (см. рис. 5.9 в, г на вкладке). Хотя реально трудно получить цветной снимок, в точности передающий естественные цвета, цветное синтезирование позволяет с некоторой достоверностью воспроизвести соотношения цветовых характеристик объектов съемки.

Важное место занимают методы выделения контуров. Дело в том, что контурное изображение, сохраняя существенные детали исходного изображения, в ряде задач сокращает объем вычислений. Кроме того, переход к контурным изображениям имеет преимущества психологического характера,

поскольку при дешифрировании внимание человека концентрируется в основном на границах между более или менее однородными областями. Очевидно, контурное изображение может быть полу-

чено из исходного выделением областей, содержащих резкие перепады яркостей, и «подавлением» областей с примерно одинаковой интенсивностью. Детальность, с которой будут выделены контуры, зависит от того, как определены понятия «резкий» и «примерно одинаковый». Рассматривая яркость изображения как двумерную функцию своих пространственных координат, можно определить контур как совокупность точек плоскости, где велик градиент этой функции. Поэтому контурные изображения называют еще градиентными, а операцию выделения контуров — пространственным дифференцированием. Рисунок 5.13 иллюстрирует получение контурных изображений различной детальности за счет предварительного повышения контраста. Обработка производится с использованием скользящего окна разме-

ром  $3 \times 3$  элемента. Контуры выделяются путем сравнения взвешенной суммы яркостей по окну обработки с порогом на локально-бинаризованном изображении. Суммируя контурное и исходное изображения, получают изображение с «подчеркнутыми» контурами (рис. 5.14). В случае если нужно выделить контуры, ориентированные опре-

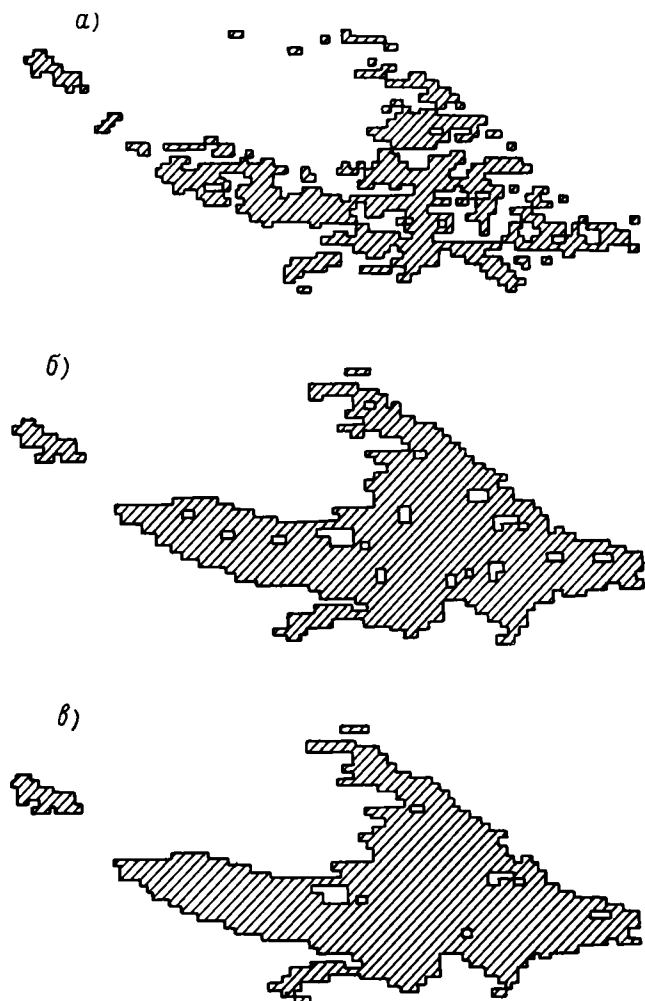


Рис. 5.8. Влияние атмосферы на результаты распознавания объекта.

*а* — обучение и распознавание проведено по разновременной информации, *б* — то же после адаптации обучающих данных, *в* — обучение и распознавание проведено по одновременной информации.

деленным образом, отыскивают не градиент функции, а соответствующую частную производную. На рис. 5.15 представлены результаты селективной фильтрации по различным направлениям, для сравнения также приведено полное градиентное изображение. Направленная фильтрация с успехом применяется, например, в геологии для обнаружения одинаково ориентированных линеаментов.

Проиллюстрируем некоторые другие используемые в практических задачах способы преобразования изображений. Нелинейное преобразование, носящее название соляризации (рис. 5.16 *а*, *б*), связано с наложением позитива снимка на его негатив, с последующей корреляцией динамического диапазона яркостей. Для получения стереоскопической имитации исходного снимка (рис. 5.16 *в*) используется наложение негатива снимка

на его позитив со сдвигом на несколько элементов по диагонали. На рис. 5.16 *г* показаны результаты так называемой медианной фильтрации исходного снимка скользящим окном размером  $3 \times 3$  элемента. Медианная фильтрация, в отличие от обычной, не заменяет значение яркости элемента на взвешенную сумму яркостей соседних элементов, а располагает их в пределах окна фильтрации в вариационный ряд и значение элемента заменяет на значение среднего элемента в этом вариационном ряду. Медианная фильтрация имеет два важных свойства: во-первых, она, фильтруя импульсные помехи, составляет контуры (не приводит к расфокусировке изображения, как это бывает при обычной фильтрации) и, во-вторых, не вносит в изображение новых значений яркости. Второе свойство оказывается важным, например, при обработке классификационной карты результатов распознавания.

**5.6. Процедуры оптимального представления** предназначены для представления многозональной космической видеоинформации и результатов обработки в оптимальном для восприятия виде. При этом на основе моделей зрительного восприятия информации человеком решаются три типа задач:

- оптимизация представления информации по полю яркости на основе учета характеристик зрительной системы человека,

- оптимизация представления информации по спектральным диапазонам с учетом ее коррелированности,

- оптимизация представления результатов обработки на основе генерализации данных и выбора форм отображения (масштабов, условных знаков, цветов и т. п.).

Первые две задачи оптимального представления по существу связаны с наиболее эффективным использованием всего многомерного (по числу зон) пространства поля яркости за счет декорреляции зон и «растягивания» яркости в каждой зоне. При этом для сохранения исходных цветовых соотношений желательно проделать обратное преобразование с сохранением достигнутой декорреляции.

Идея оптимального представления по полю яркости заключается в следующем: так как качество изображения определяется в основном его контрастом, то оптимальной формой представления видеоинформации будут изображения с равномерно распределенными по всему динамическому диапазону яркостями. Пусть, например, большинство деталей в изображении приходится на темные области, тогда имеет смысл разбить темные области полутоновой шкалы на сравнительно малые ступени, а светлые — на сравнительно длинные. Преобразования, приводящие к оптимальному виду, т. е. переводящие изображение с произвольной гистограммой распределения яркости к изображению с равномерной гистограммой называют эквализацией. Согласно теории информации, преобразование эквализации можно рассматривать как метод создания изображений, обладающих максимальной энтропией. Эксперименты показывают, что в зрительной системе сила ощущения пропорциональна логарифму интенсивности падающего на глаз света. Принимая во вни-

мание это свойство зрения, естественно потребовать, чтобы равномерно были распределены не яркости преобразованного изображения, а их логарифмы. Другим важным свойством человеческого зрения является наличие взаимного торможения

Задачи оптимального представления информации тесно связаны с подобными задачами инженерной психологии. Поэтому поиск вида представления производится с привлечением идей и методов этой науки.

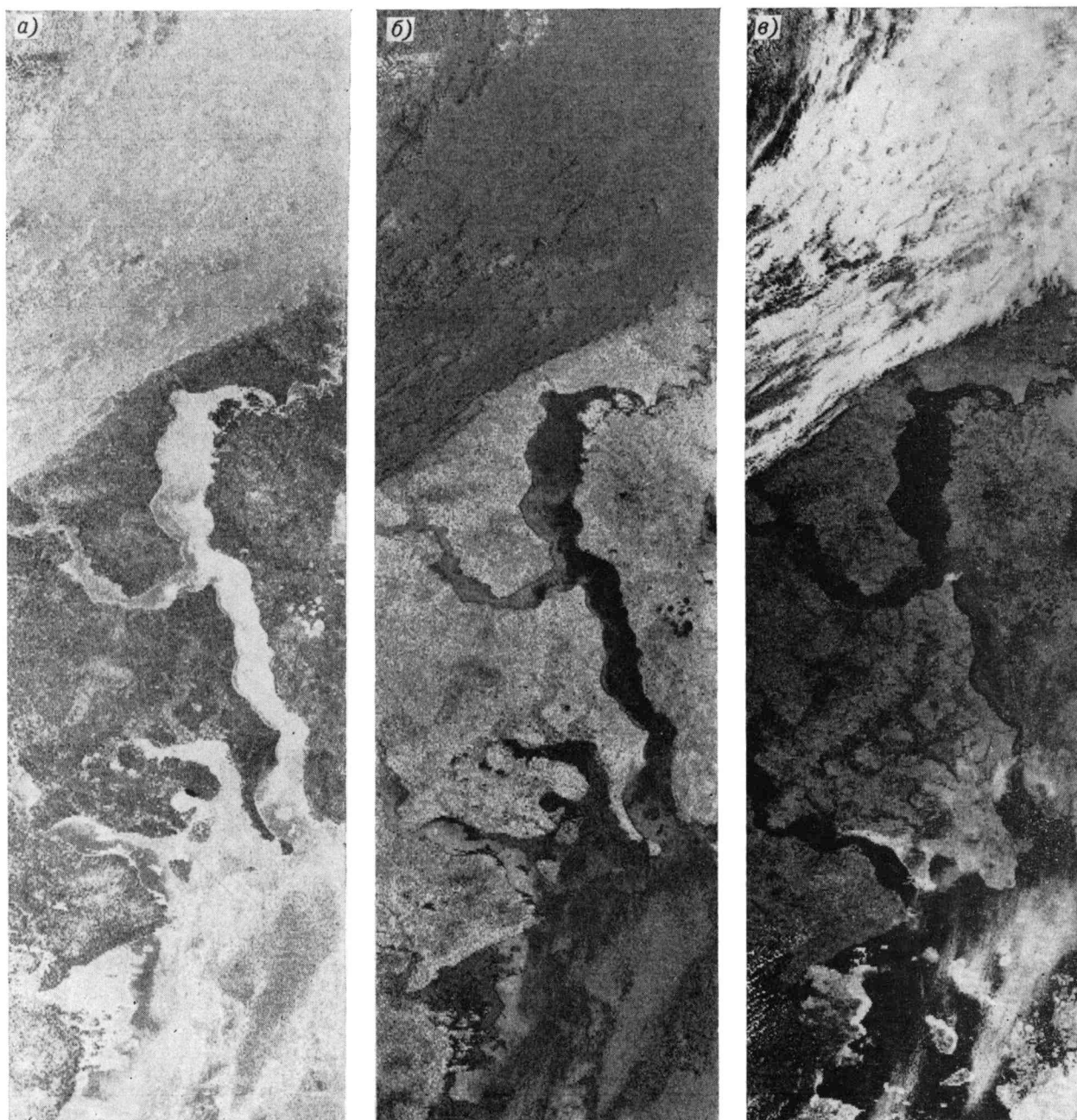


Рис. 5.10. Суммирование двух изображений.

*а* — исходное изображение в диапазоне 0,6—0,7 мкм, *б* — в диапазоне 0,8—1,0 мкм, *в* — новое изображение (сумма изображений *а* и *б*).

нервных клеток сетчатки глаза, в результате чего зрительная система действует аналогично фильтру высоких частот. Одновременный учет этих двух свойств зрения может быть произведен в следующей схеме обработки: сначала изображение логарифмируется, затем пропускается через линейный фильтр высоких частот и, наконец, производится эквализация (рис. 5.17). На рис. 5.18 иллюстрируется трансформация гистограммы при эквализации.

**5.7. Процедура выбора пространственных признаков** предназначена для отбора компонентов вектора измерений (или их функций), наиболее информативных для решения данной задачи. Задача выбора пространственных признаков близка к задаче сжатия информации, которую тоже можно рассматривать как задачу отбрасывания несущественных компонентов. Выбор пространства признаков осуществляется на основе решения задачи перевода образа из пространства большей



размерности в пространство меньшей размерности при условии оптимизации некоторой функции критерия качества. Если выбор признаков не связан с планируемой схемой классификации, то такой подход принято называть выбором признаков без учета ограничений. Другой подход связывает

тельным) анализом решаемой задачи и привлечением различного рода добавочной информации (учет физических свойств объекта, его характерных яркостей, времени года, географической зоны, метеоусловий и т. п.).

**5.8. Процедура текстурного анализа** предназна-

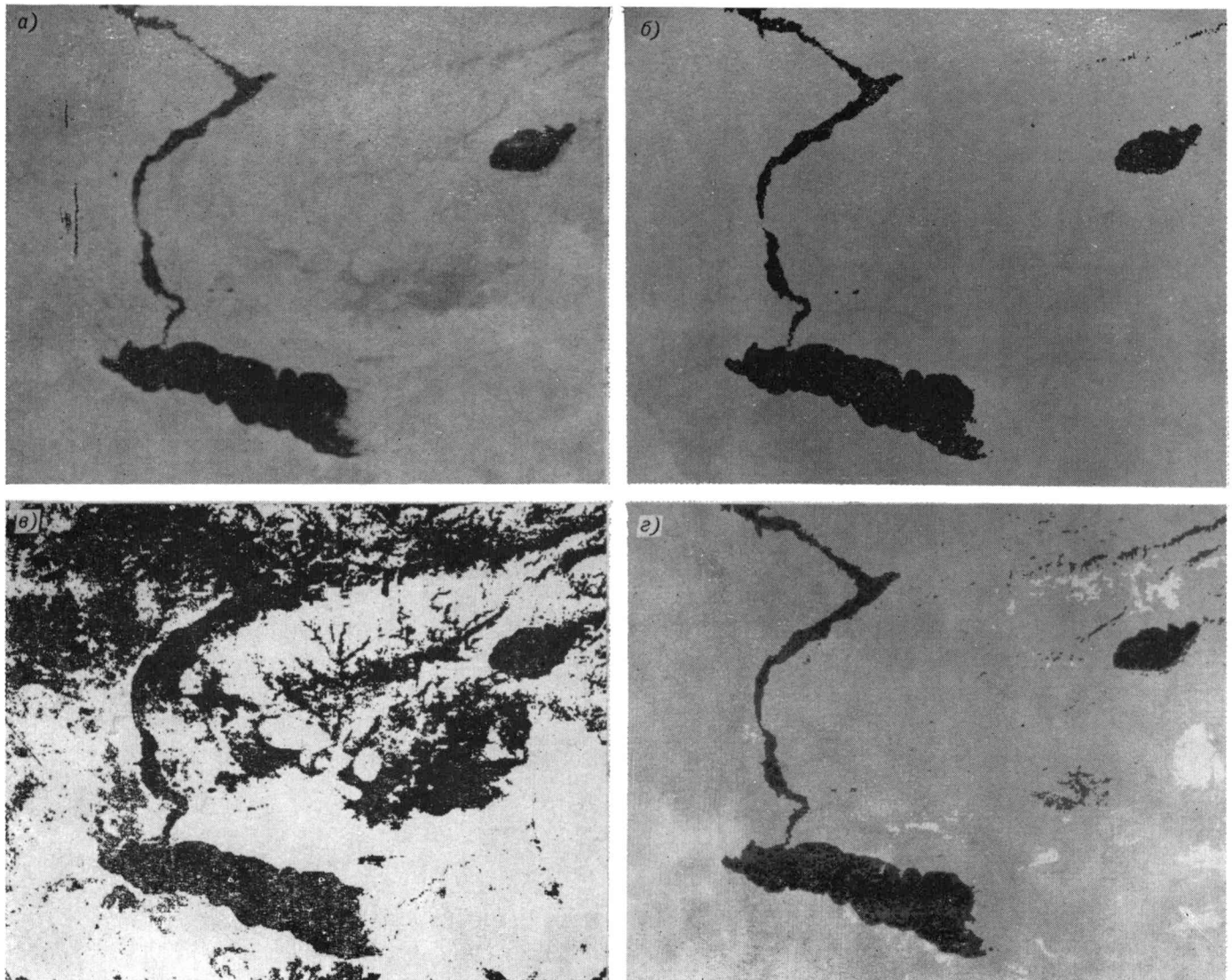


Рис. 5.12. Линейное повышение контраста изображения.

*а* — исходное изображение, содержащее 120 градаций яркости, *б* — контрастированное, содержащее две градации яркости, *в* — три градации яркости, *г* — пять градаций яркости.

выбор признаков с качеством последующей классификации, при этом признаки обычно отбираются в соответствии с критерием, функционально связанным с максимумом вероятности правильности распознавания. Если распределение признаков для всех классов объектов известно, то при выборе признаков используют понятие энтропии (признаки, уменьшающие неопределенность заданной ситуации считаются более информативными, чем те, которые приводят к противоположному результату) и дивергенции (мера несходства между классами, отбираются признаки, максимизирующие дивергенцию). Помимо этих методов при отборе признаков используются эвристические критерии, связанные с углубленным (содержа-

чена для описания текстур — типичных для данного объекта пространственных вариаций яркости. Для создания текстурного описания изображение разбивается на фрагменты и каждому фрагменту ставится в соответствие некоторый набор текстурных характеристик. Последние могут быть присоединены к многозональным векторам данного фрагмента в качестве дополнительных компонент. Обычно использование при распознавании такого «расширенного» вектора спектрально-пространственных признаков повышает точность распознавания на 10—15%. Текстурные признаки используются не только в поэлементном распознавании, но и при идентификации выделенных ранее (например, при кластерном анализе) генетически

однородных образований. Все многообразие используемых в настоящее время текстурных признаков функционально связано с одним из следующих способов описания: с помощью статистических моментов функции распределения яркостей, с помощью характеристик функции ори-

смачиваемых классов. Решающие функции строятся исходя из некоторого критерия классификации. Обычно таким критерием является критерий минимума вероятности ошибочного распознавания. Многочисленные эксперименты по распознаванию многозональной видеоинформации указывают на

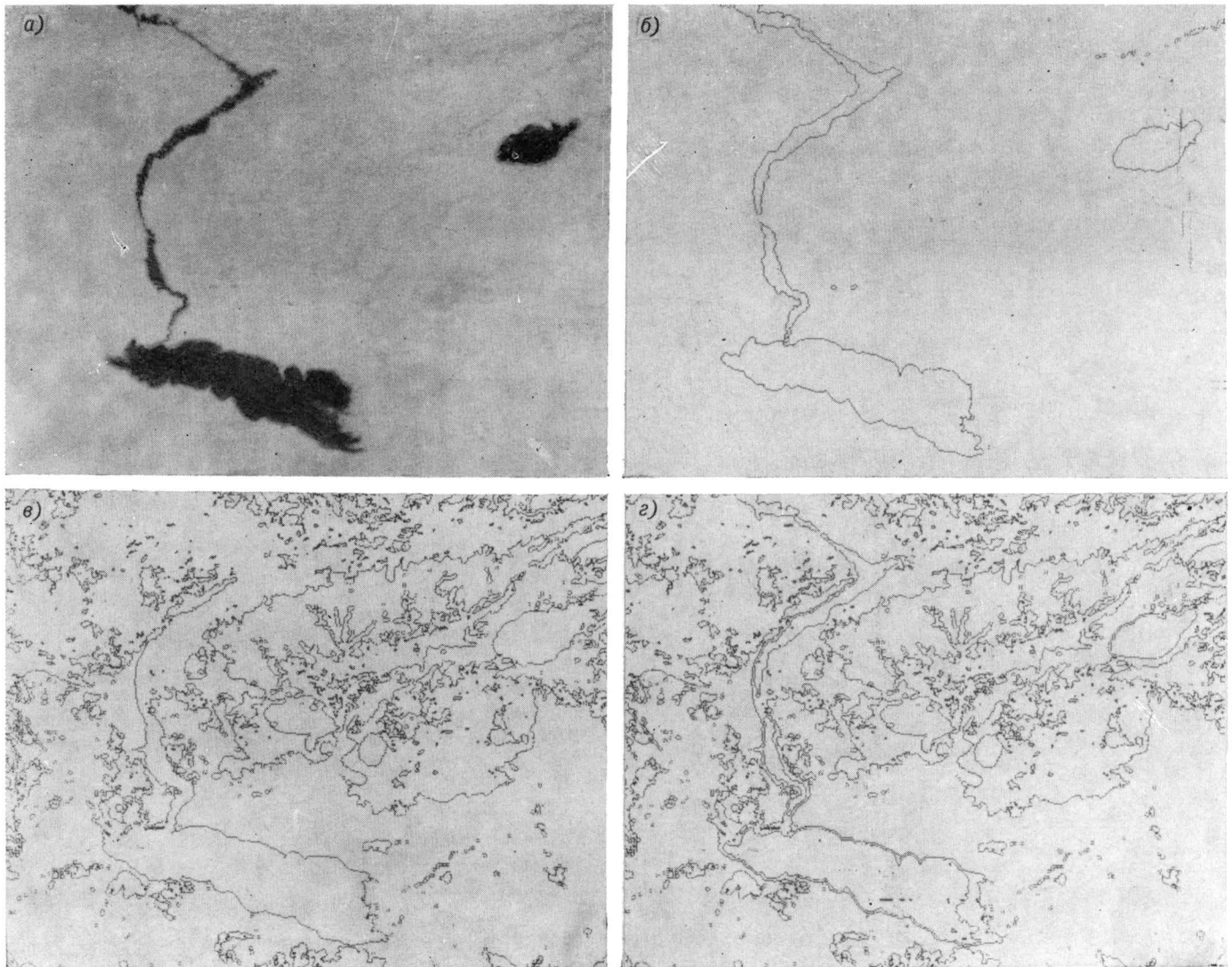


Рис. 5.13. Получение контурных изображений различной детальности.

*a* — исходное изображение, *б* — выделение контуров с предварительным повышением контраста до двух уровней яркости, *в* — до трех уровней, *г* — до четырех уровней.

ентации яркостей и параметров двумерного спектра ортогональных преобразований (Фурье, Адамара, МГК и др.).

**5.9. Процедура распознавания** предназначена для отнесения векторов признаков (яркостных, текстурных, смешанных) к одному из классов объектов с географической идентификацией каждого класса (распознавание с обучением) или без нее (распознавание без обучения — кластерный анализ).

Распознавание с обучением основано на построении по некоторой обучающей информации, представляющей выделенные классы, таких функций, которые должны обеспечивать разделение пространства признаков на области, каждая из которых содержит векторы только одного из рас-

то, что векторы признаков достаточно хорошо группируются по классам и поэтому установить границы между областями различных классов не очень сложно. В большинстве случаев можно ограничиться поверхностями первого и второго порядка.

Кластерный анализ основан на такой группировке векторов в пространстве признаков без использования обучающей информации, чтобы векторы одной группы (кластера) были «похожи» (удовлетворяли некоторому критерию однородности), а векторы разных групп были «непохожи». На рис. 5.19 приведен один из диапазонов исходного четырехзонального снимка и его кластерная карта. Выделенные области (каждая представлена своим вектором средних) классифицируются по

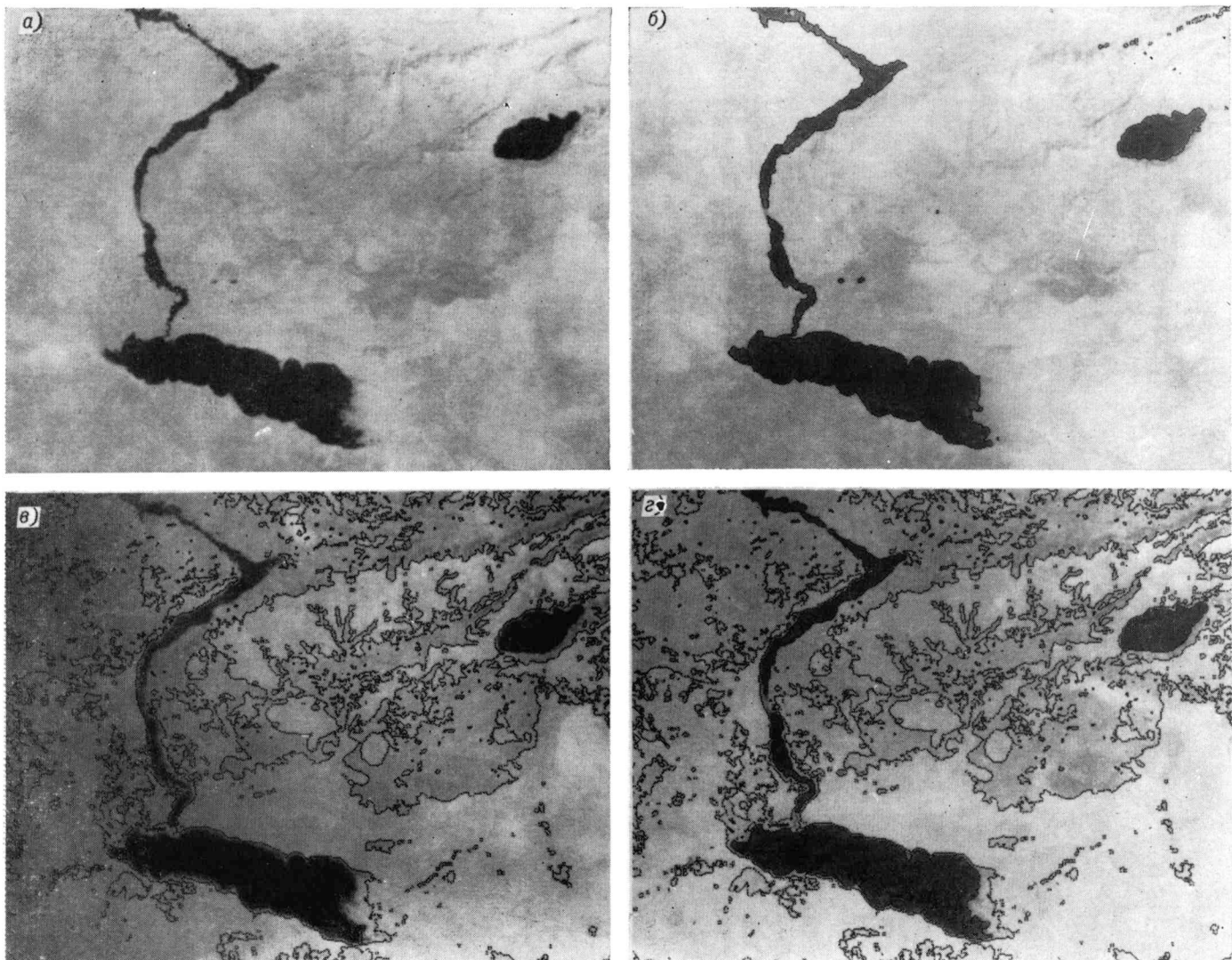
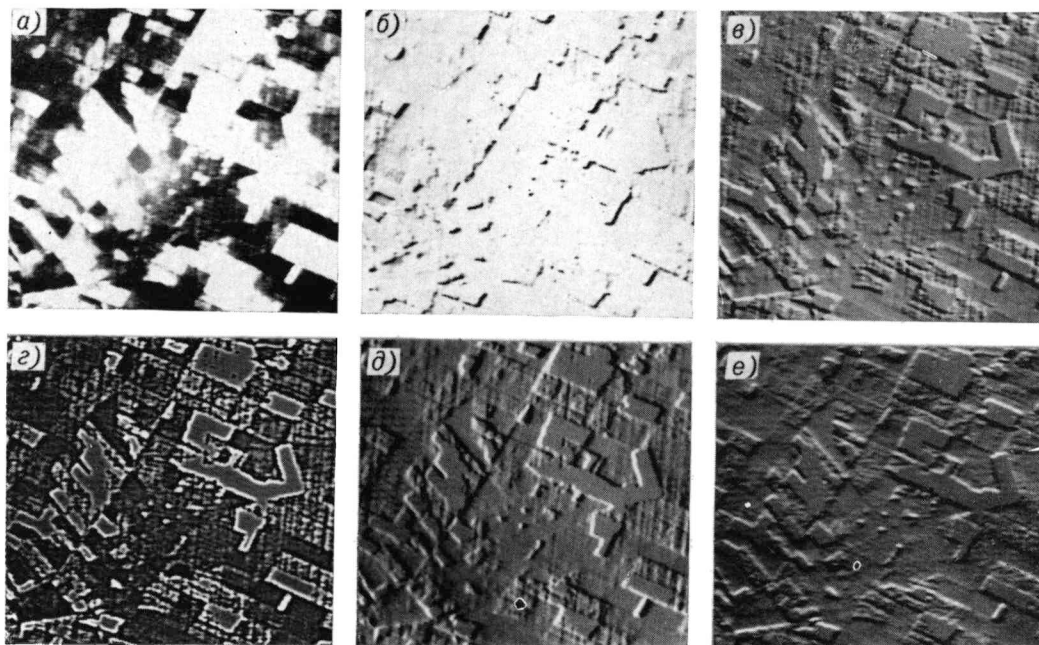


Рис. 5.14. Подчеркивание контуров.

*a* — исходное изображение, *б* — подчеркивание контуров с предварительным контрастированием до двух уровней яркости, *в* — до трех уровней яркости, *г* — до четырех уровней яркости.

Рис. 5.15. Направленная фильтрация контуров.

*a* — исходное изображение, *б* — направленная фильтрация, *в* — не-направленная фильтрация.



Позиция на рисунке	Направление фильтрации
<i>б</i>	
<i>в</i>	
<i>г</i>	
<i>д</i>	

спектральным признакам с учетом порогового критерия близости классов. Меняя значения порога, можно получить кластерные карты с различной детальностью разбиения. На рис. 5.19 б восемь самых крупных кластеров окрашены серым тоном различной интенсивности. Белый цвет

разбивалось на такие фрагменты, каждый фрагмент описывался вектором признаков. Кластеризация проводилась методом выделения неоднородных по текстуре областей. На карте можно различить восемь самых крупных классов по разной степени яркости.

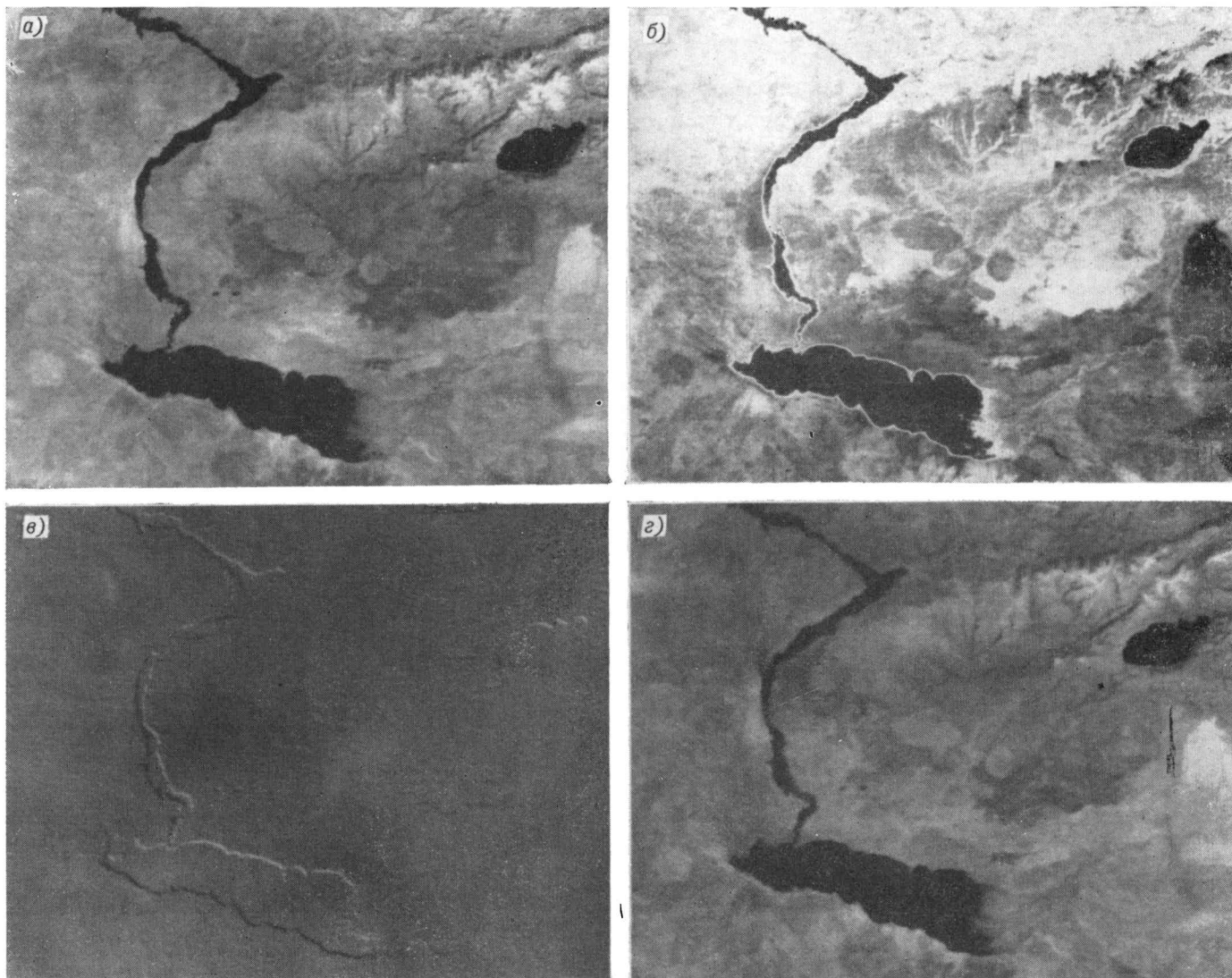


Рис. 5.16. Различные способы обработки космического изображения.

*а* — исходное изображение, *б* — после соляризации, *в* — стереоскопическая имитация, *г* — после медианной фильтрации.

соответствует неоднородным участкам изображения, не отнесенным ни к какому кластеру. На приведенной карте видно, что область акватории представлена несколькими классами. Анализ показал, что наиболее существенные различия для этих кластеров лежат в зеленой части спектра.

Пример кластеризации по текстурным признакам приведен на рис. 5.20. В качестве исходного было взято космическое изображение, приведенное на рис. 5.17 *а*. Для получения текстурных признаков использовалась статистика разностей яркостей в паре соседних точек по фрагменту изображения. В качестве меры текстуры было взято среднее значение разностей. Размеры фрагментов выбирались достаточными для прослеживания статистики. Все исходное изображение

Следует отметить, что не все задачи можно решать методами распознавания, в ряде случаев необходимо использовать методы линейной или нелинейной оценки параметров состояния природной среды.

**5.10. Особенности интерактивного режима обработки изображений.** Специфичность программно-аппаратного обеспечения обработки многозональной видеoinформации связана с двумя основными особенностями задач обработки. Первая особенность — это гигантские объемы обрабатываемой информации (до сотен мегабит на одно многозональное изображение) и трехмерный характер данных (две пространственные координаты и одна спектральная), приводит к повышенным требованиям на быстродействие процессоров вычисли-

тельных устройств, объемы их оперативной памяти, емкость запоминающих устройств, быстроту обращения к ним и т.п. Вторая особенность обра-

только в процессе интерпретации, что приводит к необходимости оперативного участия человека в наблюдении и управлении ходом решения за-



Рис. 5.17. Эквализация космического изображения.

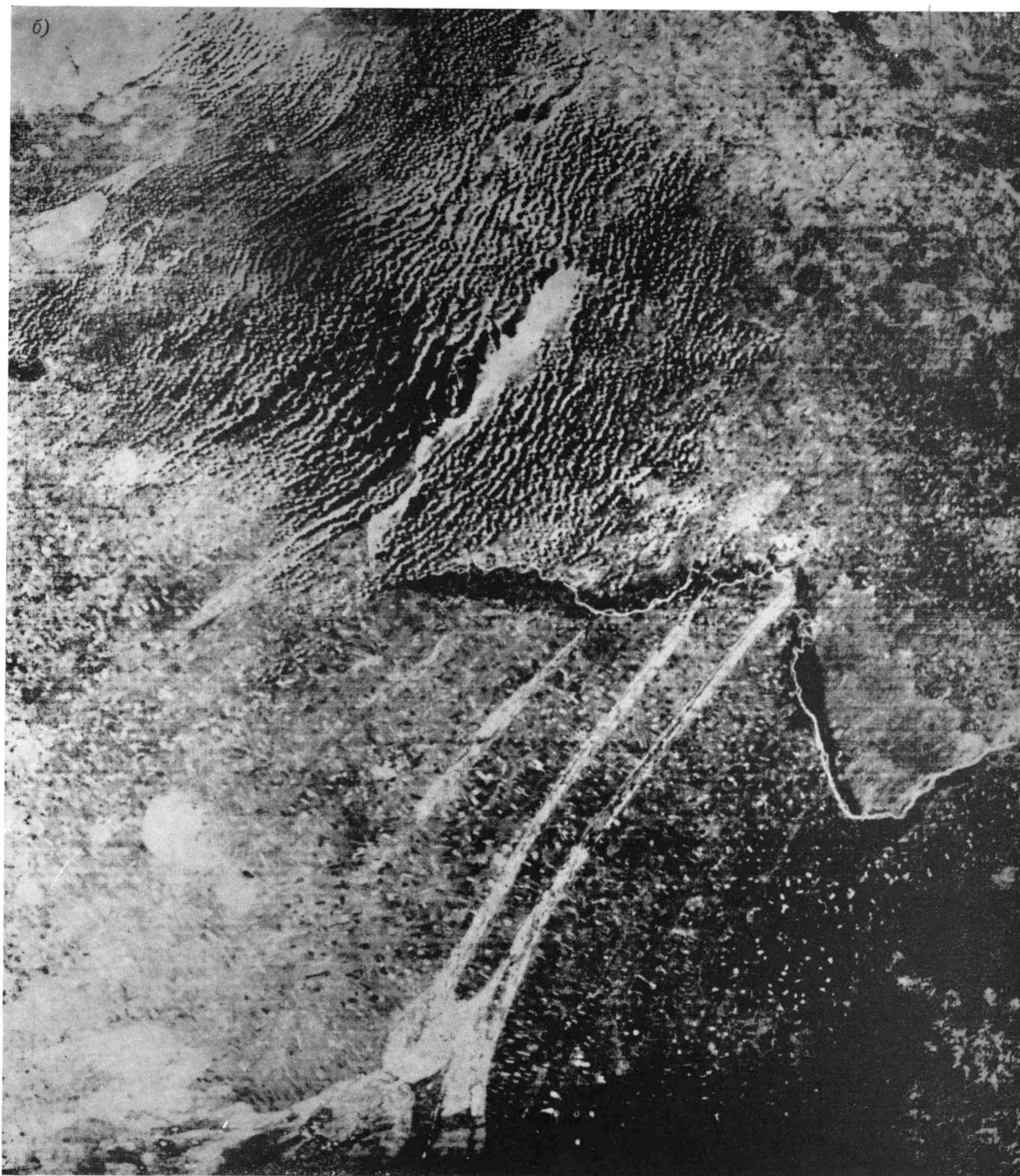
*a* — исходное изображение, *б* — после эквализации.

ботки видеоинформации состоит в невозможности полной формализации большинства задач обработки, т. е. в отсутствии некоторого формального критерия качества результата обработки. Это связано с тем, что качество обработки можно оценить

даци. Такой режим обработки принято называть диалоговым или интерактивным. Диалог «человек — ЭВМ» можно рассматривать как своеобразный алгоритм оптимизации, позволяющий сочетать различные стратегии обработки и тематический

анализ с привлечением априорной информации промежуточных и конечных результатов обработки.

а также набора функциональных устройств, с помощью которых оператор обращается к дисплею. Связь с дисплеем и управление его работой осу-



Специальные технические средства, обеспечивающие обработку в интерактивном режиме, называются видеодисплейными системами или дисплеями. Дисплеи состоят из блока памяти для хранения одного или нескольких изображений, процессора для их обработки, экрана для отображения результатов обработки и запросов ЭВМ,

осуществляется посредством специальных процедур. Все алгоритмы преобразования данных объединены в некоторую иерархическую структуру и список их высвечивается на экране дисплея. Выбор одной из имеющихся возможностей осуществляется либо с помощью указателя (световое перо, управляемый курсор), либо с помощью стан-

дартной клавиатуры. Указатели, которые оператор может свободно перемещать по экрану дисплея, используются и при обработке, например для оконтуривания тестового участка, который затем будет использован в задаче распознавания в качестве обучающего. После завершения оконтуривания можно подать команду, по которой координаты контура будут переданы в ЭВМ. При работе

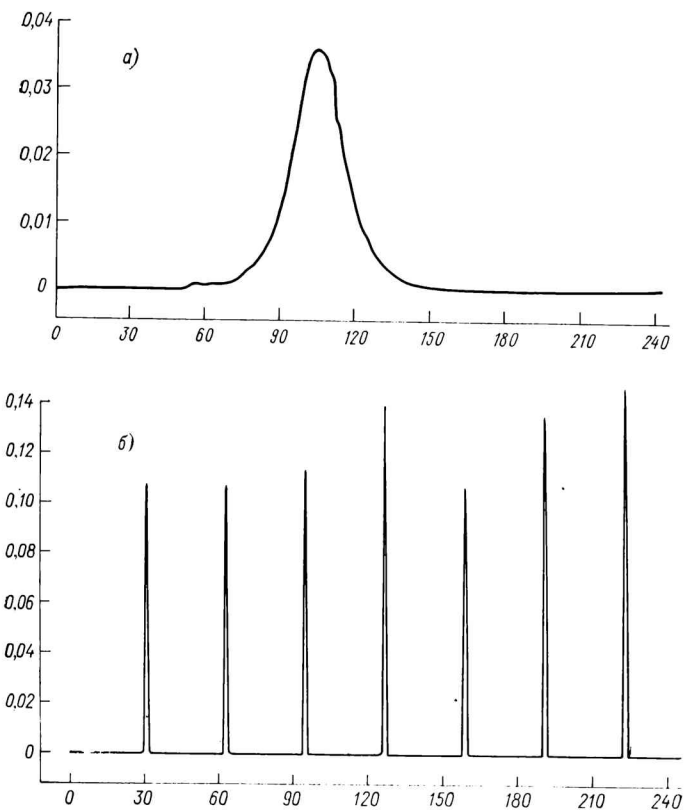


Рис. 5.18. Преобразование гистограмм при эквализации. *а* — гистограмма исходного изображения (см. рис. 5.17 *а*), *б* — гистограмма изображения после эквализации (см. рис. 5.17 *б*).

в интерактивном режиме ответы ЭВМ должны быть достаточно быстрыми, чтобы можно было быстро обеспечивать формулировку, проверку и изменение альтернативных гипотез. Дисплей не предназначен для обработки больших массивов видеоданных. В больших системах обработки они используются в основном для выработки стратегии обработки на основе тщательного анализа небольшой части видеoinформации совместно с априорными данными.

Имеющийся опыт работ позволяет выявить следующие основные функции дисплея:

- воспроизведение изображений и графических данных (различных графиков и буквенно-цифровой информации) в цветном и черно-белом виде;
- просмотр или поиск части изображений, представляющей интерес, по изображению очень больших размеров; для осуществления этой функции у дисплея имеется канал связи с внешними накопителями;
- совмещение данных, например нескольких графических изображений или видеоизображений.

Изображение на экране дисплея воспроизводится с высоким пространственным разрешением (обычно  $512 \times 512$  элементов), яркостью и контрастом и обеспечением кажущейся непрерывности

тонов черно-белого и цветного изображения. В дисплее предусмотрена функция формирования графической информации и совмещения ее с изоб-

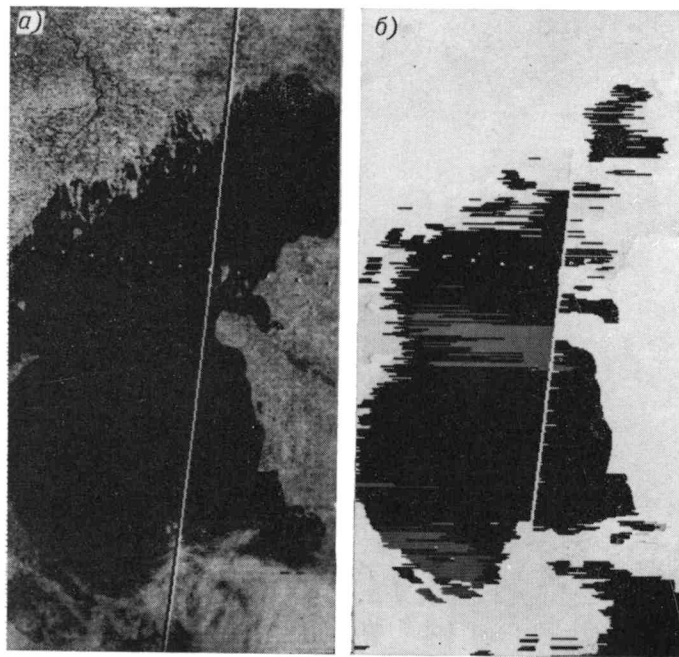


Рис. 5.19. Кластерный анализ по спектральным признакам. *а* — фрагмент (канал 0,8—1,0 мкм) исходного четырехканального изображения, *б* — кластерная карта того же фрагмента.

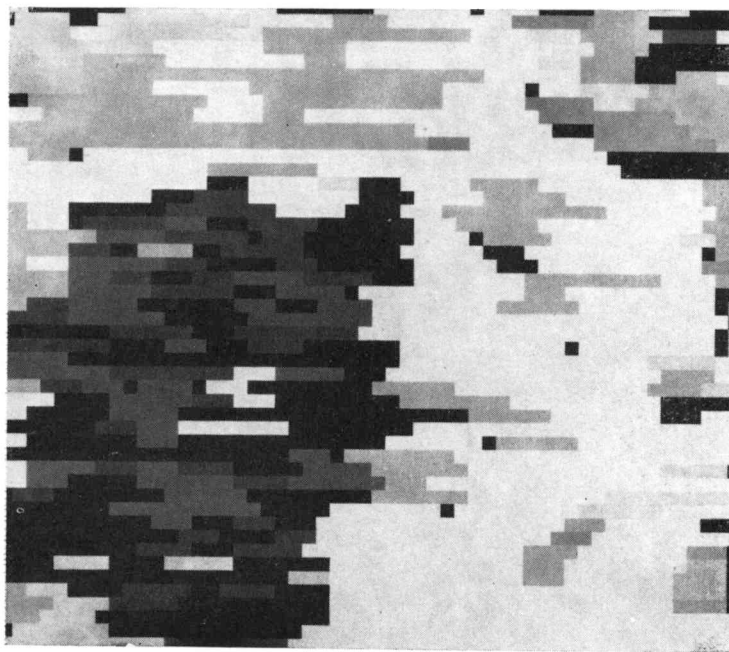


Рис. 5.20. Кластерный анализ по текстурным признакам. В качестве исходного взято космическое изображение на рис. 5.17 *а*.

ражением. Например, можно совместить изображение с картографической информацией. Заложены в дисплее алгоритмы обработки можно в зависимости от способа реализации разделить на две группы: поточечные и пространственные. При поточечной обработке каждый элемент изображения преобразуется независимо от других элементов в плоскости изображения. Примерами

такой обработки могут служить операции изменения яркости и контрастности снимков, поэлементного сложения изображений и т. п. По существу почти все поэлементные преобразования связаны с изменением передаточной функции и сравнительно просто реализуются путем построения таблиц соответствия первоначальных яркостей новым. Наибольшая эффективность в диалоговом режиме преобразования по передаточной функции достигается тогда, когда оператор с помощью светового пера или курсора может задавать ее форму. Алгоритмы пространственной обработки связаны с преобразованиями, определяющими каждый элемент нового изображения или какую-либо числовую характеристику на основе анализа некоторого множества элементов на исходном изображении. Примерами простран-

ственной обработки являются алгоритмы фильтрации скользящим окном и задачи текстурного описания изображения.

Важнейшим свойством современных дисплейных систем является их программируемость, что позволяет расширить границы применения дисплеев, в частности, при изменении типа и формата массива данных и алгоритмов обработки.

Особую и пока мало разработанную задачу представляет собой создание специального языка общения человека с ЭВМ. Главной проблемой здесь является выбор режима работы, при котором не очень четкие вопросы и требования человека будут однозначно интерпретироваться ЭВМ. Кроме того, машина должна помогать человеку, предлагая возможные варианты решения.



# Изучение природно-территориальных комплексов



## Глава 6

Различные компоненты природной среды конкретной территории находятся в определенной взаимозависимости. Отдельные замкнутые территории, обладающие некоторой однородностью компонентов природной среды и их связей, образуют так называемые природно-территориальные комплексы (ПТК). Природно-территориальный комплекс обладает однородностью геологического строения, рельефа, почв, растительности и т. п. В рамках каждого комплекса наиболее полно и тесно проявляются особенности связей между компонентами природной среды [1].

Материалы космических съемок отображают все компоненты природной среды в интегрированном виде. Характер изображения природного комплекса на космических снимках определяется как специфическими особенностями его строения в целом, так и физиономическими особенностями природной среды — рельефа, растительности, почв и т. п. Поэтому изучение отдельных компонентов по космическим снимкам должно быть связано с исследованием природного комплекса в целом. При изучении ПТК необходимо учитывать также сезонную и многолетнюю изменчивость компонентов ПТК и их динамику.

Природно-территориальные комплексы имеют иерархическую структуру. Относительно простые ПТК объединяются в более сложные, а те в свою очередь в еще более сложные природно-территориальные системы.

Снимок среднего разрешения, получаемый системой «Метеор—Природа», охватывает территорию около 2 млн. км<sup>2</sup>. На нем можно различить многие десятки ПТК регионального уровня организации природы. Возможность одновременного наблюдения за ними позволяет изучать состояние природных объектов на большей территории. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования сооружений (трасс, железных дорог, оросительных систем и т. п.), а также для принятия оперативных решений по управлению сельским, водным и лесным хозяйством.

Космические снимки, благодаря их большой обзорности, позволяют изучать распространение крупных и средних природных комплексов и их границ, а также связи компонентов внутри отдельных ПТК. Периодическая съемка одной и той же территории позволяет проследить динамику ПТК, оценить степень воздействия человека на природу, а также прогнозировать дальнейшее развитие ПТК.

Первой стадией обработки космических снимков является выделение границ ПТК по фототону и рисунку изображения. Тон изображения обусловлен спектральными свойствами фиксируемых из кос-

моса компонентов ПТК, и поэтому зависит от их точной, сезонной и т. п. изменчивости. Рисунок космического изображения ПТК большей частью обусловлен особенностями геоморфологического строения территории, в той или иной степени подчеркнутыми растительностью, почвами, гидрографией и т. п.

Описание комплекса компонентов, входящих в ПТК, обычно выполняется с помощью тематических карт.

Наряду с изучением типов взаимодействия природных элементов, образующих ПТК, в ландшафтном дешифрировании большое место принадлежит анализу существующего землепользования. На кадрах космических снимков хорошо видны не только природные комплексы, но и земли, в разной степени преобразованные и освоенные человеком: пашни, пастбища, луга, карьеры, разработки полезных ископаемых, мелиоративные системы и т. п. Их совокупность создает определенный рисунок на космическом изображении, анализ которого позволяет делать заключение о рациональности того или иного типа природопользования.

Обзорность космических материалов сравнительно легко можно увеличить, создавая монтажи из снимков. В качестве примера использования космической информации для изучения ПТК могут служить приводимые ниже фотомонтажи, составленные из ряда космических сканерных снимков, или отдельные снимки некоторых участков территорий Советского Союза.

### 6.1. Природно-территориальные комплексы Нечерноземья

Нечерноземье занимает огромную площадь (более 2,8 млн. км<sup>2</sup>) на севере Европейской части СССР. В него входят 29 административных областей и автономных республик РСФСР. Осуществление комплексной долговременной программы развития этой территории, намеченной в постановлениях Партии и Правительства, требует всестороннего и глубокого изучения ее природных ресурсов. В целях дальнейшего развития сельского и лесного хозяйства, их интенсификации, предусмотрено проведение грандиозных организационно-хозяйственных мероприятий. Существенную помощь при этом может оказать космическая информация.

Представленный на рис. 6.1 монтаж космических сканерных снимков среднего разрешения со спутника «Метеор—Природа» охватывает практически всю (за исключением небольшого участка на юге) территорию Нечерноземной зоны РСФСР. Снимки получены в зимний период.

Большая протяженность территории с севера на юг (1000 км) определяет разнообразие природных условий: с севера на юг закономерно сменяются зоны тундры, тайги и смешанных лесов. Нечерноземье занимает северную, моренную часть Русской равнины. Формирование внешнего облика территории во многом обусловлено особенностями развития ее в четвертичный период, когда она испытала несколько оледенений. Вследствие этого характерной чертой северной части Русской равнины являются формы рельефа, связанные с деятельностью ледника (аккумуляцией, экзарацией) и эрозионной деятельностью вод, которая преобразовала эти формы. Границы оледенений служат важными геоморфологическими рубежами. Они разделяют области с различной степенью сохранности ледниковых форм рельефа. Нечерноземной зоне РСФСР присуща широтная зональность ландшафтов. На Крайнем Севере расположены самые молодые — тундровые ландшафты, сформировавшиеся после отступления Валдайского ледника. Рельеф характеризуется преобладанием плоских озерных равнин. Почвенно-растительный покров представлен кустарничковой и моховолишайниковой тундрой на тундрово-глебовых почвах.

Южнее, в зоне тайги, господствуют ландшафты моренных и водно-ледниковых равнин Валдайского и Московского оледенений. В зависимости от возраста оледенения ледниковые формы имеют различную сохранность, что соответственно отражается в преобладании моренных гряд или водно-ледниковых равнин. Почвенно-растительный покров представлен елью и пихтой на подзолистых почвах.

Южная часть территории Нечерноземья занята ландшафтами водно-ледниковых равнин со смешанными лесами на дерново-подзолистых почвах.

Северо-запад территории, включая Кольский п-ов и Карелию, относится к зоне экзарационной деятельности ледника. Это область сноса материала, где обнажены кристаллические породы Балтийского щита. Преобладают ландшафты низких скалистых гряд, чередующихся с заболоченными понижениями. Характерной чертой этой территории является заозерность.

Предварительный анализ фотомонтажа показывает, что отчетливо различаются вышеназванные ландшафтные группировки, причем снежный покров сохраняет существенные различия между ними. Тундровые ландшафты дешифрируются по ровному светлому фототону. Для таежных ландшафтов моренных гряд и равнин зоны Московского оледенения характерен мелко- и среднепятнистый рисунок темно-серого и серого фототона. Ландшафты южной части территории, наиболее измененные хозяйственной деятельностью человека, выделяются по точечно-мелкопятнистому рисунку, присущему чередованию полей, небольших участков леса и населенных пунктов. Область ледникового сноса (Карелия) также отчетливо выделяется на фотомонтаже благодаря определенной ориентировке вытянутых гряд понижения. Рисунок такого типа ландшафта — полосчато-пятнистый.

Однако внутри каждого из описанных типов ландшафтов можно выделить по характеру фотозображения более мелкие контуры, относящиеся к тому или иному виду ландшафта. Более мелкие

контуры на изображении отражают хозяйственную деятельность человека.

Анализ рисунка изображения позволяет выделить на фотомонтаже для Нечерноземья 23 природно-территориальных района (рис. 6.2). Для каждого из выделенных районов характерно природное и, как следствие, хозяйственное единообразие.

В пределах Нечерноземья выделено шесть основных зон хозяйственного освоения. На севере выделяется оленеводческо-промысловый район, включающий тундру, лесотундру и часть северотаежных лесов. Это в основном равнинные слаборасчлененные территории, относящиеся к молодым тундровым ландшафтам. Как хорошо видно по фотомонтажу, земная поверхность в этой зоне полностью покрыта снегом, что несет в себе определенную информацию для организаций, занимающихся хозяйственной деятельностью на этой территории. Антропогенное же влияние человека на данный ландшафт практически не заметно из-за маскирующих свойств снежного покрова.

Район лесозаготовительного и промыслового освоения с очагами земледелия и животноводства занимает обширное пространство среднетаежных и западную часть северотаежных лесов. Тип рельефа этой зоны — моренно-равнинный. В пределах этого района на фотомонтаже среди темно-серого тона, соответствующего массивам темнохвойных лесов, четко выделяются (например, в междуречье верхних течений рек Северной Двины и Печоры) участки с упорядоченным рисунком, характеризующимся относительно равномерным распределением светлых и темных прямоугольников (типа шахматной доски). Это места интенсивных лесных вырубок.

К зоне распространения южнотаежных лесов приурочен район лесозаготовительного и сельскохозяйственного использования. Строение рельефа и структура почвенного и растительного покрова, характеризующиеся чередованием залесенных моренных гряд и луговых понижений, предопределили очаговый характер ведения сельского и лесного хозяйства. В результате особенности этой зоны проявляются в специфическом пятнистом рисунке фотоизображения, причем для съемок в зимнее время светлые участки соответствуют открытым пространствам сельскохозяйственного освоения, серые — участкам старых вырубок, а темные — массивам лесов.

На юге Нечерноземья расположен район интенсивного сельскохозяйственного освоения, относящийся к зоне смешанных и южнотаежных лесов. Моренный рельеф выражен слабо, преобладают полого-увалистые, слаборасчлененные равнины. Рисунок изображения — местами мелкопятнистый, а на большей части территории преобладают крупные пятна с полигональными очертаниями. Значительное увеличение площади пашен привело к изменению общего тона фотоизображения. На снимке этот район выглядит более светлым, чем предыдущий, а отдельные участки имеют монотонный светло-серый фон, обусловленный покрытыми снегом массивами полей.

Кроме того, на территории Нечерноземья имеется два промышленных района с сельским хозяйством пригородного типа, расположенных вокруг главных центров — Москвы и Ленинграда.



Рис. 6.1. Монтаж космических снимков территории Нечерноземья. ИСЗ «Метеор—Природа», аппаратура МСУ-С. 1981 г., зима.

Для них характерен мелкопятнистый контрастный рисунок с выраженной полигональностью, обусловленный интенсивным использованием территории — обилием населенных пунктов, густой сетью дорог, сочетанием лесов, пашен, лугов и болот.

К горным массивам Хибин и Тиманского кряжа, четко выделяющимся на снимке специфическими рисунками, приурочены районы горных разработок.

Использование подобных фотомонтажей для территории Нечерноземной зоны РСФСР в разные сезоны года позволяет определять структуру землепользования, выявлять резервы земельного и лесного фонда и т. п.

## 6.2. Зона освоения Байкало-Амурской магистрали

Байкало-Амурская магистраль имеет огромное народно-хозяйственное и социально-политическое значение. Территория, по которой проходит трасса, включает в себя 21 административный район общей площадью 1,1—1,2 млн. км<sup>2</sup>.

Протяженность Байкало-Амурской магистрали около 3100 км от ст. Лена на р. Лена до Комсомольска-на-Амуре. Трасса проходит в сложных горных условиях Южной Сибири и Дальнего Востока.

В связи со значительной протяженностью с запада на восток наблюдается многообразие ландшафтных областей, что достаточно четко прослеживается на фотомонтаже этой территории, составленном из космических сканерных снимков со спутника «Метеор—Природа». (рис. 6.3).

Пример ландшафтного дешифрирования этого фотомонтажа приводится на рис. 6.4. Как видно, территория освоения БАМ расположена в пределах трех ландшафтных областей, включающих 18 районов (выделов).

В западной зоне преобладают горно-таежные ландшафты с широким развитием гольцовых поверхностей. В центральной зоне магистрали, проходящей через малонаселенные районы северного Забайкалья, преобладают горные хребты, вытянутые с западо-юго-запада на восток-северо-восток и разделенные межгорными понижениями. Высота хребтов достигает 2000—2500 м. Большинство хребтов отличается крутыми склонами и острыми вершинами. Широко развиты мерзлотно-солифлюкционные процессы. Растительный покров представлен даурской лиственницей и сосной на горно-таежных и горно-подзолистых почвах. В глубоких речных долинах и межгорных котловинах, где обычны температурные инверсии, а вечная мерзлота зале-

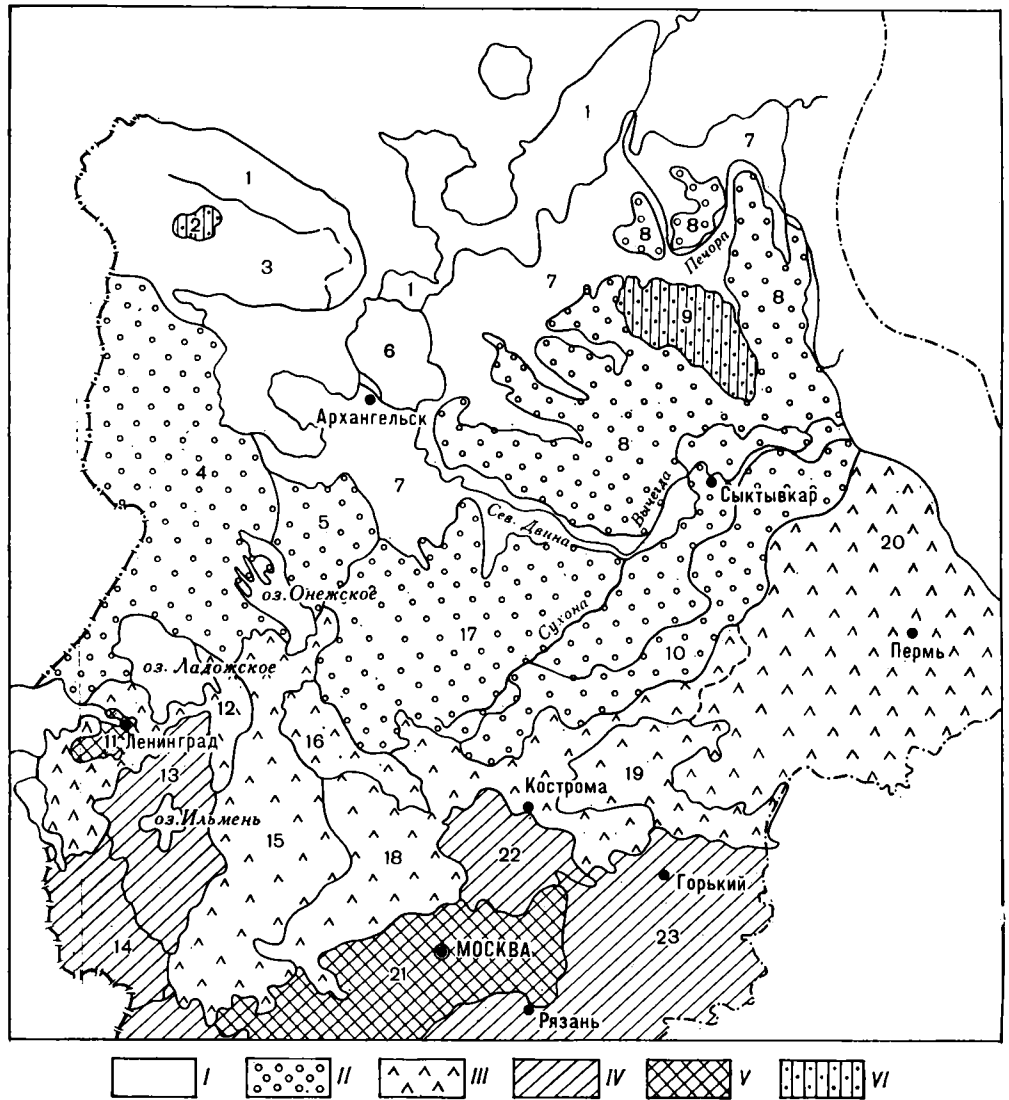


Рис. 6.2. Схема дешифрирования природно-хозяйственных районов Нечерноземья.

Типы природно-хозяйственных районов по преобладающему природопользованию: I — оленеводческо-промысловый, II — лесозаготовительный и промысловый с очагами сельского хозяйства, III — лесозаготовительный и сельскохозяйственный, IV — сельскохозяйственный, V — промышленный с сельским хозяйством пригородного типа, VI — горнодобывающий. Цифры — номера природно-хозяйственных районов.

№ района	Район	Рисунок изображения	Природно-хозяйственная характеристика	№ района	Район	Рисунок изображения	Природно-хозяйственная характеристика
1	Побережье Баренцева моря	Однородный белого тона	Плоская заболоченная заозеренная равнина (на Кольском п-ве — холмисто-грядовая), покрытая кустарничковой и ерниковой тундровой растительностью и кустарничковыми болотами. Оленеводческо-промысловый район	4	Карелия	Полосчато-пятнистый с вытянутыми, ориентированными на северо-запад пятнами мелкого, среднего и крупного размера, контрастного фототона	Холмисто-грядовая «сельговая» равнина с многочисленными озерами, покрытая северо- и среднетаежными, главным образом сосновыми лесами и ерnikово-осоково-сфагновыми и осоково-разнотравными болотами. Лесозаготовительный и промысловый район с очагами сельского хозяйства
2	Хибины	Полосчато-кольцевой светло-серого тона	Горные массивы, окруженные зоной понижений с озерами и покрытые северо-таежными сосновыми и еловыми лесами, сменяющимися горными тундрами. Район горных разработок	5	Левобережье Онеги	Густо-мелкопятнистый с отдельными крупными пятнами неопределенной формы, с преобладанием светло-серого тона	Пологоволнистая заболоченная и заозерная равнина с многочисленными камами и озами, покрытая северо- и среднетаежными еловыми и сосновыми лесами и сфагновыми, торфяно-кустарничковыми болотами. Лесозаготовительный район с очагами сельского хозяйства
3	Центральная часть Кольского п-ва	Неравномерно-пятнистый с пятнами от светло-серого до темно-серого тона среднего и мелкого размера, неопределенной, вытянутой и округлой формы	Расчлененная возвышенность с горными массивами, переходящая на юге в низменную заболоченную равнину, покрытая северо-таежными сосновыми и еловыми лесами и ерnikово-сфагновыми и травяно-моховыми болотами. Оленеводческо-промысловый район	6	Беломорско-Кулойский	Мелко- и среднепятнистый в сочетании с ветвисто-сетчатым, по периферии района — полосчатый,	Пологохолмистая возвышенность, густо расчлененная эрозийной сетью и ограниченная четкими уступами коренных пород, покрытая

№ района	Район	Рисунок изображения	Природно-хозяйственная характеристика	№ района	Район	Рисунок изображения	Природно-хозяйственная характеристика
7	Северная окраина Русской равнины	с преобладанием светло-серого тона  Ветвистый среднепятнистый с преобладанием светло-серого тона и отдельными темно-серыми пятнами	северо-таежными еловыми лесами с пятнами ерниковых и сфагновых болот. Оленеводческо-промысловый район  Пологоволнистая террасированная и заболоченная равнина с мелкими озерами, пересеченная долинами крупных рек, покрытая северо-таежными редкостойными еловыми с примесью сосны лесами и ерниковыми и сфагновыми болотами и закустаренными осоковыми лугами по поймам. Оленеводческо-промысловый район	16	Молого-Шекснинский	пятнистым и ветвистым, с преобладанием серого тона  Пятнисто-полосчатый, ориентированный на северо-запад, с чередованием пятен белого и серого тона	численными озерами, слабоосвоенная эрозийной сетью, покрытая мелколиственными, сосновыми и еловыми южно-таежными лесами, пашнями, сенокосами и пастбищами, торфоразработками. Лесозаготовительный и сельскохозяйственный район
8	Водораздел рек Северной Двины и Печоры	Пятнистый с ветвистыми пятнами, местами радиально расходящимися, с участками мелких прямоугольных пятен, с преобладанием темно-серого цвета	Пологоволнистая и холмистая равнина, расчлененная на севере района долинами рек на отдельные крупные языки, покрытая в основном среднетаежными лесами с преобладанием еловых на западе и сосновых на востоке района, с отдельными пятнами сфагновых болот. Лесозаготовительный и промысловый район с очагами сельского хозяйства	17	Сухонский	Резко выраженный пятнистый рисунок с пятнами различных размеров неопределенной, овальной, удлинненной формы, часто с прямоугольными очертаниями, с контрастными сочетаниями темных и светлых тонов	Холмисто-грядовая равнина с широкими слаболиственными понижениями, сильно расчлененная эрозийной сетью, покрытая еловыми, мелколиственными и сосновыми среднетаежными лесами, сфагновыми болотами, с отдельными участками сельскохозяйственных земель. Лесозаготовительный и промысловый район с очагами сельского хозяйства
9	Тиманский край	Сетчато-пятнистый с отдельными ориентированными полосами и выраженным сочетанием светло-серого и темно-серого тонов	Возвышенность, ориентированная на северо-запад, глубоко расчлененная эрозийной сетью на массивы и гряды, покрытая среднетаежными еловыми и сосновыми лесами. Горнодобывающий район	18	Верхне-Волжский	Крупно- и мелкопятнистый, местами полигональный с равномерным сочетанием светло- и темно-серого тонов	Пологохолмистая и холмисто-грядовая равнина с плоскими заболоченными понижениями, пересеченная долинами Волги и ее притоков, покрытая мелколиственными сосновыми и еловыми южно-таежными лесами, пашнями, сенокосами и пастбищами, торфоразработками. Сельскохозяйственный и лесозаготовительный район
10	Северные Увалы	Средне-мелкопятнистый с отдельными крупными пятнами с преобладанием темно-серого тона	Увалисто-холмистая гряд с елово-пихтовыми среднетаежными лесами на востоке и сосново-еловыми южно-таежными лесами на западе. Лесозаготовительный и промысловый район с очагами сельского хозяйства	19	Ветлужский	Пятнистый с мелкими, средними и крупными пятнами, местами с прямоугольными очертаниями, с редкими полосами, пересекающими район, и с контрастным сочетанием светлых и темных тонов	Плоская, местами заболоченная равнина, в центральной части пологоувалистая, покрытая сосновыми и мелколиственными южно-таежными лесами, сенокосами и пашнями. Лесозаготовительный и сельскохозяйственный район
11	Ленинградско-Ижорский	Мелкопятнисто-полигональный с контрастным чередованием белого и темно-серого тонов	Слабоволнистая пологая равнина, на северо-востоке — низменная и заболоченная, с сельскохозяйственными землями (пашнями, сенокосами, пастбищами), южно-таежными еловыми, мелколиственными и сосновыми лесами и землями, занятыми населенными пунктами, дорогами. Промышленный район с сельским хозяйством пригородного типа	20	Камский	Пятнистый с сочетанием крупных пятен с мелкими, имеющими часто прямоугольные очертания	Пологовалистая холмистая и слабоволнистая равнина, густо расчлененная эрозийной сетью, покрытая сосновыми, лиственнично-сосновыми, еловыми и мелколиственными южно-таежными лесами, с лугами по долинам рек и пашнями. Лесозаготовительный и сельскохозяйственный район
12	Чудско-Ладожский	Неясно-пятнистый темно-серого тона со средними и мелкими светло-серыми пятнами	Слабоволнистая заболоченная равнина с участками холмисто-грядового рельефа, покрытая мелколиственными южно-таежными лесами и болотами, с отдельными участками земель, занятых населенными пунктами, дорогами, пашнями, сенокосами, пастбищами и торфоразработками. Лесозаготовительный и сельскохозяйственный район	21	Московский	Густой равномерно мелкопятнистый, в восточной части — крупно- и среднепятнистый, с четким чередованием светло- и темно-серого тонов	Пологохолмистая и грядово-холмистая, в восточной части слабоволнистая равнина, с сочетанием небольших массивов хвойных и лиственных лесов, пашен, сенокосов, пастбищ, населенных пунктов, дорог, в восточной части — болот. Промышленный район с сельским хозяйством пригородного типа
13	Приильменский	Пятнисто-полосчатый в южной части веерообразный с чередованием светло-серого и темно-серого тонов	Холмисто-грядовая равнина, густо расчлененная речной сетью, заболоченная, покрытая мелколиственными сосновыми и еловыми южно-таежными лесами, пашнями, лугами. Имеются торфоразработки. Сельскохозяйственный район	22	Ивановский	Крупнопятнистый, в центре района — в сочетании с мелкопятнистым, с преобладанием светло-серого тона	Пологохолмистая равнина, пересеченная долиной Волги, покрытая мелколиственными, сосновыми и еловыми лесами, пашнями, сенокосами, пастбищами, болотами, торфоразработками. Сельскохозяйственный район
14	Псковско-Великолукский	Крупно- и мелкопятнистый с чередованием светло- и темно-серого тонов	Холмистая равнина, заболоченная и заозеренная, покрытая сосновыми и мелколиственными лесами, пашнями, сенокосами и пастбищами, с землями, занятыми населенными пунктами и дорогами. Сельскохозяйственный район	23	Волжско-Окский	Преобладание белого тона с включением мелких и отдельных крупных пятен угловатых очертаний серого тона	Слабоволнистая равнина с грядово-холмистыми участками, расчлененная долинами Волги и ее притоков, в основном распаханная, с отдельными массивами мелколиственных и сосновых лесов. Сельскохозяйственный район
15	Валдайский	Крупнопятнистый в сочетании с мелко-	Холмисто-западинная грядовая возвышенность с много-				



Рис. 6.3. Монтаж космических снимков территории Байкало-Амурской магистрали. ИСЗ «Метеор—Природа», аппаратура МСУ-С. 1981 г., зима.

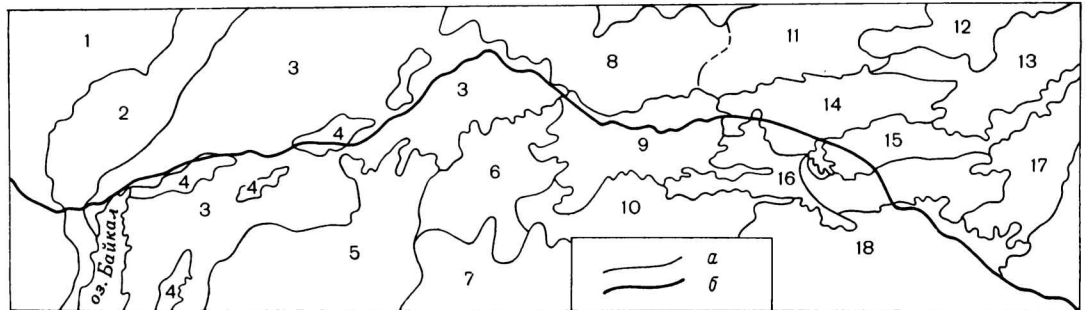


Рис. 6.4. Схема ландшафтного дешифрирования территории Байкало-Амурской магистрали.

а — границы природных районов, выявленных на снимке, б — трасса БАМ, цифры — номера природных районов.

№ района	Район	Рисунок изображения	Природная характеристика
1	Предбайкальская впадина	Однородный темно-серого тона с пятнистостью, местами ветвистый	Слаборасчлененное плато высотой 500—800 м, в центральной части грядовое, с низкогорными и среднетаежными сосновыми и сосново-лиственничными лесами с фрагментами темнохвойных массивов
2	Северобайкальское нагорье	Мелкополосчатый, с преобладанием белого тона	Система горных коротких хребтов с крутыми склонами и межгорных широких впадин, вытянутых в меридиональном и субмеридиональном направлениях. Горы средневысокие и высокие с отдельными ледниковыми формами, глубокорасчлененные, с горнотаежными лиственничными редкостойными лесами, зарослями кедрового стланика и высокогорными, преимущественно кустарничковыми и мохово-лишайниковыми тундрами с фрагментами альпийских лугов

№ района	Район	Рисунок изображения	Природная характеристика
3	Байкальско-Становая горная область	Крупнодревовидный и мелкополосчатый с преобладанием белого тона	Система горных массивных хребтов и межгорных впадин, дно которых лежит на высоте 500—1000 м, вытянутых в субширотном направлении. Горы средневысокие и высокие с отдельными ледниковыми формами, глубокорасчлененные V-образными долинами. Горнотаежные лиственничные редкостойные леса, заросли кедрового стланика и высокогорные, преимущественно кустарничковые и мохово-лишайниковые тундры с фрагментами альпийских лугов
4	Северобайкальские межгорные котловины	Однородный серого тона с неясно выраженной мелкопятнистостью	Межгорные понижения со слаборасчлененным равнинным рельефом, расположенные на высоте 500—800 м, местами сильно заболоченные, с низко- и среднегорными лиственничными, преимущественно ерничково-багульниковыми и кустарничково-моховыми лесами

№ района	Район	Рисунок изображения	Природная характеристика	№ района	Район	Рисунок изображения	Природная характеристика
5	Западное и Центральное Забайкалье	Распльчатый ветвисто-полосчатый с преобладанием серого тона	Система горных хребтов и межгорных котловин, вытянутых в основном с юго-запада на северо-восток, хребты высотой 1000—1800 м, преимущественно широкие плосковершинные. Горнотаежные, лиственничные и сосново-лиственничные леса, заросли кедрового стланика и высокогорные тундры	16	Хребет Янкан-Тукурингра	Однородный темно-серого тона с ветвистостью преимущественно субширотного направления, с отдельными светлыми пятнами неопределенной формы	Среднегорье высотой 1000—1250 м с пологосклонными вершинами — гольцами. Горнотаежные лиственничные, чаще багульниковые и рододендроновые леса с фрагментами пихтово-еловых лесов, редколесий и кедрового стланика
6	Система Олёкминского Становика (Центральное Забайкалье)	Ветвистый, мелкопятнистый с преобладанием серого тона	Среднегорье высотой 600—1800 м. Горнотаежные лиственничные багульниковые леса в сочетании со сфагновыми марями и ерниками	17	Север Бурейнского нагорья	Ветвисто-среднепятнистый с преобладанием темно-серого тона	Среднегорье, с участками ледниковых форм рельефа, высотой 600—1250 м, отдельные хребты до 2000 м, глубоко расчлененные долинами рек. Горнотаежные лиственничные багульниковые и рододендроновые леса с фрагментами кедрового стланика, пихтово-еловых лесов и редколесий
7	Юго-восточное Забайкалье	Перисто-ветвистый с преобладанием темного серого тона	Низкогорье высотой 600—1000 м, с участками равнинно-сочного рельефа в межгорных котловинах. Горнотаежные лиственничные леса горных массивов и дерновинно-злаковые и злаково-разнотравные степи в межгорных котловинах	18	Амурско-Зейская равнина	Мелко- и среднепятнистый, неясно выраженный, местами ветвистый	Плоско-увалистая равнина высотой 300—400 м, с отдельными останцами высотой до 800—900 м, заболочена, густо расчленена долинами рек. Южно-таежные лиственничные травяно-кустарничковые леса и мари с ерниками
8	Чугинское плоскогорье	Древовидно-полосчатый, неясно выраженный с преобладанием серого тона	Пологоволнистое плато высотой 1000—1200 м, сравнительно слабо расчлененное, местами заболоченное, с горнотаежными лиственничными, преимущественно кустарничковыми редкостойными лесами и зарослями кедрового стланика с фрагментами горной тундры				
9	Бассейн верхнего течения р. Нюкжи	Крупнопятнисто-перистый, неясно выраженный с чередованием серого и светло-серого тонов	Среднегорье, местами низкогорье высотой 800—1250 м, иногда с участками ледниковых форм, с хорошо разработанной долиной р. Нюкжи. Горнотаежные и долинные основные, сосново-лиственничные и лиственничные кустарничково-травяные и зеленомошные леса с фрагментами лиственничных редколесий и зарослями кедрового стланика				
10	Левобережье р. Амур (междуречье рек Амазара—Осежина)	Пятнисто-ветвистый, кольцевой, четко выраженный с преобладанием серого цвета	Система низкогорных хребтов высотой 400—600 м и межгорных котловин, вытянутых в широтном направлении. Среднегорная лиственничная и сосново-лиственничная тайга с долинными сфагновыми марями и ерниками				
11	Западная часть Алданского нагорья	Ветвистый, размытый, нечетко выраженный с преобладанием серого цвета	Низко-среднегорье высотой 400—1200 м, заболоченное. Среднегорные лиственничные леса с зарослями кедрового стланика со сфагновыми марями				
12	Центральная и восточная часть Алданского нагорья	Ветвисто-полосчатый четко выраженный с преобладанием белого цвета	Среднегорье, местами высокогорье высотой 1400—2000 м с участками ледниковых форм с хорошо разработанной долиной. Горнотаежные лиственничные, сосново-лиственничные леса с зарослями кедрового стланика				
13	Майский хребет, Джугджур	Древовидный, местами пятнистый с преобладанием серого цвета	Среднегорье, местами высокогорье высотой 1200—1800 м. Горнотаежные лиственничные леса				
14	Правобережная часть бассейна верхнего течения р. Зея	Мелкопятнисто-перистый с различными очертаниями, с преобладанием серого тона	Низкогорье высотой 400—650 м, местами до 800 м. Горнотаежные лиственничные багульниковые леса в сочетании со сфагновыми марями и ерниками, с фрагментами пихтово-еловых лесов				
15	Верхнезейско-Удская равнина	Перисто-полосчатый преимущественно субширотного направления с преобладанием светло-серого тона	Плосковолнистая равнина высотой 300—400 м, к востоку до 100 м, заболочена, сравнительно густо расчлененная долинами рек. Средне-таежные лиственничные и лиственнично-березовые леса в сочетании с марями и травяными болотами				

гает близко от поверхности, развиваются сфагновые лиственничники или вторичные березово-осиновые леса.

Восточный отрезок Байкало-Амурской магистрали проходит по южной части Дальнего Востока. Рельеф преимущественно низкогорный, с обширными выположенными котловинами. Ландшафты средней тайги постепенно сменяются ландшафтами южной тайги, где преобладают еловые и елово-пихтовые леса с примесью мелколиственных и широколиственных пород.

На протяжении всей магистрали широко развиты такие физико-геологические явления, как осыпи, оползни, термокарст, наледи, снежные лавины и сели. Все это сильно осложняет строительство и эксплуатацию магистрали. Также необходимо отметить, что все районы, по которым проходит трасса, высоко сейсмичны. Большая протяженность магистрали, проходящей в необжитых малонаселенных и малоисследованных районах страны, требует новых методов изучения прилегающих к ней территорий и периодического слежения за всей трассой.

Природное районирование, проведенное по фотомонтажу, позволило по новому взглянуть на трассу БАМ и примыкающие к ней районы и определило возможность использования спутниковых данных космической съемки Земли в целях исследования малоизученных территорий зоны освоения БАМ.

Применение спутниковой космической съемки особенно целесообразно для эффективного планирования разностороннего комплекса научно-исследовательских и изыскательских работ. В значительной степени этому планированию способствует детальное природное районирование, представленное на монтаже снимков территории БАМ. В горных районах, где велика опасность схода лавин, особенно ценна возможность периодических съемок с ИСЗ, поскольку никаким иным способом получить широкую по территориальному охвату информацию о динамике накопления снега нельзя.

Космическая съемка также позволяет следить за изменениями оперативной обстановки в лесных пожароопасных районах. Не меньший интерес представляет и слежение за состоянием водных объектов, например за ледоставом или весенним таянием льда и т. п.

По мере освоения притрассовой зоны Байкало-Амурской магистрали все большее значение имеет контроль за состоянием атмосферы вблизи промышленных объектов, расположенных в глубоких горных котловинах.

Существенную помощь космическая съемка оказывает при локализации и прогнозе многих опасных стихийных явлений. Анализ распространения глубинных разломов, хорошо видных на космических материалах (и даже на уменьшенной схеме монтажа), позволяет геологам и сейсмологам выявить наиболее сейсмоопасные участки территории.

Одним из ведущих направлений использования данных дистанционного зондирования Земли для подобных регионов является составление инженерно-геологических карт, которые помогают определить степень влияния различных природных факторов на крупные инженерные сооружения.

### 6.3. Плато Путорана

На космическом снимке (рис. 6.5) показан один из наиболее труднодоступных районов Средней Сибири — плато Путорана. Оно сложено мощной туфолавоваей толщей триасового возраста. Плато Путорана в неотектонический этап сформировалось как единая морфоструктура сводового, купольного характера, что отразилось в своеобразии глубокого радиального расчленения по сети разрывов, направленных от центра к периферии свода. Большая часть плосковерхих водоразделов Путорана занята горной арктической тундрой с курумами, а глубокие долины заняты лиственничным и елово-лиственничным редколесьем.

Строение речной сети и водораздельных пространств позволяет расшифровать многие страницы становления современных природных комплексов и, в частности, существование приподнятых и опущенных блоков на крыльях Путоранского свода (например, Лонтокойский Камень, Брус-Камень и т. д.).

Прилегающие к плато территории существенно различаются по рельефу и, следовательно, по морфологии. На западе (рис. 6.6), в пределах Туруханских дислокаций, хорошо видны меридионально вытянутые валы на высоких террасах Енисея. К северу от плато располагается Северо-Сибирская низменность. На юге с развитием геологических образований, в которых вулканические породы замещены близкими по составу интрузивами, внедрившимися в толщу осадочных пород, прослеживается распространение трапповых возвышенностей — останцов, чередующихся с малыми котловинами. Следует отметить, что точная конфигурация некоторых геолого-ландшафтных границ стала известна только в результате анализа космических сканерных снимков среднего разрешения.

На зимнем снимке с ИСЗ «Метеор-Природа» наиболее отчетливо выделяются заснеженные территории собственно плато Путорана. Глубокие

долины подчеркиваются благодаря теневому эффекту. Хорошо видны покрытые льдом поверхности крупных моренных озер.

### 6.4. Природно-территориальные комплексы Алтайского края

Алтайский край занимает обширные пространства к югу от Западно-Сибирской равнины. На юго-востоке Алтайского края расположены горные массивы Алтая, на северо-западе — обширные Предалтайская и Кулундинская равнины. В состав Алтайского края входят Горно-Алтайская и Новосибирская области.

Алтайский край богат разнообразными природными ресурсами — рудными месторождениями цветных металлов и полиметаллов, железа, золота, ртути, мрамора, бурого угля, а также лесами и пастбищами.

Положение Алтайского края в центральной части материка и его континентальный климат обусловили особенности формирования ландшафтов. Для разных районов горного Алтая характерны свои системы высотных зон. Во влажных северных и западных районах луговые степи предгорий сменяются выше густыми темнохвойными лесами, а на самых высоких вершинах — субальпийскими и альпийскими лугами. Западные и северные предгорья заняты степями. Равнинные территории Алтайского края относятся к Верхнеобской и Кулундинской физико-географическим провинциям. Верхнеобская физико-географическая провинция представлена преимущественно лесостепными и степными ландшафтами возвышенных аллювиальных и аллювиально-пролювиальных равнин. Кулундинская провинция — самая низкая часть территории. Здесь распространены степные и сухо-степные ландшафты аллювиально-пролювиальных и озерных равнин, местами засоленных.

К группе интразональных ландшафтов относятся песчано-боровые, которые определяют характерный рисунок изображения территории.

Анализ космического сканерного снимка с ИСЗ «Метеор-Природа» позволяет разделить территорию по характеру рисунка на две части: юго-восточную — горную и северо-западную — равнинную (рис. 6.7).

Равнины западной части территории Алтайского края выделяются на космическом изображении характерными темными полосами древних линий стока, поросших лесной растительностью, среди светлых степных ландшафтов, большей частью распаханных.

Более детальный анализ рисунка фотоизображения позволил выделить на территории Алтайского края 25 природно-территориальных комплексов (рис. 6.8); из них 17 — на равнинах и 8 — в горах. Это говорит о довольно простой ландшафтной структуре горной территории края и в то же время о довольно сложной структуре равнинной территории, что связано с переходным характером ландшафтов территории от лесных и лесостепных на севере до сухостепных на юге.

Хозяйственная деятельность оказывает сильное воздействие на ландшафты степных районов Алтайского края. Практически полностью распаханы тер-





Рис. 6.5. Космический снимок плато Путорана с ИСЗ «Метеор—Природа», аппаратура МСУ-С, диапазон 0,7—1,1 мкм, 2 ноября 1982 г.

ритории степей. Сухостепные равнины, большей частью засоленные, используются как пастбища, и только обводненные территории распаханы. На космическом снимке районы земледелия выделяются по мелкопятнистому рисунку прямоугольников полей. Пастбищные районы характеризуются

размытыми пятнами светло-серого и серого фототона с белыми выцветами солей и отдельными, чаще всего светлыми прямоугольниками старопахотных земель.

Интразональные ландшафты отчетливо выделяются на фоне светлых сельскохозяйственных по-

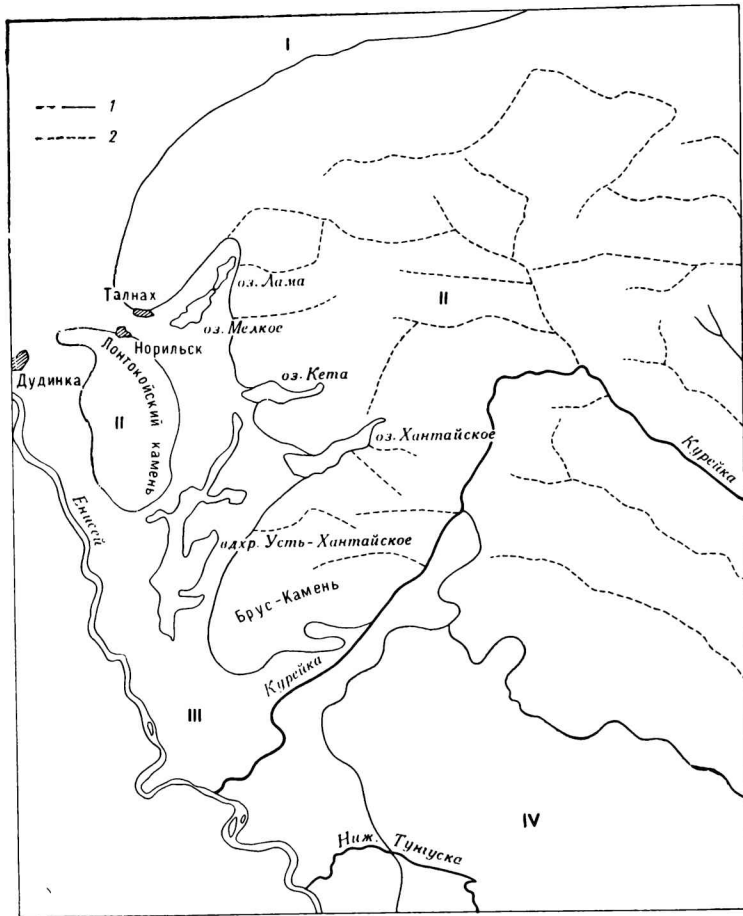


Рис. 6.6. Схема дешифрирования природных районов плато Путорана.

1 — границы природных районов, выделенных на снимке; 2 — направление русел основных рек, соответствующих тектоническим разрывам; I, II, III, IV — номера природных районов, выделенных на снимке: I — Северо-Сибирская низменность, покрытая преимущественно моховыми, лишайниковыми и ерниковыми тундрами; II — плато Путорана с горноарктическими тундрами, сменяющимися к югу лиственничными и елово-лиственничными редколесьями; III — придолинный район с развитием северо-таежных еловых, лиственнично-еловых и лиственничных преимущественно редкостойных лесов с фрагментами ивняково-ерниковых тундр; IV — район траптовых возвышенностей с северо-таежными лиственничными и елово-лиственничными лесами.

Рис. 6.7. Монтаж космических снимков территории Алтайского края с ИСЗ «Метеор—Природа», аппаратура МСУ-С.



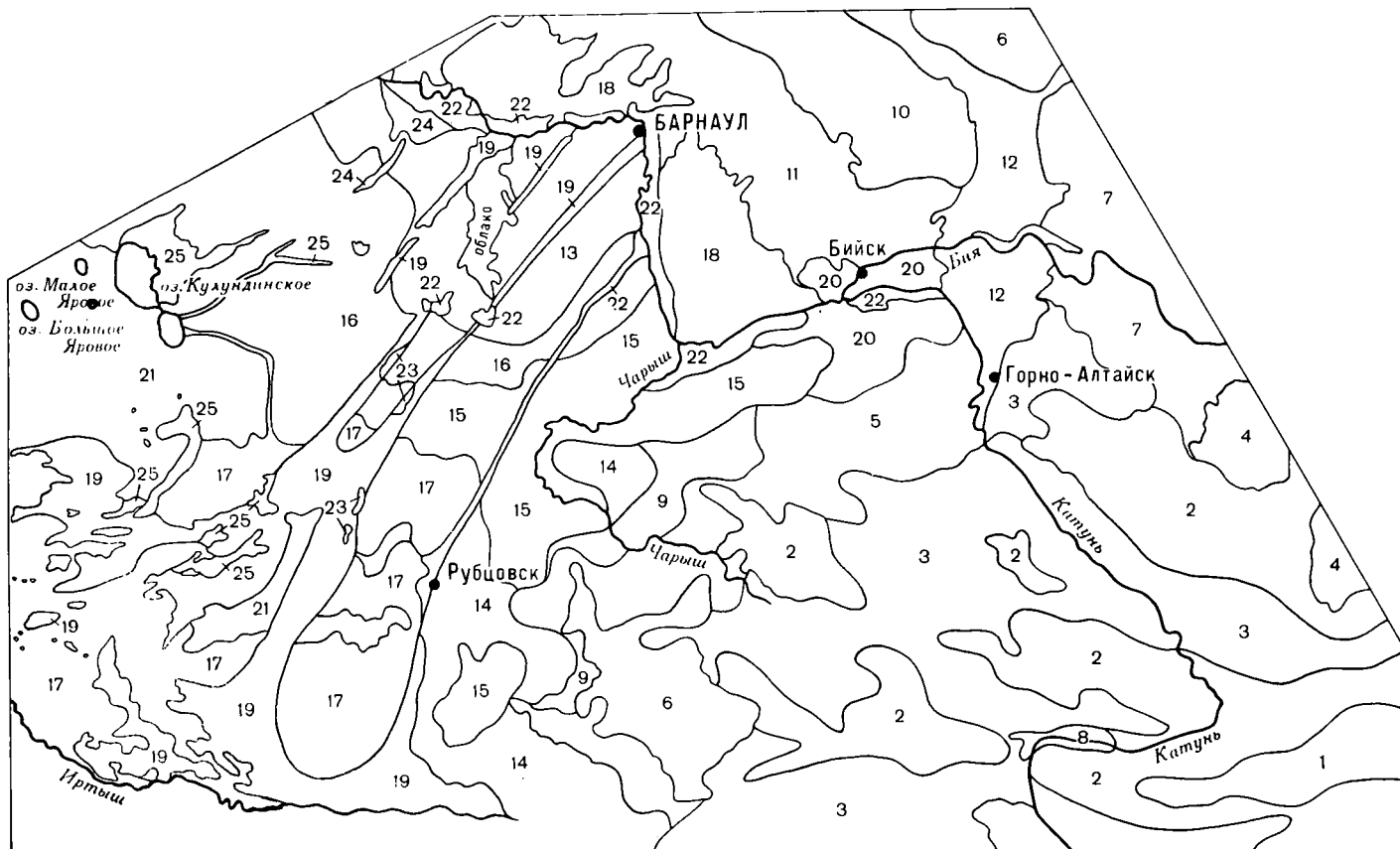


Рис. 6.8. Схема дешифрирования природно-территориальных комплексов Алтайского края.

№ района	Рисунок изображения	Характеристика природно-территориальных комплексов	№ района	Рисунок изображения	Характеристика природно-территориальных комплексов
<b>Высокогорные территории</b>			<b>Возвышенные равнины</b>		
1	Древовидный, мелковетвистый темно-серого тона	Резко-дробнорасчлененные, скалистые с ледниковыми, каменными россыпями и фрагментами моренных отложений	9	Неясно-пятнистый с чередованием светлых и светло-серых пятен	Мелкосопочник лугово-степной
2	Крупнодревовидный, ветвистый темно-серого тона	Пенепленизированные, останцово-холмисто-увалистые, с малоощным суглинистым покровом и каменными россыпями, с альпийскими и субальпийскими лугами	10	Густой средне-пятнистый, перистый с преобладанием темно-серого тона	Пологоувалистое лесовое плато с луговыми степями в сочетании с березовыми широколиственными лесами
<b>Среднегорные территории</b>			11	Мелкопятнистый, перистый серого тона	Пологовосхолмленные переветренные песчаные и супесчаные террасы с осиново-сосново-березовыми травяными лесами
3	Неясно-выраженный древовидный с преобладанием серого тона	Крутосклонные глубокорасчлененные, скалистые и каменно-осыпные, с лиственничными и березово-лиственничными лесными лугами	12	Перистый светло-серого тона	Холмисто-увалистые предгорные цокольные равнины с луговыми степями
4	Крупнодревовидный темно-серого тона	Крутосклонные, глубокорасчлененные, скалистые с каменно-осыпными склонами и кедровыми лесами	13	Густо-мелкозернистый серого тона с черными вкраплениями	Пологоувалистое лесовое плато, расчлененное балочной сетью с разнотравными луговыми степями (в основном распаханные)
5	Неясно-пятнистый светло-серого тона, размытый со средними и мелкими серыми пятнами	Крутосклонные среднерасчлененные скалистые с кустарниковыми луговыми степями	14	Пятнистый с мелкими пятнами, местами с прямоугольными очертаниями и с контрастным сочетанием темных и светлых тонов	Крупноувалистые цокольные предгорные равнины с разнотравными степями (в основном распаханные)
<b>Низкогорные территории</b>			15	Мелкопятнистый серого тона со средними и мелкими темно-серыми пятнами	Пологоувалистое лесовое плато с разнотравными степями (в основном распаханные)
6	Неоднородный серого тона с ветвистостью	Пологосклонные слаборасчлененные с редкими скальными выходами с осиново-пихтовыми высокотравными лесами	16	Неоднородный перистый, вытянутый в одном направлении неоднотонного серого цвета	Пологоувалистое лесовое плато с разнотравными типчаковыми степями (в основном распаханные)
7	Крупнопятнистый в сочетании с ветвистым темно-серого тона	Пенепленизированные пологоувалистые с осиновыми, пихтово-осиновыми, березово-осиновыми и сосново-березовыми высокотравными лесами	17	Густо-полосчатый, вытянутый в широтном направлении	Пологоувалистое лесовое плато с типчаковыми сухими степями (в основном распаханные)
<b>Межгорная котловина</b>					
8	Неясно-выраженный пятнистый серого тона со средними пятнами темно-серого тона	Пологоувалистое днище котловины, сложенное аллювиальными отложениями, с ковыльными степями			

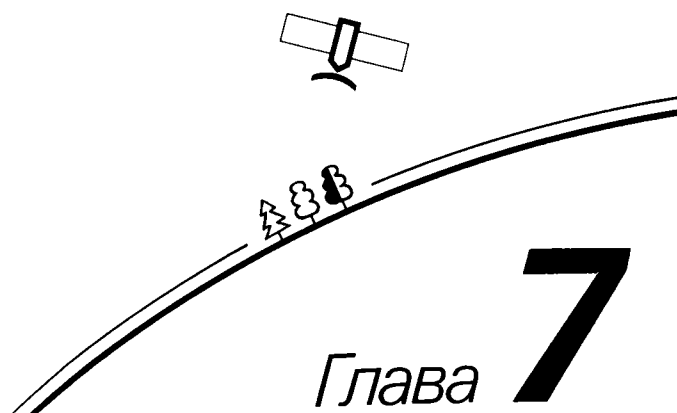
№ района	Рисунок изображения	Характеристика природно-территориальных комплексов
18	Однотонный, размытый серого тона, по краям переходящий в темно-серый	Дюнно-грядовые, песчаные террасы с сосновыми и березово-сосновыми брусничными лесами
Низменные равнины		
19	Неоднородный темного тона с размытыми крупными пятнами темно-серого тона	Дюнно-котловинные и полого-грядовые переветренные песчаные древнеаллювиальные равнины и дельты древних ложбин стока с сосновыми лесами
20	Сетчато-пятнистый с выраженным сочетанием светло-серого и темно-серого тона	Плосковолнистые песчано-лессовые древнеаллювиальные равнины и террасы с разнотравными лугами
21	Неоднородный, расплывчатый, полосчатый светло-серого тона	Плоские древнеаллювиальные песчаные и супесчаные равнины (в основном распаханные)
22	Однородный расплывчатый белого тона	Пойменные луговые террасы
Низинные равнины		
23	Однородный черного тона	Низкие лугово-солонцово-солончаковые озерные и речные супесчаные террасы
24	Однородный серого тона, размытый с мелкой пятнистостью	Низкие солонцово-солончаковые речные террасы и высокие поймы с разнотравными лугами
25	Преобладание белого тона с включением мелких пятен серого тона	Низкие озерные террасы с галофитными лугами

лей темными вытянутыми полосами, пересекающими территорию с северо-востока на юго-запад. Эти древние ложбины стока в настоящее время заняты сосновыми борами, которым (на песчаных аллювиальных и аллювиально-озерных почвах) соответствует темная окраска на космических снимках. Участки, лишенные растительности, подверглись ветровой эрозии и на снимке выделяются светлыми пятнами развеваемых песков.

Анализ рисунка, соответствующего горным территориям, позволяет выделить природно-территориальные комплексы разновысотных гор. Например, хорошо выделяются природно-территориальные комплексы низкогорий. Неглубокому расчленению в сочетании со степной и лугово-степной растительностью соответствует своеобразный характер изображения — гладкий рисунок с чередованием светлых и светло-серых пятен. Природно-территориальные комплексы среднегорий отличаются мелковетвистым рисунком склонов. Тени подчеркивают глубину расчленения природно-территориальных комплексов высокогорий. Таким образом, высокогорья на снимке выделяются как одни из самых темных участков с четким древовидным рисунком.

Представленные примеры использования сканерных изображений земной поверхности при изучении природно-территориальных комплексов свидетельствуют о перспективности этого вида информации в исследованиях физико-ландшафтного направления.

# Изучение состояния почвенного и растительного покровов



Исследования, связанные с рациональным использованием земельных ресурсов, включают широкий круг вопросов. Среди них одно из первых мест занимает учет земельного фонда и изучение состояния земельных угодий. При этом наибольшее внимание уделяется оценке состояния таких ценных угодий, как пашня, залежи, сенокосы и пастбища, леса и многолетние насаждения.

Для решения этих задач в основном использовались наземные обследования и аэрофотосъемка. Следует отметить, что традиционные методы построены на дискретных и разновременных наблюдениях и не удовлетворяют современным требованиям отраслей народного хозяйства. Космические снимки обеспечивают практически одновременный и сплошной охват наблюдениями значительных территорий. Периодическое повторение съемок позволяет следить за изменением состояния земельных угодий. Вместе с тем использование дистанционных методов ставит свои сложные задачи как в области выбора параметров, характеризующих состояние земельных угодий, так и в создании методов обработки косвенных (не прямых) дистанционных измерений.

## 7.1. Изучение почвенного покрова

Состояние почвенного покрова характеризуется многими параметрами, которые тесно связаны с типами и подтипами почв. Космические снимки дают возможность определять границы основных типов и подтипов почв. Пример такого дешифрирования многозональных сканерных снимков среднего разрешения (рис. 7.1) приведен на рис. 7.2. Важными параметрами состояния почвенного покрова являются эродированность, засоленность, заболоченность и гумусность.

Эрозию почв, т. е. процесс разрушения почвенного покрова под воздействием поверхностных вод и ветра, обычно подразделяют на плоскостную (поверхностную) и линейную (овражного типа). Результат оценки по сканерному снимку (рис. 7.3) овражной и плоскостной эрозии приведен на рис. 7.4. Овражная эрозия хорошо дешифрируется на зимних снимках по характеру залегания снежного покрова. Изображение территорий с очень большим количеством оврагов и сильно эродированными

почвами (1) имеет тонкий изрезанный рисунок светлого и темно-серого тона, обусловленный неравномерным залеганием снежного покрова на вершинах и склонах оврагов и балок и древесно-кустарниковой растительностью, покрывающей днища оврагов и имеющей на изображении темно-серый тон. Более размытый, но тоже достаточно четкий и тонкий рисунок на изображении имеют сильноэродированные почвы (2), преобладающие на сильноэродированной территории, на которой находится от 25 до 100 оврагов и балок на 100 км<sup>2</sup>. Средне- и слабоэродированные территории (3, 4), на которых находится от 10 до 25 оврагов на 100 км<sup>2</sup> и на которых преобладают средне- и слабоэродированные почвы, имеют сглаженный рисунок светло-серого и белого тона на космическом изображении. На плоских равнинных безовражных территориях (5) снег залегает ровным слоем и изображение этих территорий характеризуется белым тоном и бесструктурным рисунком. Изображение лесов (6) на фоне снежного покрова имеет темный тон. Болота (7) характеризуются ровным размытым рисунком серого тона. Размытый рисунок изображения светлого тона имеет облачность (8).

Методика дешифрирования почв, подверженных плоскостной эрозии, основана на том, что спектральные характеристики генетических горизонтов почв различны. Особенно сильно различаются спектральные коэффициенты яркости (СКЯ) генетических горизонтов почв, имеющих четко дифференцированный вертикальный профиль. Так, например, в инфракрасной области спектра СКЯ генетических горизонтов дерново-подзолистых почв с хорошо выраженным процессом оподзоливания изменяется от 0,4 для гумусового горизонта до 0,7 для подзолистого горизонта. Подобная методика дешифрирования эродированных почв пригодна для таежно-лесной зоны с преобладанием дерново-подзолистых почв и для зоны степей с каштановыми почвами. Для дешифрирования плоскостной эрозии в лесостепной и степной зонах на черноземных почвах эта методика непригодна, так как черноземы не обладают резко дифференцированным вертикальным профилем.

Почвы с существенно различным содержанием гумуса могут дешифрироваться по космическим снимкам (рис. 7.5). Результаты такого дешифрирования приведены на рис. 7.6.

Засоление почвы — это процесс накопления в почве растворимых солей. Для территории СССР характерны четыре основных типа засоления почв:

— сульфатно-содовый (Приднепровская низменность, южная часть Западно-Сибирской, Амурская и Лено-Вилюйская низменности, средняя часть Сыртового Заволжья, южная часть Окско-Донской равнины);

— хлоридно-сульфатный (южная часть Сыртового Заволжья, Зауралье к востоку от Прикаспийской низменности, Казахская складчатая страна, Туранская низменность, Фергана, дельта Амударьи);

— сульфатно-хлоридный (Туранская и Причерноморская низменности);

— хлоридный (Прикаспийская низменность).

Широко распространены засоленные почвы на аллювиальных равнинах крупных рек (Волги, Днепра, Дона, Иртыша, Амударьи), в приозерных понижениях, на приморских аллювиальных равнинах и древних террасах.

Летом на сорных солончаках образуется солевая корочка, на менее засоленных почвах поверхность покрывается растительностью. Зимой и в весенне-осенний период соры более увлажнены, чем окружающие незасоленные земли, и потому хорошо выделяются на их фоне. По космическим снимкам распознаются сухие солончаки (см. рис. 7.1) с выцветами легкорастворимых солей на поверхности и солевые коры, солончаки пухлые, гипсовые коры.

Изучение состояния растительного покрова по космическим снимкам связано с необходимостью выделить вклад атмосферы и почв в излучение, регистрируемое на ИСЗ. Для учета вклада почв в регистрируемое на ИСЗ излучение могут быть использованы специальные карты пространственного распределения их отражательных характеристик (рис. 7.7). Для сравнения на рис. 7.8 приведен фрагмент карты-схемы почвенного покрова некоторых районов Европейской территории СССР.

## 7.2. Изучение состояния лесной растительности

Велика роль леса в жизни человека. Поэтому постоянный контроль за состоянием лесной растительности в условиях интенсификации разработки лесных богатств и вовлечения в сферу производства все новых территорий приобретает исключительно важное значение.

Первые эксперименты с многозональной космической информацией малого и среднего разрешения показали реальную возможность ее использования для оценки залесенности территорий, распознавания породного состава лесов, контроля пожаров, контроля антропогенного воздействия и т. п.

**7.2.1. Оценка залесенности территории и распознавание лесной растительности.** Границы лесной растительности довольно хорошо дешифрируются на космических снимках (особенно на фоне снега). Снимки среднего разрешения, полученные зимой, дают возможность достаточно просто оценивать эту характеристику по фотону. Так, например, залесенность Московской области, оцененная по снимку за 8 января 1981 г., равна 38 % (рис. 7.9). Та же характеристика, полученная по Атласу ле-

сов СССР (издание 1973 г.), составила 32 %. Расхождение в оценках, по-видимому, связано в основном с динамикой лесного покрова в период между датами получения исходной информации.

При определении породного состава леса по многозональной видеoinформации могут быть использованы различные методы цифрового распознавания (см. раздел 5).

Статистическое описание классов может производиться по опорным данным о тестовых участках, причем для лесной растительности, являющейся малодинамичным объектом, не требуется высокая степень синхронности в получении космической и опорной информации.

На рис. 7.10 (см. вкладку) приведен пример распознавания лесов для одного из районов таежной зоны Европейской части СССР. Исходными данными послужил многозональный снимок малого разрешения, полученный с ИСЗ «Метеор». Для распознавания был выбран метод Байеса. Обучающие выборки представляли собой соответствующие тестовым участкам подмножества элементов, исходных многозональных видеоданных. Объем обучающих выборок для каждого заданного класса составил от 50 до 100 элементов изображения. Описание заданных классов по обучающим выборкам производилось в четырехмерном спектральном пространстве признаков. При обучении оператор производил привязку тестовых участков к конкретному изображению, выбранному для работы, для чего изображение выводилось на экран дисплея. Результат привязки представлял собой набор координат подмножеств элементов изображения, соответствующих тестовым участкам, который далее использовался для выборки многозональных данных о тестовых участках и статистического описания искомого классов лесов. Такими классами являлись темнохвойные (еловые) леса, светлохвойные (сосновые) леса и лиственные (осиновые и березовые) леса, а также незалесенные болота. Объекты, не входящие в этот перечень, были отнесены к классу «прочие территории». Поскольку класс «прочие территории» не может быть обеспечен тестовыми участками в силу разнородности входящих в него объектов, статистическое описание его было выполнено на основе теоремы о полной вероятности с привлечением исходных многозональных данных на всем изображении. На основании полученного статистического описания классов на этапе классификации было произведено поэлементное распознавание исходного изображения. Результат распознавания был выведен на устройство цветной печати с присвоением каждому классу определенного цвета. Проверка правильности распознавания контрольных участков леса дала следующие результаты: темнохвойные породы правильно классифицировались в 83 % случаев, лиственные — в 67 %, болота — в 50 % случаев. Контрольные участки светлохвойных лесов были классифицированы неверно. В целом было правильно классифицировано 57 % контрольных участков.

Представленный здесь результат получен на основании съемки, выполненной в летний период. Достоверность распознавания может быть повышена при использовании разновременных снимков. Видеoinформация высокого разрешения повысит

точность получения характеристик лесной растительности. Использование данных разновременных съемок позволит также оценить динамику лесонасаждений.

ных массивов, общей оценки лесосырьевых запасов, картографирования лесов и физико-географического изучения территории. Так, по приведенному на рис. 7.10 фрагменту можно сделать следующие

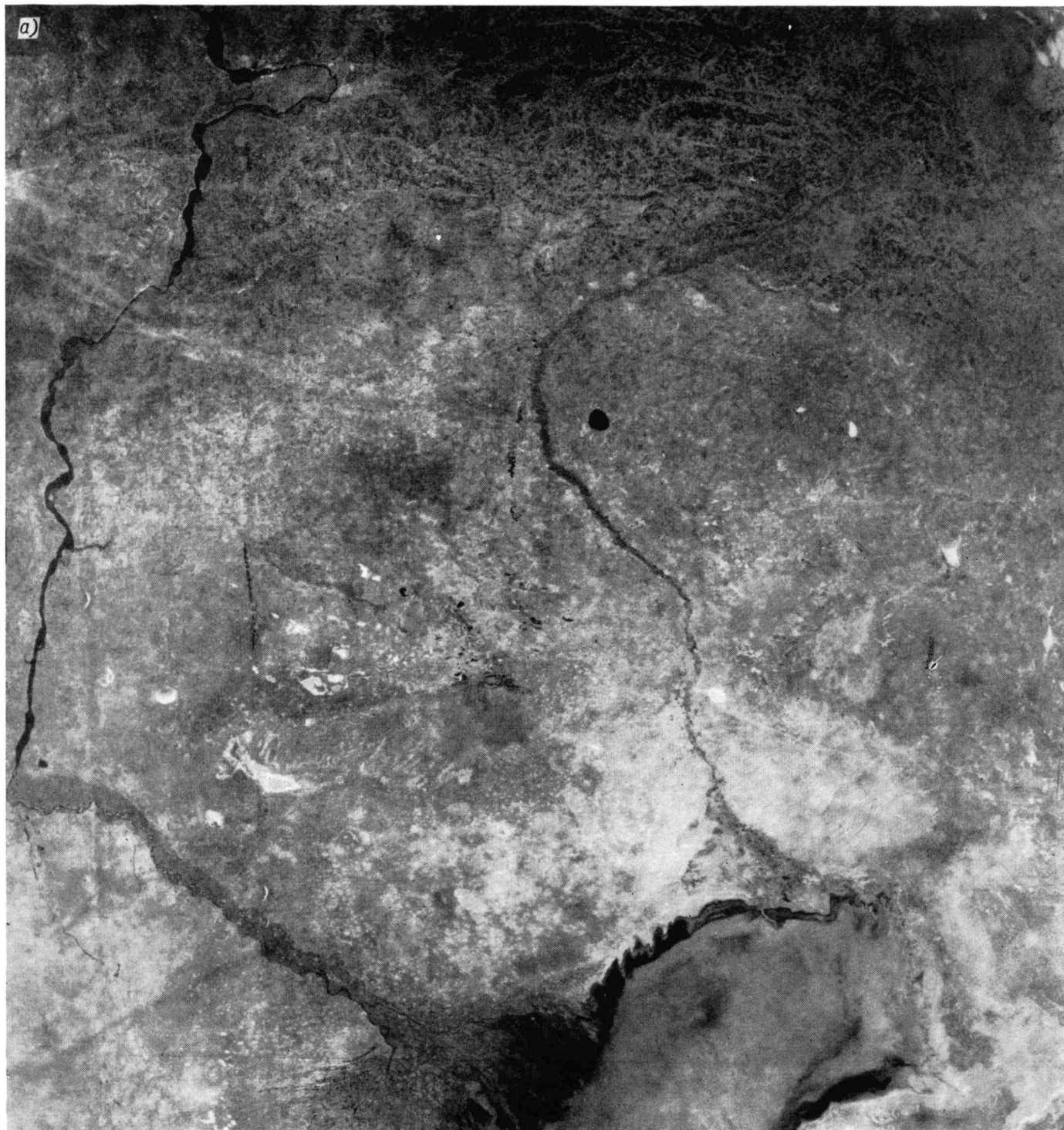


Рис. 7.1. Космические изображения среднего разрешения, использованные для дешифрирования типов и подтипов почв.  
а — диапазон 0,6—0,7 мкм, б — диапазон 0,7—1,1 мкм.

Данный эксперимент показывает принципиальную возможность использования такого подхода к обработке космических видеоданных для оценки степени общей залесенности территории и пространственного распространения основных лесобразующих пород, определения положения основных лес-

выводы: общая залесенность территории составляет 50 %; основная лесная порода — ель, местами встречаются березовые и осиновые леса, повсеместно встречаются мелкие участки сосны; основные лесные массивы приурочены к водораздельным поверхностям и склонам речных долин; район обла-

дает значительными запасами древесины, однако ценных лесных пород немного.

**7.2.2. Оценка пожарной опасности залесенных территорий.** Достаточно высокая обзорность, по-

Процесс обнаружения и развития очагов пожаров может быть описан такими тремя последовательными процедурами: 1) составление карты-схемы возможности возникновения пожара, 2) де-



вторяемость и оперативность космических съемок позволяют использовать их для обнаружения и контроля развития лесных, тундровых и степных пожаров, а также для оценки их последствий. Это особенно важно для тех регионов, авиаразведка над которыми или не ведется, или ведется эпизодически.

шифрование и определение координат очагов пожаров, 3) дешифрирование выгоревших участков и составление соответствующей карты-схемы.

На дату выполнения космической съемки, исходя из особенностей растительного покрова, метеорологической обстановки, климатических и физико-



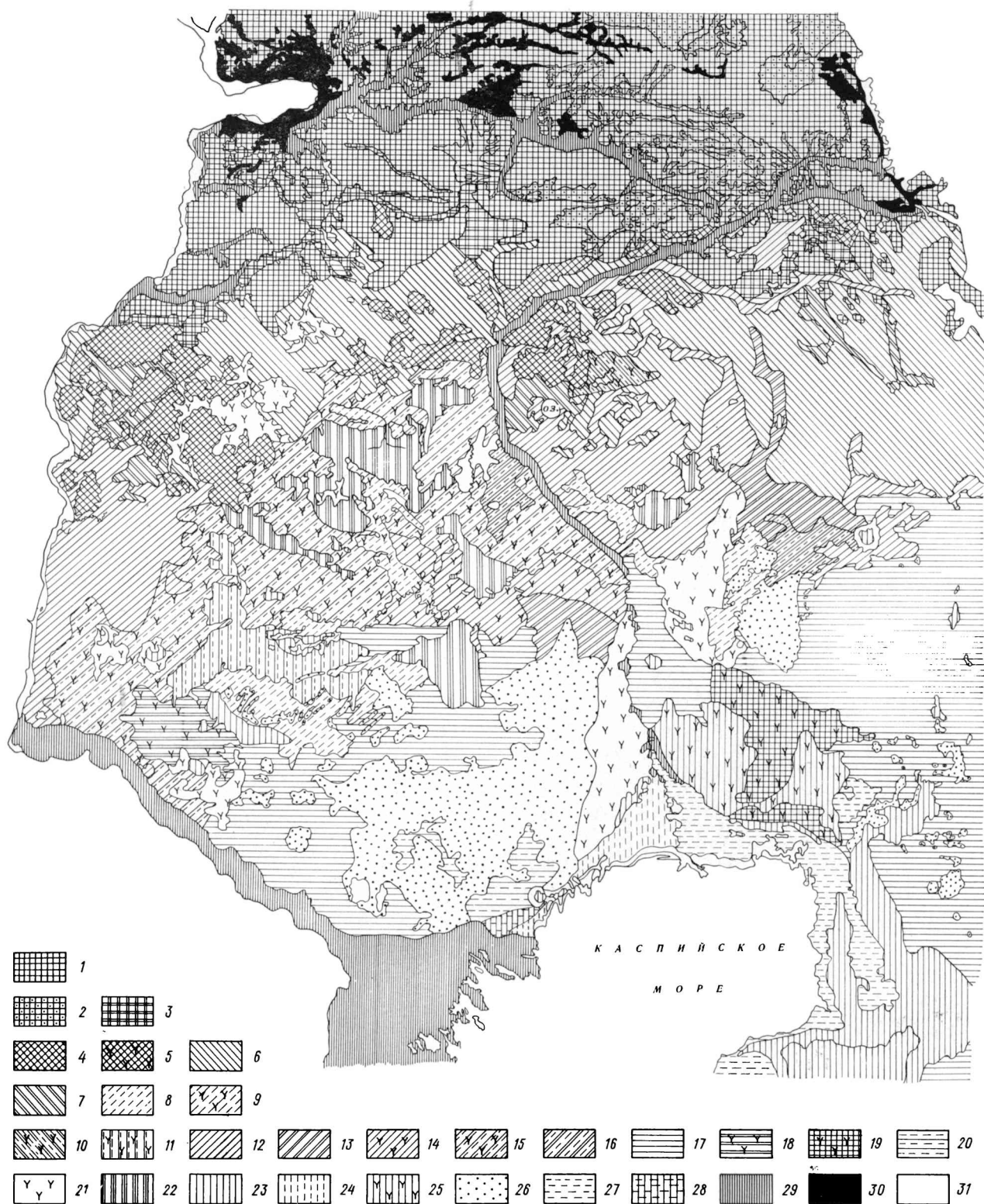


Рис. 7.2. Схема дешифрирования типов и подтипов почв по мнгозональным снимкам среднего разрешения.

1 — черноземы, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм серо-черный, рисунок крапчатый; 2 — черноземы эродированные, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм темно-серый и серый, рисунок тонкий, изрезанный; 3 — черноземы солонцеватые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм серый и темно-серый, рисунок крапчатый; 4 — темно-каштановые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм темно-серый и серый, пятнистая текстура; 5 — темно-каштановые в комплексе с солонцами, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, рисунок малококонтрастный, пятнистый; 6 — каштановые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, рисунок малококонтрастный; 7 — каштановые солонцеватые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, рисунок малококонтрастный, пятнистый; 8 — лугово-каштановые, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм серый, рисунок мелкопятнистый; 9 — лугово-каштановые в комплексе с солонцами, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темновато-серый, рисунок малококонтрастный, пятнистый; 10 — комплексы лугово-каштановых, каштановых солонцеватых и солонцов, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм светло-серый и серый, рисунок пятнистый; 11 — комплексы лугово-каштановых, солонцов и солончаков, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темно-серый, рисунок комплексный, пятнистый; 12 — светло-каштановые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый и серый, рисунок крапчатый; 13 — светло-каштановые солонцеватые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, рисунок малококонтрастный, пятнистый; 14 — комплексы светло-каштановых и солонцов, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм светло-серый, рисунок контрастный, пятнистый; 15 — комплексы светло-каштановых и солонцов, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм серый, рисунок пятнистый; 16 — комплексы светлокаштановых, солонцеватых и лугово-каштановых, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темновато-серый, рисунок пятнистый; 17 — бурые пустынно-степные, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм серый, рисунок точечный; 18 — комплексы бурых пустынно-степных солонцеватых и солонцов, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темновато-серый, монотонная текстура; 19 — комплексы бурых пустынно-степных, солонцов и солончаков, тон изображения в диапазоне 0,7—

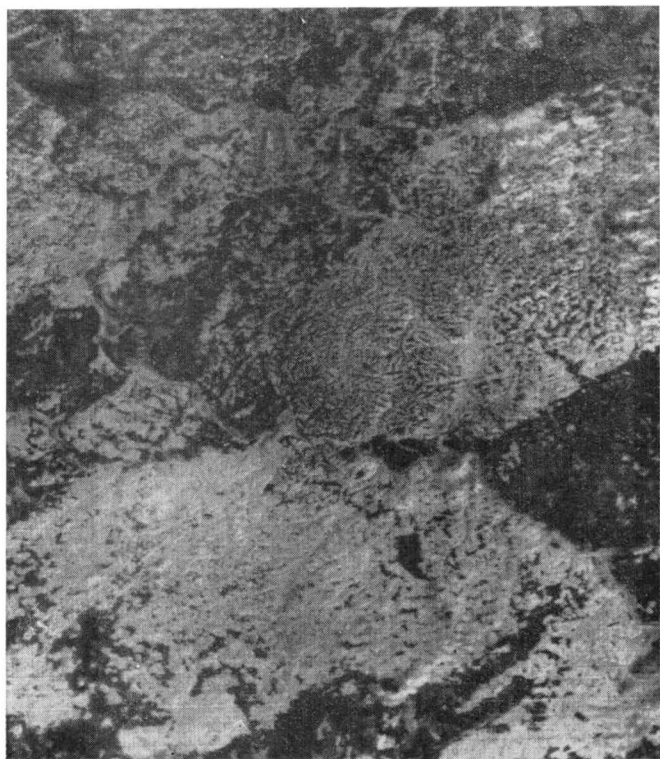


Рис. 7.3. Космическое изображение среднего разрешения, использованное для оценки овражной и плоскостной эрозии.

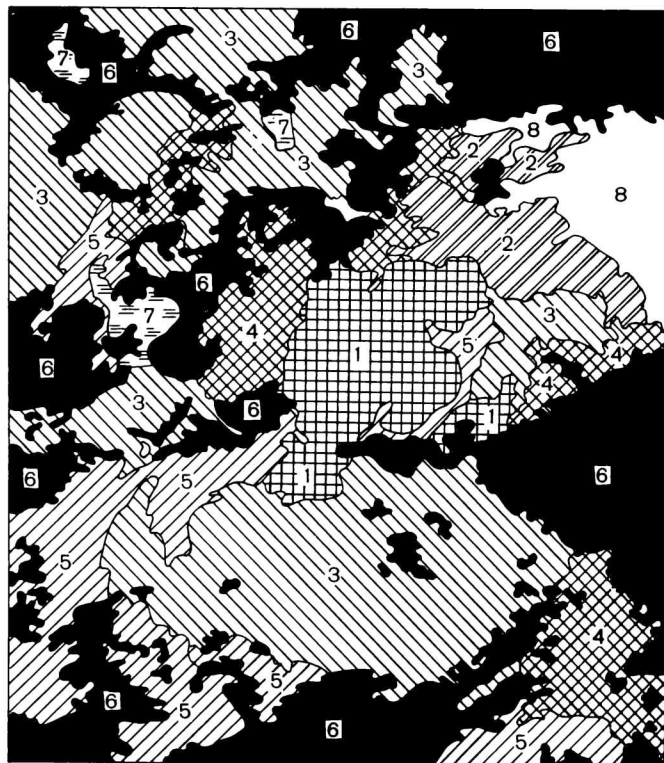


Рис. 7.4. Схема оценки овражной и плоскостной эрозии по снимку среднего разрешения (рис. 7.3).

1 — районы с преобладанием очень сильно эродированных почв, 2 — сильно эродированных почв, 3 — среднеэродированных почв, 4 — слабо эродированных почв, 5 — неэродированных почв, 6 — леса, 7 — болота, 8 — облачность.

географических характеристик местности, составляется карта-схема (рис. 7.11), характеризующая возможность возникновения пожара. Оценка этого параметра выполняется по пятибалльной шкале. Такая карта помогает выделить на космическом снимке зоны, которые подлежат тщательному дешифрированию, а также в ряде случаев повысить достоверность дешифрирования очагов пожаров.

Прямым признаком очага пожара является изображение дымового шлейфа. Исследования показали, что на снимках среднего разрешения достаточно уверенно дешифрируется изображение дымового шлейфа, покрывающего площадь не менее 50 га, что соответствует примерно участку 3×3 элемента снимка (рис. 7.12). Однако облачные образования бывают похожи на дымовые шлейфы. Сравнение снимков, полученных в видимом и ближнем ИК диапазонах, позволяют различить дымовой шлейф и облачность, хотя в ряде случаев лишь интуиция и опыт специалиста-дешифровщика дают возможность правильно выполнить такое разделение. Если на космическом снимке в видимом диапазоне спектра (0,5—0,6 или 0,6—0,7 мкм) прослеживаются образования, похожие на изображения шлейфов дыма, но исчезающие на снимках, полученных в ближнем ИК диапазоне (0,8—1,1 мкм), то процесс дешифрирования заканчивается и определя-

ются координаты этих объектов, которые и принимаются за координаты очагов пожаров (рис. 7.13). Если же изображение шлейфа дыма не исчезает на снимках в ближнем ИК диапазоне (вероятнее всего, это — облачность), то выполняется более тщательный анализ, при котором учитываются конфигурация и размеры объекта, наличие изображения выгоревшего участка, возможность возникновения пожара и т. п.

Дешифрирование выгоревшего участка растительности выполняется по космическим снимкам, полученным в конце пожароопасного сезона. Дешифровочным признаком является существенное потемнение фототона (рис. 7.14). Результаты дешифрирования оформляются в виде карты-схемы выгоревших участков (рис. 7.15).

### 7.3. Использование спутниковой информации для оценки состояния пустынно-пастбищной растительности

Многозональная информация с экспериментальных спутников серии «Метеор—Природа» с различным разрешением на местности дает возможность опера-

1,1 мкм серый, рисунок пятнистый и мелкопятнистый; 20 — лугово-степные буры, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темновато-серый, рисунок точечно-пятнистый; 21 — солонцы, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм светло-серый и почти белый, малоконтрастная пятнистая и монотонная текстура; 22 — солоды, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темно-серый, рисунок мелкокрапчатый, малоконтрастный; 23 — солончаки, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм белый, монотонная текстура; 24 — солончаки луговые, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, в диапазоне 0,5—0,7 мкм почти белый, рисунок малоконтрастный, мелкопятнистый; 25 — солонцы с солончаками, тон изображения в диапазоне 0,7—1,1 мкм светло-серый, рисунок пятнистый, малоконтрастный; 26 — пески, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм белый, рисунок пятнистый; в диапазоне 0,7—1,1 мкм тон изображения светло-серый, рисунок точечный; 27 — лугово-болотные, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм темно-серый, рисунок мелкопятнистый, контрастный; 28 — болотные и солончаки, тон изображения в диапазоне 0,6—0,7 мкм серо-черный, пятнисто-меандровая текстура; 30 — лес; 31 — водные объекты.



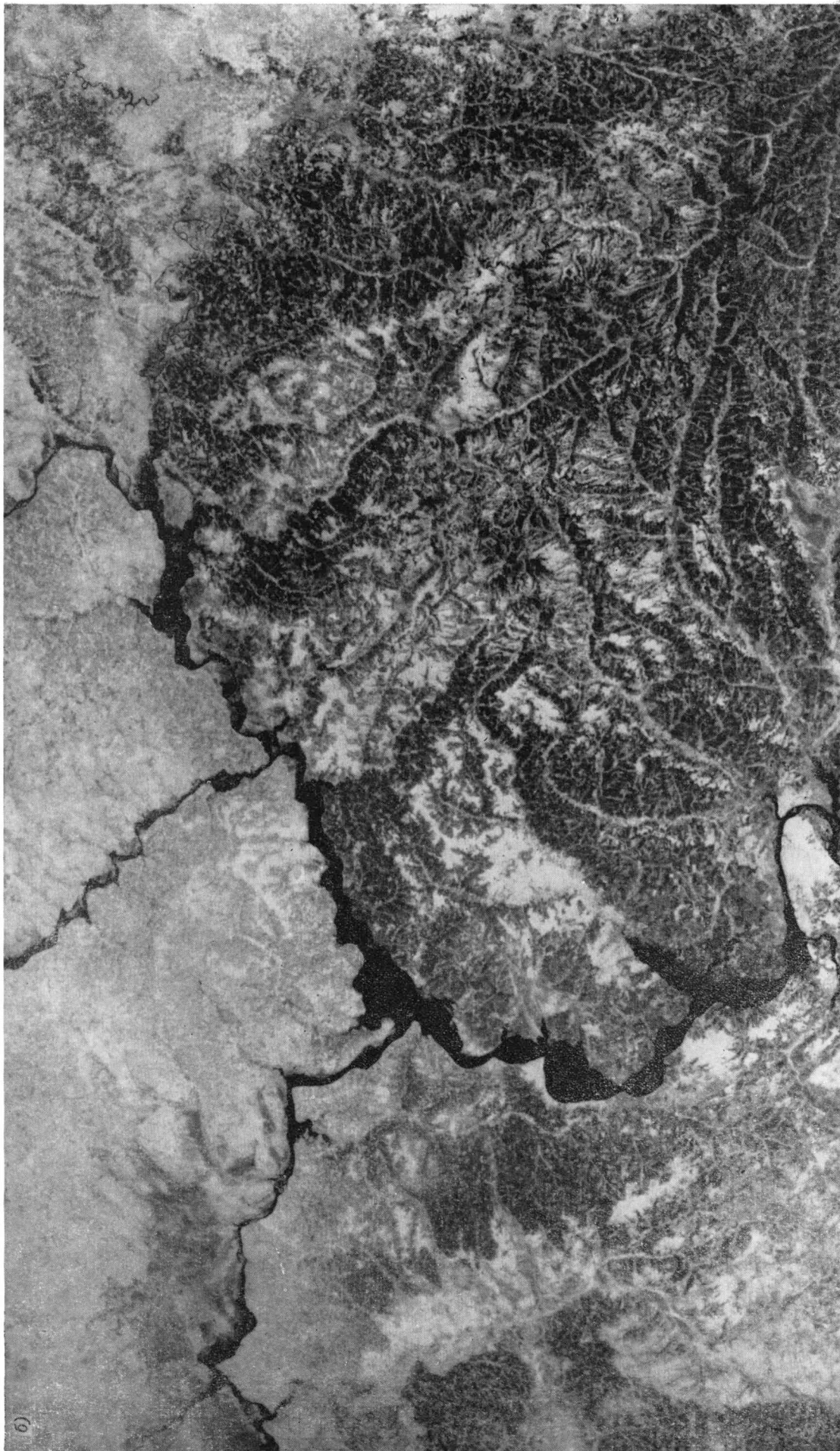


Рис. 7.5. Космическое изображение среднего разрешения для дешифрирования почв с различным содержанием гумуса.

а — диапазон 0,5—0,7 мкм, б — диапазон 0,7—1,1 мкм.

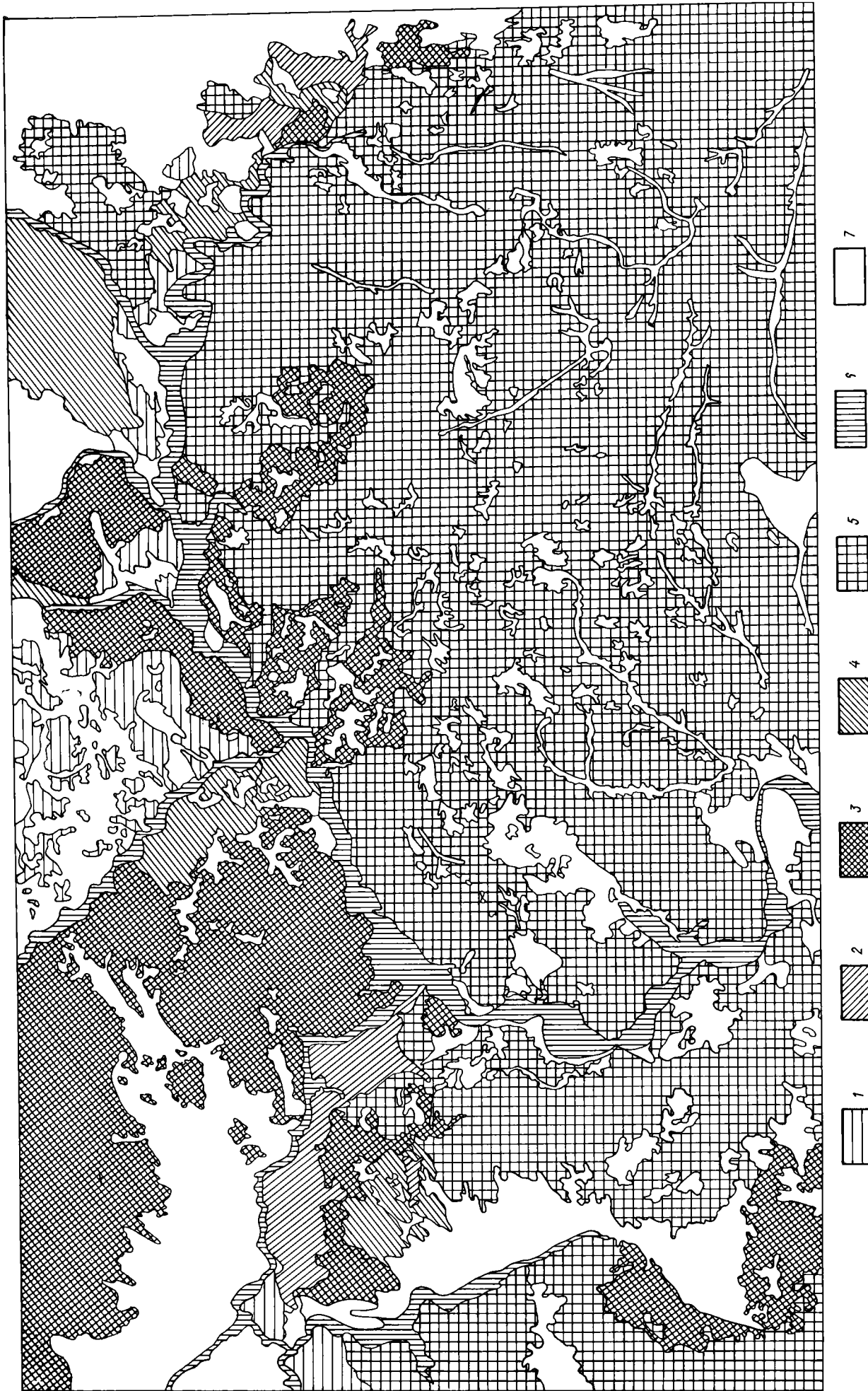


Рис. 7.6. Схема дешифрирования почв с различным содержанием гумуса.

1 — дерново-подзолистые, с содержанием гумуса 1—2 %, тон изображения серый; 2 — светло-серые лесные, с содержанием гумуса 2—3 %, тон изображения темновато-серый; 3 — серые лесные, с содержанием гумуса 3—4 %, тон изображения темно-серый; 4 — темно-серые лесные, с содержанием гумуса 4—5 %, тон изображения темный; 5 — черноземы, с содержанием гумуса 5—10 %, тон изображения серо-черный; 6 — пойменные почвы и долины рек; 7 — лес.

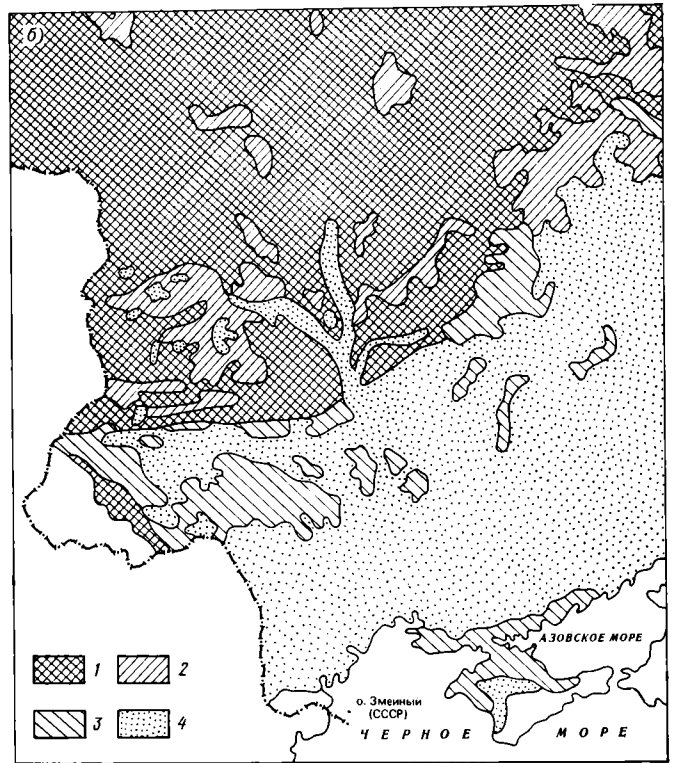
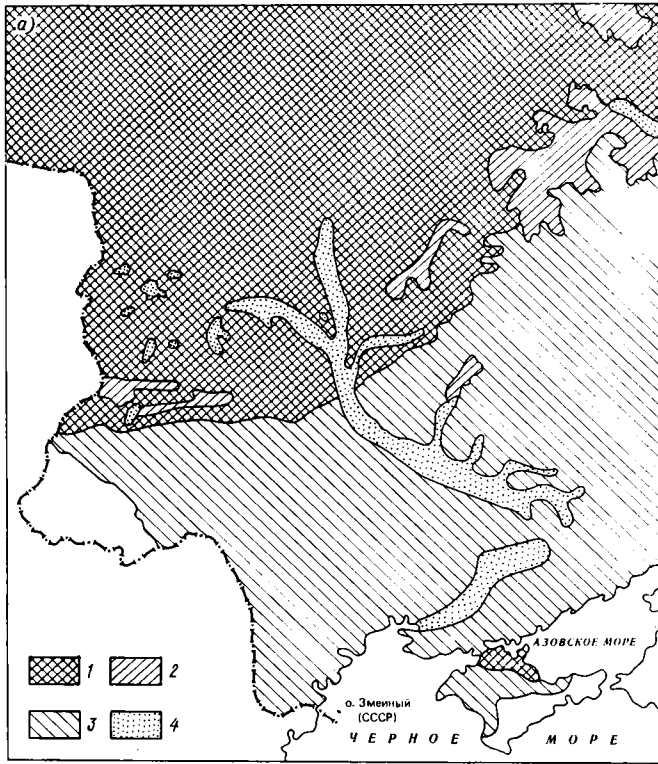


Рис. 7.7. Распределение коэффициентов спектральной яркости почв.

а — диапазон 0,5—0,6 мкм: 1) коэффициент спектральной яркости 19—25 %, 2) 13—19 %, 3) 6—13 %, 4) 6 %; б — диапазон 0,7—0,8 мкм: 1) коэффициент спектральной яркости 28—35 %, 2) 22—28 %, 3) 12—22 %, 4) 12 %.

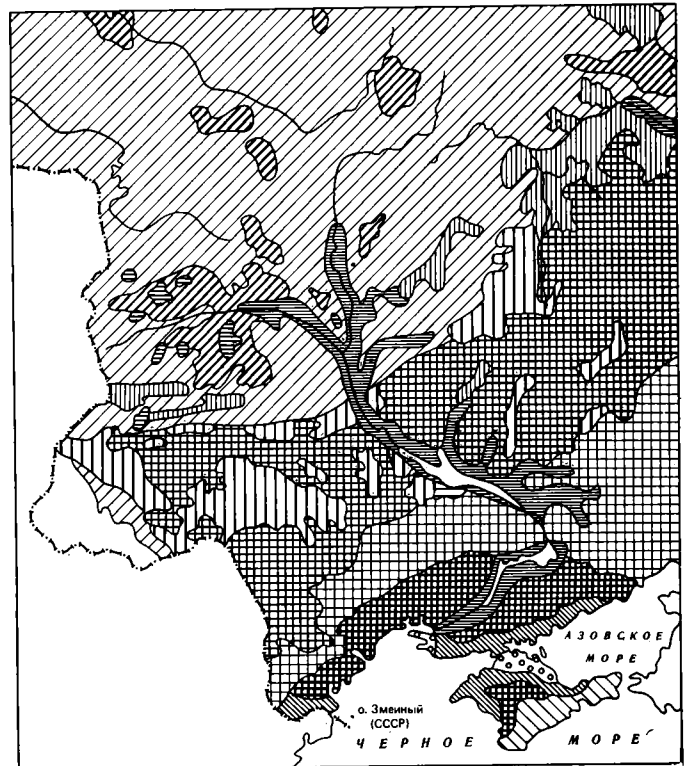


Рис. 7.8. Карта-схема почвенного покрова.

1 — аллювиально-луговые, 2 — торфяно-глеявые, 3 — черноземы обыкновенные, 4 — черноземы типичные, 5 — черноземы южные, 6 — темно-каштановые, 7 — светло-каштановые, 8 — серые лесные, 9 — светло-серые лесные, 10 — дерново-подзолистые, 11 — подзолисто-глеявые, 12 — пустынно-песчаные, 13 — солончики, 14 — солоды, 15 — бурые пустынно-степные, 16 — солончаки.



Рис. 7.9. Оценка залесенности территорий.

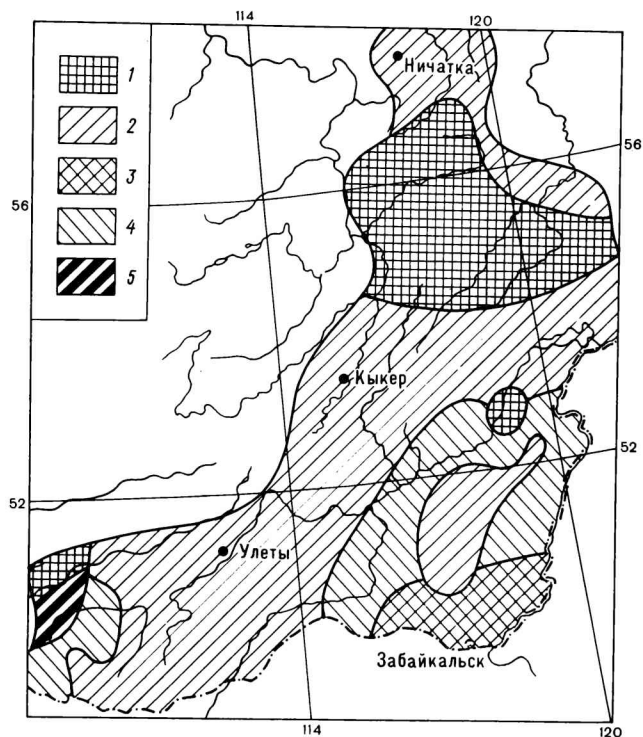


Рис. 7.11. Оценка возможности возникновения пожаров. Читинская область, 15 июля 1981 г.

1 — максимальная возможность пожара, 2 — большая, 3 — средняя, 4 — небольшая, 5 — возможность пожара отсутствует.

тивно оценить состояние пастбищной растительности на больших территориях. Определение состояния пустынных пастбищ производится в основном фотометрическим методом, который основывается на зависимости коэффициентов яркости растительности покрова от параметров его состояния (надземной растительной массы, площади листовой поверхности, густоты состояния растений). При определении параметров растительного покрова могут быть использованы коэффициенты яркости в отдельных участках спектра и отношение или разность спектральных коэффициентов яркости.

При применении фотометрического метода при космических съемках необходимо провести комплекс дополнительных наземных и самолетных измерений, дающих необходимый материал для построения градуировочных кривых определения коэффициентов яркости почв и т. д.

Непосредственное использование фотометрического метода для определения параметров растительного покрова из космоса затруднено анизотропией отражательных свойств земных объектов, различной освещенностью разных точек снимаемой территории, а также искажающим влиянием атмосферы. Оценка параметров пастбищной растительности выполняется по космическим снимкам, полученным в ясные дни с устойчивым состоянием атмосферы над рассматриваемым районом. Влияние анизотропии отражательных свойств пустынных



Рис. 7.12. Изображения дымовых шлейфов на снимке среднего разрешения,

А — очаги крупных пожаров, Б — дымовые шлейфы.



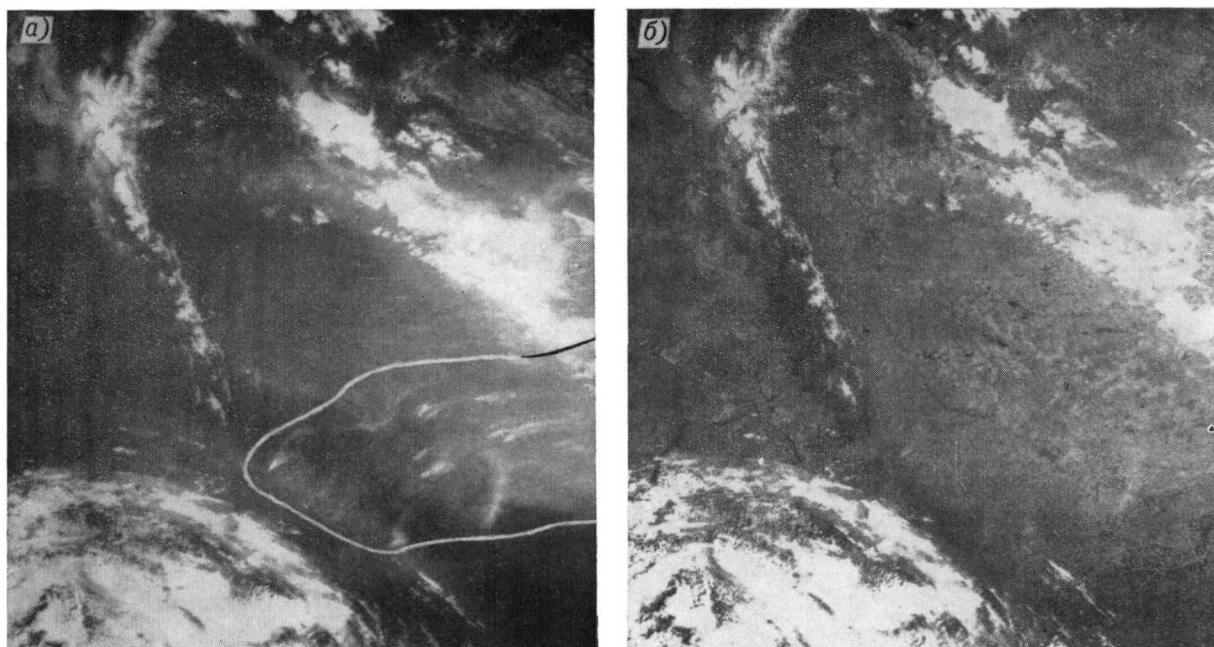


Рис. 7.13. Спектральные особенности изображения дымовых шлейфов.  
 а — диапазон 0,5–0,6 мкм, б — диапазон 0,8–0,9 мкм. Выделен ареал распространения дымовых шлейфов; в диапазоне 0,8–0,9 мкм шлейфы не отобразились.



Рис. 7.14. Результаты дешифрирования гарей.  
 1 — дымовые шлейфы, 2 — гарь.

пастбищ удается свести к допустимому за счет ограничения углов сканирования и проведения съемок при достаточно больших высотах Солнца.

При использовании спутниковых данных, зарегистрированных на фотопленку (рис. 7.16), измеряются оптические плотности элементов изображе-

фотометрирования в каждой ячейке значения оптической плотности переносятся на географическую карту масштаба 1:1 000 000, которая разбита на квадраты, соответствующие ячейкам палетки.

При выборе эталонных участков руководствуются следующими принципами. Максимальное



Рис. 7.15. Карта-схема выгоревших участков.

Выделены выгоревшие участки, цифры означают площадь выгоревшего участка (км<sup>2</sup>)

ния обследуемой территории. Для снимков, имеющих разрешение 1—3 км, элемент изображения должен соответствовать на местности квадрату со стороной 30—50 км. Разделение на элементы производится с помощью палетки (рис. 7.17), представляющий собой сетку с ячейками, которые соответствуют равновеликим площадям местности с учетом искажения масштаба за счет кривизны земной поверхности. Если используется метод отношений коэффициентов яркости, то фотометрированию подвергаются снимки, полученные в двух участках спектра (600—690 и 760—1100 нм). Если же используется метод коэффициентов яркости, то фотометрируется снимок, полученный только в области спектра 600—690 нм. Найденные в результате

удаление участков выбирается так, чтобы разница в высоте Солнца в крайних участках не превышала 3°. С этой точки зрения, предпочтительны участки в полосе 100×500 км, вытянутой вдоль широты. Коэффициенты яркости этих участков должны охватывать весь диапазон, в котором могут находиться коэффициенты яркости остальных квадратов обследуемой территории. Возможный диапазон коэффициентов яркости обследуемой территории устанавливается по результатам предварительных самолетных и наземных обследований. Суммарная площадь эталонных участков составляет около 5 % обследуемой территории.

Определение коэффициентов яркости эталонных квадратов проводится с самолета при высотах

Солнца, больших  $40^\circ$ . При таких высотах Солнца можно пренебречь изменением коэффициента яркости пустыни в течение дня. Желательно, чтобы область спектральной чувствительности самолетных фотометров лежала в пределах спектральных областей, в которых производится спутниковая съемка.

их площади. Расчеты показывают, что коэффициент яркости квадрата пустыни с достаточной для практики точностью может быть определен по результатам измерений, охватывающих 6—8 % площади квадрата. Таким образом, на полосе размером  $100 \times 500$  км бывает достаточно проложить четыре—



Рис. 7.16. Сканерный снимок территории Средней Азии (аппаратура МСУ-М).

Как показывает опыт, в период максимального накопления растительной массы, когда обычно определяется урожайность пастбищной растительности, коэффициенты яркости пустыни при отсутствии осадков меняются так мало во времени, что их без больших погрешностей можно считать неизменными в течение 5—7 дней. Поэтому самолетные измерения коэффициентов яркости эталонных участков не обязательно проводить в тот же день, когда проведена космическая съемка. Это значительно облегчает процесс подспутникового эталонирования, так как на практике часто бывает трудно совместить одновременно самолетную и спутниковую съемки. Указанное обстоятельство позволяет прокалибровать несколько спутниковых снимков по результатам одной самолетной съемки.

Поскольку размеры эталонных участков велики, то коэффициенты яркости определяются не на всей

пять авиамаршрутов общей протяженностью 2—3 тыс. км.

После того как определены коэффициенты яркости эталонных участков пустыни, строится график связи между значениями оптической плотности или прозрачности изображения эталонных участков пустыни и значениями их коэффициентов яркости. При использовании метода отношения коэффициентов яркости график строится для двух участков спектра, расположенных в областях 600—690 и 760—1100 нм. Если используется метод коэффициентов яркости, то график строится для участка спектра 600—690 нм. На рис. 7.18 для примера приведена связь между коэффициентами яркости эталонных участков пустыни Кызылкум в области спектра 600—690 нм и прозрачностью их изображения, полученного в области спектра 500—700 нм. На основании подобной связи определяются коэф-

коэффициенты яркости остальных квадратов пустыни, не вошедших в эталонную полосу. Для квадратов, на которых расположены объекты, не относящиеся к пастбищам (водная поверхность, горы, оазисы

стны приводят к одной освещенности.

Точность определения растительной массы зависит от точности определения коэффициента яркости почвы под растениями. Поэтому для использования

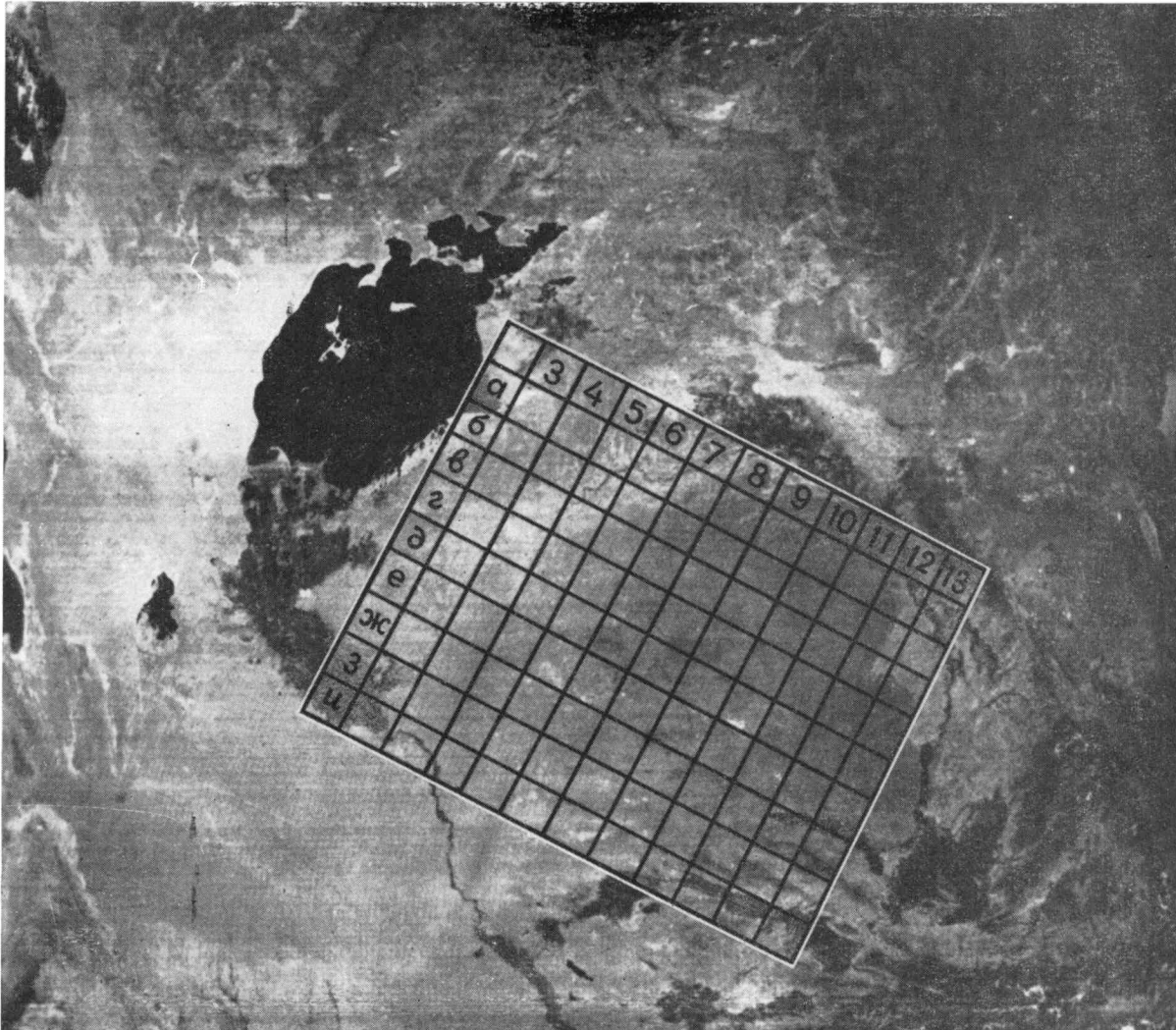


Рис. 7.17. Наложение сетки квадратов на исходный снимок.

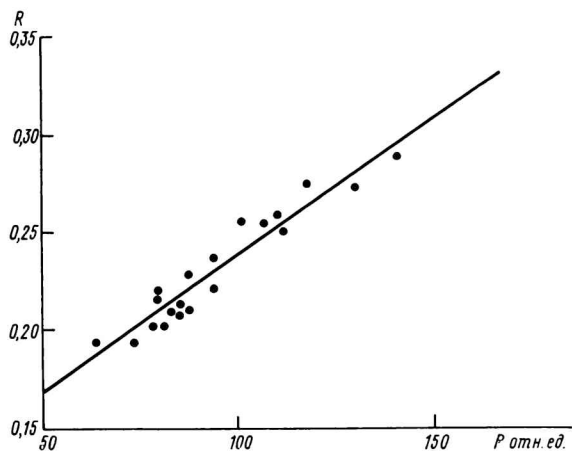


Рис. 7.18. Зависимость прозрачности ( $P$ ) изображения участков эталонной полосы от коэффициентов яркости ( $R$ ).

и т. п.), коэффициенты яркости не определяются. При использовании метода коэффициентов яркости найденные коэффициенты яркости квадратов пу-

спутниковой информации необходимо провести подготовительные работы по определению коэффициентов яркости почв.

Из-за глобальности охвата и малой разрешающей способности спутниковой съемки нет необходимости определять коэффициенты яркости почвы на небольших участках, как это делается при наземных измерениях. В данном случае достаточно ограничиться средними коэффициентами яркости основных почвенных массивов, находящихся на отснятой территории. Для этого на основе почвенной карты среди пустынных пастбищ выделяются массивы с основными типами почв, характерными для обследуемого района, и на выделенных массивах определяются спектральные коэффициенты яркости почв в рабочих участках спектра. Опыт показывает, что спектральные коэффициенты яркости почвы на песчаных пастбищах можно определять с самолета или вертолета. В этом случае подбираются участки песчаной почвы, лишенные растительности и характерные для данного почвенного массива. Чтобы облегчить подбор участков воздуха, а также ис-

ключить влияние атмосферы на результаты измерений, высота полета самолета должна быть 100—200 м. Для пастбищ на сероземах и такыровидных почвах чаще всего не удается подобрать достаточно протяженные участки, лишенные растительности, характерные для каждого почвенного мас-

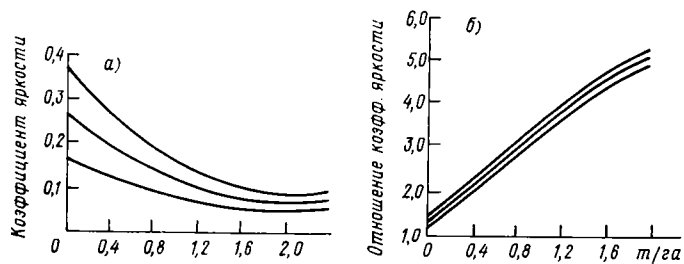


Рис. 7.19. Градуировочные кривые для определения сухой растительной массы пастбищ (т/га) методом коэффициентов яркости (а) и методом отношения коэффициентов яркости (б).

сива. Поэтому коэффициенты яркости этих почв определяются наземными способами.

По значениям коэффициентов яркости квадратов пустыни с помощью градуированных кривых (рис. 7.19 а) определяется урожайность пустынно-пастбищной растительности в каждом квадрате. При определении массы растительности по квадратам используется та градуировочная кривая, кото-

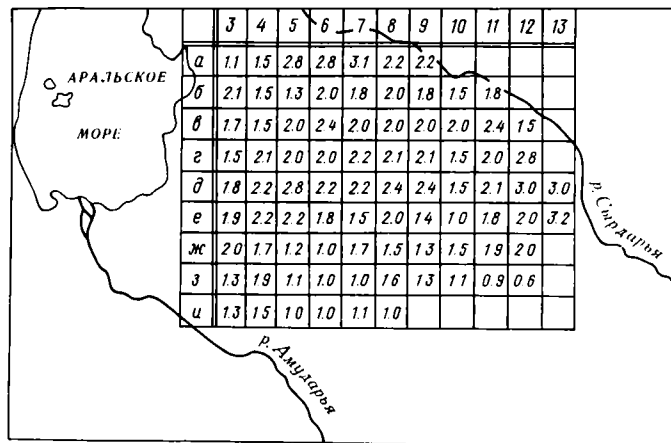


Рис. 7.20. Карта распределения урожайности пустынно-пастбищной растительности (т/га) в пустыне Кызылкум. 7 мая 1975 г.

рая, соответствует коэффициенту яркости почвы в данном квадрате.

При использовании метода отношения коэффициентов яркости для каждого квадрата сначала определяют коэффициенты яркости в двух участках спектра, а затем находят их отношения. Массу растительности определяют по соответствующей градуировочной кривой, построенной для отношения коэффициентов яркости (рис. 7.19 б).

Полученные значения урожайности растительной массы заносят в соответствующие квадраты на почвенно-растительной карте масштаба 1 : 1 000 000 (рис. 7.20). Разработанный метод позволяет получить за 2—3 дня карты детального распределения урожайности пустынно-пастбищной растительности на площади 30—50 млн. га.

#### 7.4. Оценка состояния сельскохозяйственных угодий и хода сельскохозяйственных работ

Эффективность решения Продовольственной программы СССР, принятой Майским (1982 г.) Пленумом ЦК КПСС, определенным образом зависит от обеспечения Советов агропромышленных комплексов и других органов, управляющих сельским хозяйством, оперативными и объективными сведениями о состоянии сельскохозяйственных угодий и ходе сельскохозяйственных работ. Это сведения о перезимовке, фазах развития сельскохозяйственных культур, объемах биомассы, фитопатологическом состоянии, повреждениях вредителями, продуктивности пастбищной растительности, ходе агротехнических мероприятий и других сельскохозяйственных работ.

Информация, получаемая по материалам космических съемок, может составить основу подобных сведений. Особенности космических съемок определяют определенную поэтапность решения вышеперечисленных задач. В некоторых случаях сначала выполняется распознавание типов сельскохозяйственных культур, а затем, например, вычисляется объем биомассы.

Так как в регистрируемое ИСЗ излучение вносят вклад и растительность, и почвы, о при распознавании сельскохозяйственных культур и оценки их состояния необходимо учитывать влияние различия почв. Это может быть выполнено либо непосредственно специальной коррекцией спутниковых измерений, либо косвенно-определенным выбором тестовых участков. Исходными данными для коррекции могут служить карты пространственного распределения отражательных характеристик почв (см. рис. 7.7). Специальный выбор тестовых участков для обучения производится с учетом их репрезентативности для ограниченных регионов. В любом случае необходимо учитывать, что отражательные характеристики почв зависят от их влажности.

Как уже указывалось в разделе 4, качество распознавания растительности (в том числе и травянистой) существенно повышается, если использовать их естественные различия в определенные фазы их развития. Биометрические характеристики растительного покрова точнее определяются по измерениям в красной и инфракрасной областях спектра.

Для оценки условий перезимовки озимых удобны космические снимки среднего разрешения, дающие с высокой периодичностью сведения о состоянии снежного покрова. Снимки высокого разрешения вполне пригодны для оценки состояния сельскохозяйственных угодий и распознавания сельскохозяйственных культур.

Сравнительный анализ данных рис. 7.21 и 7.22 позволяет сделать предварительные выводы о возможности визуального дешифрирования типов сельскохозяйственных культур, хода сельскохозяйственных работ и состояния угодий.

Анализируя снимок от 27 июля и карту-схему, легко заметить, что сельскохозяйственные объекты основных севооборотов, дешифрируемые на приведенном снимке, могут быть разделены на три группы. К первой относятся поля, имеющие на снимке темно-серый и черный фототон и однородную текстуру. Это — пашня, поля подсолнечника и кукурузы. При этом к северу от долины реки поля куку-

рузы по фототону и текстуре не отличаются от пашни и полей подсолнечника, а южнее речной долины — отличаются от них по более темному, практически черному фототону. По-видимому, это связано с различной экспозицией склонов долины. Ко второй группе относятся угодья, имеющие различные оттенки серого фототона. Это группа яровых и кормовых культур (ячмень, ячмень с овсом, просо, люцерна) и смешанные посевы кукурузы с сорго, имеющие однородный тон изображения. К этой же группе относятся пастбищно-луговые угодья, отличающиеся дендровидным рисунком, вызванным наличием на них троп, полевых дорог, и т. п., а также рисунком границ угодий, имеющих сложную конфигурацию. К третьей группе относятся поля, отображаемые светлым фототонном. Это — стерня различных культур и практически не отличающиеся от нее посевы многолетних трав.

Результаты совместного анализа однозонального снимка и карты-схемы показывают, что в данной ситуации уверенно дешифрируются поля со стерней, недостаточно четко разделяются угодья, относящиеся к первой группе. Наибольшие трудности возникают при дешифрировании угодий второй группы, как из-за незначительного числа полей, относящихся к каждой из культур данной группы, так и из-за большой изменчивости этих объектов. Однако можно сделать предварительный вывод о возможности эффективного использования многозональных снимков высокого разрешения для оценки состояния сельскохозяйственных угодий и распознавания сельскохозяйственных культур.

Оценку хода сельскохозяйственных работ на данной территории можно провести путем сравнительного анализа снимков рис. 7.21 и 7.23, полученных в разное время. На рис. 7.24 приведена схема изменения сельскохозяйственных угодий выбранного участка местности с 27 июля по 14 августа 1980 г. Все изменения, указанные на схеме, могут быть разделены на две группы. Первая группа содержит те изменения состояния угодий, интерпретация которых не вызывает серьезных затруднений (вспашка и косовица). К второй группе относятся изменения, интерпретация которых на данном этапе затруднена и требует проведения дальнейших исследований. По-видимому, имеется возможность оценки хода таких агротехнических мероприятий, как повторная вспашка, полив, боронование, культивация и т. п. Однако даже анализ объектов первой группы позволяет относительно несложно получать оперативные количественные оценки объемов проводимых работ по вспашке и косовице для выбранных территорий (район, хозяйство).

Оптимизация управления сельскохозяйственным производством на уровне крупных агропромышленных комплексов предполагает наличие обобщенных данных о состоянии сельскохозяйственных работ по большим территориям и в определенные ключевые моменты времени. Для получения таких сведений целесообразно использовать съемки среднего разрешения, так как снимки высокого разрешения обладают меньшим захватом по территории и меньшей периодичностью. В то же время обработка снимков среднего разрешения в связи с тем, что на них различимы лишь крупные поля (или группы полей), требует в ряде случаев несколько иного подхода. Естественное при этом

уменьшение числа оцениваемых параметров состояния в определенном смысле компенсируется возможностью более частого повторения таких оценок для больших площадей, а также значительно меньшим объемом обрабатываемой информации. Здесь возможны следующие решения. Один из них состоит в трактовании сигнала от тестового участка, как сигнала от одного конкретного объекта, и второй — как от смеси объектов с априори известным площадным распределением их в пределах тестового участка. При этом первый подход (см. раздел 5) предполагает наличие полей размером в несколько элементов разрешения (не менее  $3 \times 3$  элемента). Анализ снимков среднего разрешения показывает, что подобная ситуация возможна лишь для достаточно крупных полей.

При любом подходе первый этап обработки заключается в нанесении на снимок границ оцениваемого района и выделения подмножества элементов изображения, составляющих область обучения — тестовый участок.

Дальнейшая обработка изображений по первому подходу, основывается на процедурах поэлементного распознавания, описанных в разделе 5. Требуется лишь особая тщательность в выборе и оконтуривании тестовых участков.

При втором подходе по цифровому эквиваленту снимка (используя дисплейный комплекс) определяют эмпирические функции распределения яркостей  $x$  для каждой съемочной зоны. При дискретизации диапазона яркостей на 256 уровней эмпирические функции распределения будут иметь вид

$$\sum_{i=1}^{256} f_i(x_i) = 1. \quad (7.1)$$

Без потери общности можно считать, что оценке подлежат два типа угодий (например, поля, занятые озимыми культурами, и прочие угодья). Сумма относительных площадей угодий этих двух типов равна единице, т. е.

$$S_1 + S_2 = 1, \quad (7.2)$$

при этом функция (7.1) может быть представлена как

$$\sum_{i=1}^{\Omega_j} f_i(x_i) + \sum_{i=\Omega_j}^{256} f_i(x_i) = 1, \quad (7.3)$$

где  $\Omega_j$  — порог, разделяющий искомые классы объектов.

Если при этом для каждой съемочной зоны известна общая привязка яркостей искомых классов к шкале яркостей (например, изображение объектов первого класса светлее изображения объектов второго класса), то может быть установлено соотношение вида

$$\sum_{i=1}^{\Omega_j} f_i(x_i) = S_1, \quad (7.4)$$

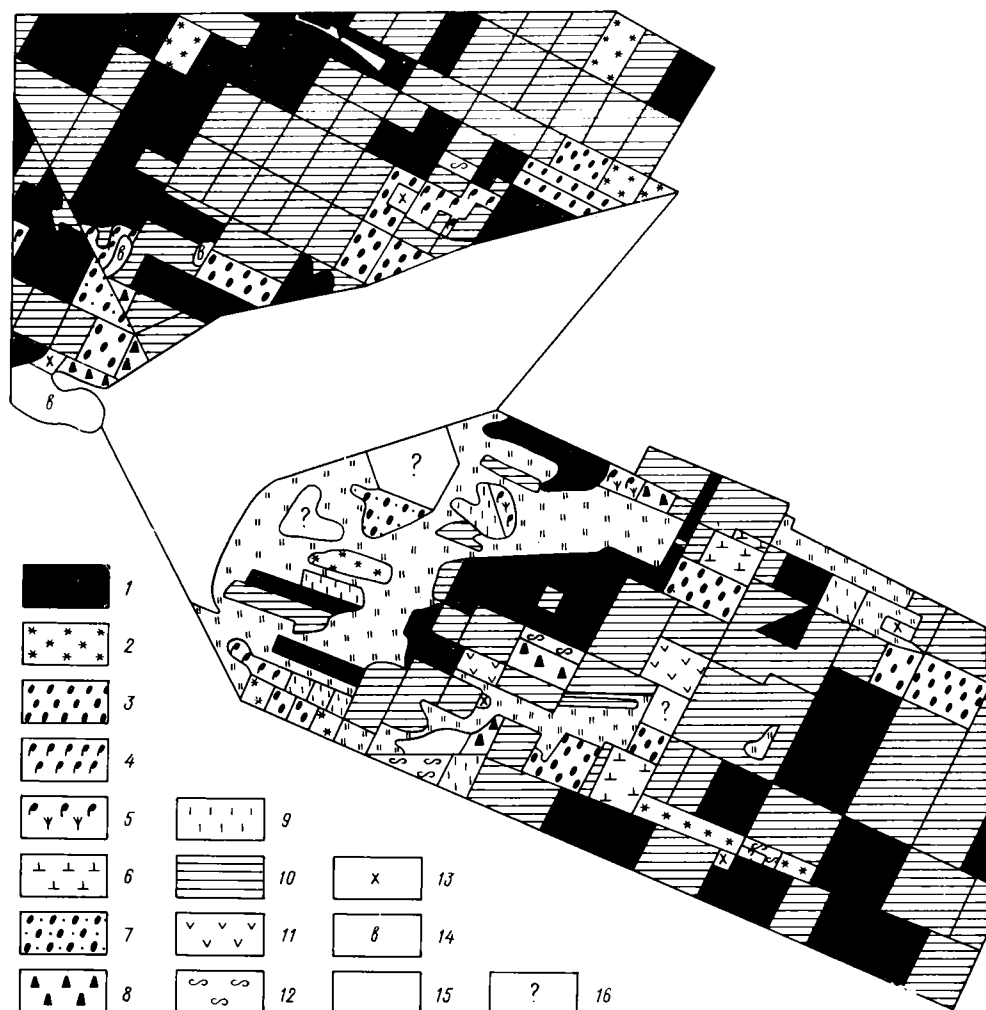
которое и лежит в основе второго подхода.

Если для некоторого тестового участка известна относительная площадь  $S_1$  и построены эмпирические функции распределения яркостей (7.1) во всех съемочных зонах, то по формуле (7.4) можно найти пороги для каждой из съемочных зон. Далее, по-



Рис. 7.22. Карта-схема размещения сельскохозяйственных угодий на территории, изображенной на рис. 7.21.

Первая группа угодий: 1 — пахота, пар, 2 — подсолнечник, 3 — кукуруза; вторая группа угодий: 4 — яровой ячмень, 5 — яровой ячмень с овсом, 6 — просо, 7 — кукуруза с сорго, 8 — суданка, 9 — люцерна; третья группа угодий: 10 — стерня, 11 — многолетние травы; прочие угодья: 12 — бахчи, 13 — хозяйственные постройки, 14 — водосемы, 15 — долина реки с комплексом земель, не используемых в основных севооборотах, 16 — данные отсутствуют.



строив эмпирические функции распределения для оцениваемой территории (при условии, что тестовый участок репрезентативен для нее) и используя найденные пороги  $\Omega$ , получим оценки относительных площадей выбранных классов объектов. При этом окончательная оценка для данного класса находится как средняя из оценок по различным съемочным зонам (или как средняя взвешенная, если есть данные о степени информативности той или иной зоны для решения данной задачи).

Для примера рассмотрим оценку площадей, занятых посевами озимой пшеницы на территории одного из административных районов Херсонской области. На рис. 7.25 приведен исходный снимок среднего разрешения, а на рис. 7.26 приведены эмпирические функции распределения, полученные соответственно для тестового участка и для всего района. Результаты оценки (площадь в процентах), полученные с помощью первого и второго подходов на основании исходного снимка (рис. 7.25), и данные аэровизуального обследования посевов приводятся в следующей таблице:

Объект	Первый подход	Аэровизуальное обследование	Второй подход
Озимая пшеница	35	37	39
Яровые культуры	35	40	43
Прочие земли	30	23	18

Как следует из таблицы, погрешности первого и второго подходов для посевов озимой пшеницы составили 2% по сравнению с данными аэровизуального обследования. Таким образом могут решаться и другие подобные задачи, например, оценка общей площади паров, полей со стерней и т. п.

При машинном распознавании сельскохозяйственных угодий и культур могут быть использованы различные процедуры (см. раздел 5). Однако в любом случае необходимо наличие некоторой вспомогательной информации. Такой информацией могут быть априорные сведения о том, где располо-





Рис. 7.24. Карта-схема, характеризующая ход сельскохозяйственных работ за период 27 июля—14 августа 1980 г.

1 — поля без изменений, 2 — поля, на которых проведена косовица, 3 — поля, на которых проведена вспашка, 4 — поля, где характер изменений не определен.

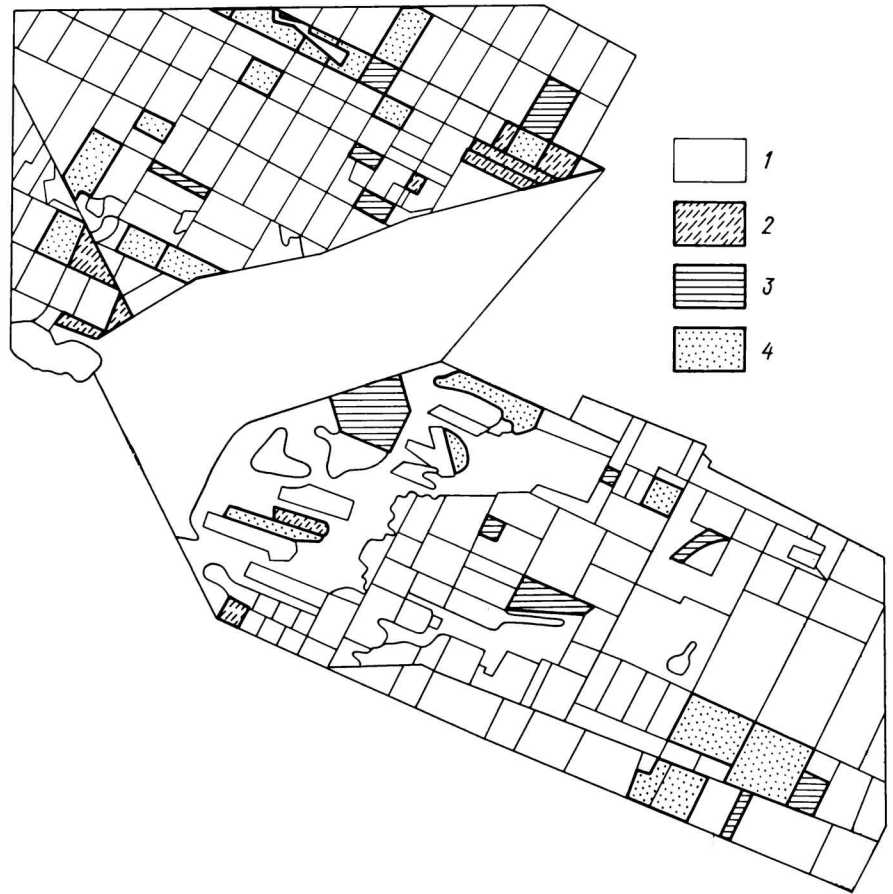


Рис. 7.25. Фрагмент снимка среднего разрешения сельскохозяйственной территории.

Выделен район, для которого производилась оценка площади посевов озимой пшеницы. В пределах района выделен тестовый участок.

жены эталонные (тестовые) участки для каждой культуры (угодя) на момент съемки.

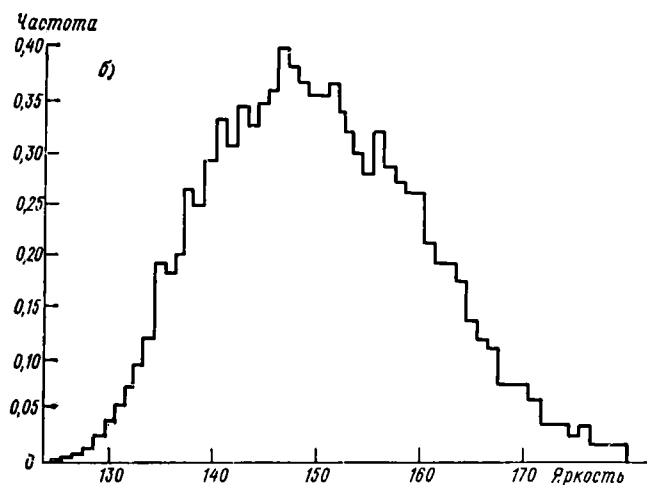
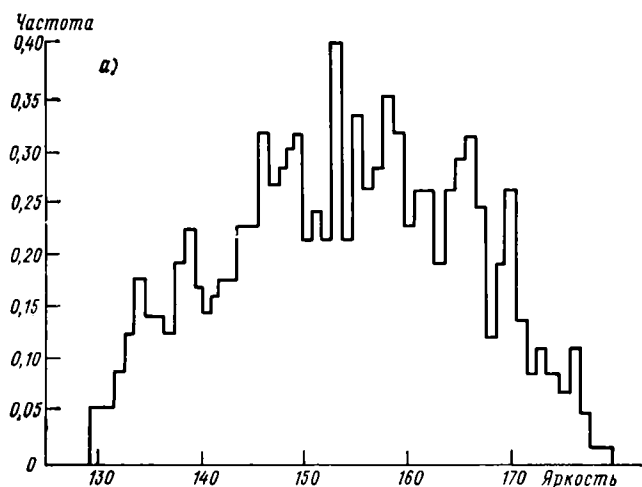


Рис. 7.26. Эмпирическая функция распределения для тестового участка (а) и для всего района (б).

Пример поэлементного распознавания сельскохозяйственных культур по одному из районов интенсивного растениеводства приведен на рис. 7.27 (см. вкладку). Исходной информацией послужили материалы съемки аппаратурой «Фрагмент», установленной на ИСЗ «Метеор». В качестве классов объектов распознавания были приняты: озимая пшеница при проективном покрытии почв растительностью  $>80\%$ , озимая пшеница при покрытии  $<80\%$ , пар и посевы прочих культур.

Далее по результатам поэлементного распознавания для каждого поля озимой пшеницы были вычислены три оценки, являющиеся эмпирическими вероятностями принадлежности данного поля к первым трем классам (см. рис. 7.27 в). Эти оценки представляют собой количество элементов данного поля, принадлежащих каждому классу, нормированное на число элементов, образующих все поле. Сумма оценок по рис. 7.27 а и в показывает вероятность отнесения данного поля к классу «озимая пшеница». Для участка местности, приведенного на рис. 7.27 в, в результате натурных обследований было установлено истинное пространственное распределение полей с озимой пшеницей с оценкой проективного покрытия почвы растительностью. Это позволило оценить точность распознавания как собственно полей с озимой пшеницей, так и фактически их состояния (процент проективного покрытия почв растительностью). По сравнению с данными натурных измерений  $88\%$  полей с озимой пшеницей были распознаны правильно. Анализ результатов распознавания полей озимой пшеницы с различным проективным покрытием показал устойчивую корреляционную связь (коэффициент корреляции равен 0,9) значений величины действительного проективного покрытия с его экспериментальной численной оценкой.

Такая тесная связь указывает на возможность использования подобных материалов космических съемок и методов распознавания для получения не только данных о видовом составе сельскохозяйственных культур, но и о проективном покрытии почв растительностью.

# Спутниковая информация для гидрологических целей



Гидрология — наука, изучающая гидросферу, ее свойства и протекающие в ней процессы и явления во взаимосвязи с атмосферой, литосферой и биосферой. Воды на земной поверхности изучает гидрология суши.

Космическая информация существенно повлияла на уровень гидрологических исследований при изучении глобального гидрологического цикла, при определении временных и пространственных характеристик водных объектов, в оценке водных ресурсов, при создании региональных и глобальных информационных систем.

Как показал опыт дешифрирования снимков с ИСЗ «Метеор», спутниковые данные позволяют в настоящее время изучать три элемента гидрологического режима: снежный покров, ледяной покров, разливы и затопления речных пойм.

## 8.1. Снежный покров на водосборах

Одной из важных проблем гидрологии является расчет и прогноз объема весеннего половодья на реках. Точность расчета весеннего половодья определяется полнотой и объективностью информации о динамике снежного покрова на водосборе и запасах воды в снеге. Задача сводится к получению необходимых сведений о распределении снежного покрова по площади и во времени с заданной частотой и точностью. Существующая сеть наземных наблюдений на стационарных постах и станциях Госкомгидромета не всегда позволяет получить объективную информацию о состоянии снежного покрова на большой площади водосбора. Кроме того, наблюдения за снежным покровом выполняются, как правило, в населенных пунктах, где велико антропогенное влияние на процессы таяния снега. Снег в зоне влияния города за счет загрязненности тает быстрее, чем на прилегающей к городу местности. Для получения объективной информации эпизодически проводятся авиаразведки снежного покрова в соответствии с действующими указаниями [1]. Информация, полученная в результате авиаразведки, носит несколько субъективный характер, ее качество во многом определяется опытом наблюдателя. Большой объективности можно добиться с помощью аэрофотосъемки снежного покрова, но это более дорогостоящий и менее оперативный путь. Поэтому аэрофотосъемка снежного покрова выполняется очень редко и только на репрезентативных участках водосборов.

В настоящее время для картографирования границ снежного покрова используются материалы

спутниковых съемок с ИСЗ «Метеор» [2]. Ценными качествами этой информации являются ее регулярность и глобальность обзора. Съемки из космоса, обеспечивающие большую обзорность территории с одновременной генерализацией деталей поверхности, дают более полную информацию о площадном распределении снежного покрова и границах его распространения. При анализе полученной из космоса информации наиболее перспективным является режимный подход к обработке, т. е. освоение всей массы снимков, накопленных к настоящему времени (за 10—12 лет). По каждой съемке дешифрируется граница снежного покрова, а по ряду снимков за год и за несколько лет оценивается режим этой границы, который затем увязывается с режимом речного стока (рис. 8.1).

Снежный покров является наиболее светлым образованием на земной поверхности (по альбедо и коэффициентам яркости он сопоставим с облачностью), поэтому при отсутствии помех он легко опознается на спутниковых телевизионных снимках. Мешают дешифрированию границы снежного покрова облачность, густая лесная растительность и некоторые объекты на земной поверхности, с отражательными свойствами, близкими к снежному покрову (ледяной покров на реках и озерах, наледи, светлые пески, осыпи и горные склоны). При дешифрировании спутниковых снимков о наличии или отсутствии снежного покрова судят по контрастам фототона, текстуре, структуре и рисунку изображения, по особенностям отображения на снимке физико-географических деталей местности.

В последние годы с появлением многозональной информации выясняются возможности определения по снимкам не только границ области снеготаяния, но и участков интенсивно тающего снега. Дело в том, что спектральные свойства сухого и влажного снега различны, поэтому есть физические предпосылки для их различения при сравнении изображений в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра (рис. 8.2.).

В естественных условиях граница снежного покрова как линия раздела заснеженных и бесснежных территорий не всегда четко выражена на местности. По снимкам для равнинной территории иногда удается выделить серую полосу пятнистого снежного покрова. В горных районах эта полоса обычно не бывает широкой и часто отображается на снимке одной линией, поэтому за границу снега здесь принимается линия наибольшего контраста тонов черного и белого.

Рассмотрим примеры изображения снежного покрова на равнинной и горной территории на сним-

ках, полученных с ИСЗ системы «Метеор». На рис. 8.3 представлены изображения высокогорного

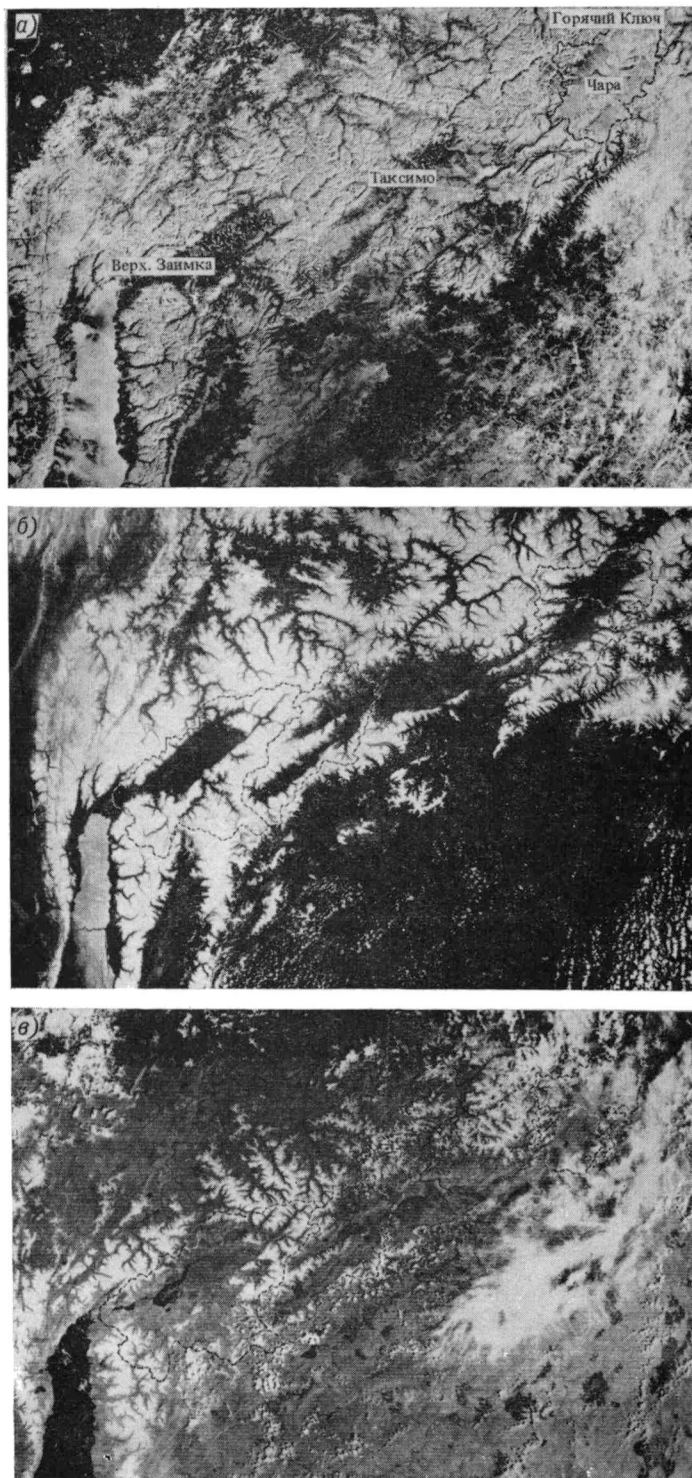


Рис. 8.1. ТВ изображения Станового нагорья. ИСЗ «Метеор» (МСУ-С), весенне-летний период 1980 г.

а — 17 марта 1980 г., степень покрытия водосборов снегом рек Муи и Верхней Ангары — 100 %; б — 2 июня 1980 г., степень покрытия снегом водосборов р. Муи — 55 %, р. Верхней Ангары — 65 %; в — 20 июня 1980 г., степень покрытия снегом водосборов р. Муи — 27 %, р. Верхней Ангары — 29 %.

района Тянь-Шаня в районе оз. Иссык-Куль. Бассейн оз. Иссык-Куль занимает тектоническую впадину, ограниченную дугообразными хребтами Кунгей-Алатау на севере и Терской-Алатау на юге. Наибольшие высотные отметки на Кунгее достигают 4711 м, на Терское — 5280 м. Растительность

отличается большим разнообразием. Для равнинной части территории характерны ландшафты пустынь и полупустынь, с высотой они сменяются луговыми комплексами. Леса встречаются отдельными массивами, наиболее распространены в юго-восточной части Иссык-Кульской котловины. Особенности зимнего изображения района определяются ландшафтами территории. Равнинные участки формируют матовую (белую, серую, темную) текстуру. Дендритовая структура сохраняется почти круглый год, но зимой отличается менее изрезанным рисунком. Динамика рисунка изображения в период снеготаяния проявляется в увеличении изрезанности дендритовой структуры с общим сохранением рисунка и увеличении преобладания матовых темных текстур над матовыми белыми. Граница снежного покрова при отсутствии облачности дешифрируется надежно. Она имеет сильно изрезанный вид, характерный для высокогорных районов.

На рис. 8.4 представлены изображения равнинного района в среднем течении р. Ишим. Рассматриваемый участок представлен степями с небольшими пятнами березового леса на юге (нижняя часть снимка) и лесными заболоченными массивами на севере (верхняя часть снимка). К 4 апреля 1979 г. снег сошел лишь локально в южной части территории, и на снимке видно пятно темного тона. Граница снега очень изрезанная. На фоне заснеженных степей хорошо изобразился участок транссибирской железнодорожной магистрали с основными станциями и разъездами. Видна также сеть автомобильных дорог на отдельных участках. К 23 апреля граница снежного покрова значительно сместилась на север. Изрезанность границы усугубляется наличием речной сети меридионального направления (поперек границы снеготаяния). Граница имеет очень расплывчатый (диффузный) характер.

По материалам спутниковых съемок сканером малого разрешения возможна оценка динамики границ снежного покрова одновременно на большой территории, к примеру на всей Европейской части СССР (рис. 8.5).

Граница снежного покрова контрастнее изображается на равнинной малозалесенной территории. При переходе границы снежного покрова в лесную зону достоверность дешифрирования границы снега уменьшается.

Детальная картина распределения снежного покрова необходима для оценки состояния озимых культур и условий их развития в период после схода снежного покрова.

Результаты обработки ряда последовательных съемок для горного водосбора помогают гидрологам при решении многих задач гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. На основе телевизионной спутниковой информации можно получить: схемы распределения снежного покрова на водосборах на даты съемок, степень покрытия водосборов снегом и средние значения высоты снеговой линии на даты съемок, сроки образования и схода снежного покрова на различных высотах за каждый год съемки; продолжительность залегания снежного покрова на различных высотах, длительность периодов образования и схода

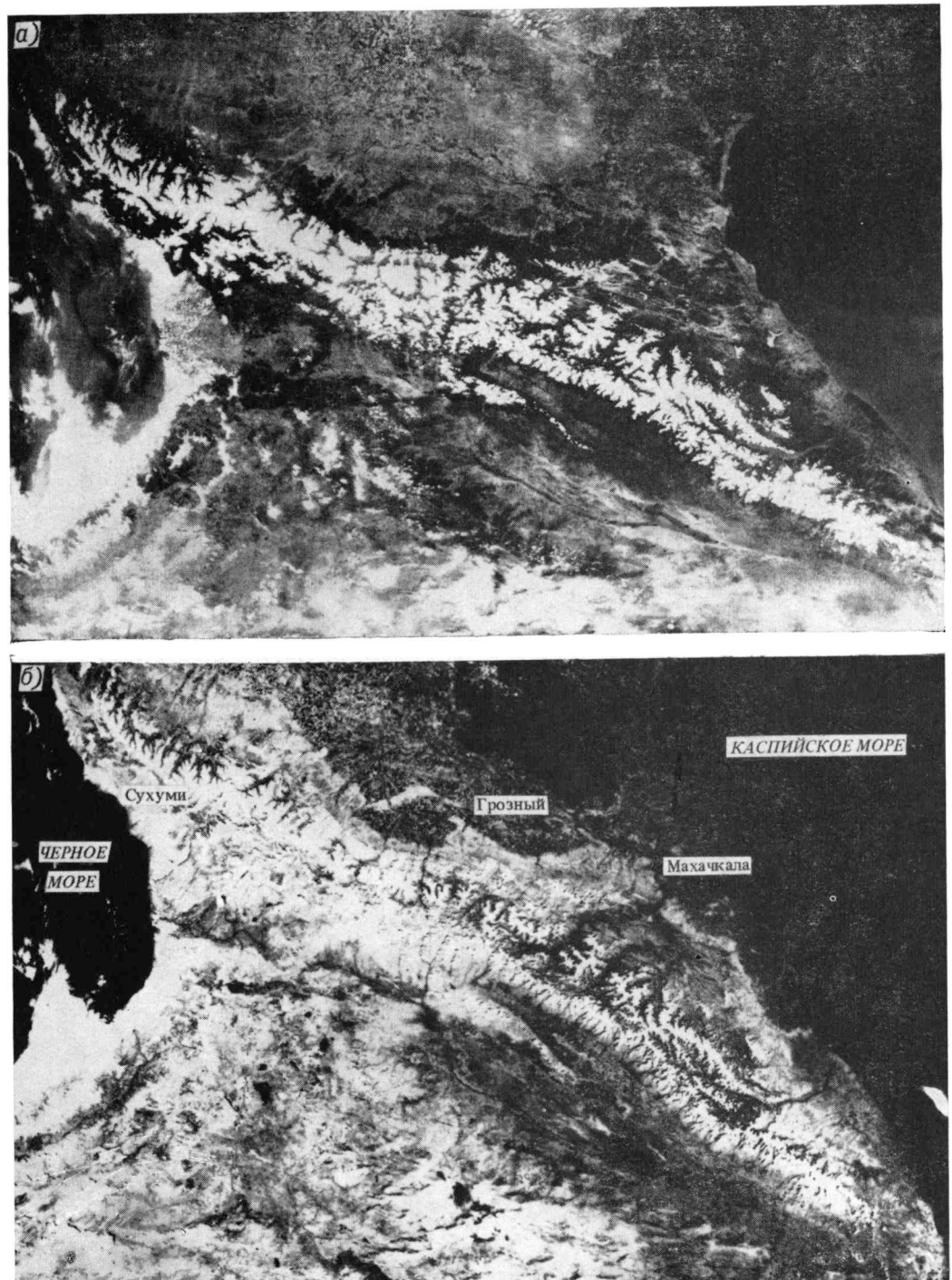


Рис. 8.2. ТВ изображения Большого Кавказа. ИСЗ «Метеор» (МСУ-С), 12 июня 1981 г.

а — диапазон 0,5—0,7 мкм, б — диапазон 0,7—1,1 мкм.



Рис. 8.3. ТВ изображения границы снежного покрова на горной территории, прилегающей к оз. Иссык-Куль. ИСЗ «Метеор» (МСУ-С), весенне-летний период 1980 г.

а — 14 апреля 1980 г., б — 1 июля 1980 г.

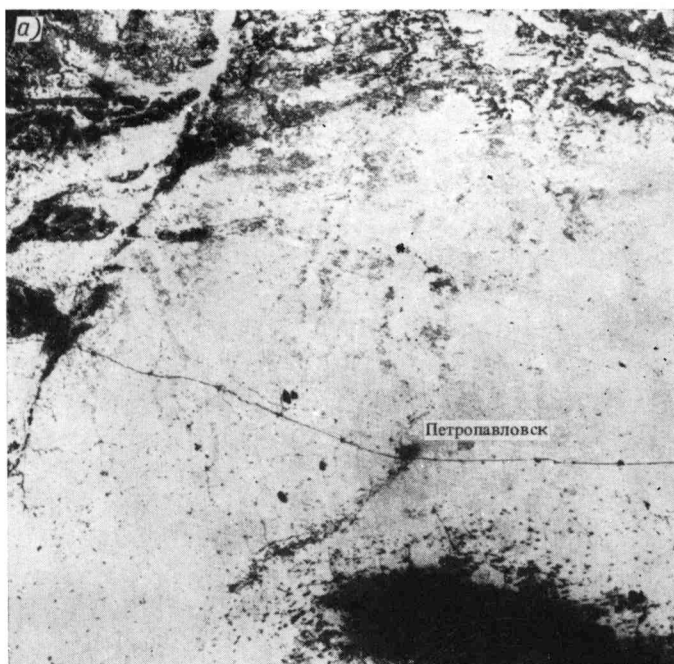
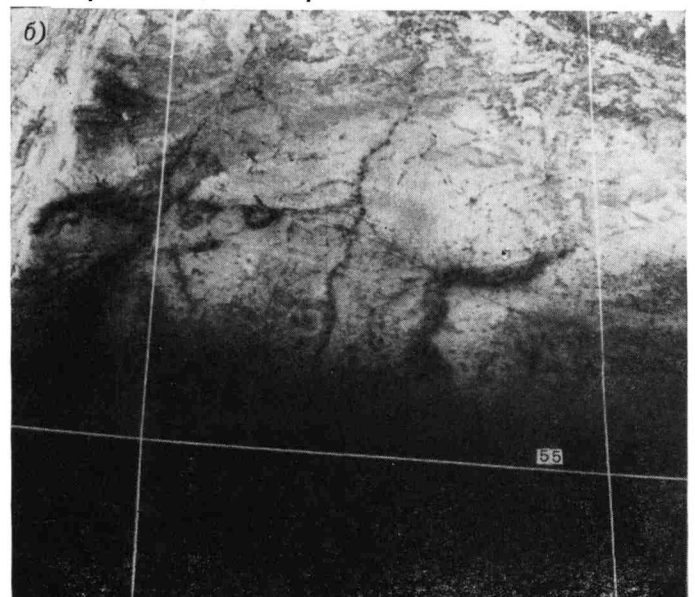


Рис. 8.4. ТВ изображения границы снежного покрова на равнинной территории водосборов рек Тобол и Ишим. ИСЗ «Метеор» (МСУ-С), весенний период 1979 г.

а — 4 апреля 1979 г., б — 23 апреля 1979 г.



снежного покрова, а также длительность бесснежного периода в горах за каждый съемочный сезон; многолетние выводы о сроках образования и схода снежного покрова и продолжительности его залегания на различных высотах.

В горных районах, слабоосвещенных гидрометеорологическими наблюдениями, спутниковые данные о динамике снеговой линии с успехом можно использовать в прогностических связях как показатель снегозапасов на водосборе.

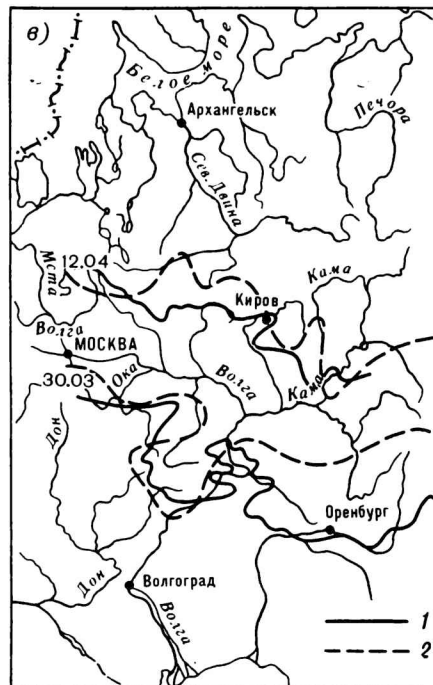
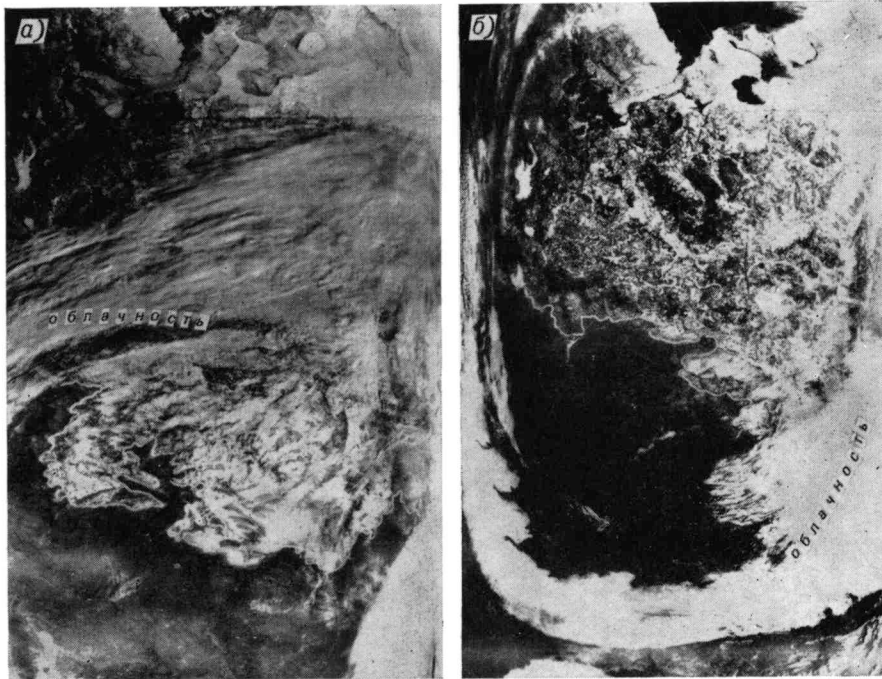


Рис. 8.5. Картографирование границы снежного покрова по материалам съемки с ИСЗ «Метеор» и по данным наземных наблюдений на постах и станциях Госкомгидромета.

*a* — ТВ изображение малого разрешения, 30 марта 1977 г.; *б* — ТВ изображения малого разрешения, 12 апреля 1977 г.; *в* — границы снежного покрова по материалам ИСЗ «Метеор» (1) и наземным наблюдениям (2).

В практике гидрологических прогнозов стока сведения о высоте снеговой линии используются для определения площади одновременного снеготаяния и для расчета распределения снегозапасов по высоте. Возможно выявление для отдельных водосборов зависимости высоты снеговой линии и степени покрытия водосборов снегом от сумм положительных значений средней суточной температуры воздуха, накопленных на день съемки.

## 8.2. Ледовая обстановка на водоемах

Ледовый режим рек, озер и водохранилищ во многом определяет продолжительность и эффективность навигации. Сведения о ледовой обстановке поставляют наземные гидрологические посты и станции, расположенные, как правило, по берегам водоемов. Сеть наземных наблюдений редкая. Информация с наземных пунктов наблюдений мало



репрезентативна для средних и больших водоемов, с прибрежных постов практически невозможно определить ледовую ситуацию в центральной части озера и водохранилища.

Для объективной оценки ледовой обстановки водоемов используется авиация. Так как данные о ледовой обстановке водоемов нужны потреби-

систему дешифровочных признаков ледовой обстановки на различных водоемах [3].

Возможность оценки ледовой обстановки на озерах и водохранилищах по спутниковым изображениям в значительной степени определяется решающей способностью последних и размерами водоемов. По результатам обработки многочис-

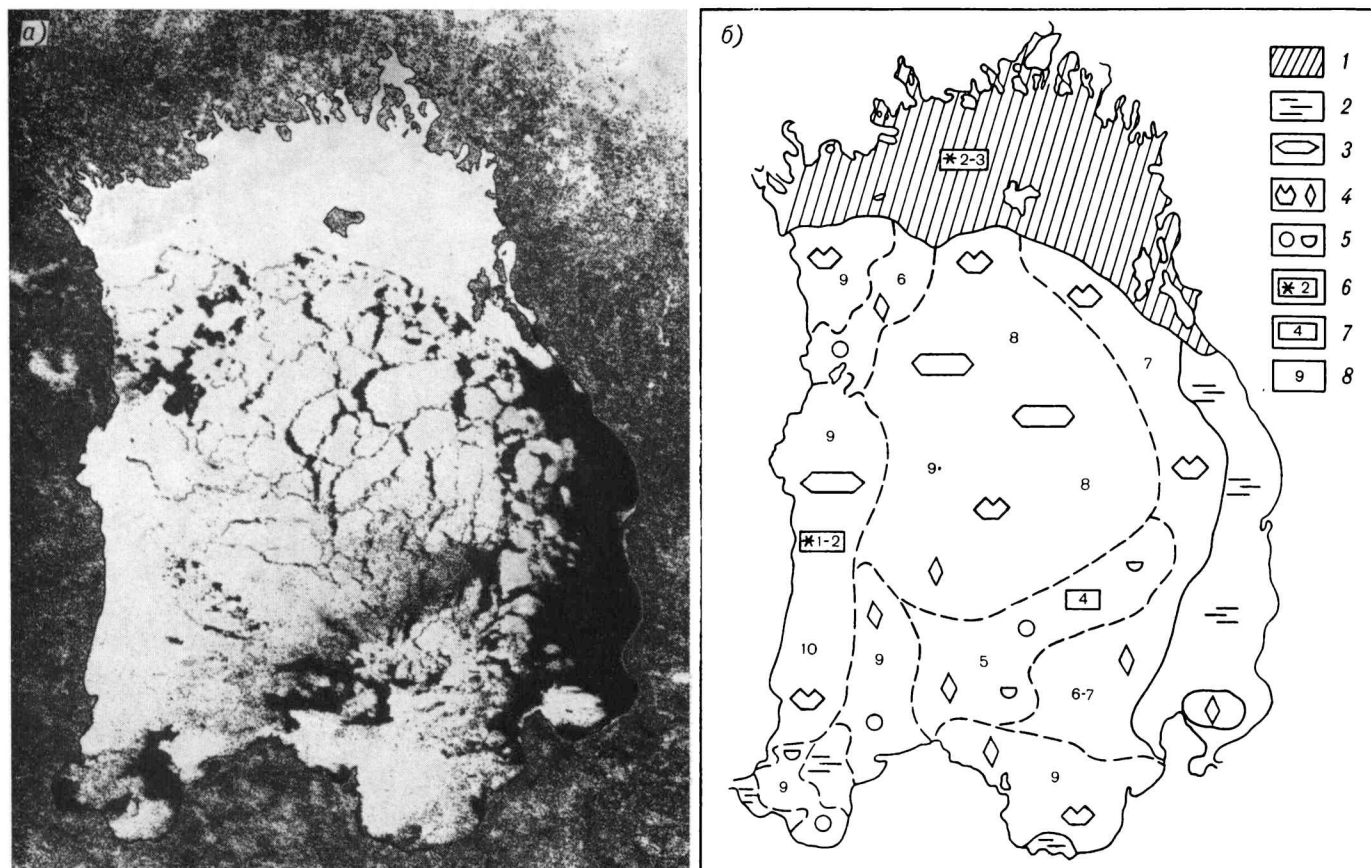


Рис. 8.6. Ледовая обстановка на Ладожском озере 3 мая 1978 г., по результатам дешифрирования ТВ спутникового снимка среднего разрешения.

*a* — ТВ изображение с ИСЗ «Метеор», в диапазоне 0,8–1,0 мкм, *b* — картограмма ледовой обстановки: 1 — ледяной покров, 2 — чисто, 3 — большие ледяные поля, 4 — поля и обломки ледяных полей, 5 — крупно- и мелкобитый лед, 6 — заснеженность на трехбалльной шкале, 7 — разрушенность по трехбалльной шкале, 8 — густота льда в баллах.

телям в оперативном режиме, то выполняются авиаразведки. Это позволяет непосредственно после завершения облета передавать заинтересованным организациям сведения о ледовой обстановке обследованных водоемов. Использование авиации качественно повысило (относительно наземных наблюдений) уровень гидрометеорологического обслуживания народного хозяйства. Однако авиационные разведки проводятся в весьма ограниченном объеме, и, как правило, на объектах важного народнохозяйственного значения.

Съемки из космоса впервые дали возможность наблюдать большие озера и водохранилища полностью, как единое образование, в комплексе с окружающей физико-географической обстановкой. Появилась возможность регулярного наблюдения за объектами, получения информации в пригодном для объективной оценки виде. Проведение синхронных со спутниковыми съемками аэровизуальных наблюдений, специальных аэрофотосъемок в разных масштабах позволило разработать

лненных изображений, полученных с ИСЗ «Метеор», установлено, что можно оценить ледовое состояние озер и водохранилищ в довольно широком диапазоне — от решения вопроса, есть ли лед нет (для — малых озер), до картографирования ледовой обстановки на больших озерах и водохранилищах. Детальность определения ледовой обстановки на озерах зависит не только от площади, но и от их формы, которую можно охарактеризовать коэффициентом  $\delta = B/L$  или  $\delta = W/L^2$ , где  $B$  — ширина водоема,  $L$  — его длина,  $W$  — площадь водной поверхности.

По современным спутниковым изображениям, принимаемым на автономных пунктах приема информации, можно определить сроки очищения от льда малых и средних озер, получить генерализованную схему ледового состояния средних по размеру озер и водохранилищ (используя характеристики: чисто, ледяной покров, неполный ледостав), картографировать ледовую обстановку на больших озерах (выделением на поверхности участков

Рис. 8.8. Продвижение волны вскрытия в нижнем течении р. Енисей весной 1980 г.

*a* — 2 июня, *b* — 6 июня.

Стрелками показаны участки, свободные от льда. На снимке за 2 июня видны закраины, граница льдов; на снимке за 6 июня — закраины, разводья, фронт вскрытия и граница льдов.

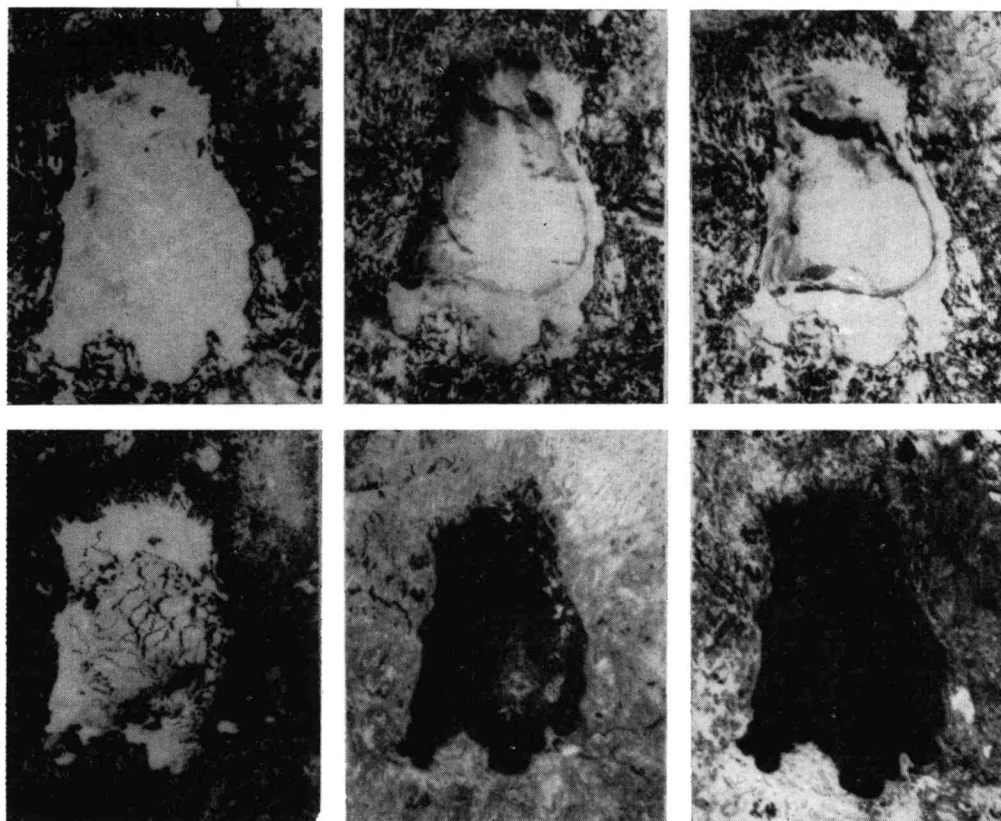
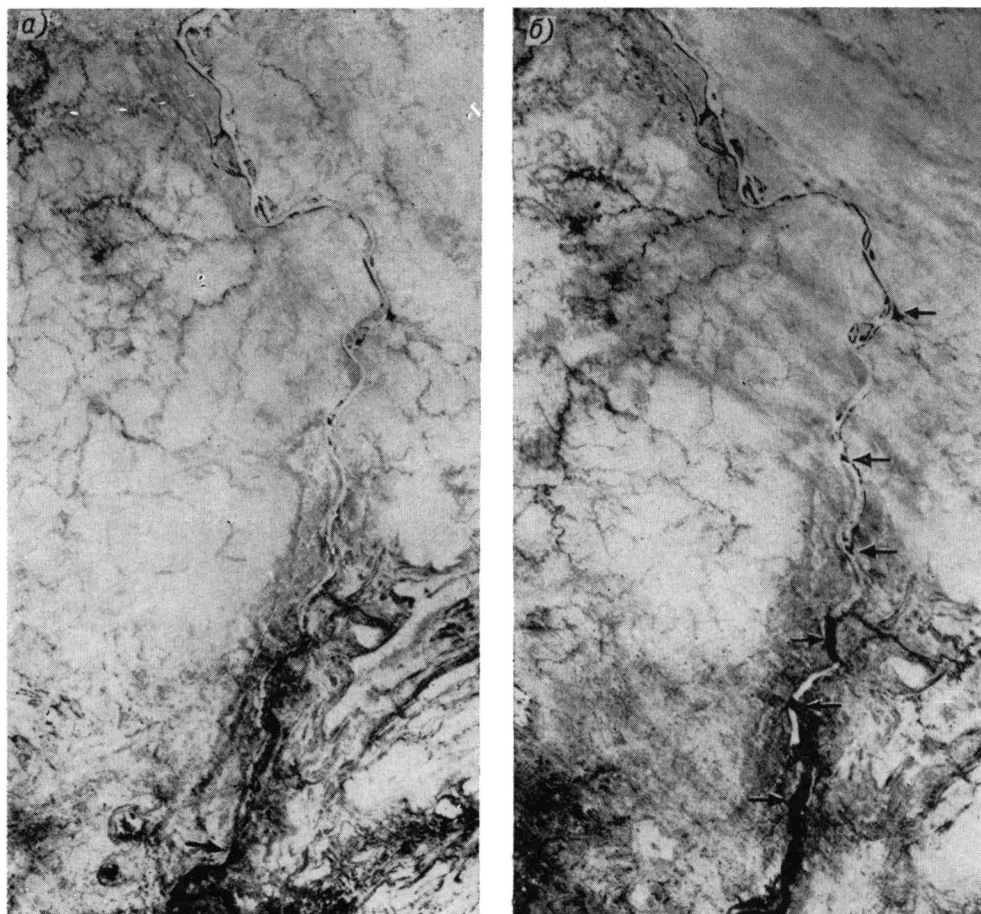


Рис. 8.9. Динамика вскрытия Ладожского озера по съемкам с ИСЗ «Метеор».

чистой воды, заснеженного и малозаснеженного ледяного покрова, ледяных полей, сплоченных и разреженных).

По сканерным спутниковым многозональным снимкам малого, а тем более среднего разрешения, можно обнаружить большинство деталей ледовой обстановки, фиксируемых обычно при авиаразведке (рис. 8.6). Контуры, разграничивающие различные состояния ледяного покрова на озере, можно опознать по снимку и достаточно надежно перенести на карту. По спутниковым снимкам можно оценить степень покрытия озера льдом как отношение занятой льдом акватории к общей площади озера.

Перспективным направлением при обработке снимков является использование при анализе многозональных изображений синтезирующего прибора МСП-4 (рис. 8.7 на вкладке).

В отдельных случаях по материалам спутниковых съемок сканером среднего разрешения удастся проследить процесс вскрытия льда на больших реках (рис. 8.8). Ряд последовательных снимков за весенний период (рис. 8.9) помогает оценить динамику очищения озера от льда (его ледовитость). Эта величина, определяемая как отношение занятой льдом (с учетом густоты) части озера к общей его площади, является важной характеристикой ледового режима озера. Она зависит от предшествующих условий формирования ледового покрова на озере и в то же время обуславливает последующий ход событий по очищению озера от льда.

По ряду съемок оз. Байкал и Ладожского оз. выяснены связи ледовитости озера на фиксированную дату и длительности периода очищения озера от льда с определяющими факторами. Разработка подобных зависимостей по съемкам за многолетний период может обеспечить выводы прогностического характера для объективного определения сроков появления льда на озере и его исчезновения.

### 8.3. Оценка разливов и затопления речных пойм

Пойма — часть дна речной долины, затопляемая в периоды высокой воды, формирующаяся в результате отложения переносимых потоком наносов в ходе плановых деформаций речного русла. В гидрологическом отношении интересны динамические процессы на речных поймах: режим затоплений и опорожнений, границы разливов при различной высоте половодья. Наземными средствами собрать материал по затоплению пойм больших рек на значительном протяжении практически невозможно. В случае использования наземных средств для исследования затопления пойм, необходимо зафиксировать положение урезов воды на характерные моменты времени, соответствующие определенным отметкам уровня воды, а затем выполнить топографическую съемку с привязкой зафиксированных урезов. Такие работы можно выполнить только на ограниченных участках рек с неширокой поймой. Для рек со средними и большими поймами используются аэровизуальные наблюдения или аэрофотосъемка. В ходе этих работ опре-

деляют: места выхода воды на пойму, последовательность затопления поймы, характер затопления различных частей поймы, площади затоплений при разных уровнях воды, сроки начала затоплений различных народнохозяйственных объектов и характер разрушений, границы наибольшего разлива, вид и размер деформации контуров пойменных массивов и характеристику эрозионно-аккумулятивных процессов на поверхности поймы.

Получение вышеперечисленных сведений в результате аэровизуальных обследований возможно только при наличии большого количества наземных ориентиров и хорошей топографической карты. В большинстве случаев при таких наблюдениях фиксируется только граница разливов и отмечаются затопленные народнохозяйственные объекты. Материалы аэрофотосъемки значительно более информативны по сравнению с авианаблюдениями, особенно при наличии нескольких последовательных аэрофотосъемок в период затопления и опорожнения поймы. Главная трудность при обработке аэрофотосъемок с целью их использования для оценки затопления пойм состоит в дешифрировании уреза воды на участках, покрытых кустарниковой растительностью и лесом. На малозалесенных обширных поймах урезы достаточно надежно дешифрируются даже по материалам мелкомасштабных съемок (до 1:1 000 000). Хорошо различимы по тону воды с различной мутностью (темные — талые, стоячие; более светлые — паводочные, русловые). В большинстве случаев по тону изображения на снимке можно определить направления движения воды на пойме.

Выполнение площадных аэрофотосъемок пойм в период затопления (обычно весной) связано со многими трудностями, так как требуется благоприятное сочетание уровня затопления и съемочной погоды. Указанные трудности значительно ограничивают применение аэрофотосъемки для изучения затоплений пойм на большом протяжении реки.

Применение космических съемок и наблюдений для изучения процессов затопления и опорожнения речных пойм весьма перспективно [4]. Постоянство слежения за земной поверхностью, большая обзорность и быстрота получения информации во многом определяют перспективность этих методов. Таким образом, в принципе возможно охватить съемками и наблюдениями все пойменные реки в периоды высоких половодий. Большая генерализация деталей при наблюдениях из космоса обеспечивает региональные исследования и позволит проследить за наиболее характерными процессами прохождения половодья, проявляющимися в закономерностях изменения пойменных разливов по длине реки от истока до устья. Основными проблемами при этом являются трудности дешифрирования границы разливов, неопределенность связей физиономических компонентов поймы с частотой ее затопления, отсутствие надежных критериев для оценки точности результата.

Основным видом информации, получаемой с ИСЗ «Метеор», пригодным для изучения пойм средних и больших рек являются снимки среднего и высокого разрешения. Со снимков среднего разрешения можно извлечь полезную информацию о состоянии поймы и процентном соотношении за-

топленных и сухих частей поймы. В спектральном интервале 0,7—1,1 мкм более четко выделяются затопленные участки, по снимкам в зоне 0,5—0,7 мкм можно опознать направления течений речных вод и зоны их распространения. По снимкам высокого разрешения с большей достоверностью возможно выделение затопленных участков поймы, а сравнение многозональных изображений позволяет обнаружить и разделить полузатопленные и полностью затопленные участки. Телевизионные спутниковые снимки среднего разрешения обеспечивают установление границы поймы, площадей затопления на момент съемки, типа поймы.

В зависимости от вида растительности, произрастающей на пойме и на прилегающих к ней бровках долины, можно выделить три группы границ: хорошей контрастности с дном долины, пятнистой контрастности с дном долины и малой контрастности с дном долины.

На рис. 8.10 представлены изображения поймы Оби в среднем течении при различных ее состояниях. Изображения имеют своеобразный для каждого сезона вид. Светлыми тонами пойма отображается зимой и в осеннюю межень. В зимние периоды границы поймы изображаются контрастно только на тех участках, на которых пойма отличается от бровок долины характером древесной растительности. Выделить положение основного русла на зимнем снимке практически невозможно. По снимку, полученному в осеннюю межень, с большой достоверностью можно дешифровать не только основное русло, но и крупные пойменные протоки. Границы разливов хорошо дешифрируются при сплошном затоплении поймы.

Подобные результаты дешифрирования поймы можно подтвердить снимками Волго-Ахтубинской поймы (рис. 8.11). На снимке изображается весь участок от Волгограда до впадения Волги в Каспийское море. Это позволяет анализировать ход затопления поймы по длине реки. Основными дешифровочными признаками при выделении затопленных зон является форма, размер, структура и местоположение деталей на изображении. Контрасты тонов являются определяющим признаком при выделении зон затопления. Черный или почти черный тон изображения поймы соответствует затопленным или частично затопленным участкам (рис. 8.12). На этом рисунке показан пример дешифрирования по фрагменту телевизионного спутникового изображения поймы р. Обь в районе впадения р. Иртыш. Для участка характерна пойменная многорукавность, ширина поймы 35—40 км. Съемка выполнена в период стояния на этом участке высоких уровней воды. Степень затопления на разных массивах рассматриваемого фрагмента различна и оценена в общем для всего снимка с учетом морфологических особенностей поймы. На снимке хорошо дешифрируются (черной полосой) основное русло и самая большая пойменная протока. Темными выглядят также соровые участки находящихся в подпоре притоков Оби. Светлыми пятнами отобразились пойменные острова. Пойменные массивы, размежеванные бровками проток, гривами и веерами перемещения русла, местами занятые кустарником, затоплены частично (они выделяются на снимке ячеистой структурой).

При картографировании затоплений предлагается выделять шесть зон с различной степенью затоп-

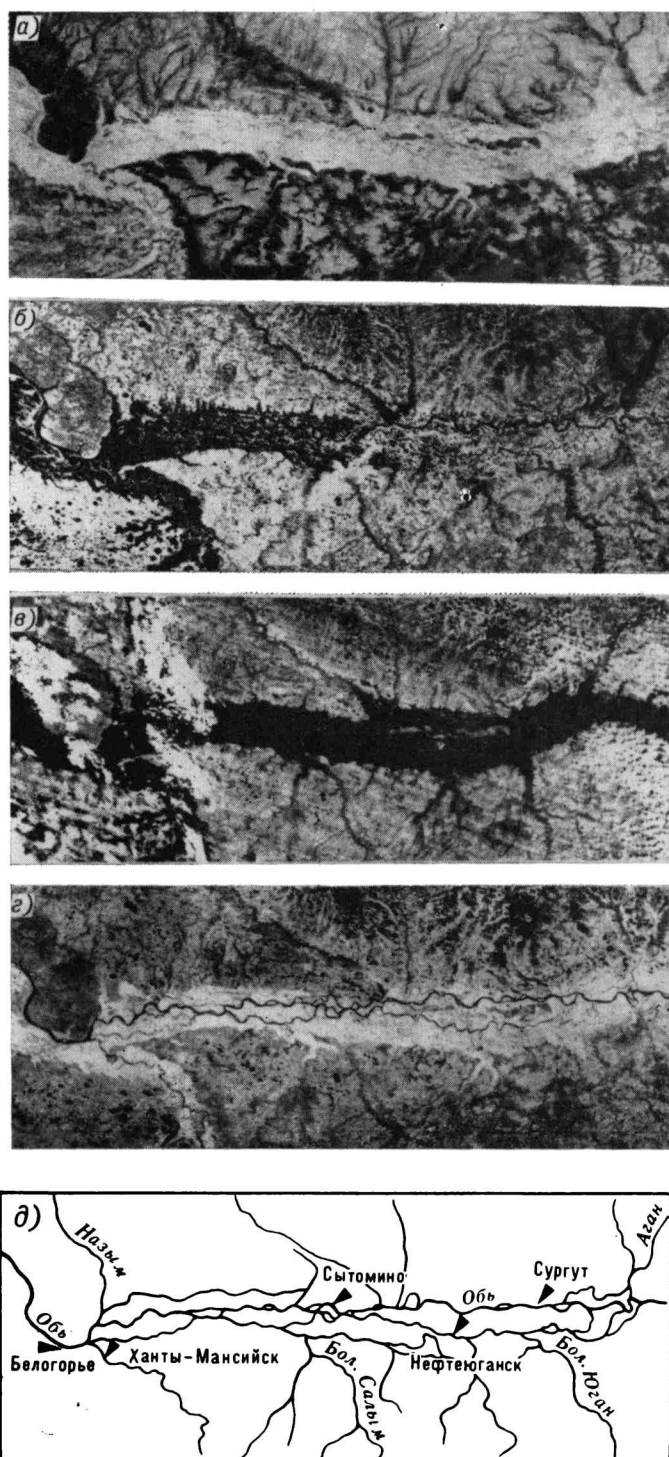


Рис. 8.10. ТВ изображения с ИСЗ «Метеор» (МСУ-С, диапазон 0,8—1,0 мкм) участка р. Оби в среднем ее течении при различном состоянии поймы.

а — пойма покрыта снегом (1 февраля 1980 г.), б — частичное затопление поймы (22 июня 1981 г.), в — полное затопление поймы (25 июля 1979 г.), з — пойма свободна от воды (31 августа 1981 г.), д — схема участка.

ления: 0—10; 11—30; 31—50; 51—70; 71—100 %. Задача распознавания степени затопления элементарных участков поймы решается путем квантования изображения рабочего участка на шесть заданных уровней. По окончании процесса распоз-

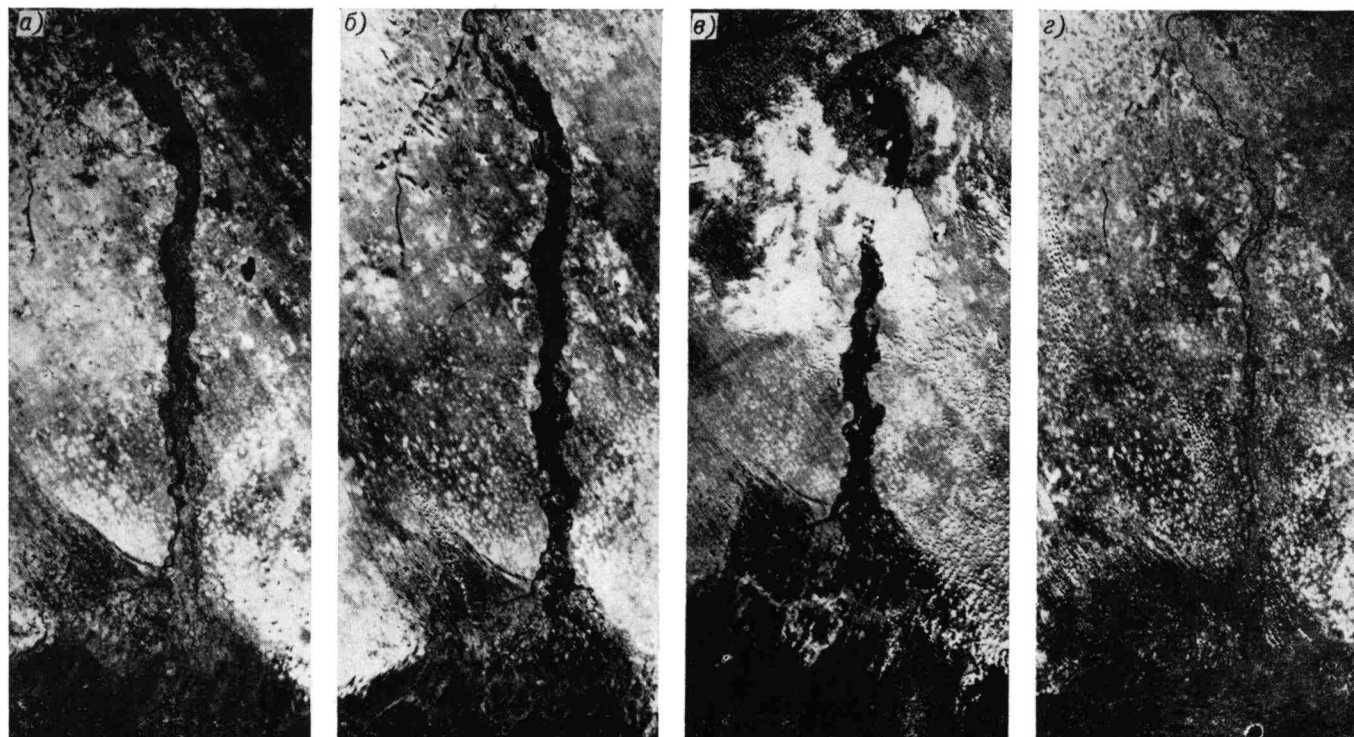
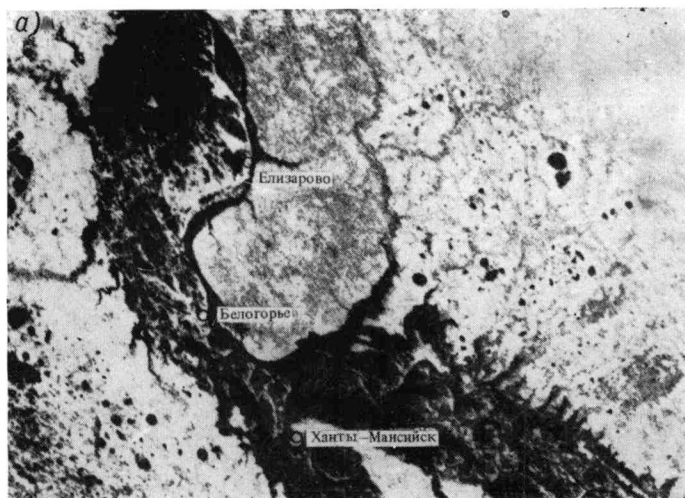


Рис. 8.11. ТВ изображения с ИСЗ «Метеор» (МСУ-С, диапазон 0,8—1,0 мкм) участка Волго-Ахтубинской поймы при различном ее состоянии.

*а* — влажная пойма (27 апреля 1979 г.), *б* — частичное затопление поймы (26 мая 1980 г.), *в* — пойма в период высокого половодья (13 июня 1979 г.), *з* — пойма свободна от воды (осенняя межень 10 сентября 1980 г.).



навания всем элементам одной зоны придается одно значение плотности, в результате чего все изображение участка поймы окажется разделенным на шесть зон с разной степенью затопления.

Полученные по спутниковым снимкам сведения о затоплении речных пойм являются дополнительной к наземным и авианаблюдениям информацией, которая может использоваться для контроля сведений об уровнях выхода воды на пойму, поиска связей размеров затопленных площадей с уровнем и расходом воды, наблюдений за продвижением волны половодья вдоль реки для фиксации катастрофических затоплений (рис. 8.13).

#### 8.4. Автоматизированная обработка спутниковых данных для гидрологических целей

Необходимость разработки автоматизированных методов дешифрирования и картографирования состояний гидрологических объектов по спутниковым данным обусловлена возрастающим объемом поступающей космической информации и требованиями оперативности проводимой обработки. Автоматизированные методы свободны от субъективных оценок, полученные при этом количественные оценки состояния гидрологических объектов имеют достаточно высокую точность. Кроме того, приме-

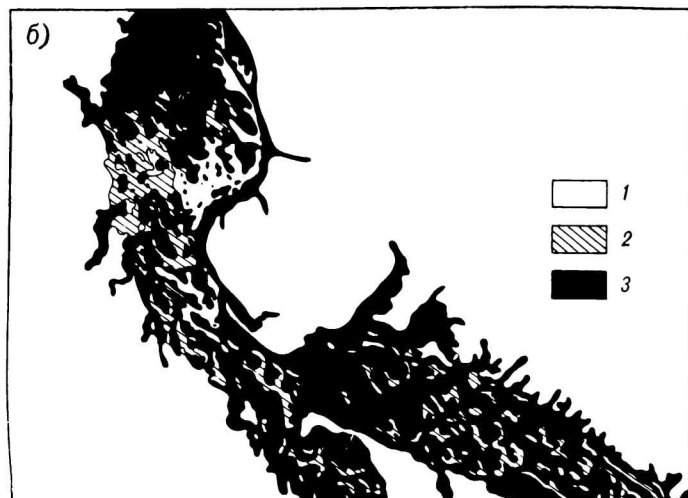
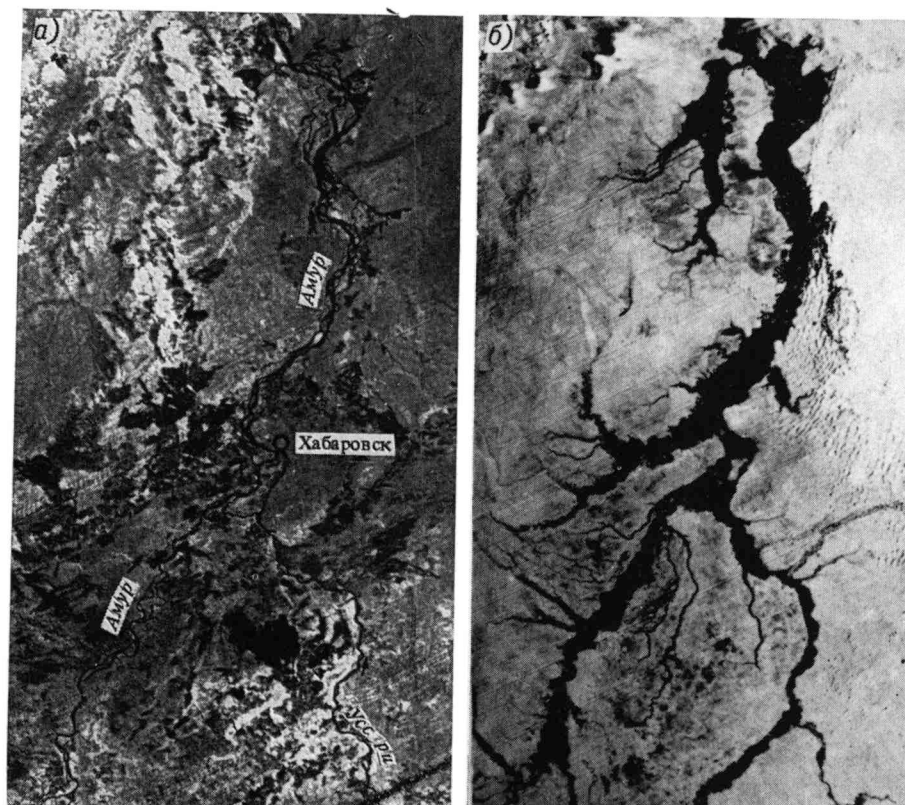


Рис. 8.12. Фрагмент спутникового ТВ изображения (МСУ-С, диапазон 0,7—1,1 мкм) поймы р. Оби в месте впадения в нее р. Иртыш за 22 июня 1981 г. (*а*) и результаты его дешифрирования с выделенными участками различной степени затопления (*б*).

1 — незатопленные участки, 2 — участки, предположительно затопленные на 31—50 %, 3 — участки полностью затопленные.

Рис. 8.13. ТВ изображения поймы р. Амура с притоками, полученные с ИСЗ «Метеор» до прохождения катастрофического паводка 28 апреля 1981 г. (а) и в период больших разливов 1 сентября 1981 г. (б).



нение автоматизированных методов позволяет представить результаты обработки в виде карт.

В настоящее время разрабатываются автоматизированные методы картографирования снежного и ледяного покровов, речных разливов и затоплений. Ниже приведены примеры автоматизированного дешифрирования и картографирования речных разливов, а также снежного покрова.

При изучении речных разливов и затоплений целью автоматизированной обработки является получение границ зоны полного затопления, а также выделение зон с различной степенью затопления. При определении границ зоны полного затопления необходимо отделить по особенностям фототона изображения зону полного затопления от частично затопленных участков, а также от переувлажненных территорий. Координаты точек границы зоны полного затопления затем пересчитываются в выбранную картографическую проекцию. Определение положения границ затопления по снимкам можно осуществлять с использованием характерных тестовых участков и регистрограмм отдельных профилей. Гистограммы яркости изображения тестовых участков используются для выбора порога квантования изображений на зону полного затопления («вода») и незатопленные участки. Регистрограммы отдельных профилей позволяют уточнить пороговое значение квантования, после выполнения которого отделяется изображение полностью затопленных участков от частично затопленных и переувлажненных территорий.

Для иллюстрации автоматизированной обработки используется фрагмент снимка среднего разрешения со спутника «Метеор» от 19 мая 1981 г. в диапазоне 0,8—1,1 мкм, содержащий изображение р. Ветлуги в период разлива (рис. 8.14). Фрагмент снимка был записан на магнитную ленту и

выведен на экран дисплей-процессора «Периколор». На экране дисплея выбран и оконтурен тестовый участок, который, по мнению оператора, содержит преимущественно элементы воды. По построенной для тестового участка гистограмме определялось пороговое значение оптической плотности, соответствующее изображению воды. Пороговое значение уточнялось по результатам анализа регистрограммы. По пороговому значению было выполнено преобразование исходного изображения методом адаптивного квантования. Результаты преобразования представлены на рис. 8.15, где черным цветом выделены элементы, отнесенные к классу «вода». Полученные таким образом границы затопления были трансформированы в проекцию карты. Дальнейший путь исследований — выделение зон с различной степенью затопления. Для этого при обработке необходимо иметь в банке данных зависимости спектральных яркостей элементов изображения пойм рек от степени их затопления.

При автоматизированной обработке спутниковых данных могут быть установлены характеристики пространственного распределения снежного покрова, в том числе границы снега и степень покрытия снегом замкнутой территории в заданной картографической проекции.

Выделение на спутниковых снимках классов «снег» и «не снег» выполняется также по пороговым значениям оптических плотностей. Квантование изображения по модам гистограмм позволяет перейти к оценке степени заснеженности внутри замкнутого контура. На рис. 8.16 приведен фрагмент космического снимка среднего разрешения (диапазон 0,5—0,7 мкм) территории Северного Казахстана. Результаты квантования изображения по пороговому значению оптических плотностей приведены на рис. 8.17. В цифровой эквивалент изобра-



Рис. 8.14. ТВ изображение с ИСЗ «Метеор» (МСУ-С) разлива на р. Ветлуге. 19 мая 1981 г., диапазон 0,8—1,1 мкм.

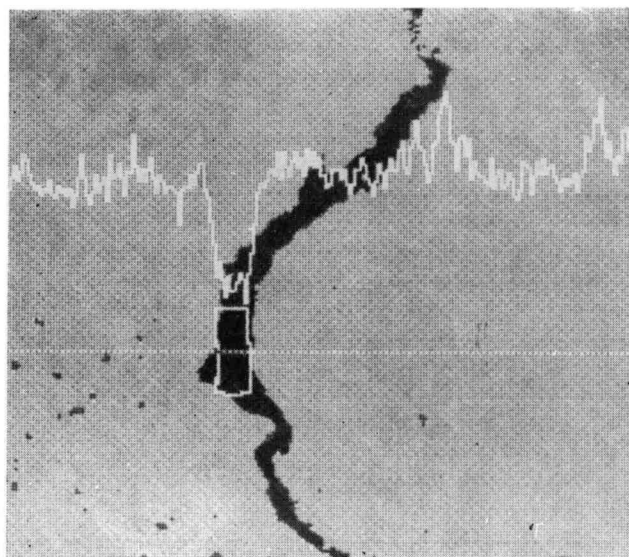


Рис. 8.15. Результаты обработки на ЭВМ фрагмента снимка с изображением разлива на р. Ветлуге.

На квантованном на два уровня снимке показаны тестовый участок и регистрограмма яркостей.

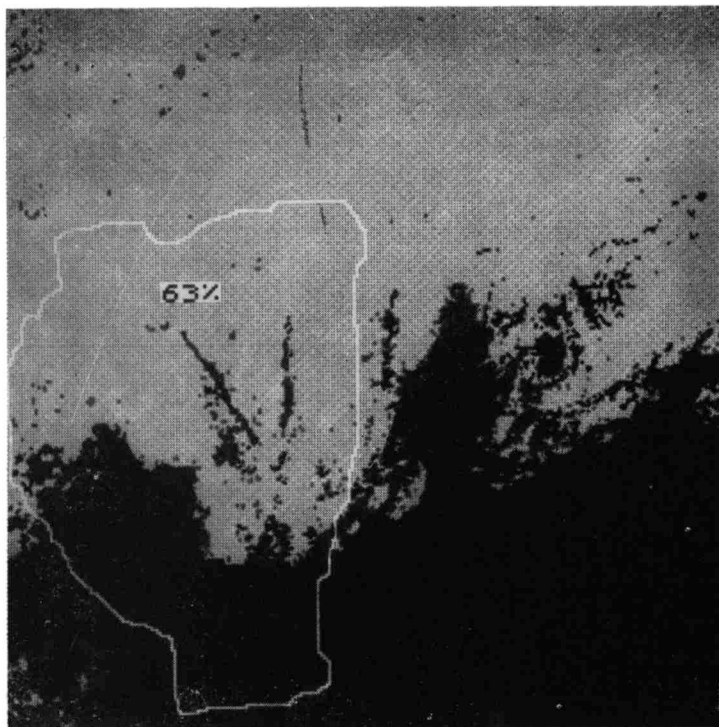


Рис. 8.16. Космический снимок среднего разрешения территории Казахстана в период снеготаяния. 4 апреля 1979 г. На снимок нанесен контур водосбора р. Улькаяк.

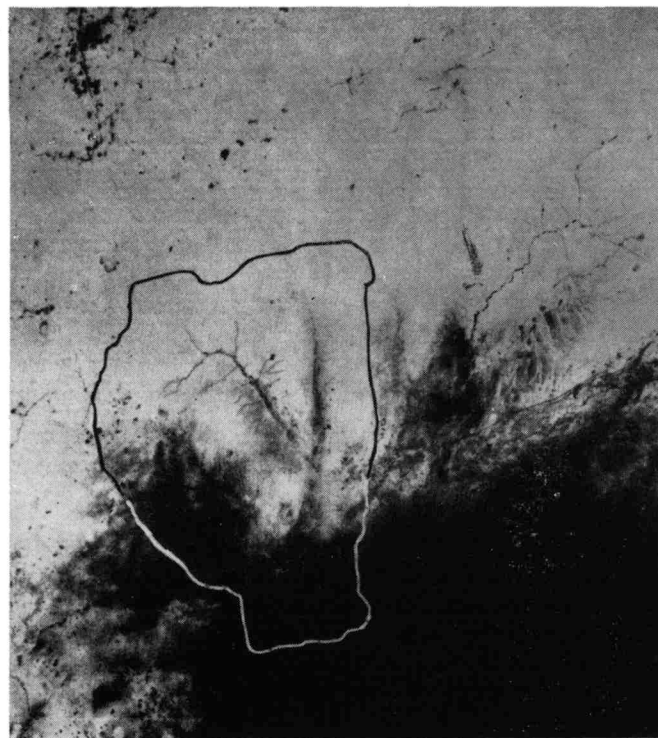


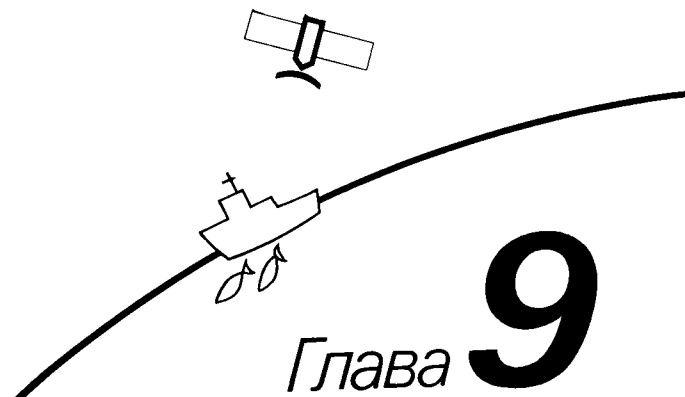
Рис. 8.17. Результаты обработки на ЭВМ фрагмента снимка (рис. 8.16).

Получено бинарное изображение, элементам класса «снег» присвоен серый цвет, класса «не снег» — черный цвет. Белым цветом очерчены границы водосбора р. Улькаяк. Заснеженность внутри водосбора 63 %.

жения на ЭВМ замешана граница водосбора р. Улькаяк, для которой вычислена заснеженность в процентах как отношение количества элементов класса «снег» к общему количеству элементов

фрагмента. Заснеженность для водосбора г. Улькаяк на 4 апреля 1979 г. по результатам обработки на ЭВМ составила 63 %.

# Использование спутниковой информации видимого и ИК диапазонов в океанографии



## Глава 9

Современная океанография—это комплексная наука, представляющая собой совокупность многих научных направлений, занимающихся изучением Мирового океана. Она исследует те или иные свойства морской воды: ее движение, состав, физические характеристики, взаимодействие с суши и атмосферой, с различными живыми организмами, экономические и технические возможности ее использования и т. д.

Океанография тесно связана с целым рядом смежных наук—геологией, биологией, метеорологией и др. Данные океанографии широко применяются в технических науках, связанных с использованием моря или самой воды. Океанография изучает море, рассматривая его как важнейшую часть окружающей среды.

Традиционно океанография условно делится на физическую океанографию, химическую (гидрохимия) и биологическую (гидробиология). Сегодня в качестве фундаментальных составных частей океанографии с полным правом можно считать морскую метеорологию, подводную геологию и геофизику, а также отдельные технические направления, связанные с использованием энергетических и минеральных ресурсов морей и океанов.

В системе наук о Земле, заинтересованных в получении информации с космических носителей, океанографии принадлежит особое место. Покрыв свыше 2/3 поверхности Земного шара водой, наделен океаны и моря значительной пространственно-временной изменчивостью, сама природа предопределила использование искусственных спутников Земли (ИСЗ) для быстрого периодического осмотра Мирового океана.

Исследование комплексной проблемы взаимодействия океана и атмосферы, изучение систем течений Мирового океана, определение биологических ресурсов отдельных акваторий, поиск и обеспечение разработки минеральных ресурсов, использование запасов нефти и газа на морском шельфе, обеспечение безопасности мореплавания, вопросы круглогодичной навигации в северных ледовых морях, контроль загрязнения Мирового океана—в решении всех этих и многих других важнейших задач значительная роль отводится космической (спутниковой) океанографии. Содержание современной космической океанографии было бы недостаточно характеризовать лишь как совокупность методов исследования Мирового океана из космоса. Поскольку определение океанографических параметров с помощью средств космической техники на современном этапе связано еще и с необходимостью проведения исследований в ряде других областей, рассмотрим

некоторые проблемы становления космической океанографии как комплексного междисциплинарного научного направления.

### 9.1. Космическая океанография на современном этапе

В последние годы появилось значительное количество публикаций, авторы которых с различных позиций анализируют значение для океанографии новых средств и методов получения информации, место космических методов среди других методов сбора океанографических данных, особенности космической океанографии, выделяющие ее среди других направлений космического природоведения, рассматривают первые успехи, трудности становления и высказывают свои мнения о перспективах развития методов и технических средств космической океанографии [7, 10, 15, 17—19, 22, 23, 35—37].

Пока еще скромный вклад спутниковой информации в понимание физических, химических и биологических процессов в океане, согласно [7], объясняется следующим:

1. Для изучения многих явлений и процессов океанографическая информация должна быть четырехмерной (три пространственные координаты и время). Между тем дистанционное зондирование—это принципиально зондирование поверхности. Связи между процессами, происходящими в глубине, и их проявлениями на поверхности океана изучены пока недостаточно.

2. Спутниковые методы определения океанографических параметров по своей сути—косвенные. Переход от непосредственно измеряемых с ИСЗ величин к совокупности принятых в океанографии параметров не всегда однозначен. Существующие методы определения океанографических параметров с ИСЗ непрерывно совершенствуются, но эта работа еще далека от завершения.

3. Сигнал от морской поверхности, принятый с ИСЗ, подвержен влиянию атмосферы, вклад которой в ряде случаев значительно превосходит величину полезного сигнала. Однако получение информации о характеристиках атмосферы (включая параметры морского аэрозоля) в любой момент измерения океанографических параметров и оперативный учет этой информации пока не обеспечивается.

4. Как следствие, точность определения океанографических параметров с ИСЗ значительно ниже точности измерений, выполненных с помощью традиционных контактных средств. Для устранения



методических неопределенностей и повышения точности спутниковых измерений путем введения различных поправок необходимо проводить синхронные подспутниковые измерения многих других параметров состояния самого океана и атмосферы над ним.

5. Серьезным препятствием для получения регулярной спутниковой информации в виде временных рядов наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, обладающих наилучшим про-

основное достоинство спутниковых данных), приводит к поступлению непривычно большого для океанологов объема измерительной информации. Скорость передачи данных с некоторых ИСЗ составляет от десятков кбит/с до десятков Мбит/с, а суточный объем информации достигает сотен Мбайт. Обработка таких информационных потоков не может быть выполнена сугубо в рамках традиционных океанографических учреждений. Обработка даже ограниченного объема космической

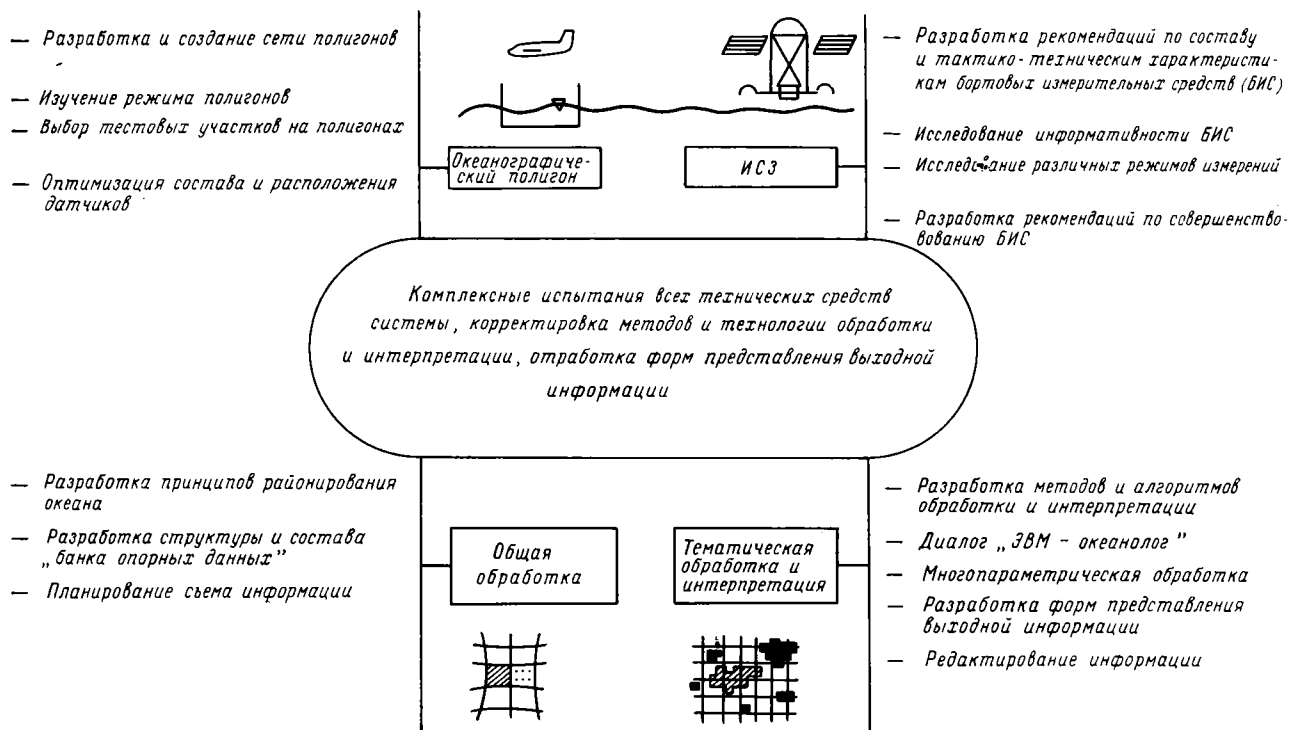


Рис. 9.1. Участие специалистов-океанологов в комплексных исследованиях и разработках, направленных на создание средств и методов получения, обработки и интерпретации спутниковой информации в интересах океанографии [7].

странственным разрешением, является облачность. Нерегулярный характер космической информации, ее фрагментарность в недалеком прошлом не позволяли океанологам рассматривать ее в качестве самостоятельного источника знаний об океане.

6. Отличие космической информации от традиционной по своей физической сущности (к примеру, известная проблема связи радиационной и термодинамической температуры), качественно новая форма представления информации («площадная» в отличие от привычных разрезов и измерений в точке) также затрудняли использование новой информации. Следует признать недостаточность опыта усвоения разнородных измерений (площадных, линейных и точечных). Разработка общих методов использования спутниковой информации для решения океанологических задач еще только начинается. Особое внимание при этом должно быть уделено выявлению специфических особенностей спутниковой информации.

7. Использование принципиально новых технических средств — датчиков, работающих в различных диапазонах электромагнитного спектра, в том числе многоканальных приборов, установленных на космических носителях, которые обеспечивают практически мгновенный обзор большой акватории

информации в интересах океанографии до сих пор сопряжена с большими техническими трудностями и проводится со значительными задержками во времени.

Отмеченные выше трудности становления космической океанографии, весь опыт использования космической информации в интересах наук о Земле свидетельствуют о необходимости системного подхода к разработке средств и методов получения, обработки, интерпретации и использования космической информации в интересах науки об океане. Такой подход предполагает одновременное создание как комплекса технических средств, включающего бортовую аппаратуру ИСЗ, линии связи Земля—ИСЗ—Земля, пункты приема информации с ИСЗ, наземный вычислительный комплекс для обработки информации, банк опорных данных, сеть для сбора опорной информации, так и совокупность методов, алгоритмов и программ общей и тематической обработки, интерпретации и представления выходной информации.

Рассмотрим роль специалистов-океанологов в комплексе исследований и разработок, реализующих такой подход [7]. По нашему мнению, необходимо участие океанологов в выполнении работ по четырем направлениям (рис. 9.1): 1) совершен-

ствование бортовой аппаратуры ИСЗ, 2) создание подсистемы сбора опорной информации (полигоны), 3) общая обработка космической информации, 4) океанографическая интерпретация информации. Все эти направления принципиально взаимосвязаны и реально объединяются при комплексных испытаниях всех технических средств системы и методов обработки интерпретации информации.

**Бортовые измерительные средства (БИС) ИСЗ.** Океанологи должны участвовать в определении таких океанографических параметров, которые нужно (и на данном этапе возможно) измерять с ИСЗ, в установлении пределов их изменений в реальных условиях, необходимой точности измерений, дискретности съема информации. С участием океанологов производится выбор оптимальных диапазонов электромагнитного спектра, в которых нужно измерять радиационные характеристики, чтобы определять необходимые параметры океана. Дается обоснование оптимального комплексования БИС, необходимых для получения характеристик океанографических полей с заданной точностью и дискретностью во времени и в пространстве.

Определенная роль должна быть отведена численному моделированию условий получения спутниковой информации. На этапе комплексных испытаний системы проводится исследование ранее предложенных режимов измерений, а также опробование различных вариантов измерений. Путем сравнения результатов дистанционных и полигонных измерений проводится исследование информационных свойств БИС в целом и отдельных видов бортовой аппаратуры. Все эти работы выполняются коллективом специалистов с обязательным участием океанологов, обладающих необходимой технической подготовкой, владеющих опытом производства неконтактных океанографических измерений.

**Подсистема сбора опорной информации** включает создание, оснащение и опытную эксплуатацию экспериментальных океанографических контрольно-измерительных полигонов, которые необходимы для получения опорной информации.

Целью исследований является выработка обоснованных рекомендаций по размещению тестовых участков полигонов, исходя из географических особенностей, гидрологического и метеорологического режима района, рекомендаций по составу измерительных средств и месту их размещения, по структуре, периодичности и объему измерений. Океанологи должны участвовать в разработке методов экспресс-анализа и интерпретации информации, получаемой с помощью контрольно-калибровочных приборов, размещаемых на авиационных носителях, судах, плавучих платформах, основаниях и буях. Подробнее особенности подсистемы сбора океанологической опорной информации рассмотрены в разделе 4 настоящей книги.

**Общая обработка космической информации и ее океанографическая интерпретация** тесно связаны между собой. К общей обработке можно отнести планирование съема космической информации. Следует предусматривать возможность освещения обстановки в том или ином районе Мирового океана с разной степенью детальности. Очевидно, что это можно планировать на основе уже сложив-

шихся представлений об особенностях различных районов океана. Эти данные должны составлять так называемую стационарную часть банка данных, необходимых для обработки и последующей интерпретации космической информации. Специалисты-океанологи должны участвовать в определении структуры банка данных, состава находящейся в нем информации, а также в выработке рекомендаций по заполнению стационарной (на базе атласов, пособий и др.) и оперативной (на базе синхронных или квазисинхронных полигонных измерений) частей банка данных (подробнее см. [8]).

Особо важная роль принадлежит океанологам в разработке методов интерпретации космической информации с целью оперативного определения океанографических параметров. Эти разработки должны сочетаться с теоретическими исследованиями по разработке методов адаптации разномасштабных синхронных (квазисинхронных) измерений. Участие специалистов океанографического профиля обеспечит наилучшее согласование технических возможностей интерактивной системы оперативной обработки ресурсной информации и практического опыта и интуиции океанографов при анализе гидрофизических полей и их аномалий. Важно обеспечить участие океанографов в редактировании выходной информации. Сюда же условно может быть отнесена и разработка методов использования космической информации об океане для решения конкретных задач, исследования конкретных процессов и явлений в Мировом океане. Разработка таких методов должна быть основана на хорошем знании процесса обработки спутниковой информации и учете специфических особенностей этого вида информации.

Все перечисленные виды работ объединяются на этапе комплексных испытаний, которые служат проверкой всех составных частей системы. Целью исследований является изучение степени соответствия информации, полученной с ИСЗ, а затем обработанной и тематически интерпретированной средствами вычислительного комплекса, и информации, полученной традиционными средствами и методами. При выполнении этих исследований будет производиться выявление ошибок измерений, будут вводиться различные корректуры во всех звеньях технологической цепочки «измерение — передача — обработка — интерпретация — представление информации и ее распространение». На этом этапе должна быть получена информация, характеризующая пространственно-временную изменчивость гидрофизических полей на основе крупномасштабных единовременных спутниковых измерений. Это позволит приступить к анализу океанографических процессов разных масштабов на основании качественно новой, регулярно поступающей информации.

Поскольку обеспечение дальнейшего развития космической океанографии требует обязательного проведения перечисленных выше исследований и разработок, можно считать, что в значительной мере именно они и составляют реальное содержание этого научного направления на современном этапе.

Первые важные успехи использования спутниковой информации в изучении океана и его ресур-

сов отмечаются [19]: 1) при наблюдениях за океаническими вихрями, 2) при статистическом анализе вихрей и фронтов, 3) при обнаружении следов внутренних волн на поверхности океана, 4) при использовании ИСЗ в системах, включающих океанографические буи, 5) при наведении научно-исследовательских кораблей на исследуемые объекты.

Важным этапом в развитии космической океанографии являлись комплексные испытания новых технических средств, установленных на борту ИСЗ «СИСАТ» и «НИМБУС-7», и методов обработки результатов измерений с целью извлечения океанографической информации. Анализ материалов, полученных в ходе этих работ, посвящено большое число публикаций зарубежных исследователей. В отечественной печати соответствующие обзоры содержатся, в частности, в [1, 14].

В настоящее время степень развития спутниковых методов определения отдельных океанографических параметров существенно различна.

В документе Всемирной метеорологической организации [10] приводятся требования к пространственному разрешению и точности измерения отдельных океанографических параметров, а также излагаются перспективы их определения с ИСЗ на оперативной или экспериментальной основе в течение 80-х годов. Заимствованная из [10] сводка приведена в сокращенном виде в табл. 9.1. По мере накопления опыта работы с космической информацией и в связи с развитием бортовых технических средств ИСЗ приведенные в этой таблице данные несколько менялись. Со сводкой информации, которую планируется получать с помощью спутниковой океанографической системы США НОСС (NOSS), можно ознакомиться в работе [31]. Программы Европейского космического агентства, СССР, США и Японии по созданию в 80-х годах спутников и космических систем, представляющих интерес для океанографии, с указанием некоторых технических характеристик бортовой аппаратуры изложены, в частности, в работах [2, 3].

Таблица 9.1

Анализ возможностей спутниковой океанографии в 80-е годы (по данным [10])

Параметр	Требования			Возможность выполнения требований в 80-е годы	Примечание
	пространственная дискретность	частота	точность		
Температура поверхности моря (ТПМ)	300 км	6 ч	0,5 °С	300 км; 6 ч; 1,0—1,5 °С	
Горизонтальный градиент ТПМ	Зависит от задачи	1—2 раза в сутки	0,5 °С	1—2 раза в сутки; 0,5 °С	
Горизонтальный градиент цвета воды		То же		На экспериментальной основе	Горизонтальное разрешение 0,8 км при полосе обзора ИСЗ шириной 700 км
Содержание хлорофилла				То же	То же
Горизонтальный градиент прозрачности воды		1—2 раза в сутки		„	Могут использоваться фотографии с очень высоким разрешением
Загрязнение моря: нефтяные пятна, отличные от естественных пятен	Достаточная для обнаружения и определения местоположения			„	Существуют лабораторные и самолетные проекты, физические принципы и методы
Загрязнители (кроме углеводородов) микроповерхностного слоя океана				„	Прделана только предварительная работа по спутниковым методам определения нефтяных и других загрязнений моря
Поверхностное течение		12 ч	Скорость 0,3 м/с; направление 20°	0,3 м/с; 20°	ИСЗ служат для приема информации с дрейфующих буев. Точность зависит от частоты определения положений буев
Океанские волны	300 км	≤ 6 ч	Высота 0,5 м; период 0,5 с; направление 10°	На экспериментальной основе	С помощью радиолокаторов бокового обзора с синтезированной апертурой
Ветер у поверхности	300 км, в отдельных районах максимально возможное	≤ 6 ч	Скорость 1 м/с; направление 10°	То же	С помощью микроволновых методов

В настоящее время во многих странах проводятся подготовительные и экспериментальные работы, направленные на создание методов и аппаратуры для определения океанографических параметров с ИСЗ. В этих исследованиях используются как существующие космические носители, не предназначенные специально для получения океанографической информации, так и экспериментальные ИСЗ. В СССР были запущены экспериментальные океанографические ИСЗ «Космос-1076», «Космос-1151», по программе международного сотрудничества социалистических стран были проведены методические работы по океанографии с помощью ИСЗ «Интеркосмос-20» и «Интеркосмос-21».

Для отработки методов интерпретации и применения спутниковой информации видимого и ИК диапазонов в океанографии в последние годы широко используются ИСЗ, входящие в состав советской космической метеорологической системы «Метеор» — спутники типа «Метеор-2» и «Метеор-Природа».

Рассмотрим некоторые примеры океанографической интерпретации данных, получаемых с ИСЗ «Метеор».

Наиболее контрастным объектом на морской поверхности является лед. Относительная простота дешифрирования спутниковых изображений льдов позволила к настоящему времени разработать совокупность методов изучения ледового покрова морей и на этой основе эффективно использовать информацию с ИСЗ «Метеор» в интересах науки и народного хозяйства.

## 9.2. Наблюдения ледовой обстановки на морях и океанах, исследования распределения и динамики морских льдов

Для решения возникающих в процессе научно-оперативного обеспечения народного хозяйства задач необходима полная, достоверная информация о всех характеристиках ледяного покрова — возрасте, сплоченности, торосистости, размерах ледяных полей, разрушенности и т. д. Такая информация может быть получена с помощью комплекса датчиков, работающих в различных участках спектра электромагнитных волн. Кроме того, информация должна быть разномасштабной — от глобальной, охватывающей все полушарие, но имеющей сравнительно низкое пространственное и временное разрешение, до детальных съемок весьма ограниченных площадей и районов. Это приводит к необходимости использования не только различных датчиков, но и различных носителей, выполняющих съемки на различных уровнях — от измерений в космосе до непосредственных наблюдений на льду.

Все это требует создания организованного в единую систему комплекса аэрокосмических средств, дополняемого данными контактных калибровочных измерений на специальных полигонах, судах, автоматических буйах. ИСЗ являются необходимым звеном этой общей системы сбора ледовой информации.

Сравнительно высокая разрешающая способность и оперативность работы в режиме непосредственной передачи ИСЗ «Метеор-2» позволили,

с момента запуска первого спутника этой серии, эффективно использовать получаемую от них информацию для ледовых наблюдений.

Разработанные методы географической привязки и дешифрирования телевизионных снимков позволяют определять сплоченность льдов в пределах основных градаций (9—10, 7—8, 4—6, а иногда и 1—3 балла), положение границ зон различной сплоченности с точностью  $\pm (4—5)$  км, вектор дрейфа льда, положение и конфигурацию крупных полей, каналов и разводов, положение и характеристики заприпайных полей и прогаллин, а также выявлять систему дрейфоразделов.

Учитывая разнообразие задач, для решения которых используются спутниковая ледовая информация, и широкий круг потребителей, разработано три основных метода обработки телевизионных снимков ИСЗ — оптико-механический, ледовых фотокарт и аналитический.

Оптико-механический метод составления ледовых карт в настоящее время внедрен в оперативную практику во всех приморских УГКС и на судах, оборудованных пунктами приема спутниковой информации. Преимущества этого метода — простота, оперативность и возможность составления очень подробных ледовых карт.

Сущность метода заключается в простом проектировании ТВ или ИК снимка на карту более крупного масштаба (1 : 5 000 000—1 : 2 000 000) с привязкой по контурам береговой черты, дешифрировании проектируемого изображения и зарисовке на карте деталей ледовой обстановки.

Для строгой реализации метода снимок должен быть получен в проекции тематической карты. Однако такое преобразование видеoinформации может быть осуществлено только с использованием больших универсальных ЭВМ, т. е. в настоящее время не в оперативном режиме.

Гораздо проще телевизионные снимки с ИСЗ могут быть приведены к приближенно плановому виду путем выравнивания масштабов по строке сканирования и в направлении, параллельном плоскости орбиты («по кадру»). Решение задачи существенно облегчается тем, что у ИСЗ «Метеор-2» изображение по строке строится по законам равнопромежуточной проекции (сканирование равномерное по сферической Земле).

Изображение с негатива принятого на модернизированный фототелеграфный аппарат (ФТА) снимка через универсальный топографический проектор или другой фототрансформатор проектируется по отдельным районам моря на бланковую карту, на которой зарисовывается ледовая обстановка (зоны различной сплоченности, каналы, разводы, гигантские ледяные поля, припай полей и т. д.). При переходе от района к району изменением масштаба проектирования и смещением карты каждый раз добиваются наилучшего совмещения изображений береговой черты на снимке и на карте, т. е. наиболее точной географической привязки (рис. 9.2, 9.3). Оптико-механический метод составления ледовых карт успешно используется в 10 приморских управлениях Госкомгидромета, а также на всех арктических, антарктических и судовых автономных пунктах приема информации (АППИ). Все морские операции в Антарктике, а в последние годы довольно часто и в Арк-

тике проводятся только с использованием информации, полученной в результате обработки телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор-2».

Однако любая карта, отображающая состояние льдов в обобщенном виде, несравненно беднее информацией, чем исходное изображение. Между

в общей системе сбора ледовой информации искусственным спутникам Земли наряду с авиационными средствами отводится основная роль.

Если задачи оперативного обеспечения ледовой информацией мореплавания и народного хозяйства успешно решаются оптико-механическим ме-

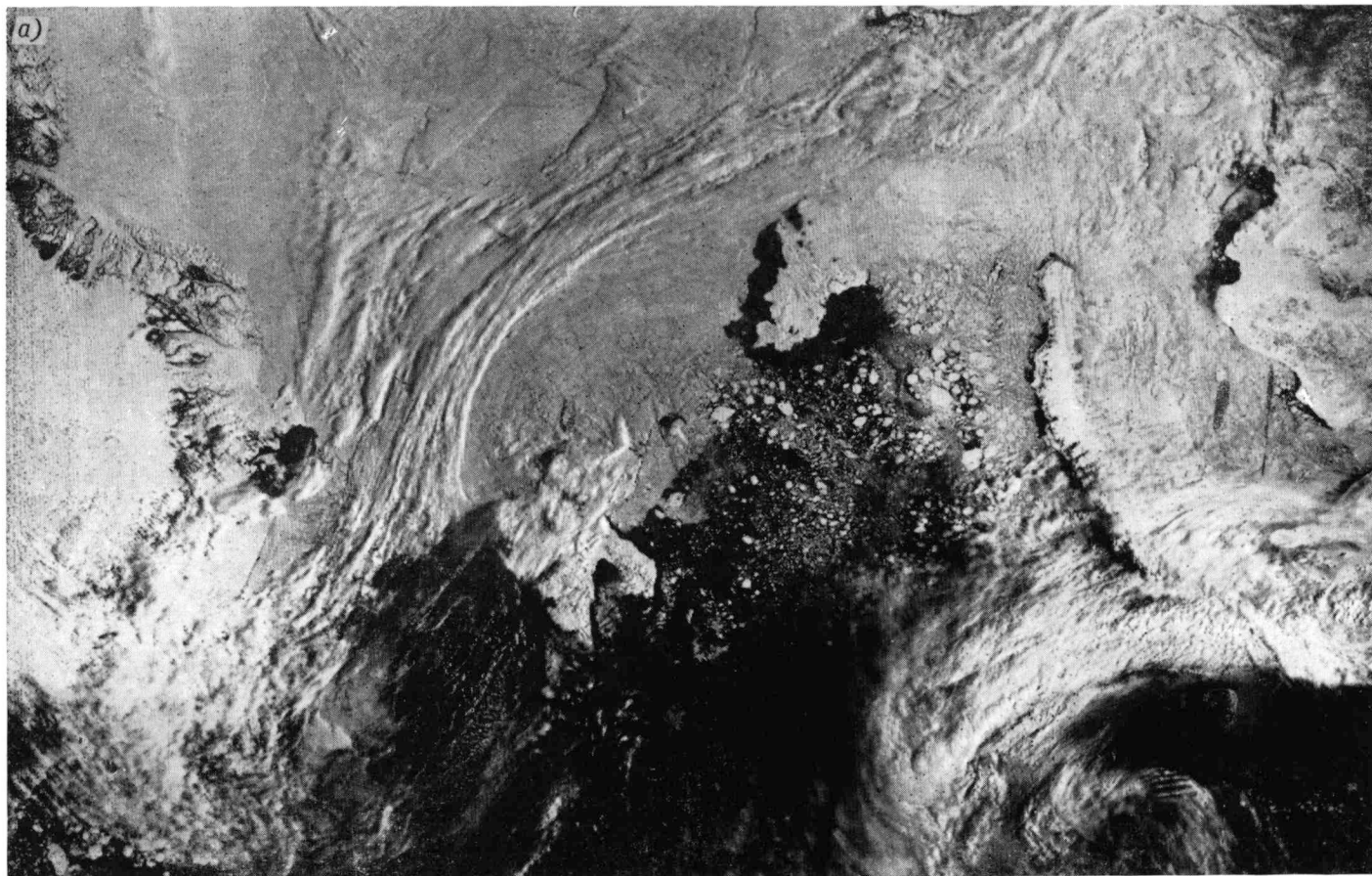


Рис. 9.2. Изображение западного сектора Арктики, полученное с ИСЗ «Метеор-2» 12 июня 1981 г. (а), и карта ледовой обстановки, составленная по этому изображению (б).

тем для успешного плавания в тяжелых льдах судоводитель должен знать положение отдельных гигантских полей, каналов, разводий и дрейфоразделов. Поэтому в последние годы разработана методика составления ледовых фотокарт, которые должны являться дополнением обычных графических карт ледовой обстановки.

Ледовые фотокарты составляются путем монтажа мозаики из увеличенных до соответствующего масштаба и надежно координированных частей снимков с впечатанной географической сеткой, принятых в течение одних-двух суток (рис. 9.4).

Необходимо отметить, что некоторые, весьма важные для мореплавания характеристики ледяного покрова, такие как генеральное распределение, схема каналов и дрейфоразделов, положение гигантских полей, по телевизионным снимкам с ИСЗ могут определяться лучше, чем другими средствами, а по оперативности и возможности одновременных наблюдений на громадных акваториях, вплоть до целого полушария, спутниковая информация находится вне конкуренции. Поэтому

тодом и путем составления ледовых фотокарт, то при использовании спутниковой ледовой информации для составления ледовых и метеорологических прогнозов численными методами, выполнения георетических и режимных исследований и решения задач климатического мониторинга предпочтительнее метод аналитической географической привязки.

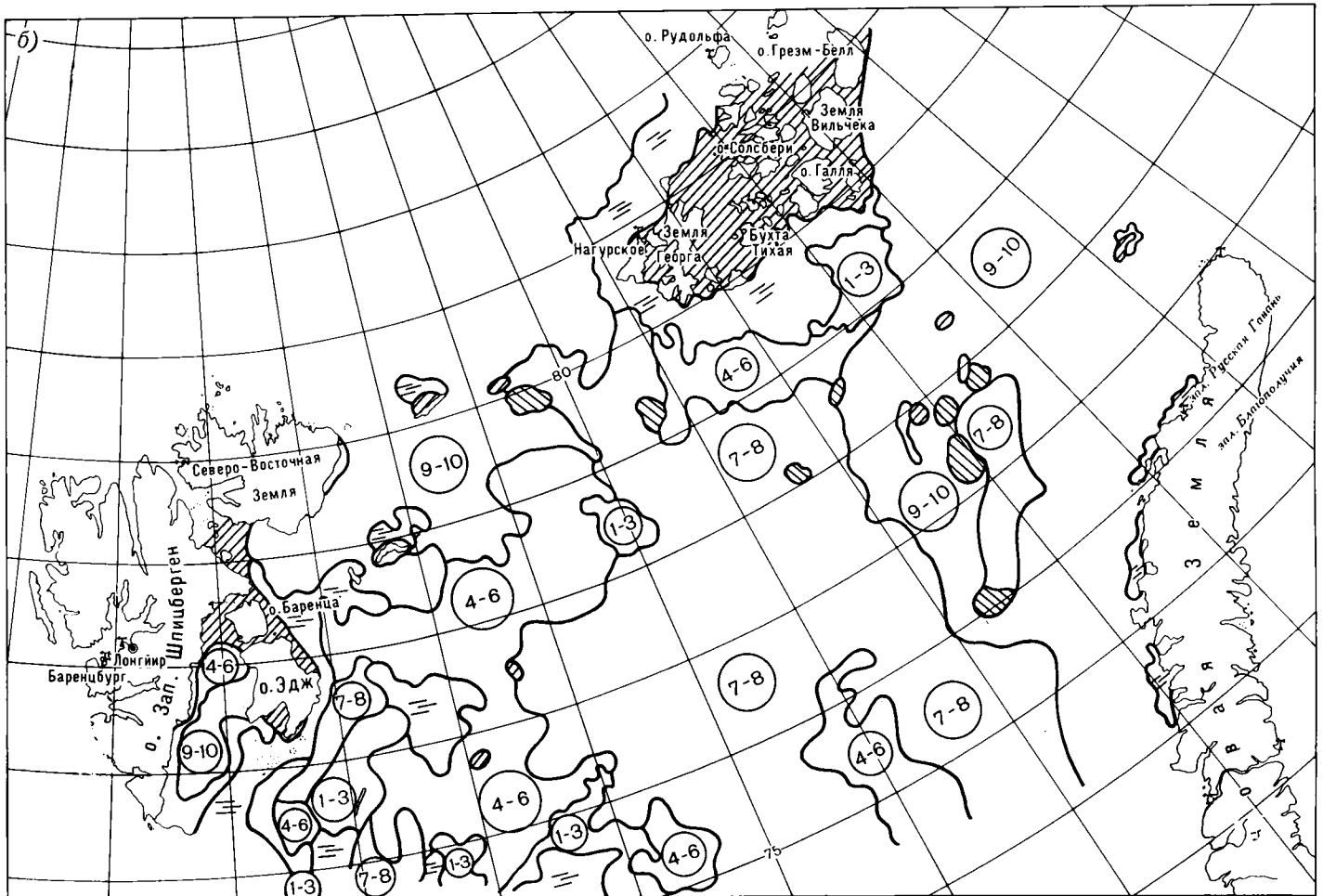
Этот метод предусматривает аналитическое преобразование координат не всех элементов снимка, а только отдельных точек (поворотных точек ледовых границ, ледовых полей).

Процесс географической привязки включает три основных этапа: 1) измерение координат точек на снимке и ввод данных в ЭВМ; 2) аналитическое преобразование измеренных координат сначала в географические, а затем в прямоугольные на карте заданного масштаба; 3) вывод в цифровом или графическом виде.

Такая схема обработки позволяет использовать в качестве устройств ввода широко распространенные фотограмметрические приборы для измерения

прямоугольных координат снимков, а устройствами вывода информации могут служить входящие в комплект оборудования многих вычислительных центров графопостроители и цифроречитывающие устройства. Это позволяет в перспективе внедрить аналитический метод на большинстве автономных

в графическом, но и в цифровом виде, полностью подготовленные для дальнейшего анализа численными методами и статистической обработки, аналитический метод целесообразно применять при использовании спутниковой ледовой информации для климатического мониторинга, режимных исследо-



пунктов приема информации, которые выполняют оперативную обработку ледовой информации.

По результатам вычислений при помощи графопостроителя строится карта векторов дрейфа (рис. 9.5). Вывод результатов вычислений не только на блок цифровой печати и графопостроитель, но и на магнитную ленту позволяет производить их дальнейшую обработку (получение векторов дрейфа в узлах регулярной сетки, вычисление поля дивергенции скоростей дрейфа, сопоставление с градиентами давления и т. д.) в автоматическом режиме, без какой-либо дополнительной подготовки.

Оценивая в общем аналитический метод, можно отметить, что по сравнению с оптико-механическим он обеспечивает меньшую детализацию и подробность, но зато позволяет достичь максимально возможной точности географической привязки и, что самое главное, дает возможность определять поле векторов дрейфа.

Принимая во внимание, что результаты ледовых наблюдений при этом получаются не только

ваний, разработки гидродинамических моделей и составления ледовых прогнозов численными методами.

Данные о дрейфе льда позволяют накапливать полученные при помощи других средств сведения о медленно изменяющихся параметрах ледяного покрова (возраст, торосистость, разрушенность и т. д.), что еще больше повышает роль ИСЗ в общей системе сбора ледовой информации.

В связи с большим объемом информации, поступающей на АППИ, и необходимостью повышения точности количественной оценки параметров, характеризующих состояние ледяного покрова, задача максимально возможной автоматизации всех процессов обработки, в том числе и дешифрирования, является весьма актуальной.

В результате выполненных за последнее время поисковых работ установлена возможность автоматизированного определения сплошности льдов по телевизионным снимкам с ИСЗ «Метеор».

Размеры элементарных площадок изображения МСУ-М (1—3 км) сопоставимы, а в ряде случаев

превышают размеры ледяных полей. В результате только часть элементарных площадок представляет собой изображение чистой воды или сплошного льда. Приняв амплитуды сигналов от этих площадок  $A_B$  и  $A_L$  за калибровочные данные и считая зависимость между сплоченностью и ампли-

применение. Дешифрирование и интерпретация ледовой обстановки по спутниковым снимкам на сети АППИ выполняется поэтому визуальными методами, с использованием разработанной системы прямых, косвенных и логических дешифровочных признаков. При этом необходимой ча-



Рис. 9.3. Изображение западного сектора Арктики, полученное с ИСЗ «Метеор-2» 17 июня 1981 г. (а), и карта ледовой обстановки, составленная по этому изображению (б).

тудой сигнала для каждой частной элементарной площадки линейной, можно получить выражение для определения сплоченности льдов в пределах выделенных наблюдателем зон

$$S = \sum_1^N \frac{A_i - A_B}{(A_L - A_B) N},$$

где  $A_i$  — амплитуда сигнала от частной элементарной площадки,  $N$  — число элементарных площадок в зоне.

Автоматизированное определение сплоченности производится с использованием устройств отображения информации дисплейного типа.

Пример такой частично автоматизированной обработки снимка МСУ-С ИСЗ «Метеор» приведен на рис. 9.6. Обработка выполнена на комплексе технических средств ГосНИЦИПР.

Необходимо отметить, что если задачу автоматизированной географической привязки в настоящее время можно считать успешно решенной, методы автоматизированной интерпретации изображений пока находят только весьма ограниченное

число разработанных пособий являются подборки наиболее характерных изображений различных льдов (эталонных снимков), полученных в разных районах в различные сезоны.

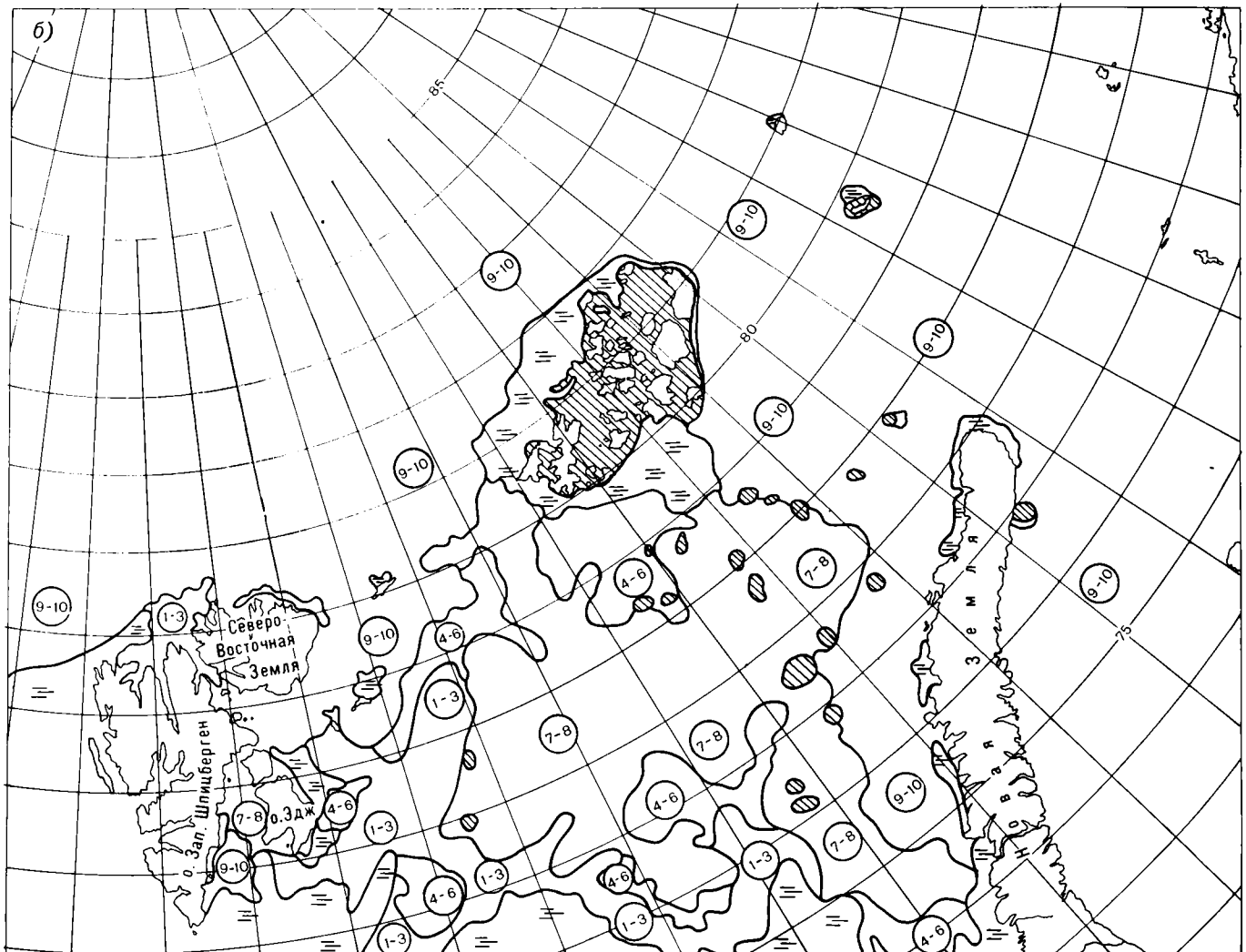
Выявление дешифровочных признаков и подбор эталонных снимков производились в процессе калибровочных наблюдений, которые выполняются ежегодно на специальных полигонах и попутно в различных экспедициях. Разработанные методы дешифрирования и географической привязки обеспечивают эффективное использование телевизионных снимков с ИСЗ при решении большинства задач, связанных с научно-оперативным обеспечением мореплавания, народного хозяйства и проведением научных исследований.

### 9.3. Исследование вихревых образований, локальных фронтов и внутренних волн

Использование спутниковой информации в практике океанологического анализа позволяет существенно расширить представления о структуре фрон-

тадных разделов струйных течений и вихревых образований различной природы в океане. В настоящее время дистанционные методы весьма широко применяются для исследования вихревых образований, главным образом, синоптических вихрей и колец течений. Изображения,

области вод, вовлеченных в вихревое движение, составляют для обеих вихрей 80—100 км. Изображения в видимой области спектра отражают поверхностные проявления динамических процессов, а ИК данные регистрируют температурные неоднородности поверхности (являющиеся, как



получаемые с ИСЗ, позволяют также исследовать вихри меньшего масштаба (20—50 км), существующие в струях течений вблизи их фронтальных разделов [16]. Такого рода вихри играют, по-видимому, важную роль в формировании термохалинной структуры фронтальных зон, однако изученность их структуры и механизма генерации явно недостаточна.

В июне 1980 г. со сканера МСУ-С ИСЗ «Метеор» было получено изображение участка поверхности Тихого океана к востоку от о. Хонсю в зоне конвергенции течений Куроисио — Ойясио [13]. На нем отчетливо видны два вихревых образования циклического характера, обозначенные на рис. 9.7 как вихри А и Б. Центральная часть вихря А имеет примерные координаты 37,5—38° с. ш. и 144,5° в. д. Центр вихря Б, частично закрытого облачностью, смещен на 150—200 км к югу (36—36,5° с. ш.) и находится на 144° в. д. Центральная часть вихря А имеет диаметр 40—50 км, размеры ядра вихря Б также около 50 км. Размеры всей

правило, следствием динамических процессов), поэтому оценки параметров вихрей по этим двум источникам информации могут не совпадать. Более того, в случае слабых температурных градиентов или их отсутствия вихревые образования (в особенности небольших масштабов) могут не проявляться на ИК изображениях.

Высокое качество изображения позволяет установить существенные различия в структуре вихрей А и Б. Вихрь А состоит из двух отдельных, четко разделяющихся по тону спиралеобразных элементов, циклонически закрученных один относительно другого. Светлая спираль, шириной от 2 до 10 км в ядре вихря и веерообразно расширяющаяся в облачности течения Ойясио, соответствует, по-видимому, холодным водам Ойясио, вовлеченным в вихревое движение. Темный участок вихря можно дешифровать как теплые воды Куроисио, отсеченные от основного потока. Вихрь Б значительно более изотропен по структуре, появляющейся в виде множества спирально закрученных



к центру нитеобразных белых полос шириной около 1 км.

На изображении выделяется характерная форма облачности в виде тонких (шириной 1—3 км) полос кучевых облаков. Сопоставление этих облачных полос с положением антицикло-

Дистанционные методы позволяют исследовать локальные фронты в прибрежных районах и внутренних морях. Используемые для этих целей ИК изображения дают возможность получать детальные картины расположения термических фронтов. Такого типа фронты могут проявляться

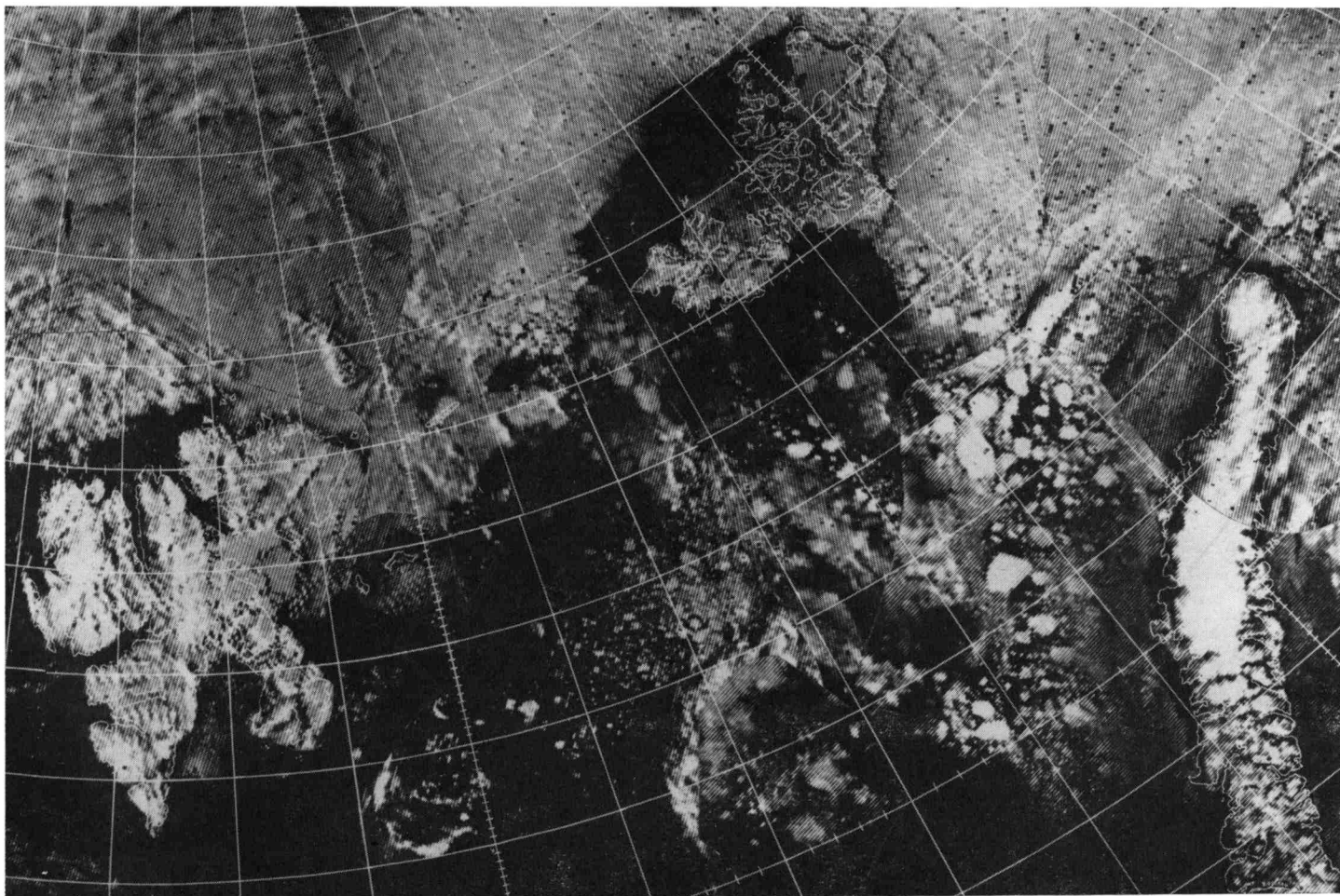


Рис. 9.4. Ледовая фотокарта западного сектора Арктики, составленная из изображений с ИСЗ «Метеор-2» за 17—18 июня 1981 г.

нического меандра Куроиси (по ИК данным) позволяет сделать вывод, что они сформировались и расположены вдоль фронта, отделяющего теплые воды Куроиси от холодных вод Ойясио. Таким образом, подобные облачные полосы (наблюдающиеся и в других районах) могут служить дополнительным дешифровочным признаком для идентификации фронтов в океане по данным в видимой области спектра.

В настоящее время имеются свидетельства того, что вихревые образования, подобные рассмотренным выше, являются характерной и постоянной особенностью зоны конвергенции течений Куроиси—Ойясио [6]. В частности, в работе [6] на основании ИК данных со спутников НОАА отмечается, что подобные вихри (вихри трения [6]) особенно часто наблюдаются восточнее мысов Инубо, Куроаки и Эримо, а также указывается, что они часто располагаются один за другим, по два вихря на одном «склоне» меандра.

также на изображениях в видимой области, так как вдоль линии фронта обычно происходит аккумуляция поверхностно-активных пленок, гасящих высокочастотные составляющие волнения, что приводит к возникновению контрастов шероховатости поверхности и, соответственно, контрастов в поле отраженной солнечной радиации. Примером служит изображение Эгейского моря и о-вов Критской дуги, полученное 26 июня 1980 г. со сканера МСУ-С ИСЗ «Метеор» [13]. Отчетливо видна на рис. 9.8 белая полоса, тянущаяся от восточной оконечности о. Крит в юго-восточном направлении, представляет собой фронтальный раздел между относительно холодными водами Эгейского моря, вытекающими из пролива Касос, и более теплыми водами центральной части Средиземного моря. Вынос более холодных вод Эгейского моря в море Леванта в летний период происходит под действием преобладающих северо-западных ветров и отчетливо прослеживается по

средним многолетним данным о температуре поверхности моря в летний период [10].

В качестве дополнительной информации, подтверждающей, что наблюдаемое явление представляет термический фронт, привлекались ИК изображения данного района, полученные

среднеквадратичного уклона морской поверхности создают контрасты в поле отраженной солнечной радиации и могут быть зафиксированы дистанционными методами. В работе [34] исследованы «ветровые тени» Антильских островов (ИСЗ НОАА-2, диапазон 0,6—0,7 мкм). На изображениях



Рис. 9.5. Карта векторов дрейфа льда в западном секторе Арктики за период 12—17 июня 1981 г., полученная путем аналитической обработки изображений с ИСЗ «Метеор-2».

Арктики за период 12—17 июня 1981 г., полученная путем

в рассматриваемый период со спутника «Тайрос». На них также хорошо заметен контраст между более холодными водами Эгейского моря, вытекающими из пролива, и теплыми водами у южного побережья Крита. Судовые наблюдения также показывают, что термические фронты часто встречаются в восточной части Средиземного моря в летний период и имеют следующие характеристики: ширина 2—10 км, перепад температуры 2—5,8° [30]. На рассматриваемом изображении фронт по своей структуре и контрастам (узкая, длинная полоса белого цвета на темно-сером фоне) легко отличим от соседствующих с ним ярко-белых вытянутых пятен, обусловленных экранирующим влиянием о. Крит. Ширина фронта 1—5 км, протяженность 80—100 км.

Острова, расположенные на пути ветрового потока, уменьшают скорость ветра и длину разгона, что приводит к образованию на подветренной стороне относительно спокойных областей с малыми высотами волн. Возникающие контрасты

наблюдались светлые полосы, соответствующие спокойным областям с высоким коэффициентом отражения, тянущиеся от подветренной стороны островов в направлении ветрового потока на расстояние до 200 км.

Аналогичное явление наблюдается на многих изображениях Эгейского моря, полученных с ИСЗ «Метеор». Особенно отчетливо ветровые тени от многочисленных островов в Эгейском море в виде ярко-белых полос, вытянутых в направлении ветра, проявляются на изображении, полученном 26 июня 1980 г. Следует отметить, что эти зоны относительно спокойной поверхности выглядят светлее окружающего фона в центральной части бликующей области. На краях же блика они, наоборот, темнее фона. Этот эффект хорошо виден на рассматриваемом изображении. Явление смены знака контраста спокойных участков морской поверхности относительно фона по мере удаления от центральной части бликующей зоны отмечалось также в [34]. Необходимо иметь в виду, что на

рис. 9.8 указано только общее направление ветра (по метеорологическим данным), тогда как ветровые тени (ВТ) отражают локальную структуру поля ветра, обладающую значительной пространственной изменчивостью в районе со столь неоднородной подстилающей поверхностью. В связи

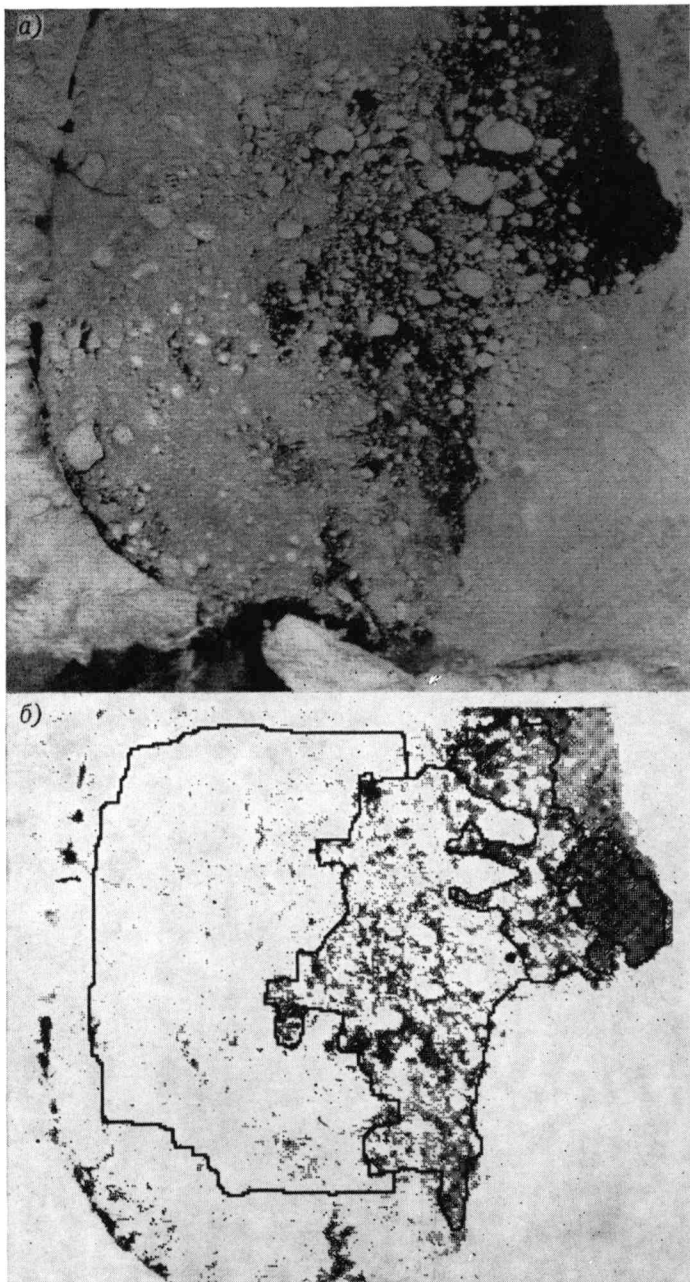


Рис. 9.6. Фрагмент исходного изображения ледовых полей (а) и результат автоматизированного определения зон льдов различной сплоченности (б).

с этим в некоторых случаях наблюдается несоответствие направлений ветровых теней преобладающему направлению ветра. Подобные космические изображения позволяют, таким образом, изучать детальную структуру поля ветра в отличие от метеорологических карт, дающих лишь общее направление ветровых потоков. Скорость ветра в периоды съемок составляла 5—7 м/с. Протяженность зон экранирующего влияния островов меняется от 20 до 80 км и связана, по-видимому,

с высотой рельефа островов над уровнем моря и шириной островов, что подтверждается неоднородной структурой ветровой тени о. Крит: наиболее протяженные и контрастные участки соответствуют наиболее возвышенным точкам острова, а разрывы между ними объясняются проникновением ветровых потоков через понижения в рельефе.

Видимые проявления внутренних волн на поверхности океана (перемежающиеся полосы с различной степенью шероховатости, наблюдающиеся при слабых и умеренных ветрах) могут быть вызваны двумя различными механизмами [28, 29], суть которых сводится к периодической модуляции коротковолновой составляющей ветрового волнения в поле течений, возбуждаемых последовательными внутренними волнами. Различные условия отражения в полосах создают контрасты в поле отраженной солнечной радиации, что и является физической основой дистанционной регистрации внутренних волн, успешно осуществлявшейся с борта космической лаборатории «Скайлэб» [27], ИСЗ «Лэндсат» [24, 28], самолетов [25]. Результаты многозональной съемки с космического корабля «Союз-22», орбитальной станции «Салют-6» и изображения с ИСЗ «Метеор» [13] также подтверждают, что внутренние волны при определенных условиях наблюдаются на поверхности океана. Следы внутренних волн наиболее отчетливо проявляются в зонах бликов, причем имеет место смена знака контраста полос относительно фона при перемещении от центра блика к его границам. В ряде работ космические изображения использованы для исследования внутренних волн.

В работах [24, 25, 32] сделан ряд выводов об основных параметрах и причинах генерации наблюдаемых из космоса внутренних волн вблизи атлантического побережья США, восточного и западного побережий Африки, в Мексиканском заливе и Карибском море. Эти исследования касаются преимущественно внутренних волн в океане и окраинных морях, генерация которых связана с взаимодействием между приливной волной и неровностями дна. Значительно реже встречаются сообщения о регистрации следов внутренних волн в закрытых морях, где их происхождение не связано с приливами, а обусловлено иными, не периодическими причинами. В этом плане значительный интерес представляет изображение, полученное 1 июля 1980 г. со сканера МСУ-С «Метеор» (рис. 9.9) [13]. На нем наблюдается сложная картина следов внутренних волн в центральной части Средиземного моря, в районе о-вов Критской дуги. Внутренние волны зарегистрированы на изображениях в обоих каналах, но более четкая картина имеет место в ближнем ИК диапазоне (0,7—1,1 мкм).

Интерпретация наблюдаемых явлений и гидрометеорологическая обстановка схематически представлены на рис. 9.10. Судя по изгибу полос в наиболее удаленной от островов части, здесь наблюдается распространение последовательных внутренних волн с юго-востока, из центральной части Средиземного моря в направлении о-вов Критской дуги. Отсутствие в этой части моря сильных приливных течений, а также тот факт,

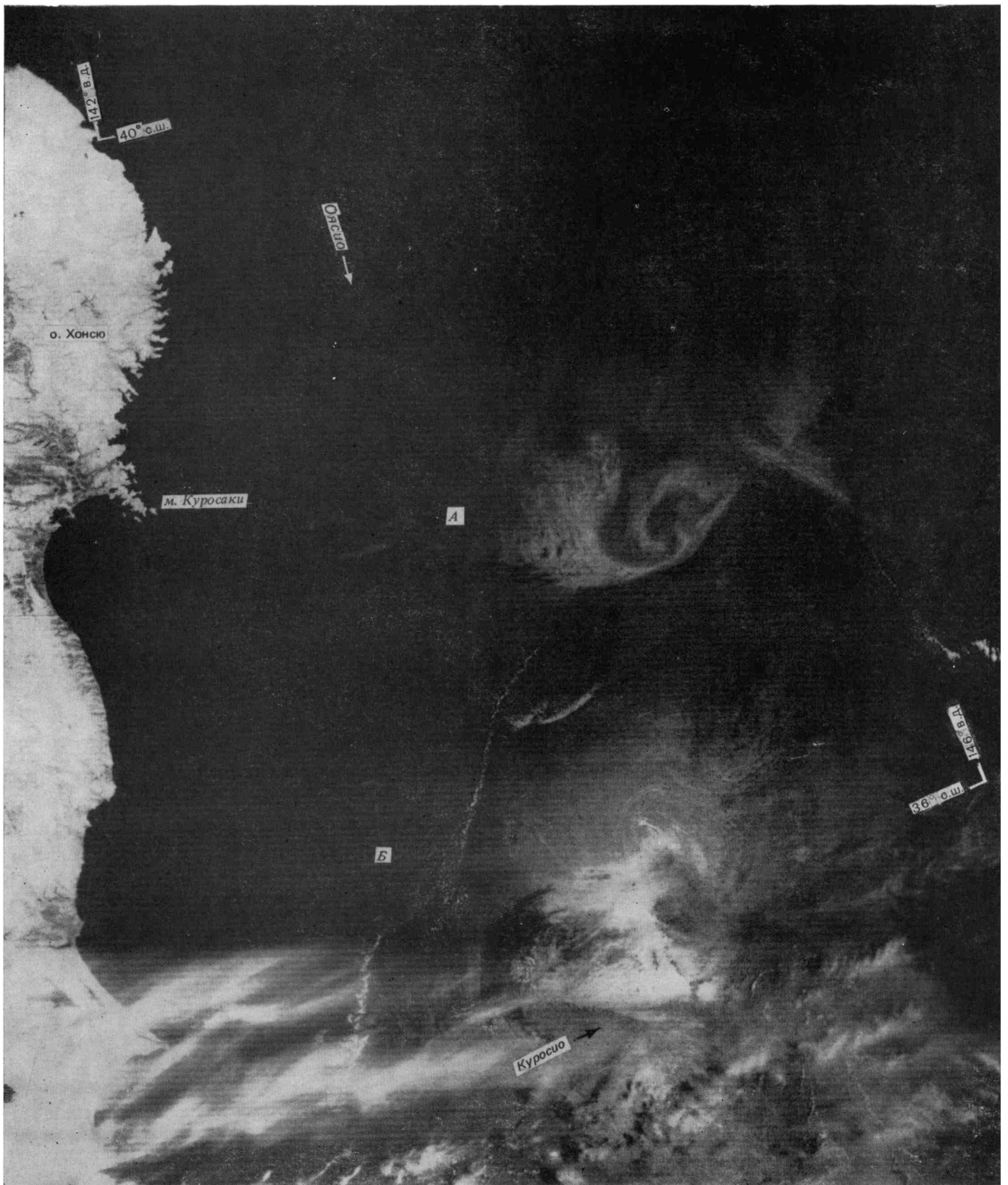


Рис. 9.7. Изображение участка поверхности Тихого океана к востоку от о. Хонсю, полученное 6 июня 1980 г. со сканера МСУ-С (ИСЗ «Метеор», диапазон 0,7—1,1 мкм, виток 7369, высота съемки 603 км, высота Солнца 58—60°).

что большая часть наблюдаемых волн расположена над глубинами свыше 2000 м, свидетельствует о том, что в данном случае их генерация не связана с взаимодействием между приливным потоком и неоднородностями дна. В отличие от океанского шельфа, где внутренние волны распространяются в виде пакетов шириной 3—5 км,

расположенных на расстоянии 15—30 км друг от друга (результат периодичности приливной волны)



Рис. 9.8. Изображение участка поверхности Средиземного моря, полученное 26 июня 1980 г. со сканера МСУ-С (ИСЗ «Метеор», диапазон 0,5—0,7 мкм, виток 121, высота съемки 667 км, высота Солнца 61—65°).

вует о том, что в данном случае их генерация не связана с взаимодействием между приливным потоком и неоднородностями дна. В отличие от океанского шельфа, где внутренние волны распространяются в виде пакетов шириной 3—5 км,

[24, 25], в рассматриваемом районе мы наблюдаем не отдельные пакеты, а поле следов внутренних волн шириной до 250 км (от Родосского пролива до пролива Касос), простирающееся на 100—150 км в юго-восточном направлении в открытую

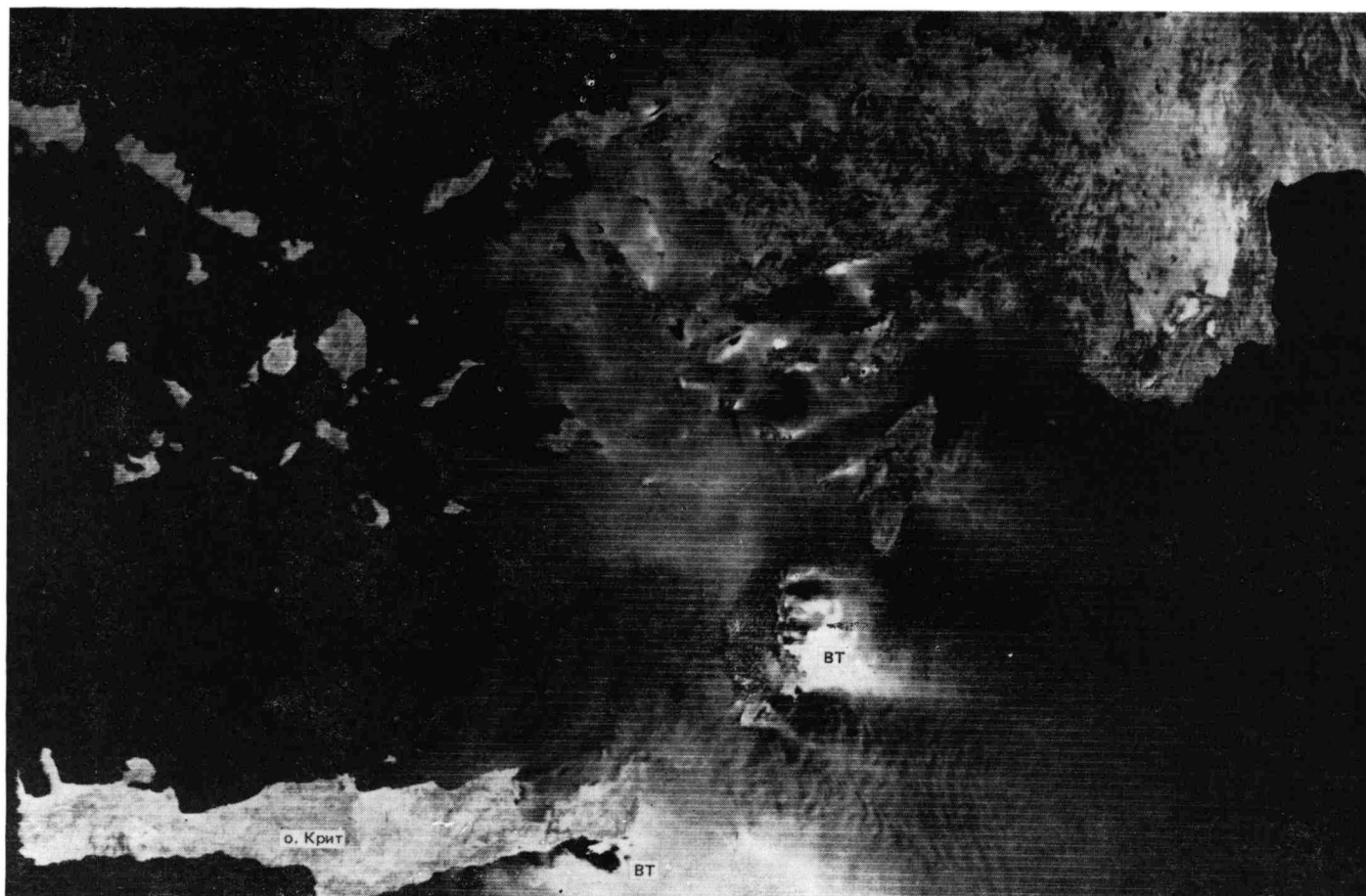


Рис. 9.9. Изображение района о-вов Критской дуги (Средиземное море), полученное 1 июля 1980 г. со сканера МСУ-С (ИСЗ «Метеор», диапазон 0,7—1,1 мкм, виток 195, высота съемки 667 км, высота Солнца 62°).

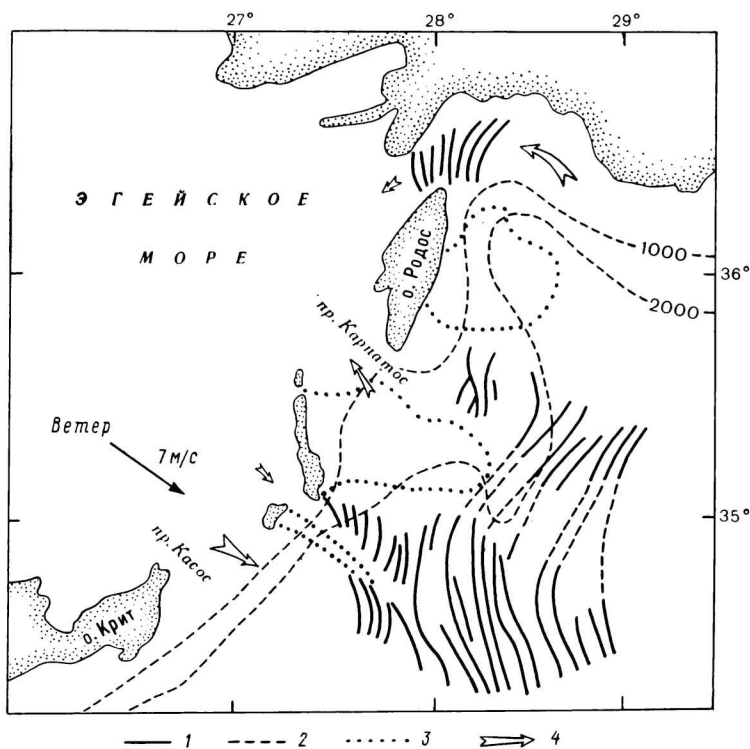


Рис. 9.10. Интерпретация явлений, наблюдаемых на изображении, полученном 1 июля 1980 г.

1 — положение следов внутренних волн, 2 — изобаты, 3 — границы «ветровых теней», 4 — направление течений в проливах.

часть моря. Длины волн составляют 5—6 км в наиболее удаленной от островов области и уменьшаются до 2—2,5 км по мере приближения к островам, что может быть связано с уменьшением глубин вблизи островов. В Родосском проливе внутренние волны имеют длину около 3 км.

На рассматриваемом изображении наблюдается интересный пример изменения формы следов внутренних волн под действием поверхностного течения, направленного из пролива Касос в море Леванта, существование которого подтверждается как средними многолетними гидрологическими данными о направлении ветра в период съемки. На изображении отчетливо видно, что в зоне действия потока, направленного навстречу распространению внутренних волн, полосы выпуклостью обращены в сторону направления течения в отличие от тыловой части поля волн, где следы внутренних волн изогнуты в направлении их распространения, т. е. противоположно течению. Вдоль границы течения, которую можно определить по границе области экранирующего влияния о. Касос (светлая полоса, тянущаяся от острова с его подветренной стороны), происходит сгущение следов внутренних волн, т. е. уменьшение их длин. В центральной части пролива Касос, где скорость встречного потока максимальна, полосы теряют свою упорядоченную структуру и можно предпо-

лагать, что здесь находится область диссипации внутренних волн.

#### 9.4. Исследование водных масс с различными оптическими характеристиками. Определение полей планктона и взвесей

Рассмотренные выше примеры океанографической интерпретации изображений, полученных с ИСЗ «Метеор», содержали анализ явлений на морской поверхности, которые обусловили контрасты яркости, связанные с изменением отраженной солнечной радиации. Яркостные контрасты на спутниковых изображениях океанов и морей могут зависеть также от концентрации в воде оптически активных веществ, влияющей на спектральный состав потоков восходящего излучения в видимой и ближней ИК областях спектра. При этом пространственно-временные изменения спектральной яркости излучения, выходящего из воды, могут быть интерпретированы как изменения содержания в верхнем слое воды взвешенных либо растворенных частиц минерального или органического происхождения. Как уже отмечалось, при прохождении потока излучения из воды через атмосферу его спектральный состав изменяется настолько, что в ряде случаев информация о водной среде теряется полностью. Однако при значительном различии оптических свойств соседних водных масс и благоприятных атмосферных условиях многозональные изображения внутренних морей, поступающие с ИСЗ «Метеор», представляют определенный интерес как для изучения динамики водных масс по оптическим трассерам, так и для исследования самих полей взвешенных веществ.

Обратимся для примера к проблеме изучения структуры течений в Черном море. Наибольший интерес, в связи с крайне слабой изученностью, представляет вопрос о вихреобразовании в зоне основного черноморского течения, затронутый непосредственно только в работах [1, 4]. Основное черноморское течение проходит вдоль берегов сравнительно узкой полосой, шириной 20—30 миль, со средней скоростью около 0,5 м/с. Согласно [4], главный поток в Черном море можно условно рассматривать как аналог струйных течений в океане и следует ожидать проявления сходных процессов вихреобразования. Анализ изображений, полученных с ИСЗ «Метеор» [12], свидетельствует о том, что вихревые образования, действительно, достаточно часто наблюдаются на поверхности моря, расположены преимущественно в зоне основного потока и характеризуются крайне сложной структурой.

Примером сложной динамической структуры в зоне основного течения в юго-западной части моря служит изображение, полученное 5 июня 1981 г. (рис. 9.11). Вдоль западного побережья прослеживается зона вод повышенной мутности (результат влияния стока Дуная), увлекаемых в юго-западном направлении Румелийским течением. В данном случае причиной «видимости» является различная мутность, а не вариации коэффициента отражения в блике, о чем свидетельствует отсутствие каких-либо контрастов на изображении в диапазоне 0,7—1,1 мкм (в случае блика максимальные контрасты следовало бы ожидать

именно в этом канале). Важно отметить, что взаимопроникновение мутных (светло-серый тон изображения) вод и прозрачных вод открытой части моря (более темный тон) в данном случае

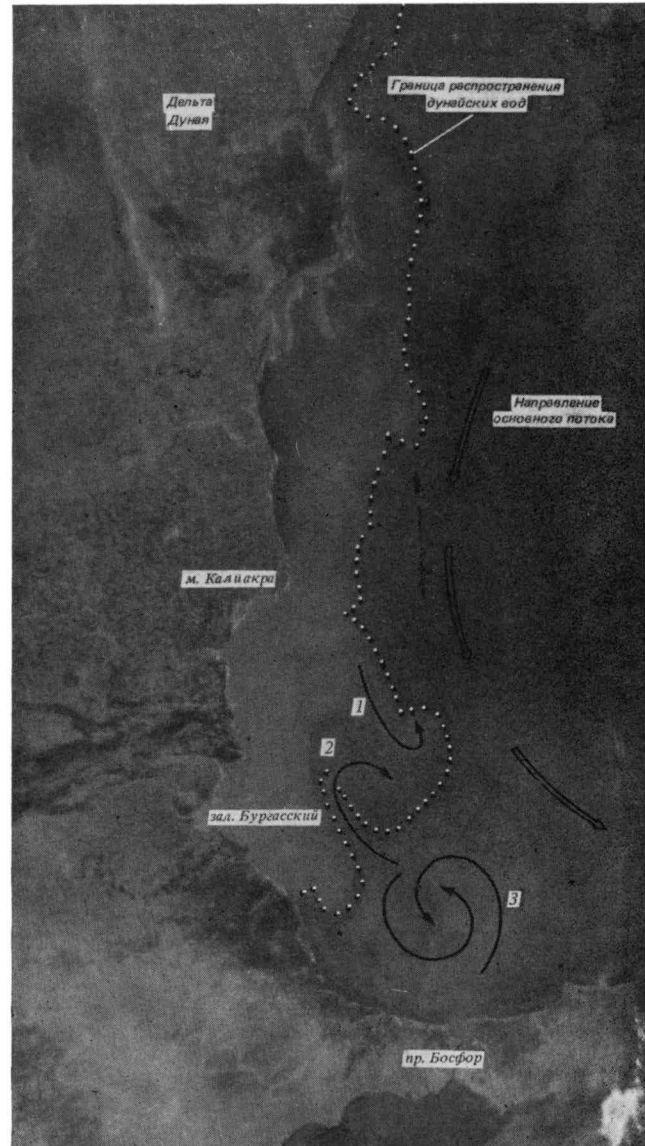


Рис. 9.11. Изображение юго-западной части Черного моря, полученное 5 июня 1981 г. со сканером МСУ-С (ИСЗ «Метеор», диапазон 0,5—0,7 мкм, виток 5222, высота съемки 651 км, высота Солнца 60—66°).

*a* — граница распространения дунайских вод, *b* — направление основного потока.

визуализирует и вихревые образования. На восточной границе замутненных вод наблюдается циклонический вихрь 1, находящийся, по-видимому, в начальной стадии развития. Юго-западнее расположен антициклонический вихрь 2, образованный вторжением воды из открытой части моря. Размер обоих вихрей около 35 км. Система циркуляции, образованная двумя вихрями, расположена над склоном дна, к которому также приурочен стержень Румелийского течения. К северу от пролива Босфор, примерно в 70 км от берега, прослеживается еще один крупный циклонический вихрь 3, выраженный на изображении значительно слабее. Сравнение рис. 9.11 с изображением, полученным спустя три дня (рис. 9.12 а)

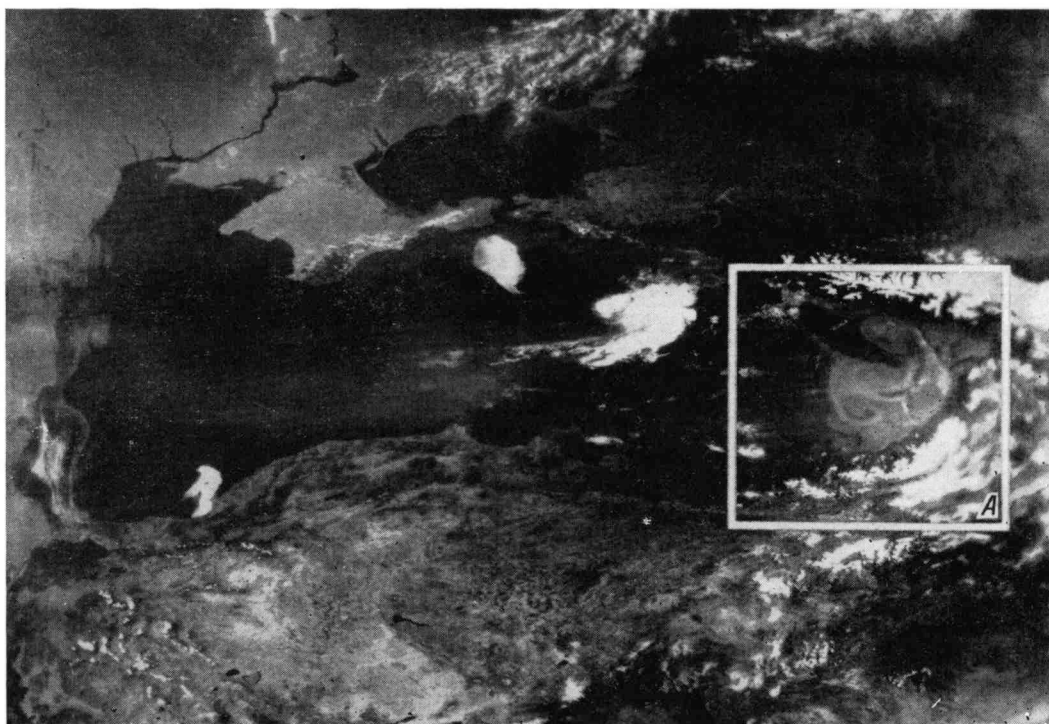


Рис. 9.12а. Изображение Черного моря, полученное 8 июня 1981 г. со сканера МСУ-М (ИСЗ «Метеор», диапазон 0,5—0,6 мкм, виток 5266, высота съемки 648 км, высота Солнца 58—68°).



Рис. 9.12б. Увеличенный фрагмент А изображения, полученного 8 июня 1981 г.



позволяет проследить процесс трансформации циркуляционной структуры:

1) произошло обострение границы между прибрежной («мутной») водной массой и водами открытой части моря (светло-серая полоса, тянущаяся от  $41^\circ$  до  $42^\circ 20'$  с. ш.);

2) горизонтальный размер вихря 2 увеличился в меридиональном направлении до 60—70 км;

3) более отчетливо выразилась северная часть вихря 2, образованная прозрачными водами центральной части моря, вовлеченными в антициклоническую циркуляцию;

4) существенно изменилась структура вихря 1 и образовалась полоса мутной воды, протянувшаяся в северо-восточном направлении в открытую часть моря на 40—50 км;

5) отчетливо выразилась антициклоническая структура между мысом Калиакра и дельтой Дуная, на расстоянии 60 км от берега.

Следует отметить, что рассмотренное динамическое образование аналогичным образом выражено и в поле температуры, что подтверждается сравнением космического изображения с ИК данными ИСЗ НОАА-6 за 7 июня 1981 г.

На изображении, полученном 8 июня 1981 г., наблюдается также сложная система вихревых образований в юго-восточной части моря (рис. 9.12 б фрагмент А). Известно, что в этом районе существует локальный антициклонический круговорот, являющийся сложным динамическим образованием со значительной пространственно-временной изменчивостью [5, 9, 21]. Однако космическое изображение указывает на то, что реальная структура течений может существенно отличаться от известных осредненных схем циркуляции. В первую очередь привлекает внимание система крупных вихревых образований 1, распространяющаяся как единое целое в северо-западном направлении в открытую часть моря. Она состоит из пары крупных вихрей: антициклонического, размерами  $80 \times 60$  км, и циклонического размерами  $70 \times 50$  км. Вблизи побережья Кавказа, в районе мыса Саук-Су, наблюдается вихревое образование 2, генерация которого связана, предположительно, с взаимодействием течения, направленного вдоль берега, с неоднородностью рельефа дна в районе м. Саук-Су. Этот вихрь имеет эллипсовидную форму и размеры  $60 \times 40$  км. Течение, направленное вдоль берега, также прослеживается на изображении в виде полосы замутненных вод шириной 10—20 км. Значительно южнее, между вихревой системой 1 и береговой чертой, расположена меньшая по масштабу вихревая система 3, состоящая из двух завихрений противоположного знака. Горизонтальный размер этих небольших вихрей около 10 км.

Таким образом, изучение изображений водных масс с различными оптическими характеристиками (в данном случае, зон взаимодействия мутных речных вод, содержащих взвешенные минеральные вещества, с чистыми морскими водами) позволяет весьма эффективно выявлять особенности динамики течений в этих зонах. Изображения, полученные с ИСЗ «Метеор», содержат также ценную информацию о пространственно-временной изменчивости зон распространения вод материкового стока, которая может быть использована,

в частности, для исследования переноса примесей (в том числе загрязнений), вносимых реками. Для примера представлены космические изображения, на которых хорошо видны области распространения вод Дуная (см. рис. 9.11), р. Чорох и других небольших рек Кавказа (см. рис. 9.12) в Черное море и р. Куры в Каспийское море (см. рис. 9.13 на вкладке).

В целом проблема использования спутниковых данных для исследования водных масс с различными оптическими характеристиками может рассматриваться в виде совокупности отдельных задач:

1. Определение факта наличия в водах изучаемого района какого-либо заранее известного вещества. Примером является изучение сезонного «цветения планктона».

2. Определение площади акватории с повышенным содержанием какого-либо оптически-активного вещества. В качестве примера можно отметить распространение мутных потоков вод горных рек, существенно отличающихся в сухую погоду и в период обильных дождей.

3. Определение типа вещества, содержащегося в аномальной водной массе (песок, глина, ил, планктон и др.).

4. Оценка коцентрации взвешенных (растворенных) веществ в задачах 1 и 3.

Перечисленные задачи приведены в порядке методического усложнения их решения, для которого требуется существенно различный объем спутниковой и подспутниковой информации.

Согласно теории распознавания, задача выделения на многозональных спутниковых изображениях водной поверхности различных участков по спектральным признакам сводится к выработке критериев, по которым каждый элемент (или группа элементов) изображения относится к одному из классов, описываемых определенным набором признаков. Признаки класса могут задаваться априори либо формироваться в процессе обучения («распознавание с обучением») по той же информации (или ее части), которая подлежит распознаванию.

При решении задач классификации в общем случае могут использоваться два подхода:

1) распознавание с использованием априорных сведений о наборе тестовых участков, соответствующих интересующим интерпретатора классам объекта, с их описанием по наземным или другим данным, включающим как границы тестовых участков на изображении, так и их характеристики;

2) распознавание при отсутствии априорных данных (на снимке нет областей с тестовыми участками, либо информация об их характеристиках не поступила к моменту интерпретации).

При этом возможно перекрытие первого и второго типа ситуаций, а именно, когда тестовые участки не соответствуют всем интересующим интерпретатора классам, т. е. интерпретатор знает, что на снимке находится или может находиться  $K$  классов, но к моменту проведения тематической обработки информации интерпретатор имеет в своем распоряжении описание только  $M$  классов (причем,  $M < K$ ).

Особенно характерна такая постановка задачи именно для контроля физико-химического состава

природных вод, так как исследуемые параметры могут быть подвергнуты большой изменчивости как вследствие особенностей хозяйственной деятельности человека, так и вследствие особенностей метеорологической обстановки. При этом нужно учитывать, во-первых, что для проведения отбора проб в ряде дискретных точек водоема и их анализа традиционными методами требуется большой промежуток времени (2—3, а нередко 7—10 дней), и во-вторых, что взятие проб в отдельных точках вряд ли может обеспечить априорной информацией описание всех классов однородных водных масс на

синтезирования на устройстве МСП-4 изображений с ИСЗ «Метеор» — прозрачных негативов в каналах 0,5—0,7 мкм и 0,7—1,1 мкм и прозрачного позитива в канале 0,5—0,7 мкм (сканер МСУ-С).

Используя инструментально-визуальный метод выделения участков изображения водной поверхности с разной оптической плотностью на схеме рис. 9.14 удалось выделить четыре градации содержания взвешенных частиц: относительно чистая вода, малая, средняя и большая концентрация. Достоверность этих результатов интерпретации спутниковых изображений подтверждается мате-

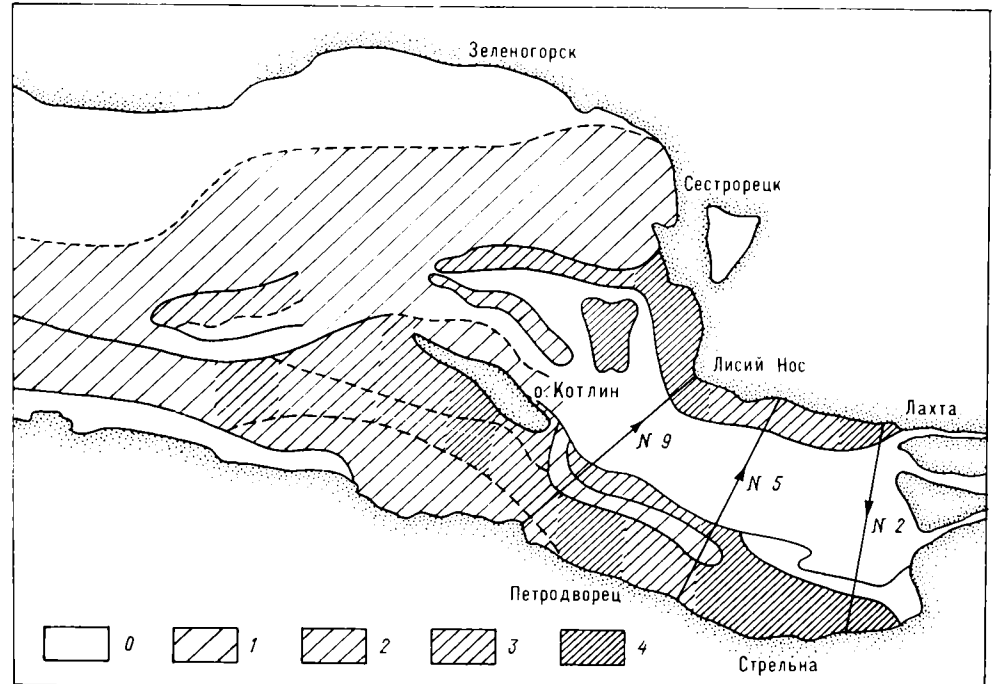


Рис. 9.16. Схема распределения зон с различным содержанием взвешенных частиц грунта (от 0 до 4 баллов) в восточной части Финского залива (по результатам визуальных авианаблюдений, выполненных 28 сентября 1982 г.). На схеме обозначены авиационные галсы № 2, 5, 9.

конкретный момент получения космической информации. В связи с этим возникает другая целевая функция тематической обработки информации о водной поверхности, а именно: в отсутствие априорной информации классификация объектов наблюдения с целью выделения на многозональном изображении однородных зон и выдача целеуказаний судам на отбор проб в каждой из выделенных зон как для подтверждения правильности проведенной классификации, так и для пояснения полученной карты тематическим описанием каждого выделяемого класса.

В зависимости от состава и особенностей имеющейся спутниковой информации, объема данных подспутниковых измерений, размеров исследуемой акватории и других обстоятельств при определении и изучении зон с различным содержанием взвешенных веществ могут быть реализованы различные подходы.

Рассмотрим пример интерпретации спутникового изображения водных масс с различными оптическими характеристиками при наличии значительного объема подспутниковой опорой информации. Схема распределения зон с различным содержанием взвешенных частиц грунта в восточной части Финского залива Балтийского моря (рис. 9.14, 9.15 на вкладке) получена в результате

риалами визуальных авианаблюдений и инструментальных определений яркости водной поверхности, выполненных сотрудниками Ленинградского отделения Государственного океанографического института с самолета ИЛ-14 (рис. 9.16). Следует отметить, что за время, прошедшее от момента съемки с ИСЗ до периода производства авианаблюдений (около суток), метеорологические условия в этом районе изменились незначительно.

Выделенные на рис. 9.14—9.16 зоны с повышенным содержанием взвешенных частиц вдоль северного и южного берегов восточной части Финского залива, наблюдаются в течение всего навигационного периода и обусловлены, главным образом, намывом грунта, проводимым на протяжении нескольких лет в районе Лахтинской отмели. По данным контактных судовых измерений концентрации цестона, выполненных Государственным гидрологическим институтом, примерно 90% взвешенных материалов составляют минеральные частицы. На кривых относительной яркости водной поверхности (рис. 9.17) отчетливо выделяются зоны чистой воды (а) и зоны с разным содержанием взвешенных веществ (б, в), соответствующие различным значениям яркости, поскольку наличие в воде взвешенных частиц минерального происхождения приводит к возрастанию яркости за счет увеличе-

ния рассеяния солнечного света в толще воды. Совместный анализ спутниковых изображений, данных авианаблюдений и контактных измерений позволяет заключить, что в рассматриваемом районе при благоприятных атмосферных условиях по информации со сканера МСУ-С ИСЗ «Метеор» можно исследовать зоны повышенного содержания взвешенных частиц минерального происхождения при их концентрации, превышающей 20—30 мг/л.

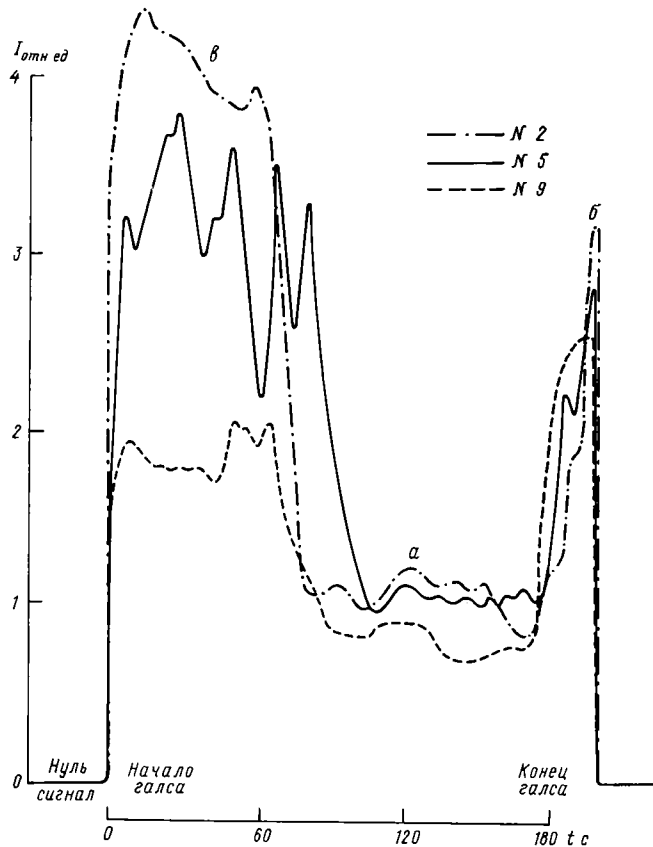


Рис. 9.17. Примеры инструментального определения яркости водной поверхности на галсах № 2, 5, 9. Длина волны 694 нм. а — чистая вода, б, в — вода с различным содержанием взвешенных веществ.

Интересно отметить, что по результатам спектрофотометрирования с самолета может быть выделено свыше десяти градаций яркости, соответствующих разному содержанию взвешенных веществ, что принципиально позволяет исследовать тонкую структуру зон взмученных вод. При съемке с ИСЗ вследствие эффектов генерализации и влияния атмосферы мелкомасштабные неоднородности и незначительные контрасты на водной поверхности не регистрируются. Так, если на изображении рассматриваемого района, полученного с МСУ-С, можно выделить четыре зоны неоднородностей, то на изображении с МСУ-М (рис. 9.18) уверенно выделяется лишь одна общая зона повышенного содержания взвешенных частиц (заштрихована). Однако с учетом разницы в пространственном разрешении обоих сканеров (240 м и 1000 м соответственно) характерные особенности (контуры) зоны сохраняются.

Примером другого подхода к интерпретации спутниковых изображений водных масс с различными оптическими характеристиками при существенно меньшем объеме опорной информации

(и при отсутствии синхронных контактных измерений содержания взвешенных частиц) является численный эксперимент по классификации серии изображений Азовского моря.

Целью численного эксперимента явилось определение возможности выделения на многозональных изображениях Азовского моря однородных областей и их идентификации с основными зонами развития фитопланктона в различные сроки, наиболее характерные с точки зрения изменчивости биомассы фитопланктона. В эксперименте использовалась серия изображений, полученных с ИСЗ

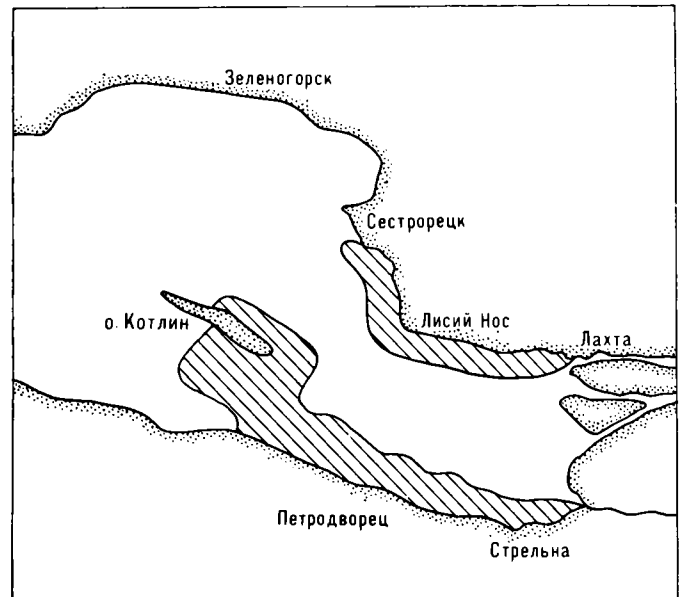


Рис. 9.18. Схема зоны с повышенным содержанием взвешенных частиц грунта (заштрихована) в восточной части Финского залива (по результатам интерпретации изображений, полученных 16 июля 1982 г. со сканера МСУ-М ИСЗ «Метеор», каналы 0,5—0,6 мкм, 0,6—0,7 мкм и 0,8—1,1 мкм).

«Метеор» 13 июля 1978 г. (В-5601), 18 августа 1978 г. (виток 6134), 4 сентября 1977 г. (виток 984) и 10 сентября 1976 г. (виток 1658).

Данная информация для проведения обработки была выбрана по двум причинам. Во-первых, на выбранных снимках в районе Азовского моря отсутствовала облачность, были относительно одинаковые условия освещенности и, кроме того отсутствовали эффекты, связанные с автоматической регулировкой усиления, и потому не было необходимости в проведении радиометрической коррекции для выбранного небольшого фрагмента всего изображения. Во-вторых, данные наземных гидрохимических измерений биомассы фитопланктона на Азовском море показывают, что этот параметр имеет существенную сезонную изменчивость: от 50—70 мг/м<sup>3</sup> в июне увеличивается до 2500—2800 мг/м<sup>3</sup> в августе и затем уменьшается до 1000—1700 мг/м<sup>3</sup> в октябре. Причем эти данные не имеют стабильного характера «подъем—спад». Так, в 1978 г. биомасса фитопланктона с июня до октября увеличивалась во всех районах Азовского моря.

На первом этапе работ производилось выделение «области интереса» — исследуемого объекта, в данном случае Азовского моря, от остальной части имеющегося изображения. Разделение информации на изображении по принципу вода—суша проводи-

лось по данным измерений в диапазоне 0,8—1,1 мкм с использованием процедуры порогового отсеечения, при этом пороговые значения в каждом конкретном

ции (на 6 классов) трех изображений (соответственно витки № 5601, 6134, 984), полученных в период июль — сентябрь.

Для оценки полученных карт кластерного анализа использовались осредненные данные о распределении биомассы фитопланктона по районам Азовского моря, показанным на рис. 9.20. В табл. 9.2 приведены данные судовых измерений за июнь—октябрь 1977 и 1978 гг. по соответствующим районам. Приведенная на рис. 9.19 а карта классификации соответствует снимку, полученному 13 июля 1978 г.

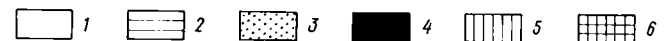
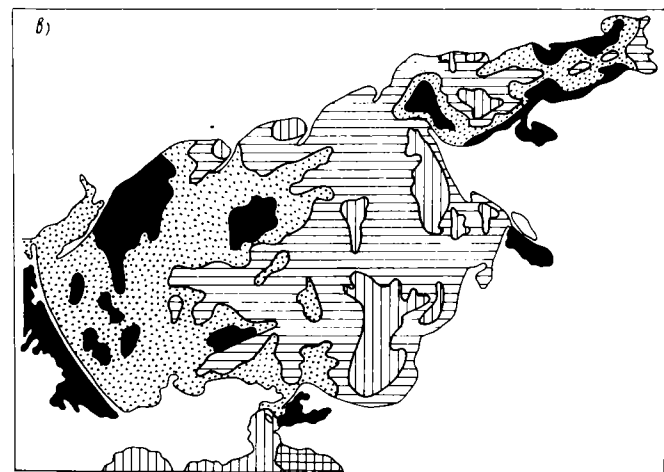
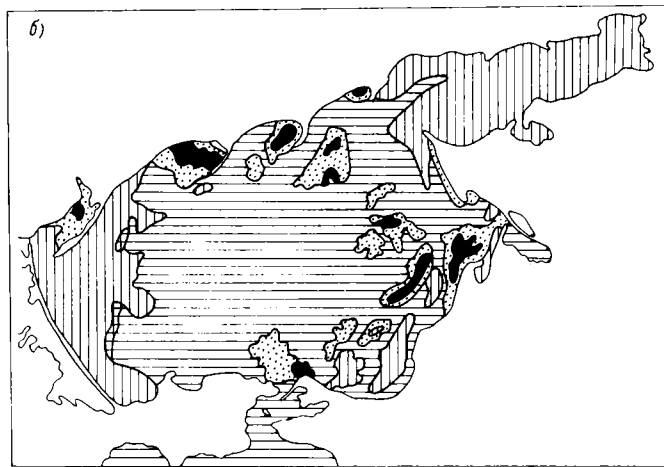
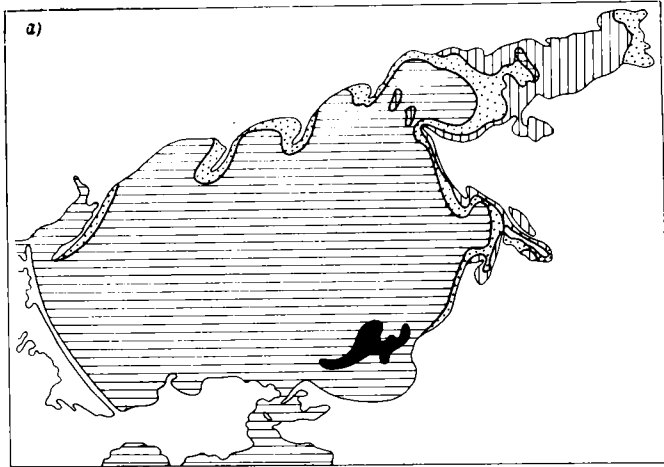


Рис. 9.19. Кластерный анализ (шесть классов) многозонального изображения Азовского моря, полученного со сканера МСУ-М ИСЗ «Метеор».

а — виток 5601, б — виток 6134, в — виток 984.

случае определялись специалистом-интерпретатором в диалоговом режиме.

На втором этапе проводился собственно кластерный анализ многозональной видеoinформации по выделенной на первом этапе «области интереса». На рис. 9.19 представлены результаты классифика-

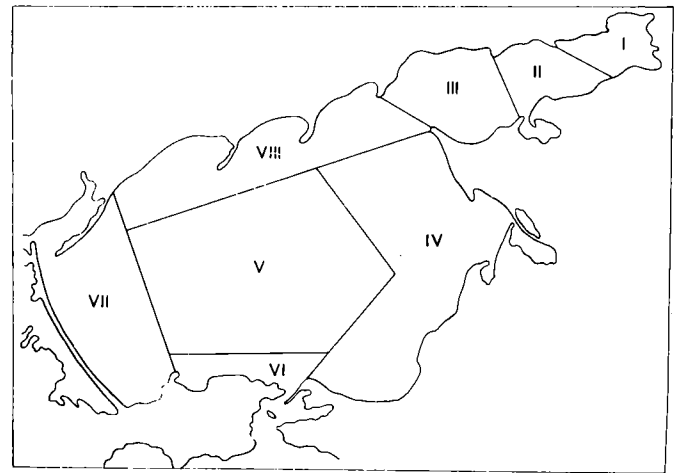


Рис. 9.20. Схема условного районирования Азовского моря.

Наличие на изображении части Черного моря, как и на всех последующих снимках, позволяет провести сопоставительный анализ состояния вод Черного и Азовского морей. Известно, что в отличие от Азовского моря, Черное море не «цветет». Так как на рис. 9.19 а Черное море и большая часть Азовского моря отнесены к одному классу, то можно предполагать, что цветение отсутствует в большей части Азовского моря в указанный срок наблюдения. Это подтверждается и осредненными данными судовых измерений (см. табл. 9.2), так, в среднем за июнь (срок, близкий к сроку получения информации с ИСЗ) по районам IV—VIII биомасса фитопланктона колеблется в пределах 41—279 мг/м<sup>3</sup>. В то же время, согласно выполненной классификации, состояние вод в Таганрогском заливе (районы I и II по схеме рис. 9.20) отличается от остальных районов, а данные табл. 9.2 указывают на интенсив-

Таблица 9.2

Средние месячные значения биомассы фитопланктона по районам Азовского моря (мг/м<sup>3</sup>)

№ района	VI 1977	VIII 1977	X 1977	VI 1978	VIII 1978	X 1978
I				521	1878	1240
II				3734	1274	1694
III				108	225	1477
IV	70	575	332	41	341	719
V	70	2930	1080	54	744	1779
VI	302	965	771	52	225	739
VII	79	1434	548	279	151	334
VIII	64	830	280	61	738	201

ное цветение вод в Таганрогском заливе (биомасса фитопланктона достигает величин  $3734 \text{ мг/м}^3$  для района II). В районе VII также присутствует данный класс, что находится в соответствии с данными табл. 9.2 (биомасса в районе VII составляет  $279 \text{ мг/м}^3$ , в отличие от значений 41—61 для районов IV—VIII).

Из табл. 9.2 видно, что биомасса фитопланктона через месяц, к 18 августа 1978 г., в районе I увеличилась, в районе II уменьшилась, в районе III увеличилась значительно и по всем остальным районам в различных пределах также увеличилась. Эти данные хорошо подтверждают результаты классификации, показанные на рис. 9.19 б, так интенсивно увеличилась биомасса в районе VIII (от 61 до  $738 \text{ мг/м}^3$ ), что отчетливо видно на рис. 9.19 б.

Согласно классификации, в сентябре 1977 г. (рис. 9.19 в) большая часть Азовского моря цветет, в то же время имеются и районы чистой воды, так как на изображении Азовского моря часть элементов отнесена к тому же классу, что и воды Черного моря. Данные табл. 9.2 за август 1977 г. подтверждают, что в период, близкий к дате получения информации с ИСЗ «Метеор», биомасса фитопланктона в районе I была значительно меньше ( $575 \text{ мг/м}^3$ ), чем в районах V ( $2940 \text{ мг/м}^3$ ), VII ( $1434 \text{ мг/м}^3$ ), VI ( $985 \text{ мг/м}^3$ ) и VIII ( $830 \text{ мг/м}^3$ ). К сожалению, фактические данные о результатах измерений на станциях в период проведения съемок с ИСЗ отсутствовали, средние же данные по районам лишь подтверждают наличие в районах Азовского моря зон с различной биомассой фитопланктона, но не позволяют каждому выделенному классу дать соответствующие количественные характеристики биомассы фитопланктона.

Результаты кластерного анализа изображений Азовского моря (рис. 9.21) подтвердили предположение о том, что даже при отсутствии априорных данных можно производить тематическую обработку многозональной космической видеоинформации с использованием алгоритмов кластерного анализа с последующей поэлементной классификацией в диалоговом режиме взаимодействия «океанолог—ЭВМ», когда оператор-океанолог по отображению результатов классификации на экране дисплея может принимать разумное решение о количестве классов.

Результаты численного эксперимента говорят о том, что изучение загрязненных природных вод по данным дистанционного зондирования может быть основано на распознавании без обучения (кластерная классификация) и дополнено параметрическим описанием уже выделенных однородных подмножеств изображения. При этом соответствующее описание может быть выполнено по апостериорным данным об измеренных параметрах. Проведенные численные эксперименты по обработке многозональной космической видеоинформации, поступающей по радиоканалам с ИСЗ «Метеор», показали, что предложенный способ может быть успешно использован при обработке оперативной информации в реальном масштабе времени, а полученные на основе кластерной классификации карты могут быть использованы для обоснованного выбора оптимального расположения точек, в которых необходимо в реальном масштабе времени, а полученные на основе судовые контактные измерения для пол-

ного описания всех выделенных состояний природных вод.

Приведенные выше примеры использования многозональной информации с ИСЗ «Метеор» для изучения водных масс с различными оптическими характеристиками показывают, что данные сканеров МСУ-М и МСУ-С дают возможность выделять

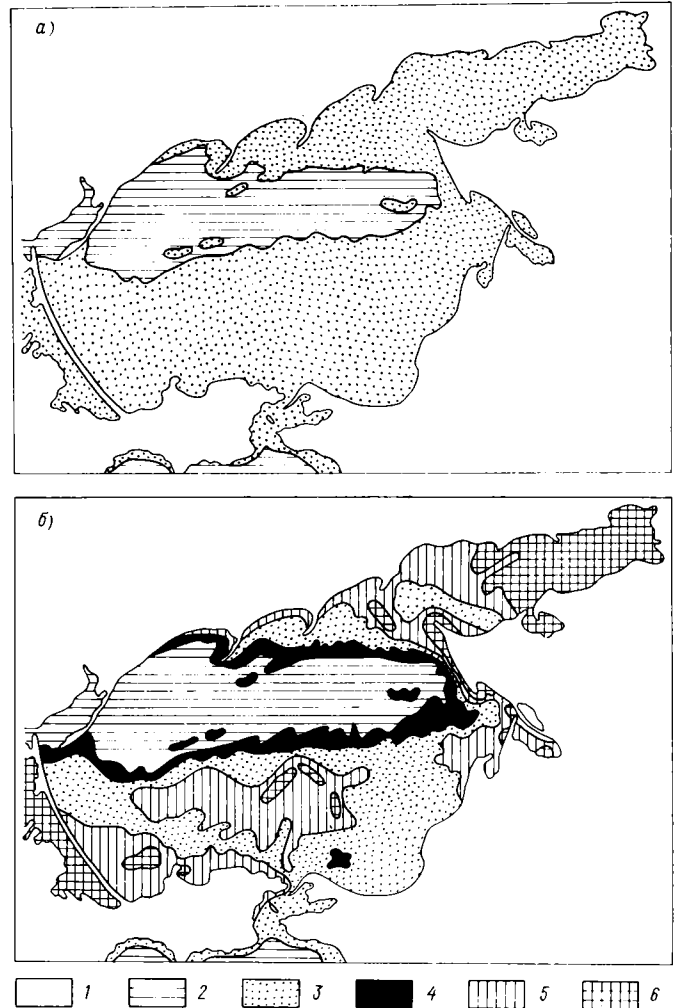


Рис. 9.21. Кластерный анализ многозонального изображения Азовского моря, полученного со сканера МСУ-М ИСЗ «Метеор» 10 сентября 1976 г. Виток 1658.

а — три класса, б — шесть классов.

зоны с повышенным содержанием взвешенных веществ органического (планктон) и неорганического происхождения. При наличии дополнительных опорных контактных измерений концентрации этих веществ в отдельных точках акваторий, по спутниковой информации можно дать оценки содержания взвешенных веществ в исследуемых водных массах. Однако переход к количественным оценкам содержания минеральной и органической взвеси в водной среде только по спутниковым данным возможен лишь при наличии метрической информации в более узких и соответствующим образом подобранных спектральных интервалах.

### 9.5. Использование в региональных океанографических исследованиях спутниковых цифровых карт температуры поверхности воды

В настоящее время определение температуры поверхности морей по измерениям собственного излучения морской поверхности в ИК диапазоне является одним из наиболее развитых методов космической океанографии. Анализ спутниковых изображений морской поверхности в ИК диапазоне позволяет даже в отсутствие высокой абсолютной точности измерений радиационной температуры воды наблюдать за положением и эволюцией термических фронтов в океане [20]. Важное место занимает изучение пространственно-временной изменчивости температуры поверхности воды (ТПВ) в исследованиях процессов взаимодействия океана и атмосферы.

Температура поверхности морей и океанов является одной из главных физических характеристик состояния границы раздела океан—атмосфера, определяющих интенсивность динамических процессов в толще океана и влияющих на атмосферную циркуляцию. Знание поля ТПВ в конкретном регионе необходимо для расчета теплового баланса, прогноза погоды (в том числе долгосрочного), наблюдения за зонами вихреобразования, индикации положения гидрофронтов с последующим расчетом количественных характеристик (таких, как вектор скорости поверхностных течений), а также для обеспечения нужд навигации, рыбного промысла и т. п. Для решения большинства из этих задач региональной океанографии необходимо иметь карты ТПВ с пространственной дискретностью не более нескольких десятков километров и временным интервалом в одни сутки и менее. Точность таких карт должна быть не хуже 1 К.

Получить подобные карты до недавнего времени не представлялось возможным, имевшиеся климатические атласы и карты температуры поверхности морей основывались на стандартных контактных методах измерения температуры в поверхностном слое воды (ТПСВ), не позволявших получить карты ТПСВ значительных водных пространств с необходимой пространственной и временной дискретностью. Использование судовых данных о ТПСВ позволяло получать лишь средние характеристики водных масс.

С развитием спутниковых средств зондирования подстилающей поверхности, в частности, с появлением ИК радиометров, появилась возможность оперативно (в синоптические сроки) получать карты ТПВ любых регионов.

Первые спутниковые карты ТПВ показали, что поле ТПВ, полученное по результатам измерений с ИСЗ, отличается от поля ТПСВ, построенного по данным контактных наблюдений, значительно большей пространственно-временной изменчивостью. Причем изменчивость спутникового поля ТПВ объясняется не только вариациями теплофизических характеристик собственно водной поверхности, но также в значительной степени флуктуациями атмосферного ослабления ИК излучения, переменным полем облачности, непостоянной по акватории скоростью ветра в приводном слое, приборными шумами радиометра, а также шумами в канале

передачи информации и другими причинами. На сложность этих вопросов указывают многие авторы (см., например, [26, 33, 38, 39]).

Возникновение комплекса проблем, связанных с оценкой точности спутниковой информации ИК диапазона с исследованием ее достоверности, с опробованием алгоритмов фильтрации различных шумовых компонент сигнала, обусловило необходимость постановки и проведения специальных комплексных подспутниковых экспериментов по сбору соответствующей опорной информации (ТПСВ, ТПВ, температура и влажность воздуха, скорость ветра и пр.), получаемой с помощью различных технических носителей (самолеты, суда) синхронно (квазисинхронно) с измерениями на ИСЗ. Тщательный анализ результатов таких комплексных экспериментальных исследований может явиться основой для мотивированного заключения о степени пригодности того или иного вида спутниковой информации для использования в региональных океанографических исследованиях [38].

Рассмотрим некоторые результаты использования цифровых карт ТПВ при изучении Балтийского и Каспийского морей.

Материалы ИСЗ серии «Метеор-2» поступали в виде карт ТПВ, представляющих собой цифровую сетку данных с шагом около 20 км. В качестве материалов подспутникового сопровождения использовались авиационные карты ТПВ, полученные при помощи ИК радиометра МИР-3, установленного на самолете-лаборатории ИЛ-14, и данные контактных наблюдений разных видов. При построении спутниковых карт ТПВ по одной из методик в значения радиационной температуры включалась поправка на атмосферное ослабление ИК излучения, вычисленная по данным аэрологического зондирования на береговых станциях. С учетом этой поправки средняя температура центральной части Балтийского моря составила в конце мая 1978 г. по спутниковым данным 14,4 °С (измерения проводились в безоблачные дни), эта же величина по судовым данным оказалась равной 14,5 °С. По самолетным измерениям средняя величина ТПВ исследованного участка акватории была несколько выше (15,9 °С), это объясняется тем, что авиационные наблюдения проводились только в прибрежной зоне.

Анализ карт температуры, полученных с ИСЗ, самолета и судов, показал, что между ними нет статистически значимых различий в значениях средних квадратических отклонений. Так, по данным наблюдений, выполненных летом 1978 г., значение  $\sigma$  для участка акватории, исследованного с ИСЗ, самолета и судов, составило соответственно: 2,2; 1,5 и 2,5 К. Амплитуда измеренных значений температуры была примерно одинакова при наблюдениях как с ИСЗ, так и с самолета и судов и составляла в весенне-летний период 7—10 К. Расчет автокорреляционных функций поля ТПВ, полученного с ИСЗ и самолета, на океанографическом полигоне также дал близкие результаты (в том и в другом случае автокорреляционная функция представляла собой экспоненту с радиусом корреляции около 30 км), что позволило сделать вывод о подобии внутренней структуры полей ТПВ по спутниковым и авиационным данным и попытаться с достаточной правомочностью использовать полученную

спутниковую информацию для анализа пространственно-временной изменчивости поля ТПВ Балтийского моря.

Спутниковые карты ТПВ показали, что Балтийское море обладает сложной пространственной

структурой, характеризующейся высокими значениями горизонтальных градиентов ТПВ (5—8 К на 100 км), большим количеством тепловых «пятен», по-видимому, представляющих собой вихревые образования (вихревое происхождение таких «пятен» в прибрежной зоне было подтверждено синхронной аэрофотосъемкой течений и наблюдениями с научно-исследовательских судов). На рис. 9.22 приведен пример карты ТПВ Балтийского моря, построенной по данным ИСЗ «Метеор-2». Одновременно на поверхности моря, по данным ИСЗ, регистрируется до 80 таких пятен, диаметром 20—60 км. Холодные пятна или, по меньшей мере, часть из них, по-видимому, представляют собой циклонические вихри, обусловленные либо существующей схемой постоянных течений, либо выходом на поверхность глубинных вод вследствие обрушения внутренних волн на нижней кромке термоклина. Температура таких холодных вихрей по данным ИСЗ составила в летний период 9—12°C, а температура теплых вихрей 16—20°C. Вертикальная составляющая скорости в холодных вихрях направлена вверх, что приводит к образованию характерного купола холодных вод и стиранию вертикальных градиентов температуры. Часть же подобных явлений может быть объяснена с учетом природы изменчивости скин-слоя, обусловленной неравномерностью солнечной инсоляции, воздействием ветра и волнения. Следует отметить, что для более определенных суждений о природе «пятнистости» поля ТПВ необходим больший объем регулярных данных с ИСЗ, позволяющий проследить динамику тепловых неоднородностей, их генезис, стадии развития и разрушения, а также совокупность данных о гидрометеорологических параметрах атмосферы и приводного слоя.

Поскольку для Балтийского моря характерны высокие значения горизонтальных градиентов ТПВ, то данные ИСЗ можно использовать для оценки скорости поверхностных течений и расчета адвективной составляющей теплового баланса, исходя из уравнения термической адвекции.

Для расчета поля скорости поверхностных течений необходимо иметь три последовательные карты ТПВ с интервалом не более суток (чтобы можно было пренебречь турбулентным перемешиванием, поверхностным нагревом и пр.); поле скорости строится относительно средней карты.

Проведенный расчет показал, что порядок величин скорости поверхностного течения, определенных по спутниковым картам ТПВ и по данным синхронной аэрофотосъемки совпадает, направления вектора скорости, определенные по спутниковым и авиационным данным, находятся в пределах I квадранта.

Большой интерес в настоящее время представляет использование спутниковой ИК информации для расчета теплового баланса. При расчете составляющих теплового баланса по известным эмпирическим формулам большое значение имеет тот факт, какая температура воды подставляется в уравнение: ТПВ или ТПСВ. Так, сравнение составляющих теплового баланса, рассчитанных по синхронным измерениям судового ИК радиометра и ртутного термометра в оправе, дало расхождение в оценке величины турбулентного теплообмена на 30%, а в оценке потерь тепла за счет испарения — на 10%.

Применение спутниковой ИК информации для расчета теплового баланса предполагает наличие гидрометеорологической информации, получаемой по району работ с гидрометстанций, судов, океанографических платформ и пр.

В перспективе, по мере разработки спутниковых средств, позволяющих измерять метеорологические параметры приводного слоя воздуха, можно будет, наряду с картами ТПВ, оперативно выдавать карты теплового баланса поверхности моря.

Значительные трудности представляет в настоящее время дешифрирование спутниковых карт радиационной температуры для регионов, частично закрытых облачностью. В этом случае для построения карт ТПВ используется композиционный метод, при котором за основу берется карта, наименее искаженная облачностью (что определяется по фотоизображениям, получаемым с ИСЗ синхронно с картами ТПВ), и используются также данные

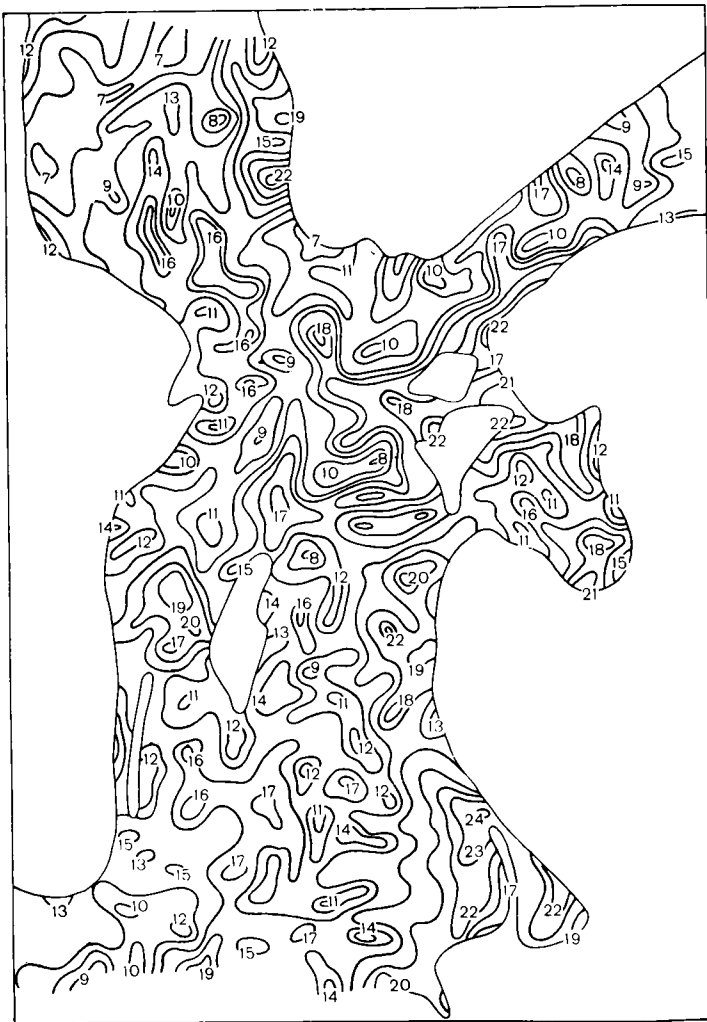


Рис. 9.22. Карта температуры (°C) поверхности Балтийского моря по данным ИК радиометра ИСЗ «Метеор» за 2 июня 1978 г.

термической структурой, характеризующейся высокими значениями горизонтальных градиентов ТПВ (5—8 К на 100 км), большим количеством тепловых «пятен», по-видимому, представляющих собой вихревые образования (вихревое происхождение таких «пятен» в прибрежной зоне было подтверждено синхронной аэрофотосъемкой течений и наблюдениями с научно-исследовательских судов). На рис. 9.22 приведен пример карты ТПВ Балтийского моря, построенной по данным ИСЗ «Метеор-2». Одновременно на поверхности моря, по данным ИСЗ, регистрируется до 80 таких пятен, диаметром 20—60 км. Холодные пятна или, по меньшей мере, часть из них, по-видимому, представляют собой циклонические вихри, обусловленные либо существующей схемой постоянных течений, либо выходом на поверхность глубинных вод вследствие обрушения внутренних волн на нижней кромке термоклина. Температура таких холодных вихрей по данным ИСЗ составила в летний

о ТПВ, полученные с ближайших к выбранному базисному витку (полученные в синоптические сроки). Вследствие высокой динамичности облачных систем участки акватории, покрытые облачностью на одних витках ИСЗ, свободны от нее на других витках, что используется при монтировании одной карты ТПВ из отдельных фрагментов карт ТПВ, полученных в течение нескольких витков. С целью исключения влияния суточного хода ТПВ

для примера приведена карта ТПВ, построенная композиционным методом.

Исследования, подобные описанным выше, в течение лета—осени 1980 г. проводились и на акватории Каспийского моря. Анализу подвергались спутниковые карты ТПВ (10 карт за август и 10 карт за октябрь), данные авиационных измерений ТПВ, выполненные ИК радиометром МИР-3 с борта самолета-лаборатории Ил-14 у восточного

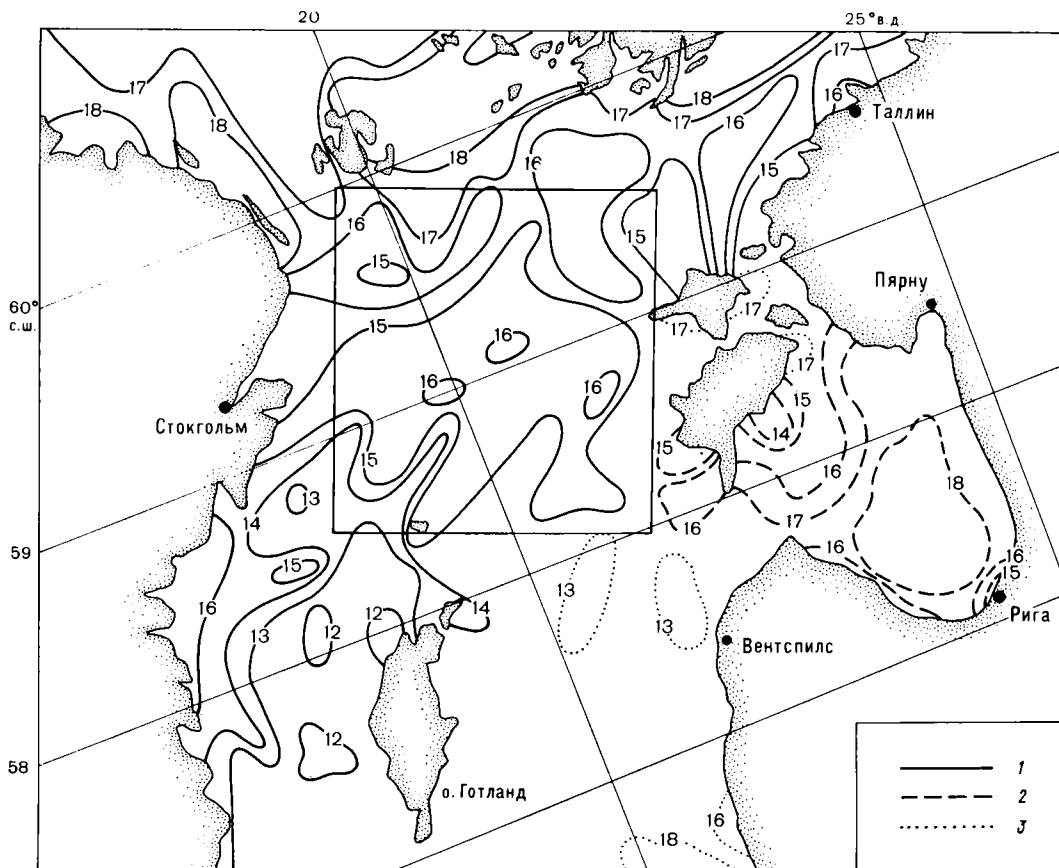


Рис. 9.23. Фрагмент композиционной карты температуры поверхности Балтийского моря (°С) по данным ИК радиометра ИСЗ «Метеор» за 30 июля 1980 г. (1) с использованием данных за 27 июля 1980 г. (2) и за 3 августа 1980 г. (3).

все использованные фрагменты карт приводятся к одному моменту времени — времени центрального витка. Для этого проводится сравнение гистограмм распределения ТПВ на тестовом участке моря, полученных на различных витках ИСЗ. В расчет принимаются только случаи одномодальных гистограмм, характеризующихся разными коэффициентами асимметрии, т. е. на выбранном тестовом участке должны быть сравнительно однородные водные массы без высокоградиентных температурных зон, связанных с наличием гидрофронтов, загрязнениями и другими причинами. При этом за истинное значение температуры ( $T_{и}$ ) на участке с частичным облачным покрытием принимается величина

$$T_{и} = \frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{\sigma^2 \ln F_1/F_2}{T_2 - T_1},$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение ТПВ,  $F_1$  и  $F_2$  — частоты наблюдения температур  $T_1$  и  $T_2$  на «теплой» стороне гистограммы.

Таким образом определяется величина  $T_{и}$  центрального витка ( $T_{и.ц}$ ) и вспомогательных витков ( $T_{и.в}$ ). Далее для каждого вспомогательного витка определяется поправка  $\Delta T = T_{и.ц} - T_{и.в}$ , вносимая в значение ТПВ при монтировании отдельных фрагментов карт в одну общую карту. На рис. 9.23

побережья Каспия и у Апшеронского п-ва, данные контактных измерений температуры с платформы у о. Артем и с гидрометстанций. Материалы наблюдений позволили оценить степень правомерности атмосферной коррекции спутниковых измерений ТПВ по средним климатическим данным (методика ГосНИЦИПР). Показано, что в летнее время применение этой методики может привести к завышению значений ТПВ. По-видимому, это связано с тем, что в летнее время атмосфера над Каспийским морем сильно замутнена, так как преобладают ветры северных направлений, способствующие выносу мельчайших частиц песка с восточного берега. В результате усиливается влияние атмосферы на прохождение ИК излучения, в частности, возрастает вклад аэрозольной составляющей собственного излучения атмосферы. В осенний же период атмосферная коррекция спутниковых измерений ТПВ Каспийского моря приводила к значениям, которые хорошо согласовывались с данными опорных измерений. Так, в октябре 1980 г. спутниковые значения ТПВ отличались от самолетных на 1 К.

В целом за период наблюдений оценка согласия полей ТПВ, полученных с ИСЗ и самолета, показала, что между ними нет статистически значимых



различий в значениях температуры и средних квадратических отклонений, так  $\sigma_{\text{ИСЗ}} = 1,5 \text{ К}$ ,  $\sigma_{\text{АВИА}} = 2 \text{ К}$ . Расчет нормированных автокорреляционных функций полей ТПВ, полученных по данным ИСЗ и самолета, дал близкие результаты, что позволяет с определенным основанием использовать спутниковые данные для анализа пространственно-временной изменчивости поля ТПВ в этом регионе. Выполненный анализ изменчивости полей ТПВ, полученных последовательно с ИСЗ серии «Метеор-2» для акватории Каспийского моря, позволил осуществить наблюдение за таким характерным океанологическим явлением, как апвеллинг в ограниченной области у восточного побережья Каспия (рис. 9.24). Известно, что это явление, связанное с подъемом глубинных вод, наблюдается здесь в июле—августе и обусловливается сгонным влиянием интенсивных ветров восточных направлений. В этот период температура поверхности воды у побережья понижается иногда до  $10\text{--}12^\circ\text{C}$  при температуре воды в центральной части моря  $23^\circ\text{C}$ . Последовательные спутниковые карты ТПВ позволяют вести наблюдения за изменением границ распространения апвеллинга, поскольку спутниковые карты акватории получаются практически для одного момента времени. Область апвеллинга имеет на спутниковых картах резкие очертания. При ослаблении ветра или при изменении его направления процесс подъема холодных вод замедляется и первоначально резкие границы апвеллинга размываются.

Полученные результаты, примеры которых приведены выше, свидетельствуют, что цифровые карты температуры поверхности моря, построенные на основе спутниковой информации ИК диапазона, позволяют в региональном масштабе изучать океанологические явления, связанные с динамикой водных масс.

При этом следует отметить, что выбор исходной спутниковой информации, ее обработка (сглаживание с использованием различных пространственных фильтров, осреднение, введение атмосферных поправок, гистограммный анализ и другие процедуры) должны выполняться в каждом конкретном случае в соответствии с определенными задачами дальнейшей обработки и использования данных и с учетом особенностей гидрологического режима исследуемого района. В особенности это касается попыток использования данных спутниковых измерений ТПВ для расчетов тепловых потоков на границе вода—атмосфера и скоростей поверхностных течений на основе уравнения термической адвекции. В последнем случае необходим тщательный анализ данных с учетом реальной точности их географической привязки.

Задачами дальнейших работ в этом направлении являются: организация регулярного получения спутниковой информации, совершенствование методики обработки этой информации с целью повышения достоверности и точности определения температуры поверхности воды в различных метеорологических условиях, разработка методик использования полученных данных в конкретных океанологических исследованиях и на этой основе организация широкого применения новых методов в практической работе научных и хозяйственных учреждений.

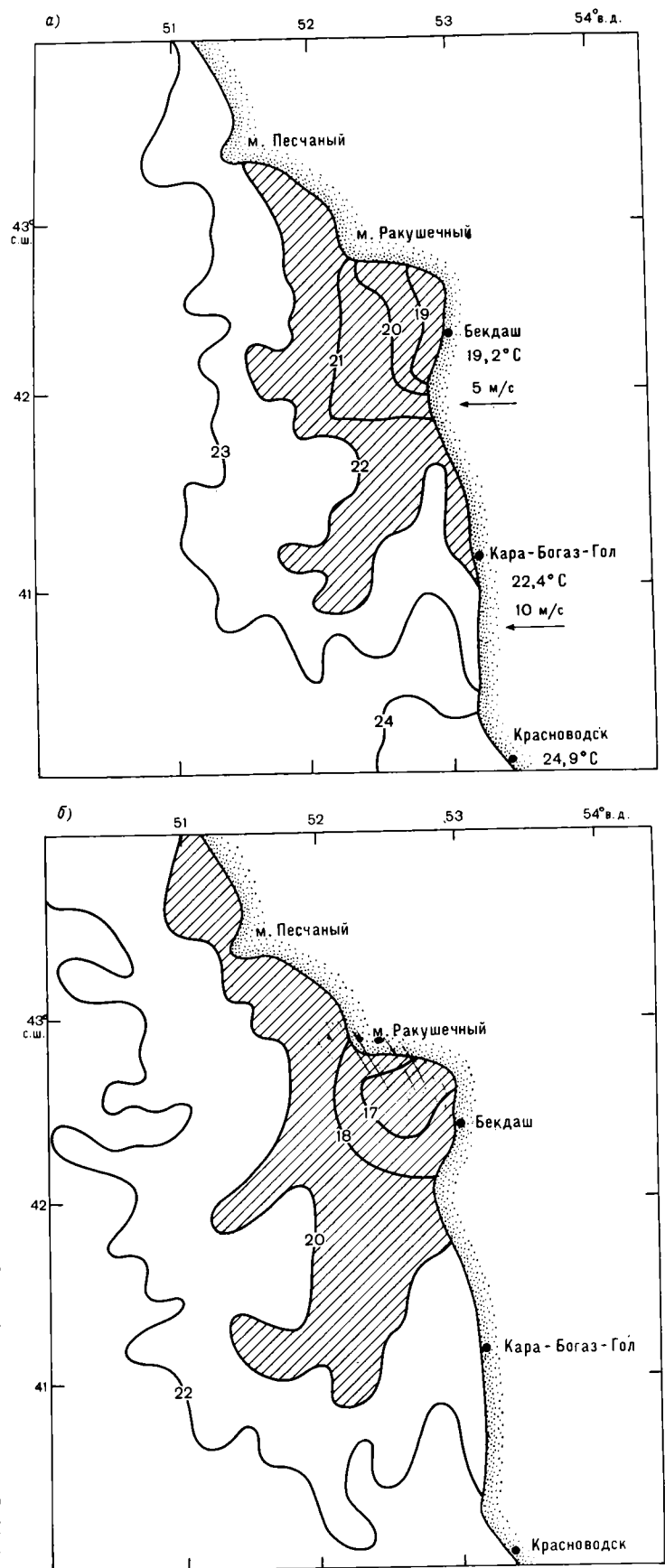


Рис. 9.24. Карты температуры поверхности Каспийского моря ( $^\circ\text{C}$ ) по данным ИК радиометра ИСЗ «Метеор» за 15 августа 1980 г. (а) и за 16 августа 1980 г. (б).

Зона апвеллинга заштрихована, приведены данные измерений температуры воды, скорости и направления ветра на береговых гидрометстанциях.

# Мониторинг антропогенного воздействия на природную среду



В настоящее время ведутся разработки научных основ и средств мониторинга антропогенных изменений состояния природной среды. Система такого мониторинга должна обеспечивать решение следующих задач:

- наблюдение за факторами, воздействующими на природную среду;
- оценка влияния этих факторов на природную среду;
- прогноз состояния природной среды.

Постоянно возрастающее воздействие производственной деятельности человека на природную среду вызывает различные последствия в региональном и глобальном масштабах и делает проблему мониторинга антропогенных изменений исключительно актуальной. Одним из важнейших вопросов является проблема загрязнения атмосферы. Концентрации газовых компонентов и аэрозоля уже сейчас испытывают большие изменения в результате человеческой деятельности. Такие загрязнения, как кислоты, щелочи, тяжелые металлы, химические соединения, разносятся потоками воздуха по всей территории нашей планеты. С помощью космической системы можно наблюдать за источниками загрязнений и путями распространения этих загрязнений.

Выпадающие загрязнения в ряде случаев приводят к изменениям в состоянии растительного покрова на больших территориях. Такие изменения наблюдаются с космических орбит по изменению цвета растительного покрова.

По космической информации определяются районы и направления переноса дымовых загрязнений, обнаруживаются многие районы, в которых уничтожается растительный покров и создаются условия образования очагов пылевых бурь, а также увеличения зон пустынь. Зоны загрязнения, связанные с осадением аэрозолей из дымовых облаков, наиболее четко заметны по изменению состояния снежного покрова.

Большое значение приобретает космическая система наблюдения за огромной территорией водной поверхности Земли. Эти наблюдения позволяют определить зоны загрязнений рек, озер и прибрежных частей морских акваторий вблизи промышленно-энергетических районов.

На космических изображениях промышленные и городские загрязнения могут быть различимы либо непосредственно по изменению альбедо за счет слоя взвешенного в атмосфере аэрозоля антропогенного происхождения, либо по изменению альбедо поверхности за счет выпадающих загрязнений, а также за счет изменения спектральных характеристик растительного покрова, подверженного

антропогенным воздействиям. Тематическая обработка космических изображений с использованием интерактивных методов позволяет определять районы распространения антропогенных загрязнений, выявлять их границы.

Последовательность обработки космического изображения заключается в следующем. Цифровой эквивалент изображения, введенный в ЭВМ, подвергается интерактивной обработке. При этом используются процедуры квантования, анализа регистrogramм и псевдоцветного кодирования. При анализе широко привлекаются априорные данные и результаты квазисинхронных опорных наблюдений.

Представляют интерес выполненные исследования динамики изменения залива Кара-Богаз-Гол — площади, очертаний береговой линии и т. д. Этот залив, расположенный на восточном побережье Каспийского моря и окруженный пустынными территориями, представляет собой обширную мелководную солеродную лагуну. До недавнего времени режим залива практически полностью определялся объемом поступающих в него каспийских вод. В заливе поступающие воды интенсивно испарялись, концентрировались до состояния рапы, а часть солей выпадала в осадок, образуя огромные массы соляных отложений.

До начала 30-х годов залив «поглощал» ежегодно около 30 км<sup>3</sup> каспийских вод, т. е. ежегодное снижение уровня Каспийского моря за счет стока в залив составляло примерно 9 см. В этот период площадь залива составляла около 18 тыс. км<sup>2</sup>, а максимальная глубина 8—9 м. К середине 60-х годов уровень Каспийского моря снизился на 2,5 м, что привело к уменьшению стока каспийских вод в залив до 8—10 км<sup>3</sup>, а площадь залива сократилась до 10 тыс. км<sup>2</sup>. Падение уровня Каспийского моря продолжалось, и к середине 70-х годов уровень снизился до минимального в текущем столетии. К 1980 г. сток каспийских вод в залив составлял 5 км<sup>3</sup>.

В марте 1980 г. залив был отчленен от моря. Отчленение залива поставило на повестку дня ряд вопросов, связанных с изменением гидрологического режима усыхающего залива-озера и влиянием этого процесса на экологические условия прилегающих районов.

Учитывая относительно большие размеры залива, пустынность его побережья и отсутствие сети постоянных наземных пунктов наблюдения, изучение этих вопросов наиболее эффективно и целесообразно проводить при помощи дистанционных методов исследований с использованием космических средств и отдельных авиационных обследований.

Для оценки изменения основных параметров гидрологического режима залива, таких как очертания береговой линии, площадь водного зеркала, рельеф дна, площадь зоны «новоосадки» солей на обсохшем дне залива и других, исследовались космические телевизионные изображения с ИСЗ «Метеор—Природа». При их интерпретации использовалась априорная информация и подспутниковые авиационные и наземные наблюдения. Подспутниковые авиационные и наземные наблюдения, проводившиеся в различные сезоны 1980—1982 гг., включали в себя аэровизуальную съемку уреза водной поверхности (фактически рапы), границ новоосадки солей и старых солевых отложений, сформировавшихся до перекрытия пролива, с привязкой к коренным берегам залива, отбор проб рапы в открытом и прибрежных районах залива, измерение температуры рапы и промеры глубин в точках отбора проб, отбор проб соли по периметру залива в различных зонах солевых отложений и другие работы.

Для оценки изменения площади водной поверхности и солевых отложений залива Кара-Богаз-Гол использовались космические снимки в ближнем ИК диапазоне, на которых наиболее четко дешифрируется граница водной поверхности (рис. 10.1 на вкладке). Сравнение изображений залива, полученных 11 декабря 1981 г., 24 апреля и 1 сентября 1982 г., позволяет определить изменение площади водной поверхности за этот период. При анализе использовались регистрограммы отдельных строк изображений и материалы аэровизуальных обследований.

Следует отметить, что проведенные аэровизуальные наблюдения позволили выделить в пределах обсохшей акватории бывшего дна четыре зоны: слабозасоленные песчаные районы, солончаки, а также солевые отложения (серые соли), уже подвергшиеся процессам эоловой заносимости терригенными материалами, и новые солевые отложения (белые соли или новоосадка солей), обнажившиеся в результате усыхания залива после его отчленения от Каспийского моря. Эти зоны различаются по цвету и хорошо идентифицируются как при аэровизуальных наблюдениях, так и на космических снимках.

На основании результатов обработки космических снимков, материалов аэровизуальных обследований и данных о состоянии залива до перекрытия установлено, что площадь залива к сентябрю 1982 г. по сравнению с мартом 1980 г. (дата перекрытия) уменьшилась в пять раз и составила 2 тыс. км<sup>2</sup>; без учета мелководных, рассеченных островами и косами прибрежных участков — 1,6 тыс. км<sup>2</sup>. На рис. 10.2 показана динамика изменения уреза рапы в заливе Кара-Богаз-Гол за 1980—1982 гг.

В результате обработки космических снимков и обобщения наземных материалов были построены также профили и карты рельефа дна залива для различных этапов его усыхания. Их анализ позволил оценить изменения средней и максимальной глубин водоема и объема поверхностной рапы в заливе. За период с момента отчленения залива его максимальные глубины снизились до 1,2 м

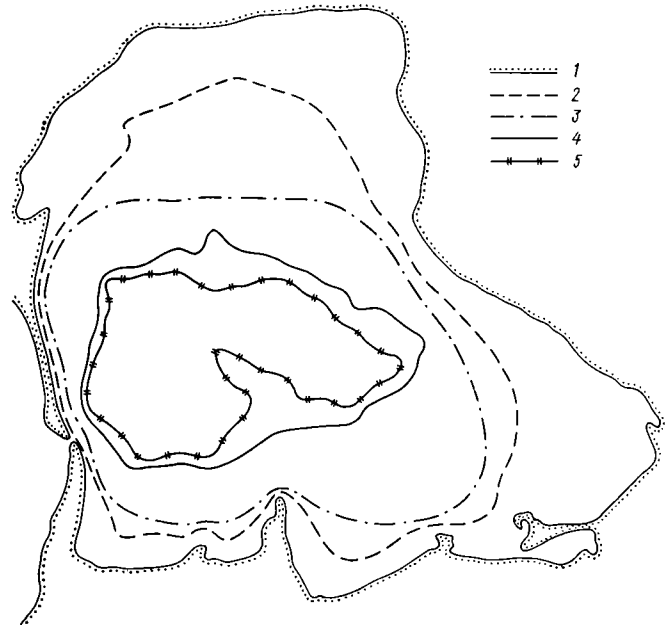


Рис. 10.2. Карта-схема изменения очертаний залива Кара-Богаз-Гол за 1980—1982 гг.

1 — береговая линия, 2 — урез рапы до отчленения, 3 — урез рапы в сентябре 1980 г., 4 — урез рапы в сентябре 1981 г., 5 — урез рапы в сентябре 1982 г.

при средней глубине 0,75 м, а объем поверхностной рапы в заливе сократился с 22 до 1,5 км<sup>3</sup>.

Для оценки антропогенных загрязнений урбанизированных районов можно использовать космические снимки среднего разрешения, полученные при помощи сканерной системы ИСЗ «Метеор—Природа». На рис. 10.3 (см. вкладку) представлен результат обработки космического изображения заснеженной территории, на которой расположен крупный промышленный город. На регистрограмме отчетливо виден максимум, центр которого совпадает с центром города. Можно считать, что существенное изменение альбедо поверхности в определенной степени объясняется антропогенным воздействием на состояние снежного покрова.

Приведенные примеры свидетельствуют о широких возможностях космического мониторинга антропогенного воздействия на природную среду.

# Применение космических многозональных сканерных съемок в геологии



Космические многозональные сканерные снимки как малого, так и среднего разрешения, получаемые с экспериментальных спутников серии «Метеор—Природа» привлекли внимание геологов благодаря большой обзорности, высокой степени генерализации изображений земной поверхности по сравнению с космическими фотоснимками, а также возможности ее изучения в нескольких диапазонах электромагнитных волн.

## 11.1. Геологическая информативность космических многозональных сканерных снимков

Большая обзорность и высокая естественная генерализация космических изображений земной поверхности позволяет реализовать при геологических исследованиях принцип «от общего к частному». Этот принцип практически всегда диктовался самим содержанием геологических исследований, требовавших дедуктивного подхода к изучению геологических объектов [4]. Однако на протяжении длительного времени геологические методы исследований базировались на основе индуктивного метода, т. е. «от частного к общему», и геологические карты, как правило, представляли собой синтез отдельных наблюдений, которые после соответствующего анализа сводились в единое целое. В связи с этим существовал определенный разрыв между методом исследования и средством познания, который частично начал восполняться применением аэрометодов. Но и здесь ограниченность площадного обзора сдерживала возможность изучения геологических объектов с позиции исследования от общих закономерностей к их частным проявлениям. В этом отношении космические сканерные снимки представляют собой незаменимый материал, так как позволяют получать изображения земной поверхности, на которых вследствие естественной генерализации проявляются лишь крупные элементы геологического строения огромных участков земной коры.

По уровню генерализации изображений геологических структур и содержанию геологической информации снимки малого разрешения относятся к континентальному рангу, среднего — к региональному рангу и представляют собой достаточно объективный материал для составления обзорных космогеологических, космогеотектонических и других специализированных карт в масштабе 1 : 2 500 000 и менее [7]. Особенно отчетливое отражение на снимках находят наиболее крупные структурно-тектонические элементы земной коры. Это, в первую очередь, платформенные и горно-складчатые области, а также крупные зоны в их пределах; разрыв-

ные нарушения от региональных до трансрегиональных систем разломов, кольцевые структуры разного ранга и генезиса.

Так, например, по резкой смене фототона, присутствующего южной части Туранской плиты, и рисунку, характерному для складчатой системы Копетдага (чередование светлых и темных полос), отчетливо прослеживается разделяющий их тектонический шов. В пределах Туранской плиты по смене фототона отчетливо прослеживаются разноориентированные разломы, являющиеся границами крупных структурно-тектонических зон, например, разломы, ограничивающие Центральную-Мангышлакско-Устюртскую зону поднятий и др. Отчетливое отражение на снимках находит зона Западно-Тяньшанского глубинного шва, существование которого долгое время ставилось под сомнение.

Несколько иной характер фотоизображения имеют структурно-тектонические элементы разновозрастных горно-складчатых областей. В молодых горно-складчатых областях, характеризующихся интенсивным проявлением неотектонических процессов, они выделяются нередко по специфическому рисунку линейных или дугообразных форм, связанных с различной степенью эрозионного расчленения рельефа. Например, мегаантиклинали Тянь-Шаня образуют выпуклые на юг дуги, во внутренних частях которых по светло-серому фототону оконтуриваются межгорные впадины: Ферганская, Иссык-Кульская и др.

На космических снимках, в том числе и на сканерных, в большом количестве выявляются в виде фотоаномалий овальной формы так называемые кольцевые структуры. Размеры таких структур в поперечнике варьируют от десятков километров до нескольких сотен (и более) километров. Фотоизображения кольцевых структур разнообразны: в одном случае — это относительно светлые овальные концентрические строения фотоаномалии на темном фоне (или наоборот), в другом — характерный рисунок полосчатости разной ориентировки, присущий, например, трещиноватости гранитоидных массивов и куполов гранито-гнейсов. Нередко (особенно в платформенных областях) выявляются кольцевые фотоаномалии с мелкопятнистым рисунком. В пределах юго-восточной части Восточно-Европейской платформы среди 20 выявленных фотоаномалий [9] наибольшее распространение имеют сдвоенные и строенные концентрические овалы или полуовалы, расчлененные радиальной сетью линейментов. Во многих случаях выявляемые на космических сканерных снимках кольцевые фотоаномалии обнаруживают определенную связь с геологическими объектами, например, в районе Балтий-

ского щита некоторые кольцевые фотоаномалии связаны с куполами древних гранито-гнейсов [1, 2], в центральной части Сибирской платформы (междуречье рек Лены и Вилюя)— с неизвестными поднятиями, а в юго-восточной части Восточно-Европейской платформы указанные выше фотоаномалии связаны с положительными структурами фундамента или осадочного чехла.

Возможности выделения литолого-стратиграфических комплексов на космических сканерных снимках ограничены, хотя некоторые из них и находят определенное отражение. В частности, отчетливо прослеживаются выходы меловых (белый фототон) и пермотриасовых (темный фототон) отложений в районе Мангышлака; современные солевые (в виде оторочек светло-серого и белого фототона) отложения залива Кара-Богаз-Гола и прибрежно-морские (светло-серый фототон) образования по побережью Каспийского моря и др. Другая важная особенность космических снимков заключается в их многозональности. Так, например, разрывные нарушения разного ранга наиболее отчетливо прослеживаются на снимках в диапазонах 0,6—0,7 и 0,8—1,0 мкм. Основные структурно-тектонические элементы в пределах горноскладчатых областей наиболее выразительны на снимках в этих же диапазонах.

Кольцевые структуры в горно-складчатых областях наиболее отчетливо проявляются на снимках в диапазоне 0,8—1,0 мкм.

### 11.2. Этапы и последовательность геологического дешифрирования космических сканерных снимков

Опыт дешифрирования космических снимков разных видов и масштабов показал, что основным источником геологической информации являются ландшафтно-геоморфологические особенности земной поверхности, наиболее информативной частью которых является рельеф. Доля геологической информации, отраженной во второстепенных особенностях рельефа, практически исчезает, и на первый план выступает информация об основных мегаформах рельефа, являющихся производными соответствующих глубинных деформаций земной коры, отражающих современные черты глубинной структуры коры и мантии.

Этапы и последовательность операций при дешифрировании многозональных космических сканерных снимков всецело определяются характером их изображений.

На первом этапе из имеющихся снимков разных диапазонов спектра выбирается наиболее информативный по контрастности и нагрузке фотоизображения и определяется его географическая принадлежность. Этот снимок тщательно изучается с целью выявления и оконтуривания участков, закрытых облачностью (или имеющих технические помехи) и непригодных для дешифрирования. Затем изучаются общие фотографические закономерности снимка, позволяющие выделить крупные области, различные по характеру фототона и рисунку изображения. После этого рассматриваются особенности фототона и рисунка внутри выделенных областей и оконтуриваются участки, отличные по тону, рисунку, конфигурации и ориентировке фотоаномалии.

Одновременно намечаются линейные элементы фотоизображения (линеаменты) по спрямленным границам областей и участков с разным фототонном или совокупности нескольких фотоаномалий, объединенных общей ориентировкой и т. п. Первый этап завершается сопоставлением выделенных контуров и линейных элементов разного ранга с различными географо-геоморфологическими картами (особенно в геологически закрытых районах) с целью отыскания их связи с элементами ландшафта и природно-территориальными комплексами.

Второй этап заключается в сопоставлении дешифрированных контуров и линеаментов с различного рода геологическими картами и схемами, в первую очередь структурно-тектонического содержания, с целью опознания известных геологических объектов или их геологических признаков.

Последний этап состоит в комплексной интерпретации результатов ландшафтного и геологического дешифрирования с материалами региональных геофизических съемок и последующем сопоставлении специализированных карт и схем, например, геологоструктурных, структурно-тектонических, прогнозных и др. На этом этапе наиболее важным является сопоставление известных геологических объектов данных и вновь выявленных и анализ их пространственных взаимоотношений. Результаты этого анализа лежат в основе структурно-тектонических и прогнозных построений. При этом достоверность геологических построений, осуществляемых с помощью космических сканерных снимков, значительно повышается с привлечением к анализу не только материалов интерпретации, но и «переинтерпретации» физических полей, в частности, магнитного и гравитационного (в нефтегазовых районах важное значение приобретают данные сейсморазведки). Такой пересмотр вызван прежде всего тем, что существующие представления о геологическом строении закрытых территорий базировались, как правило, на основе комплексного анализа данных традиционных геологических и геофизических методов исследований (геологическая съемка, бурение, магниторазведка, гравиразведка, сейсморазведка и др.). Причем степень изученности таких районов оставалась крайне неравнозначной: в одних случаях информация не находила связи с имеющимися геологическими данными и, следовательно, не реализовывалась, а в других — использовалась для гипотетических построений. Результаты геологического дешифрирования космических снимков, в том числе сканерных, явились той дополнительной информацией (нередко принципиально новой), потребовавшей поисков новых связей выявленных геологических объектов с элементами физических полей. Возможность обнаружения таких связей, благодаря комплексному анализу результатов геологического дешифрирования космических снимков и переинтерпретации магнитного и гравитационного полей, очевидна.

Следует отметить, что методика геологического дешифрирования в значительной мере зависит от геолого-географической принадлежности заснятых районов, различающихся режимом неотектонических движений, главным образом, интенсивностью и направленностью [5].

Геологическое дешифрирование космических

снимков целесообразно начать со снимков в оригинальном масштабе, а затем провести дешифрирование увеличенных и уменьшенных изображений. До начала целевого дешифрирования на одном из экземпляров следует провести топографическое дешифрирование с целью опознания элементов ортогидрографии, которые могут быть использованы в качестве ориентиров и индикаторов геологических объектов. Результаты топографического дешифрирования сопоставляются и сводятся на один отпечаток. Собственно геологическое дешифрирование необходимо выполнять по наиболее информативному изображению, а затем по снимкам каждого из имеющихся спектральных диапазонов. По окончании раздельного дешифрирования производится сведение данных на одну схему и повторный просмотр снимков разных диапазонов с целью уточнения контуров и линеаментов.

Указанная последовательность работ в целом является общей для геологического дешифрирования материалов дистанционных съемок. Специфика работы заключается в наличии снимков сверхвысокой обзорности, что требует некоторой перестройки в психологии дешифровщика, а также использования разных спектральных диапазонов, обуславливающих обязательную увязку результатов дешифрирования по разным каналам.

В МингеоСССР создан специальный фонд космических сканерных снимков, полученных с ИСЗ «Метеор—Природа», пригодных для геологического использования. Дальнейшее накопление информации и острая потребность в ней геологических организаций, повлекли за собой повышение требований к ее качеству, т. е. разработку критериев оценки пригодности информации к геологическому дешифрированию, а также необходимость разработки информационно-поисковой системы (ИПС). Характер информационного запроса и оценка реально имеющегося информационного массива снимков с учетом ближайшей перспективы, предопределили выбор информационно-поисковой системы, обеспечивающей накопление, систематизацию, обработку, многоаспектный поиск и информационное обслуживание геологических организаций информацией, получаемой с ИСЗ типа «Метеор—Природа».

При разработке информационно-поисковой системы в основу положен принцип использования классификационных систем в дескрипторном режиме, обеспечивающем информационный поиск как по широким тематическим запросам, так и по более конкретным, узким вопросам [3].

С учетом разнообразия информационных запросов, а следовательно, многоаспектности информационного поиска, в числе основных классификационных групп информационно-поисковых признаков для сканерных снимков данной ИПС выделены следующие:

— распространение облачности (в процентах) в виде кодируемых градаций: 0—10, 10—30, 30—50, 50—70 и >70 %;

— географическая привязка снимков к естественным географическим районам, к трапециям международной карты мира масштаба 1 : 1 000 000, а также к политико-административному делению мира. В связи с этим предусмотрены коды с глубокой индексацией по четырем разрядам, обеспечивающим информационный адресный поиск засня-

тых площадей по любому из указанных видов привязки;

— геолого-тектоническая привязка снимков, обеспечивающая их поиск, включая структурно-тектонические элементы, закодированные на схематической мелкомасштабной тектонической карте мира;

— группа признаков, характеризующих параметры снимков и условий съемки (дата, время, съемки, спектральный диапазон и др.);

— группа признаков, расклассифицированных по видам геологического дешифрирования космических сканерных снимков, поступающих в ИПС с учетом обратной связи с абонентами-потребителями, осуществляющими экспертную оценку геологической информативности снимков, используемых для решения геологических задач.

Эти группы основных классификационных признаков характеризуют многоаспектный характер разработанной информационно-поисковой системы, которая учитывает практически все многообразие процесса отраслевого использования космической сканерной информации (рис. 11.1).

Вся информация в виде дубль-негативов сканерных снимков и контрольных фотоотпечатков с впечатанной географической сеткой поступает в производственное объединение «Аэрогеология» из пунктов приема и обработки информации Госкомгидромета. Поступившая информация тщательно анализируется с точки зрения пригодности для геологического дешифрирования в зависимости от качества, фотографического материала, наличия облачности и технических помех. После соответствующей отбраковки дубль-негативы и контрольные отпечатки регистрируются и подготавливаются к вводу в ИПС, включая операции индексирования и кодирования, что по существу предопределяет комплектование массива на перфокартной основе. Последняя представляет собой массив перфокарт, причем с одной стороны перфокарты помещается фотоотпечаток определенного спектрального диапазона, а с другой впечатывается аннотация, содержащая все сведения, характеризующие этот снимок (географо-геологическая привязка, условия съемки и т. д.). Дубль-негативы помещаются в специальные конверты с регистрационными номерами фототеки и данными об использовании этого снимка для геологических целей (квантованные или синтезированные отпечатки, негатив, схемы геологического дешифрирования и т. п.). Целью разработанной информационно-поисковой системы является оперативное внедрение материалов космических сканерных съемок в практику производственных и научно-исследовательских организаций МингеоСССР, для чего вся поступившая полезная информация подготавливается избирательно к тиражированию с учетом районов деятельности постоянных абонентов (геологических организаций) в соответствии с их запросами. Важную форму обслуживания представляет издание каталогов, позволяющих своевременно информировать геологические организации о наличии информации с ИСЗ «Метеор—Природа».

Разработанная информационно-поисковая система по отраслевому использованию космической сканерной информации, получаемой с ИСЗ «Метеор—Природа», позволяет реализовать следующие принципы:

— централизованное получение, первичную обработку, хранение, тиражирование и оперативное распространение всей имеющейся информации;

— многоаспектный оперативный и ретроспективный поиск информации;

— централизованное информационное обслуживание, заключающееся в избирательном распределении информации, выдаче различных справок, регулярном издании каталогов космических сканер-

ответствующих мегаблокам земной коры и зонам их сочленения, что представляет достаточно объективную основу для регионального прогноза полезных ископаемых и перспективного планирования при определении общей стратегии региональных геолого-съемочных и поисковых работ.

Приведем некоторые примеры комплексного использования материалов космических съемок, в том числе сканерных при составлении различного рода

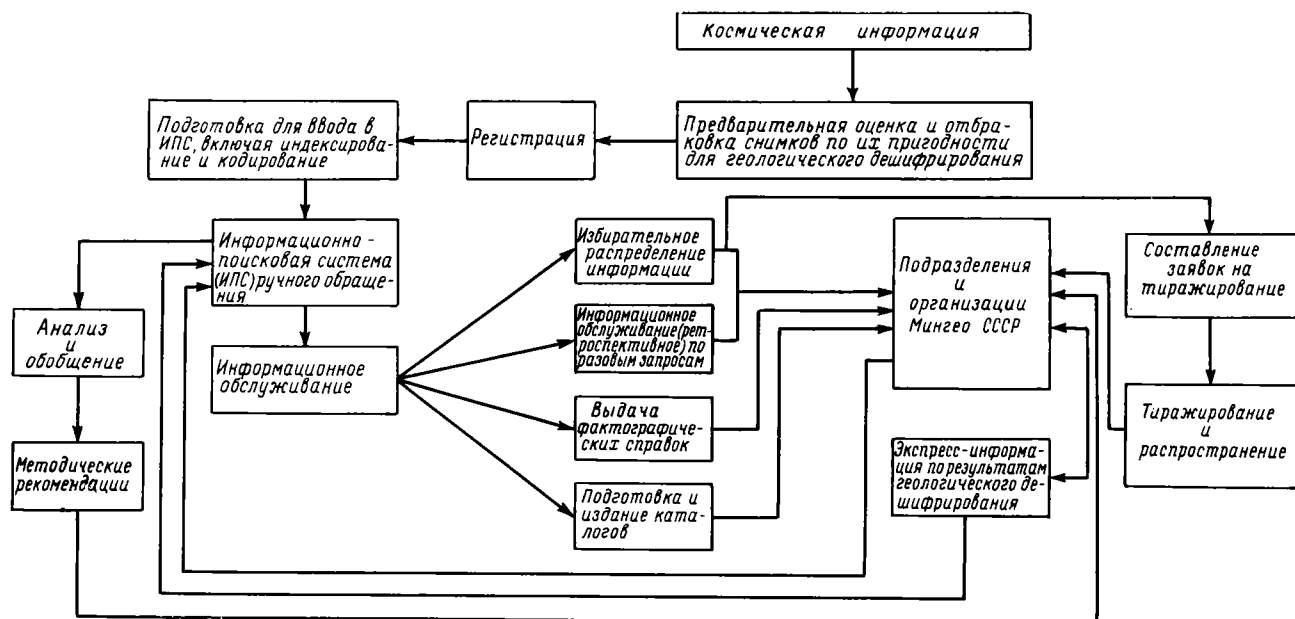


Рис. 11.1. Технологическая схема производственного использования в геологии информации с ИСЗ «Метеор—Природа».

ных снимков, пригодных для геологического дешифрирования;

— функционирование устойчивой обратной связи абонент—ИПС—абонент.

### 11.3. Использование космических сканерных снимков в геологии

Космические многозональные сканерные снимки малого и среднего разрешения нашли широкое применение в практике геологических работ. Они, как правило, используются в комплексе с материалами аэросъемок и космических съемок более высокого разрешения. Наиболее эффективно эта информация применяется для решения двух групп задач:

— изучение глобальных и региональных структурно-тектонических элементов земной коры (преимущественно используются снимки малого разрешения);

— изучение рудоконтролирующих и нефтегазоконтролирующих структур в региональном плане (используются снимки малого и в большей мере среднего разрешения);

Космическая сканерная информация в комплексе с космическими и аэрофотоснимками для решения этих задач реализуются в виде обзорных карт и схем структурно-тектонического содержания, нередко с элементами нефтегазоносного и металлогенического прогноза. Такие карты и схемы дают важную, а в ряде случаев и принципиально новую геологическую информацию, позволяющую изучать особенности крупных геоструктурных областей, со-

специализированных карт и схем. Так, составлен комплект карт масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 2 500 000, включающий карты ландшафтных индикаторов геологических объектов, космогеологическую карту и другие, который используется при региональном прогнозе на нефть и газ в Прикаспийской впадине. Составлена космогенетическая карта Камчатской области с целью перспективного планирования геолого-съемочных и поисковых работ. Информация с ИСЗ «Метеор—Природа» используется с целью тектонического районирования для выявления и прослеживания крупных разломов и разломных зон, а также кольцевых структур разного ранга и генезиса для составления карты линейных и кольцевых структур территории СССР в масштабе 1 : 2 500 000. Составлена первая схема космогенетического районирования для Северо-Востока СССР с элементами металлогенического прогноза, имеющая практическое значение для более целенаправленного проведения поисково-съемочных работ.

Наиболее ярким примером использования космической сканерной информации малого и среднего разрешения для геологических целей является космофотогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР в масштабе 1 : 5 000 000. На этой карте выделены впервые, в зависимости от таксономического ранга площадей, космогенетические области, регионы, блоки, а также системы линейных и кольцевых структур в их пределах [10].

Сеть линейных структур распадается на три группы: первая группа — разломы, разграничивающие космогенетические области, регионы, блоки;

вторая группа — линейные структуры, секущие космогеоструктурные области; третья — линейные структуры, не выходящие за пределы космогео-

Многие из этих разломов выделены впервые, другие на отдельных участках совпадают с известными нарушениями или линейными зонами дислокаций, но

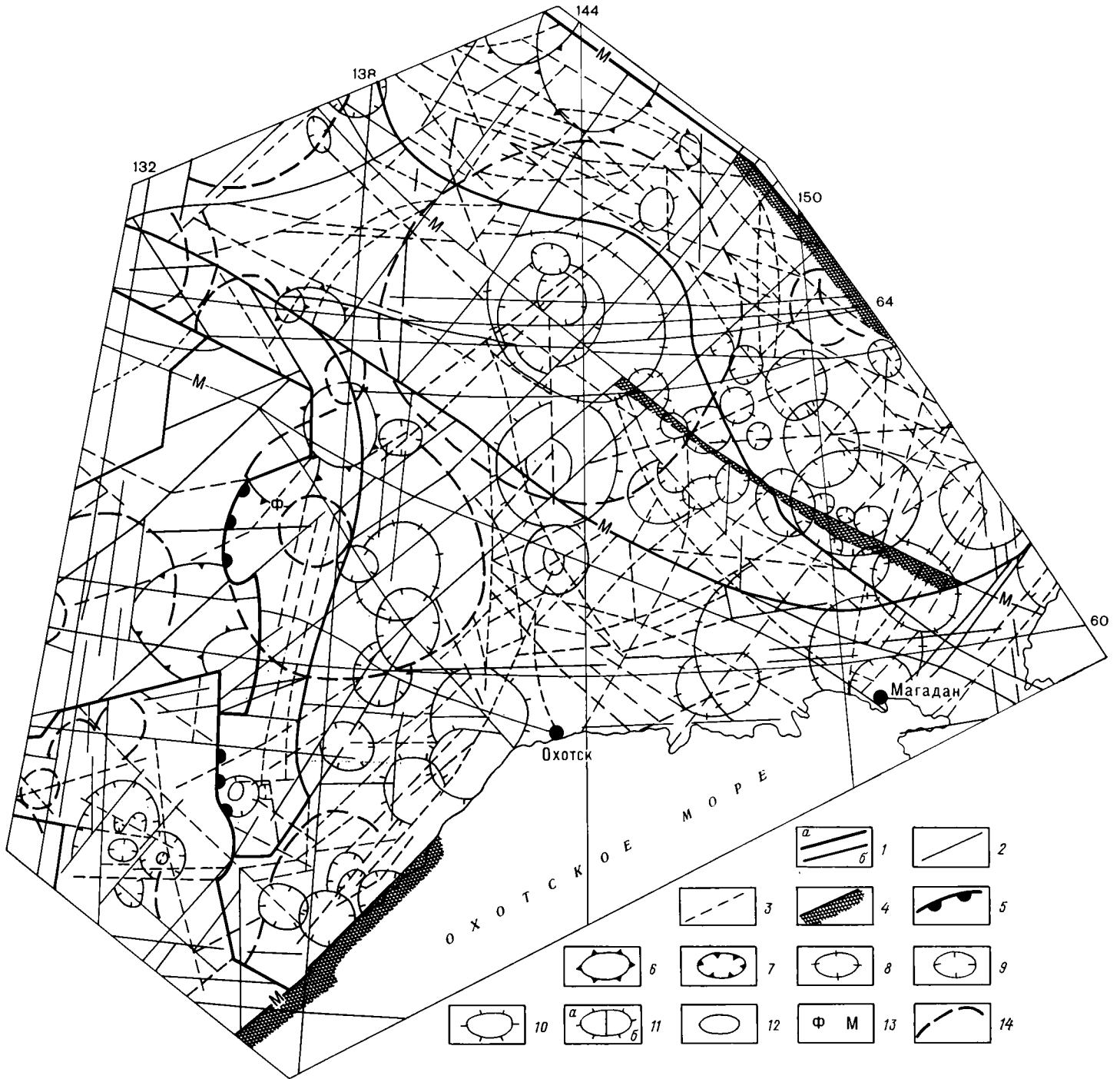


Рис. 11.2. Фрагмент космогеологической карты линейных и кольцевых структур территории СССР.

Линейные космогеологические структуры (структуры и зоны разломов): 1 — системы сопряженных разломов, разделяющие космогеоструктурные области (а) и региональные (б); 2 — разрывные нарушения, образующие системы разломов, секущие космогеоструктурные области или регионы; 3 — прочие разломы; 4 — зоны разломов; 5 — разломы с признаками горизонтальных перемещений (надвиги); 6 — положительные кольцевые космогеологические структуры (своды, поднятия, купола); 7 — отрицательные (впадины, котловины, мульды); 8 — инъективные кольцевые космогеологические структуры; 9 —

магматогенные нерасчлененные; 9 — плутонические и вулканоплутонические кислого и (или) среднего состава; 10 — основного и (или) ультраосновного состава; 11 — вулканические; 12 — ультраметаморфогенные нескрытые купола гранито-гнейсовые, гнейсовые, магматитовые и др.; 13 — разломы и кольцевые структуры, соответствующие структурам, проявленным в рельефе: поверхности фундамента молодых и древних платформ (Ф) и поверхности Мохоровича (М); 14 — кольцевые и дуговые элементы ландшафта, не коррелируемые с известными геологическими элементами.

структурных блоков и определяющие их внутреннюю структуру. В пределах территории СССР выделяются районы, где преобладают или ортогональные (Западно-Сибирская платформа) или диагональные (Восточно-Европейская платформа, Альпийско-Гималайский пояс и др.) структуры.

могут быть сведены в единые зоны трансрегионального или трансконтинентального значения. В частности, известная зона Таласс-Ферганского разлома прослежена на северо-запад до Самарской Дуги; зона Восточно-Саянского разлома — на северо-запад до Новой Земли. На карте нашли широкое



отражение своеобразные многочисленные космогеологические объекты — кольцевые структуры, разделенные на генетические группы и типы.

Приуроченность различных полезных ископаемых к кольцевым структурам определенного генезиса, размера и структурного положения заставляет обратить пристальное внимание на эти интересные объекты и особенно на их пространственное и генетическое соотношение с линейными структурами. По-видимому, эта карта будет способствовать решению ряда геологических проблем научного и практического характера, так как содержит в определенной мере принципиально новый фактический материал, отсутствующий на традиционных геологических картах. На рис. 11.2 показан схематизированный фрагмент этой карты, охватывающий часть Восточно-Азиатской космогеоструктурной области, так называемого Верхоянско-Чукотского региона, отделенного от Байкало-Станового региона зоной Нельканского разлома. Наиболее отчетливое выражение в пределах фрагмента карты получили линейные структуры, ограничивающие космогеоструктурные элементы (выделы) всех рангов, а также системы ортогональных (меридиональных и широтных) и диагональных (северо-западных и северо-восточных) разломов. Большая часть из этих систем граничных и секущих разломов фрагментарно или полностью были установлены ранее геологическими исследованиями.

Вызывает интерес ряд линейных структур трансконтинентального ранга, прослеженных на огромное расстояние. Например, система меридиональных структур практически прослеживается от хребта Ломоносова и далее через Приморье, Марианскую дугу в Тихий океан. Другая система разломов прослеживается в северо-западном направлении с Алеутской дуги, пересекает Камчатку и область мезозойд, определяя границу континента от океанической впадины Ледовитого океана. Одна из широтных систем выявляет коленообразную границу Верхоянской складчатой зоны и прослеживается на значительное расстояние в западном направлении.

На фрагменте карты показано большое количество кольцевых структур. В западной части региона развиты пликативные, а на большей территории — инъективные структуры. В ряде случаев скопления тесно сближенных кольцевых структур образуют своеобразные узлы. Один из таких узлов кольцевых структур магматогенной природы (Верхне-Колымский узел) совпадает в плане с крупным рудным поясом, другой (Учуро-Майский) — ультраметаморфогенной природы, по-видимому, связан с внутренней структурой фундамента, перекрытого осадочным чехлом. По-видимому, в минерагеническом отношении представляют интерес узлы кольцевых структур пространственно и генетически связанные с системами секущих разломов.

В качестве еще одного примера, свидетельствующего об использовании космических снимков для изучения нефтегазоносности, можно привести структурно-тектоническую схему строения осадочного чехла Бузулукской впадины (рис. 11.3). Последняя по поверхности рельефа фундамента ограничена с запада Жигулевско-Пугачевской вершиной, с северо-востока — Татарским сводом, а с востока и юго-востока — соответственно Вос-

точно-Оренбургским и Соль-Илецким поднятиями. Результаты дешифрирования позволяют говорить здесь об унаследованном характере разрывных нарушений в процессе тектонического развития региона и их подновлении на новейшем этапе. Изотермические и кольцевые объекты в западной части впадины коррелируются с вершинами и выступами, осложняющими положительные и отрицательные

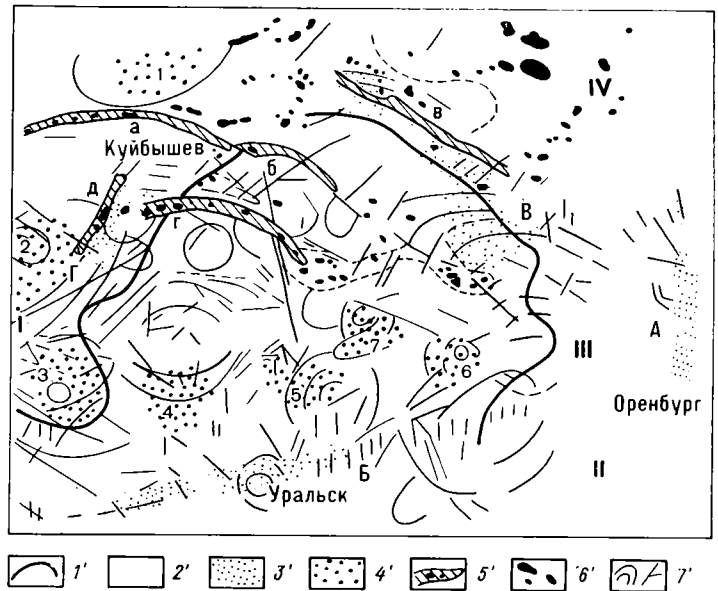


Рис. 11.3. Схема строения платформенного чехла Бузулукской впадины с учетом дешифрирования снимков с ИСЗ «Метеор—Природа».

1' — граница Бузулукской впадины; 2' — своды, вершины, ограничивающие Бузулукскую впадину; 1 — Жигулевско-Пугачевская, II — Соль-Илецкая вершина, III — Восточно-Оренбургское валовообразное поднятие, IV — Татарский свод; 3' — структурные зоны первого порядка, дешифрируемые на космических снимках; А — бортовой уступ Приуральского прогиба, В — борт Прикаспийской впадины, В — Жигулевско-Оренбургская зона (система валовообразных поднятий), Г — Покровское поднятие; 4' — выступы, дешифрируемые на космических снимках; 1 — Узюковский, 2 — Жигулевский, 3 — Балаковский, 4 — Прелюбский, 5 — Камелик-Чаганский, 6 — Мустаевский, 7 — Царевский; 5' — линейные структуры (приразломные валы); а — Жигулевский, б — Дмитриевский, в — Большекиинельский, з — Кулеловский, д — Покровский; б' — месторождения нефти и газа; 7' — линейные и изометричные структуры, дешифрируемые на космических снимках.

структуры более высокого ранга (Покровская вершина, Узюковский, Жигулевский, Балаковский, Перелюбский, Камелик-Чаганский и Мустаевский выступы). Сопоставление кольцевых объектов и изометричных форм платформенного чехла с позиций возможной их нефтегазоносности, менее эффективно, нежели для линейных структур (например, Кулешовский приразломный вал). Это может быть связано с тем, что достаточно полный анализ изометричных объектов в платформенном чехле часто затруднен в связи с недостатком геолого-геофизических данных. Практически нефтегазоносным структурам соответствуют два объекта, связанные с Узюковским и Покровским поднятиями. Рисунки 11.4, 11.5 и 11.6 иллюстрируют использование ландшафтного метода геологического дешифрирования на примере Туранской плиты. В основу схемы структурно-тектонических блоков и геологоструктурной схемы (рис. 11.5 и 11.6) положены результаты геолого-геофизической интерпретации выявленных элементов ландшафта (см. рис. 11.4) и их взаимосвязи с особенностями геологического строения территории. Наиболее отчетливое отражение получили такие глобальные структуры, как юго-восточная

часть Русской платформы, Туранская плита и горно-складчатая система Копетдага, разграниченные шовными зонами. Кроме этого, выделяются региональные структуры более низкого порядка. К последним, в первую очередь, относятся Северо-Устьюртская и Южно-Мангышлакская системы прогибов, Предкопетдагский предгорный прогиб; Центрально-Мангышлакско-Устьюртская и Туаркырская системы поднятий, а также некоторые структурные

ская, Южно-Устьюртская, Бузачинская и другие зоны разломов).

Анализ магнитного и гравитационного полей в региональном плане свидетельствует о том, что в их структуре находят определенное отражение выявленные крупные структурные элементы и разрывные нарушения разного ранга.

Следует отметить, что на снимках малого разрешения по соотношениям элементов ландшафта в региональном плане намечается несколько крупных областей, отождествляемых с крупными геоблоками фундамента. Это предположение, очевидно, нуждается в подтверждении дополнительными данными, однако необходимо заметить, что в пределах некоторых из них (Северо-Устьюртский, Кара-Богазский и др.) характер магнитного и гравитационного полей свидетельствует в пользу такого предположения. Сопоставление геофизических данных с результатами дешифрирования показывает, что в силу особенностей сканерного изображения выявленные структурно-тектонические элементы сильно генерализованы и геофизические данные позволяют их значительно детализировать, а в некоторых случаях получить принципиально новые данные. В частности, по смещениям в плане аномальных осей, отчетливо прослеживаются разрывные нарушения северо-восточного простирания, что подтверждает сделанные ранее выводы.

Находят подтверждение в геофизических полях разрывные нарушения субмеридионального направления (район Аральского моря), по-видимому, связанного с простиранием Уральских структур. Наиболее отчетливое отражение на снимке и в физических полях имеют разрывные нарушения северо-западного простирания, что связано с интенсивным развитием неотектонических процессов. Глубинность же заложения разломов только по результатам качественной интерпретации гравимагнитных полей остается проблематичной. Приведенные данные свидетельствуют о важной роли комплексного анализа результатов дешифрирования с геофизическими материалами, особенно на конечной стадии интерпретации и составления структурно-тектонических схем.

В настоящее время установлено, что кольцевые структуры разного ранга и генезиса являются одной из характерных черт поверхности Земли. На рис. 11.7 показаны основные типы кольцевых структур в пределах Балтийско-Скандинавского региона, выявленных на основе комплексного анализа результатов дешифрирования сканерных снимков малого и среднего разрешения, геологических данных и интерпретации физических полей [2]. Кольцевые структуры и им подобные изометричные в плане объекты имеют различные размеры, от нескольких десятков километров до нескольких тысяч километров. На схемах показаны лишь те из них, которые достоверно установлены по геолого-геофизическим данным или имеют достаточно отчетливое отражение на снимке. В Балтийско-Скандинавском регионе выделены две основные группы кольцевых структур. Первая группа связана с кольцевыми (чаще полукольцевыми или дуговыми) региональными разломами или даже полосами разломов. Для кольцевых образований этой группы связь с известными элементами геологического строения земной коры, как правило, не ясна; они как бы на-

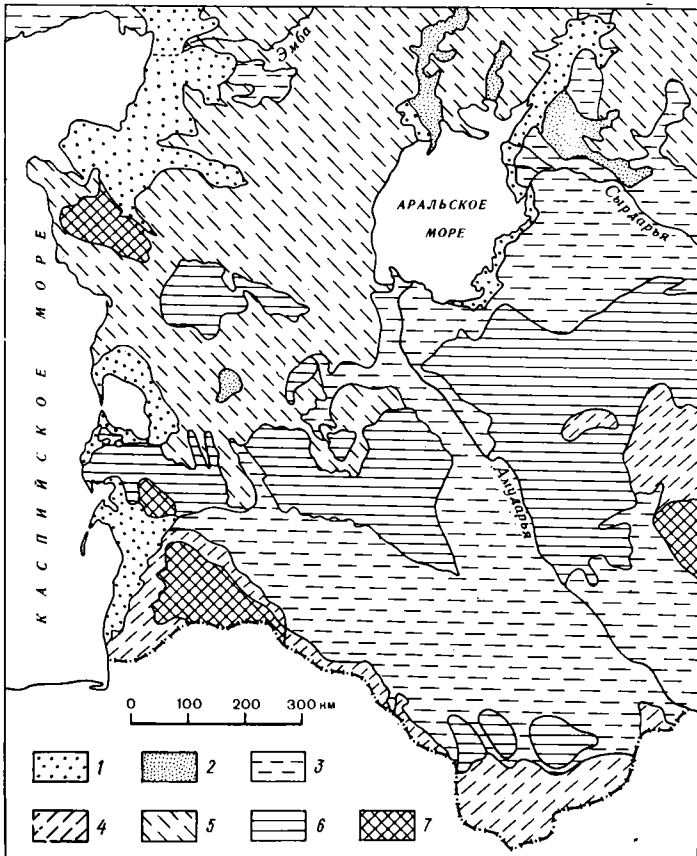


Рис. 11.4. Схема ландшафтного дешифрирования Туранской плиты.

1 — морские равнины, 2 — озерные равнины, 3 — аллювиальные и дельтовые равнины, 4 — аллювиально-пролювиальные равнины, 5 — структурно-денудационные равнины, 6 — скульптурно-денудационные равнины, 7 — горы и нагорья областей горообразования.

элементы внутри указанных зон. Системы прогибов характеризуются преимущественно серым тоном, системы поднятий — темно-серым. Причем, для Центрально-Мангышлакско-Устьюртской системы поднятий характерны линейно-вытянутые, северо-западные простирания контуров различного фототона и рисунка, а для Туаркырской — субмеридиональные, создающие зону субширотного простирания.

Разломы фундамента разного ранга проявляются на снимке как прямолинейные элементы ландшафта — линеаменты — и выделяются преимущественно по изменениям фототона с учетом и других признаков (линейно-вытянутые участки солонцов, спрямленные участки береговых линий, рек и др.). Выявленные линеаменты по комплексу геолого-геофизических данных интерпретируются как шовные зоны и зоны региональных межблоковых и внутриблоковых разломов (Южно-Эмбинская, Южно-Туранская шовные зоны, Северо-Мангышлак-

кладываются на различные структурно-формационные зоны (или «просвечивают» сквозь них), совпадая с их границами лишь на отдельных участках. Вторая группа включает собственно кольцевые

стками, ограниченными кольцевыми или дуговыми градиентными зонами и кольцевыми (чаще полукольцевыми) аномалиями. Результаты пересчета в верхнее полупространство на высоте 20—30 км и значи-

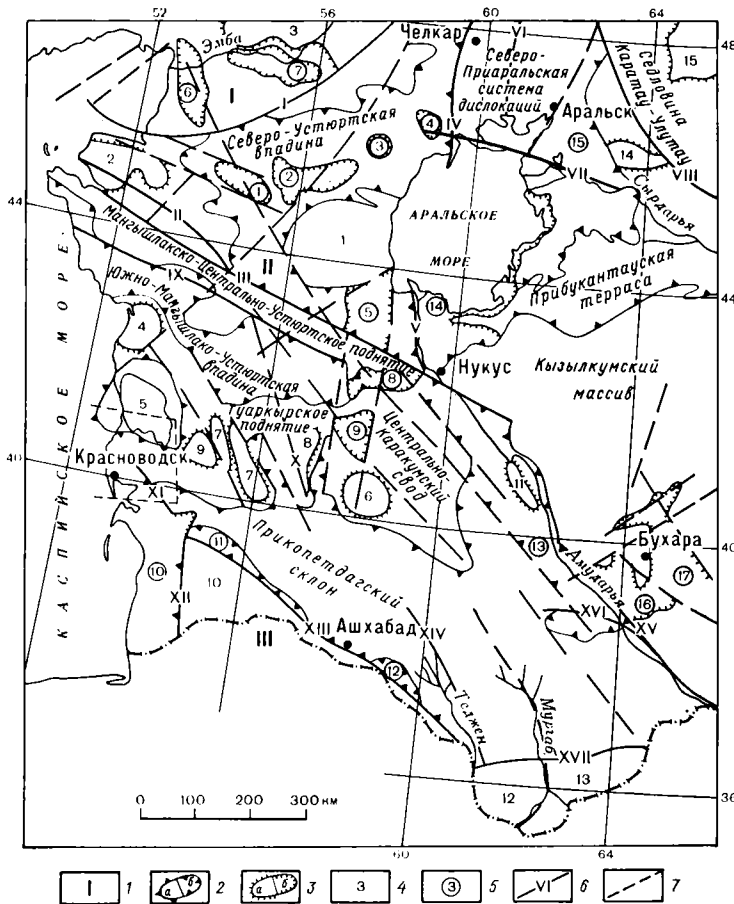


Рис. 11.5. Схема геолого-структурного дешифрирования Туранской плиты.

1) крупнейшие структурные элементы: I — Восточно-Европейская платформа, II — Туранская плита, III — Туркмено-Хорасанская система; 2) контуры крупных структурных положительных (а) и отрицательных (б) элементов; 3) контуры более мелких структурных положительных (а) и отрицательных (б) элементов; 4) положительные структуры: 1 — Актумкунский свод, 2 — Бузачинский, 3 — Сагизское поднятие, 4 — Кендырлинское, 5 — Карабогазский свод, 6 — Дарвазское поднятие, 7 — Туаркырское, 8 — Карашорское, 9 — Кемальское, 10 — Копетдаг, 11 — Султан-Санджинский вал, 12 — Бадхизское поднятие, 13 — Карабильское, 14 — Джусалинское, 15 — Улутауское поднятие; 5) отрицательные структуры: 1 — Бейнеуская котловина, 2 — Самская, 3 — Косбулакская, 4 — Кашкадарьинская, 5 — Барсакельмесская впадина, 6 — Тентяксорская, 7 — Южно-Эмбинская, 8 — Дарьялыкская котловина, 9 — Учтаган-Верхнеузбодская впадина, 10 — Западно-Туркменский прогиб, 11 — Предкопетдагский, 12 — Каихинский, 13 — Хивинский, 14 — Восточно-Аральская впадина, 15 — Приаральская, 16 — Каракульский прогиб, 17 — Рометанская котловина; 6) важнейшие разломы: I — Южно-Эмбинский, II — Бузачинский, III — Северо-Мангышлакско-Устьюртский, IV — Аральский, V — Тахтакаир-Султануиздагский, VI — Восточно-Уральский, VII — Аккулловский, VIII — Каратауский, IX — Южно-Устьюртский, X — Каратшорский, XI — Северо-Кубадагский, XII — Месериянский, XIII — Копетдагский, XIV — Тедженский, XV — Амударьинский; 7) прочие разломы.

структуры, в которых независимо от степени сложности отчетливо проявляется связь кольцевых разломов с внутренней структурой. Размеры первой группы кольцевых образований составляют в поперечнике от ста до тысячи и более километров, второй — от нескольких сотен метров до десятков и сотен километров.

Среди кольцевых образований второй группы выделен ряд генетических типов, из которых наибольший интерес представляют сложные тектономагматические блоки фундамента размером от 20 до 100 км. В физических полях этот тип кольцевых блоков представлен мозаичными аномальными уча-

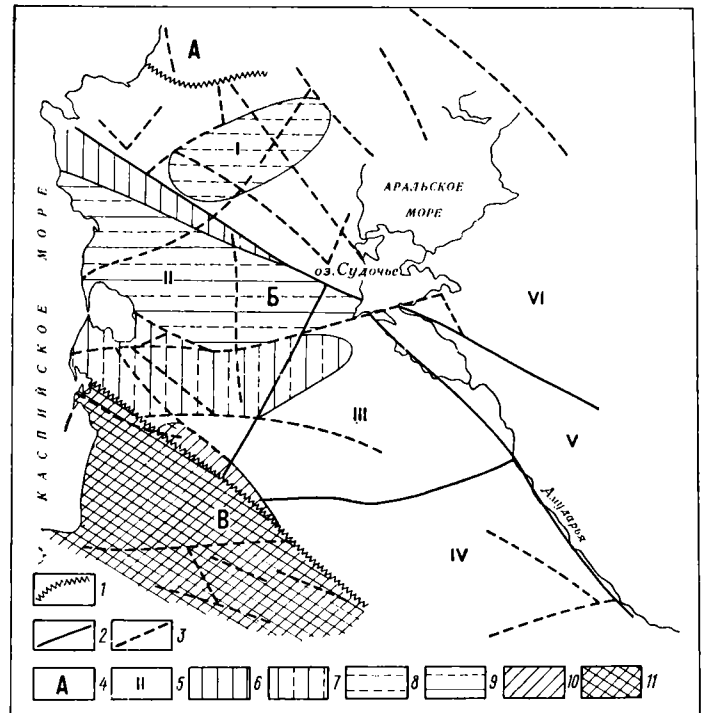


Рис. 11.6. Схема структурно-тектонических блоков Туранской плиты.

1 — краевые швы; 2 — межблоковые разломы; 3 — внутриблоковые разломы; 4 — структурно-тектонические элементы; А — Русская платформа, Б — Туранская плита, В — складчатая система Копетдага; 5 — геоблоки фундамента: I — Северо-Устьюртский, II — Карабогазский, III — Каракумский, IV — Амударьинский, V — Бухарский, VI — Кзылжумский; 6 — Мангышлакско-Устьюртская зона поднятий; 7 — Туаркырская, 8 — Северо-Устьюртская зона прогибов; 9 — Южно-Мангышлакско-Устьюртская, 10 — Предкопетдагский прогиб, 11 — система Копетдага.

тельные глубины залегания нижних кромок аномальных масс, свидетельствуют о глубоких «корнях» кольцевых структур, вплоть до поверхности Мохо. Для ряда таких структур, например Северо-Гданьской и Восточно-Борнхольмской, намечается воздымание базальтового слоя. В рельефе фундамента кольцевые блоки этого типа представлены обычно выступами с несколько опущенной центральной частью. Отмечено, что они нередко оказывают влияние на размещение структурно-фациальных комплексов чехла и их мощность, что позволяет предположить о возможной их связи с залежами нефти и газа.

Таким образом, можно отметить, что кольцевые структуры представляют собой важнейший элемент строения земной коры Балтийско-Скандинавского региона, и их последующее изучение на основе геолого-геофизических данных позволит существенно дополнить имеющиеся представления о его тектонике и закономерностях размещения полезных ископаемых.

В качестве еще одного примера использования сканерных снимков малого и среднего разрешения приведем схему линейных и кольцевых структур с элементами металлогении для Байкальской горноскладчатой области (рис. 11.8). В результате дешифрирования выявлена сложная система линейных и кольцевых образований разного ранга,

обнаруживающих пространственную связь с размещением определенных видов полезных ископаемых (металлогенические зоны нанесены с металлогенической карты территории СССР масштаба 1 : 5 000 000).

в рельефе. Наблюдаются изометрические формы, овальные, эллипсовидные, полуовальные и полукольцевые, нередко с внутренним concentрическим строением. Размеры колеблются от нескольких километров до 35—40 км. Многие проявления неко-

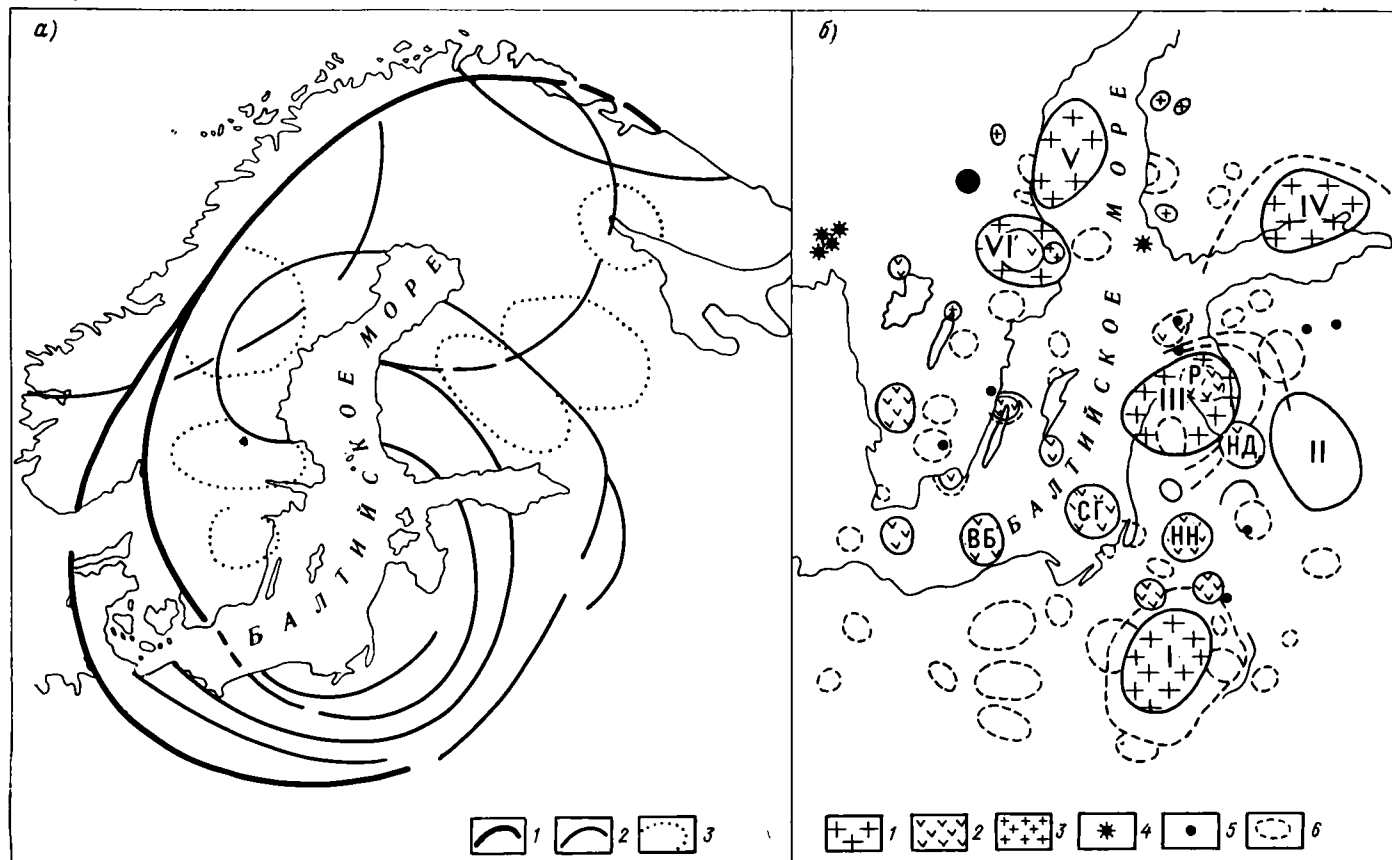


Рис. 11.7. Схема расположения кольцевых и дуговых разломов и кольцевых структур в Балтийско-Скандинавском регионе с учетом дешифрирования снимков с ИСЗ «Метеор—Природа».

*а* — крупнейшие дуговые (1), крупные дуговые и кольцевые разломы (2) и крупные кольцевые структуры неясной природы (3) по космическим данным (рисовка разломов генерализована); *б* — изометрические (кольцевые и им подобные) структуры земной коры по геолого-геофизическим и космическим данным: 1 — срединные массивы фундамента размером 150—200 км (I — Мазовецкий, II — Даугавпилский, III — Курземский, IV — Выборгский, V — Южно-Ботнический, VI — Свеаландский); 2 — кольцевые структуры сложного состава и строения (СГ — Северо-Гданьская, ВВ — Восточно-Борнхольмская, НН — Нижненеманская, НД — Нижнедаугавская, Р — Рижская); 3 — кольцевые структуры, связанные, вероятно, с гранито-гнейсовыми куполами; 4 — тектономагматические комплексы центрального типа; 5 — метеоритные кратеры (за исключением оз. Сильяна показаны вне масштаба); 6 — кольцевые структуры, неизученные и предполагаемые.

Для линейных структур (разрывных нарушений) характерны северо-восточное и северо-западное простирания, возможно, контролирующее размещение полезных ископаемых. В частности, зона золотосысып Ленского района, ограниченная с севера дугообразным разломом, с юга контролируется субширотной зоной дислокаций. В зоне сочленения последней с кольцевой структурой расположено известное Удоканское месторождение меди. С севера и юга ограничена субширотными разломами Витимо-Читинская зона золото-полиметаллической и редкометальной минерализации, приуроченная к известному Джидино-Витимскому разлому северо-восточного простирания. Таким образом, намечается широтная поясность в распределении проявлений полезных ископаемых этого региона, преимущественное распределение которых концентрируется к северу и югу от зоны максимальных неотектонических поднятий.

Кольцевые структуры, выявленные в результате дешифрирования снимков, весьма разнообразны как по форме, размерам, генезису, так и по проявлению

торых из кольцевых структур при сопоставлении с геологическими картами соответствуют определенным комплексам интрузивных вулканических и метаморфических горных пород, остальные — зонам невыявленного генезиса. Многие проявления полезных ископаемых обнаруживают пространственную связь с кольцевыми структурами — они располагаются внутри их, по периферии или в пересечении с линейными структурами. Обращают на себя внимание зоны пересечения кольцевых структур, возможно, представляющих участки повышенных тектонических напряжений, благоприятных для проникновения рудообразующих растворов. С этой точки зрения такие участки могут явиться предметом опознания.

На рис. 11.9 и 11.10 показан пример методического подхода при геологическом дешифрировании снимка малого разрешения района Чешского массива. Перед собственно геологическим дешифрированием была проведена подготовительная работа по опознанию элементов гидрографии и крупных населенных пунктов в качестве ориенти-



Рис. 11.8а. Сканерный космический снимок с ИСЗ «Метеор—Природа» территории Забайкалья.

ров, необходимая для последующего переноса геологической информации со сканерных снимков на картографическую основу (см. рис. 11.9). На структурной схеме нанесены хорошо дешифрирующиеся крупные тектонические элементы: Альпийская складчатая система, Карпатская

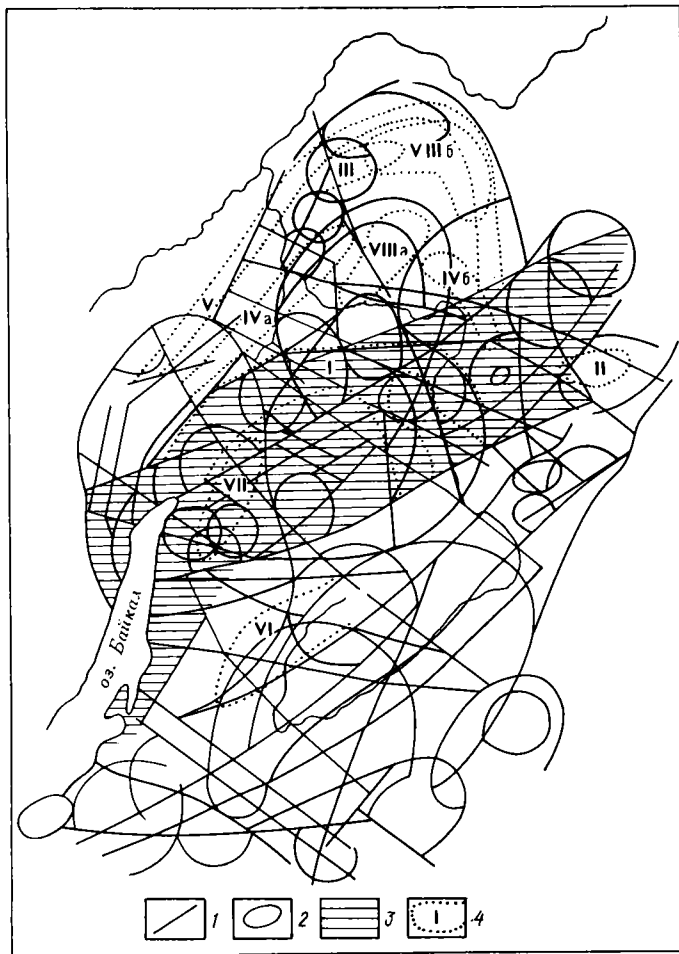


Рис. 11.86. Схема линейных и кольцевых структур с элементами металлогении.

1 — линейные структуры; 2 — овалы и кольцевые структуры; 3 — зона максимальных неотектонических поднятий; 4 — металлогенные зоны: I — Муйская зона глубинных разломов с минерализацией, связанной с офиолитами (Ni, Co, Pt, Cr) и габброперидотитовыми массивами (Cu, Ni); II — Удоканская зона медистых песчаников; III — Кевактинская зона высокоглиноземистых пород; IV — зоны слюдоносных пегматитов (IVa — Мамско-Чуйская, IVb — Нечеро-Жуинская); V — Прибайкальская зона полиметаллической минерализации; VI — Витимкан-Читинская зона золото-полиметаллической и редкометальной минерализации; VII — Верхнеангарская зона полиметаллической минерализации; VIII — зоны золотоносных россыпей Ленского района (VIIIa — Бодайбинская, VIIIb — Дальнетайгинская).

система, Предальпийско-Предкарпатский прогиб и Венгерская впадина. Внутри варисцийской складчатости выделяются участки, закрытые платформенным чехлом, а также выходы фундамента на поверхность. В целом структура Чешского массива представляется по-новому. Ранее предполагалось, что это остаточный массив, как бы выколотый по системе разломов, но на снимке видно, что это единая крупная кольцевая структура, определяемая системой граничных разломов дугообразной формы. Эта трактовка подтверждается геологическими данными, в соответствии с которыми в центральной части массива прослеживаются наиболее древние комплексы, а по периферии — окаймляющие их более молодые комплексы.

Новые данные получены и по линейным структурам: например, выявлена система меридиональных

разломов, параллельных рейнскому грабену; на значительно большее расстояние прослежена зона глубинного разлома (линия Эльбы), продолжение которого было известно до Чешского массива. На космических снимках этот разлом пересекает Чешский массив, Предкарпатский прогиб, Карпаты и уходит в Венгерскую впадину. Отдельные фрагменты разлома были картированы и ранее, но никогда не увязывались в единую зону. На схеме выделены кольцевые структуры, природа которых не всегда ясна. Одна из структур на линии Эльбы в северо-западной ее части, по-видимому, связана с пермским вулканизмом; другие, на юге, в предальпийском прогибе — с конечными моренными валами альпийского оледенения. Важно отметить, что сопоставление результатов геологического дешифрирования сканерного снимка (см. рис. 11.9) масштаба около 1 : 10 000 000 с геологическими данными свидетельствуют о том, что объем полученной полезной информации соответствует объему информации геологической карты масштаба 1 : 2 500 000 (см. рис. 11.10).

На рис. 11.11 а представлена схема тектонического районирования Кавказа, Скифской плиты и юго-востока Русской плиты, составленная по результатам дешифрирования космических снимков среднего разрешения (пример снимка приведен на рис. 11.11 б). На схеме выделены наиболее крупные площадные платформенные структуры системы разрывных нарушений, а также складчатое обрамление скифской плиты. Отчетливое выражение получила блоковая структура Скифской плиты, а также ряд известных крупных сводообразных поднятий, дешифрирующихся в виде кольцевых структур (Ставропольское и Прикумское поднятия, Астраханский свод). В пределах Прикаспийской синеклизы по аналогии с Астраханским сводом отмечен ряд кольцевых структур по кровле палеозоя, перспективных для поиска нефти и газа.

Приведенные примеры показывают, что материалы космической многозональной сканерной съемки являются принципиально новыми и, несомненно, перспективным источником дополнительной геологической информации, и их следует широко внедрять в практику региональных геологических работ всех видов (групповая геологическая съемка, космофотогеологическое картирование, геологическое доизучение площадей и др.).

Наиболее информативными, с точки зрения отражения на снимках структурно-тектонических особенностей заснятых территорий, представляются снимки в диапазонах спектра 0.6—0.7 и 0.8—1.0 мкм. Однако не следует считать, что меньшая степень информативности диапазонов 0.5—0.6 и 0.7—0.8 мкм свидетельствует о нецелесообразности использования снимков в этих диапазонах спектра, так как совместный анализ фотонизображения во всех имеющихся интервалах спектра позволяет наиболее объективно подойти к выявлению структурно-тектонических особенностей исследуемых регионов.

Дальнейшие перспективы использования космических сканерных съемок для решения геологических задач связаны с улучшением метричности сканерного изображения, повышением разрешающей способности, а также с дальнейшей разработкой цифровых способов трансформации и тематической обработки снимков на ЭВМ.



Рис. 11.9. Сканерный космический снимок с ИСЗ «Метеор—Природа» территории Средней Европы.



Рис. 11.10. Схема структурного дешифрирования района Чешского массива.  
 1 — разломы, 2 — линейные зоны, 3 — основные прогибы, 4 — кольцевые структуры.



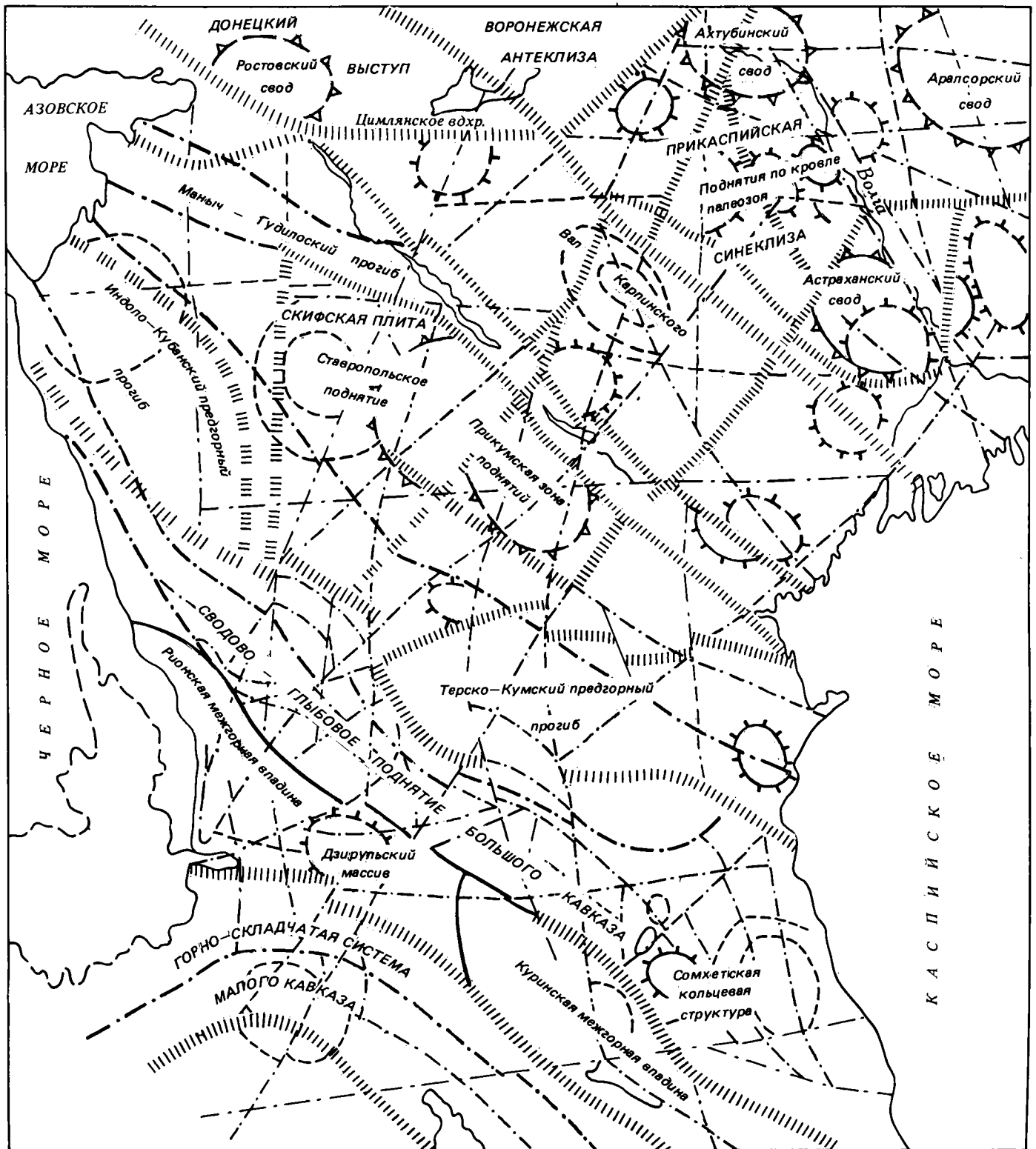


Рис. 11.11а. Схема тектонического районирования Скифской плиты и ее обрамления.

1 — наиболее крупные разрывные нарушения, разделяющие складчатые и платформенные области; 2 — разрывные нарушения, разделяющие блоки внутри складчатых и платформенных областей; 3 — трансструктурные нарушения, продольные совпадающие с ранее известными; 4 — секущие, установленные при дешифрировании; 5 — кольцевые структуры, соответствующие сводам и зонам поднятий; 6 — поднятиям при кровле палеозоя и группам локальных антиклинальных структур.

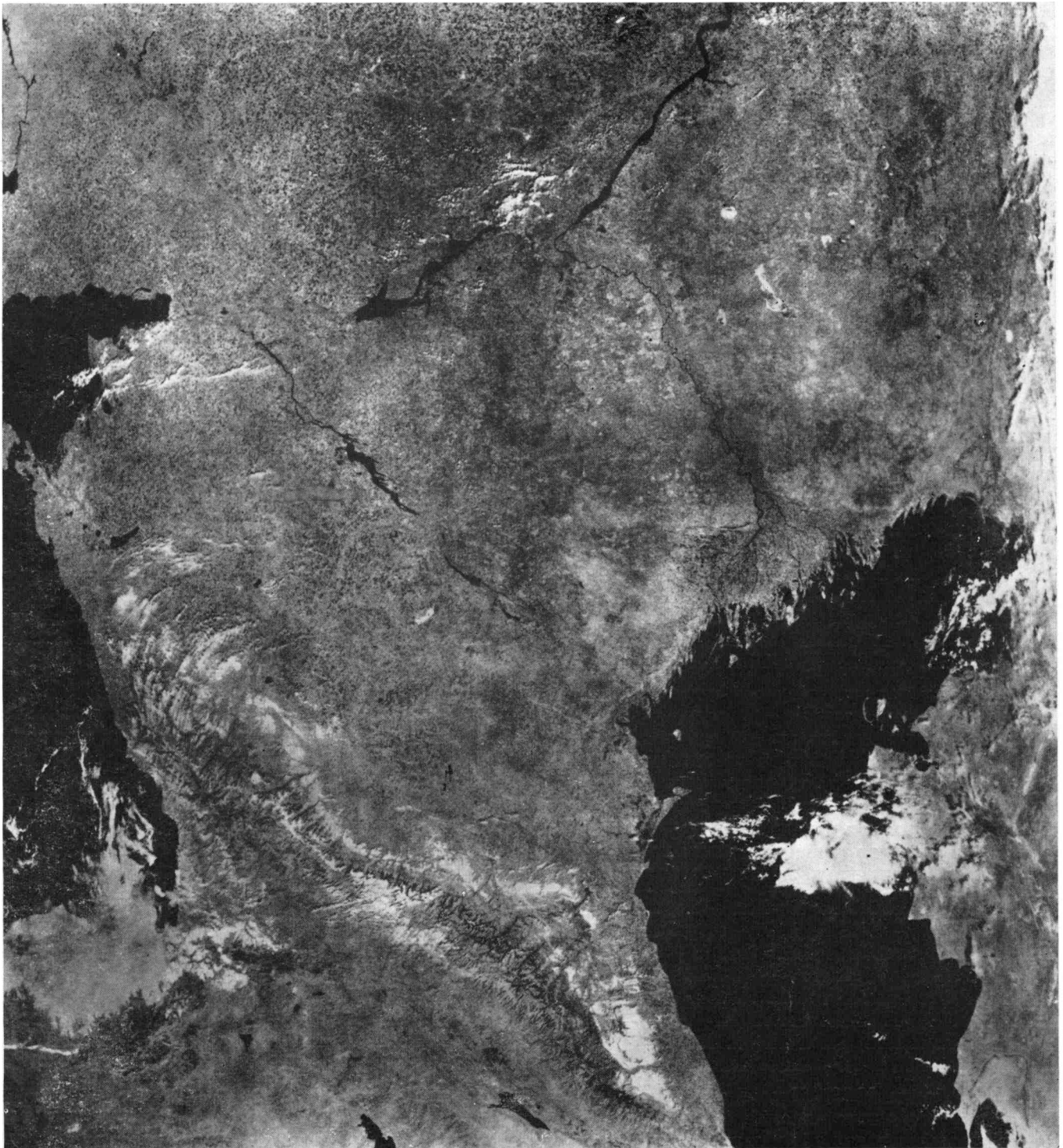


Рис. 11.116. Сканерный космический снимок с ИСЗ «Метеор—Природа» (аппаратура МСУ—С) района Скифской плиты.

## Заключение

Приведенные в книге описания аппаратуры ИСЗ, методов обработки спутниковых данных и сопутствующей опорной информации, многочисленные конкретные примеры использования результатов интерпретации данных видимого и ИК диапазонов позволяют наглядно представить весь комплекс взаимосвязанных проблем космического природоведения. Подробное рассмотрение целого ряда задач, при решении которых уже успешно применяются спутниковые данные, делает эту книгу полезным пособием по комплексному использованию спутниковых и традиционных измерений и наблюдений в интересах различных отраслей народного хозяйства и контроля природной среды.

Эта книга позволит нынешним и будущим потребителям спутниковой информации о природных ресурсах Земли и Мирового океана получить представление об уже существующих методах обработки, интерпретации и использования космических данных и одновременно поможет наметить пути совершенствования и развития всех составных частей космической системы, предназначенной для изучения природных ресурсов.

Представленные в книге материалы отражают определенный, в значительной мере уже пройденный этап в развитии космического природоведения. Этот этап характеризуется поиском наилучших путей обработки спутниковых данных, широким использованием визуально-инструментальных методов для интерпретации данных при автоматизации отдельных звеньев процесса обработки информации, использованием полученной новой информации, при решении различных научных и народно-хозяйственных задач на экспериментальной основе. Прогресс в космическом природоведении, по-видимому, будет связан с реализацией определенных тенденций в развитии составных частей космической системы.

Одним из возможных путей развития ИСЗ является переход от универсальных космических аппаратов к специализированным, с адаптивными информационно-измерительными бортовыми комплексами, допускающими гибкую перестройку программ измерений (например, под определенную задачу, с учетом сезона года и т. д.), увеличение доли бортовой аппаратуры СВЧ диапазона для пассивного и активного зондирования поверхности суши и океана (вопросы измерений в СВЧ диапазоне не нашли отражения в этой книге), выполнение части операций по обработке информации непосредственно на борту ИСЗ. Кроме того, необходимо дальнейшее совершенствование существующих и создание новых методов обработки и интерпретации космической информации с использованием моделей дистанционного зондирования в различных диапазонах электромагнитного спектра. Новые методы должны быть более устойчивыми к изменению условий космических съемок, работать в более широких интервалах изменения состояния изучаемых объектов. Перспективным является совместный анализ данных об одном и том же объекте, полученных различными техническими средствами. Интересные, даже неожиданные результаты может дать использование методов наложения различных геофизических полей, полученных на основе спутниковых измерений.

Существенное развитие должна получить наземная подсистема сбора, оптимальной обработки и передачи данных опорных синхронных (квазисинхронных) измерений параметров природной среды, необходимых для оперативной обработки и интерпретации спутниковых данных.

Определенный этап работ по развитию космического природоведения связан с автоматизацией значительно большего числа звеньев процесса обработки и интерпретации данных на основе уже разработанных алгоритмов и опробованных методических приемов. Необходим переход от отдельных экспериментов к массовой обработке данных «в линию», что позволит существенно увеличить объем используемых спутниковых данных, получать статистически более надежные результаты, ускорить процесс доведения результатов обработки до непосредственных потребителей. На этой основе окажется возможным вовлечение новых научных дисциплин в сферу космического природоведения, расширение числа отраслей народного хозяйства, использующих спутниковую информацию. Большое место должны занять методы космического природоведения в решении ряда экономических проблем, например, таких, как рациональное использование энергетических ресурсов, проблема землепользования и агрометеорологии, ведение водного кадастра, оптимизация размещения промышленных комплексов, обеспечение всесторонней хозяйственной деятельности на шельфе и в открытом океане, комплексное изучение биологической продуктивности различных районов Мирового океана и др.

Важной тенденцией развития современного природоведения является системный подход к решению проблем использования природных ресурсов на основе комплексного изучения природной среды во взаимосвязи с хозяйственной деятельностью.

Гипотетическая географическая информационная система, вероятно, будет включать в виде составной части космическую систему изучения природных ресурсов. Тогда выходная продукция космической системы (например, тематические карты, таблицы различных параметров состояния природной среды и др.) явится лишь исходной для моделей, описывающих тот или иной природный процесс. Использование спутниковой информации в таких моделях должно улучшить прогноз развития рассматриваемого процесса и обеспечить непрерывное сравнение прогноза с реально наблюдаемыми явлениями, создавая тем самым предпосылки для поиска путей управления природными процессами или их отдельными сторонами, а в ряде случаев, и для прямого воздействия на них.

Здесь необходим последовательный поиск оптимального места космической информации в общей совокупности исходных данных о состоянии природной среды, используемых в народном хозяйстве, на основе существующих и разрабатываемых моделей принятия деловых решений.

Сейчас уже трудно представить себе деятельность различных научных направлений без использования спутниковых данных. Однако следует заметить, что в целом вопрос о широком использовании спутниковой информации оказывается вовсе не простым, и не только в силу существования

организационно-технических и научно-методических проблем, но и из-за наличия определенного психологического барьера, мешающего восприятию и усвоению качественно новых данных. Формирование круга потребителей, постоянное совершенствование взаимоотношений с ними — также одна из важнейших задач развития космического природо-ведения.

Дальнейшее планомерное развитие дистанционного зондирования Земли и Мирового океана из космоса как одного из аспектов использования космического пространства в мирных целях станет основой для широкого использования новой информации на благо человечества.

\* \*  
\*

Авторский коллектив выражает признательность всем учреждениям, организациям и лицам, оказавшим содействие в подготовке и выпуске альбома-монографии.

Авторы благодарят своих коллег за полезное обсуждение книги и представление материалов, использованных в разделах 5, 6, 7 и 11; В. Р. Головчина (п. 5.3), Т. А. Воробьеву, Н. А. Евланову, Е. Б. Левину, Г. В. Мурашкинцеву, Е. А. Рождественскую (глава 6); В. С. Добрых, Л. Б. Карвовскую, Г. И. Тыжнову, Е. В. Щербенко (глава 7); В. И. Астахова, И. И. Башилову, С. М. Богородского, В. Н. Брюханова, В. А. Буша, В. В. Буклина, Е. Н. Востокова, Ю. В. Головченко, Б. И. Дмитриеву, А. В. Доливо-Добровольского, Е. Л. Елович, В. Я. Ероменко, Ю. Н. Иконникова, Я. Г. Каца, М. Т. Козицкую, Р. Н. Котелкова, В. В. Козлова, С. П. Лебедева, Г. В. Махина, Б. Н. Можяева, В. Ф. Номоканову, Н. С. Посошкову, Л. И. Соловьеву, С. И. Стрельникова, Д. М. Трофимова, В. Е. Хаина, О. Г. Шеремета (глава 11).

# Список литературы

## К главе 1

1. Гайцхоки Б. Я. Оптические характеристики некоторых разновидностей льдов.— Труды ААНИИ, 1975, т. 326, с. 71—73.
2. Исследование океана из космоса/Б. В. Новогрудский, В. Е. Скляр, К. Н. Федоров, К. С. Шифрин.— Л.: Гидрометеиздат, 1978.— 54 с.
3. Калинин Г. П., Курилова Ю. В., Колосов П. А. Космические методы в гидрологии.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.— 220 с.
4. Карвовская Л. Б., Козодеров В. В. Взаимодействие электромагнитного излучения с почвенным покровом.— Обзорная информация, сер. «Метеорология», вып. 7. Обнинск.— 40 с.
5. Козодеров В. В. Атмосферная коррекция видеозображений.— Исслед. Земли из космоса, 1983, № 1, с. 65—75.
6. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности.— Л.: Гидрометеиздат, 1982.— 216 с.
7. Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса/Под ред. К. Я. Кондратьева.— Л.: Гидрометеиздат, 1979.— 247 с.
8. Методы обработки и интерпретации многозональной информации о природных ресурсах Земли.— Труды ГосНИЦИПР, 1980, вып. 8.— 160 с.
9. Методы дистанционных измерений параметров состояния атмосферы и подстилающей поверхности со спутника.— Труды ГосНИЦИПР, 1982, вып. 15.— 112 с.
10. Методы обработки и тематического анализа многозональной аэрокосмической видеoinформации.— Труды ГосНИЦИПР, 1983, вып. 13.— 127 с.
11. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 340 с.
12. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв.— Л.: Гидрометеиздат, 1981.— 231 с.

## К главе 2

1. Арцимович Л. А., Андронов И. М., Трифонов Ю. В. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытания на ИСЗ «Метеор».— Космические исследования, 1974, т. 12, вып. 3, с. 451—468.
2. Козлов Н. П., Сагдеев Р. З., Шереметьевский Н. Н. Комплексный эксперимент на ИСЗ «Метеор» — важный шаг в развитии оперативных исследований Земли из космоса.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 5—7.
3. Трифонов Ю. В. Комплекс технических средств эксперимента по дистанционному зондированию Земли из космоса.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 21—27.
4. Трифонов Ю. В. Спутники серии «Метеор», предназначенные для изучения Земли из космоса.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 8—20.
5. Электрореактивные двигательные установки в космосе/И. М. Андронов, Ю. В. Трифонов, Ю. Ф. Тайнов и др.— Космические исследования, 1974, т. 12, вып. 3, с. 447—450.

## К главе 3

1. Аванесов Г. А. Экспериментальный информационно-измерительный комплекс на основе многозональной сканирующей системы «Фрагмент».— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 40—44.
2. Аванесов Г. А., Глазков В. Д., Зиман Я. Л. Многозональная сканирующая система «Фрагмент».— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 45—56.
3. Проблемы цифровой передачи и регистрации многозональной видеoinформации и их решение в эксперименте «Фрагмент»/А. Ф. Богомолов, С. М. Попов, Ю. Д. Смоляников, А. В. Степин.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 57—64.
4. Селиванов А. С., Тучин Ю. М. Радиотелевизионный комплекс спутников «Метеор» для исследования природных ресурсов Земли.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 28—34.
5. Экспериментальный бортовой информационный комплекс для наблюдения Земли/А. С. Селиванов, Ю. М. Тучин, М. К. Нараева, Б. И. Носов.— Исследование Земли из космоса, 1981, № 5, с. 35—39.

## К главе 4

1. Аллаhverдов Ф. М., Каллиников Ю. В. К вопросу построения морских подспутниковых информационных измерительных комплексов.— Исследование Земли из космоса, 1982, № 1.
2. Викторов С. В., Тищенко А. П. Принципы организации банка опорных данных для использования в интерактивных системах обработки космической информации об океане.— Труды ГОИН, 1982, вып. 166, с. 24—29.
3. Викторов С. В. Авиационные аппаратные комплексы для океанографических исследований в оптическом диапазоне.— В кн.: Оптика океана и атмосферы. Тезисы докладов. Баку, 1980.
4. Драбкин В. В., Аллаберт А. В., Флоренская М. Л. Задачи и общие принципы организации океанографических аэрокосмических полигонов.— Труды ГОИН, 1982, вып. 166, с. 30—36.
5. Зиман Я. Л., Сажко М. Ю., Цитович В. С. Самолетные лаборатории и опыт их использования при отработке методов и средств дистанционных исследований земных ресурсов.— В сб.: Космические исследования земных ресурсов. Т. 1, М.: Наука, 1976, с. 275—279.
6. Исмаилов Т. К. Развитие методов и средств подспутниковых наблюдений.— Исследование Земли из космоса, 1980, № 1, с. 35—39.
7. Использование космических средств для изучения земных ресурсов и контроля окружающей среды. Самолетный эксперимент/Ю. К. Ходарев, Г. А. Аванесов, Б. С. Дунаев и др.— Метеорология и гидрология, 1974, № 4, с. 25—29.
8. К вопросу исследований полей радиационной температуры поверхности моря с помощью самолета на экспериментальных подспутниковых полигонах/А. В. Аллаберт, С. В. Викторов, В. В. Драбкин, М. Л. Флоренская.— В кн.: Первая Всесоюзная конференция «Биосфера и климат по данным космических исследований». Тезисы докладов. Баку, 1982, с. 320—322.
9. Моделирование космического эксперимента с помощью самолетной лаборатории/Г. А. Аванесов, И. В. Баринов, В. Д. Глазков и др. В сб.: Космические исследования земных ресурсов. Т. 1.— М.: Наука, 1976, с. 280—287.
10. Экспериментальные океанографические полигоны/М. М. Беляев, В. В. Драбкин, Н. Н. Лазаренко, В. Г. Карпачевский.— В кн.: I съезд советских океанологов. Тезисы докладов.— М.: 1977, вып. 1, с. 173—174.

## К главе 5

1. Алексеев А. С., Кульков Н. В., Пяткин В. П. Региональный центр автоматизированной обработки аэрокосмической информации (концепция).— Новосибирск: Препринт ВЦСО АН СССР: Пр.-94, 1978.— 42 с.
2. Асмус В. В., Григорьева О. Н., Тищенко А. П. Субоптимальные решающие правила с динамическим критерием выбора признаков.— Исследование Земли из космоса, 1980, № 2.
3. Асмус В. В., Спиридонов Ю. Г., Тищенко А. П. Практические аспекты радиационной коррекции многозональной видеoinформации.— Исследование Земли из космоса, 1980, № 4, с. 59—68.
4. Асмус В. В., Спиридонов Ю. Г., Тищенко А. П. Фильтрация полупрозрачной облачности.— Исследование Земли из космоса, 1983, № 3.
5. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен.— М.: Мир, 1976.— 511 с.
6. Красиков В. А., Хатунцева М. В. Обзор машинных методов интерпретационной обработки многозональной видеoinформации.— В кн.: Аэрокосмические исследования Земли. Обработка видеoinформации.— М.: Наука, 1978, с. 132—144.
7. Красиков В. А., Шамис В. А. Кластерная процедура на базе многомерной гистограммы распределения.— Исследование Земли из космоса, 1982, № 2, с. 107—115.
8. Лэндгриб Д. А. Техника анализа для дистанционного зондирования.— ТИИЭР, т. 69, № 5, 1981.
9. Математические и технические проблемы обработки изображений.— Новосибирск: ВЦСО АН СССР, 1980.— 207 с.
10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.— 790 с.

11. Тищенко А. П., Головчин В. Р. Пространственная привязка спутниковых сканерных изображений по траекторным данным.—В кн.: Аэрокосмические исследования Земли. Обработка видеoinформации на ЭВМ.—М.: Наука, 1978, с. 56—65.
  12. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений.—М.: Сов. радио, 1979.—312 с.
- К главе 6**
1. Гвоздецкий Н. А., Михайлов Н. И. Физическая география СССР.—М.: Мысль, 1970.—543 с.
- К главе 8**
1. Методические указания управлениям Гидрометслужбы № 26. Организация и производство авиаразведки снежного покрова.—Л.: Гидрометеиздат, 1959.—19 с.
  2. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике. Картирование снежного покрова.—Л.: Гидрометеиздат, 1980.—73 с.
  3. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации в оперативной практике Гидрометслужбы. Оценка ледовой обстановки озер и водохранилищ.—Л.: Гидрометеиздат, 1982.—42 с.
  4. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации. Оценка затоплений речных пойм.—Л.: Гидрометеиздат, 1982.—48 с.
- К главе 9**
1. Абрамов А. А., Блатов А. С., Ульянова В. И. Баротропно-бароклиническая неустойчивость основного черноморского потока и вихреобразование в Черном море.—Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1981, т. 17, № 9, с. 974—981.
  2. Берестовский И. Ф., Викторов С. В. Роль перспективных космических систем в выполнении океанографического раздела Всемирной программы исследования климата.—Метеорология и гидрология, 1981, № 10, с. 113—119.
  3. Берестовский И. Ф., Викторов С. В. Космические методы в системе океанографических экспериментов Всемирной программы исследования климата. Тезисы докладов на Первой всесоюзной конференции «Биосфера и климат по данным космических исследований» (Баку, 29 ноября—3 декабря 1982 г.). Баку, 1982, с. 5—8.
  4. Блатов А. С. Гидрологическая структура и энергопас вихрей основного черноморского течения.—Метеорология и гидрология, 1981, № 7, с. 86—93.
  5. Богатко О. Н. и др. Поверхностные течения Черного моря.—Комплексные исследования Черного моря. Севастополь, 1979, с. 26—33.
  6. Булатов Н. В. Вихревая структура субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана.—Уч. зап. ЛГУ, сер. географ. 1980, вып. 27, с. 61—72.
  7. Викторов С. В. Космическая океанография: предмет, состояние, перспективы.—Труды ГОИН, 1982, вып. 166, с. 4—23.
  8. Викторов С. В., Тищенко А. П. Принципы организации «банка опорных данных» для использования в интерактивных системах обработки космической информации об океане.—Труды ГОИН, 1981, вып. 166, с. 24—29.
  9. Гамсахурдия Г. Р., Саркисян А. С. Диагностические расчеты скорости течений в Черном море на 11 горизонтах.—Океанология, 1975, т. 15, № 2, с. 239—244.
  10. Гидрология Средиземного моря/И. М. Овчинников, Е. А. Плахин, Л. В. Москаленко и др.—Л.: Гидрометеиздат, 1976.—376 с.
  11. Исследования океана из космоса (обзор)/Б. В. Новогрудский, В. В. Скляр, К. Н. Федоров, К. С. Шифрин.—Л.: Гидрометеиздат, 1978.—53 с.
  12. Казьмин А. С., Скляр В. Е. Некоторые особенности циркуляции вод Черного моря по данным ИСЗ «Метеор».—Исследование Земли из космоса, 1982, № 6, с. 42—49.
  13. Казьмин А. С., Скляр В. Е. Опыт использования видеoinформации с ИСЗ «Метеор» для исследования явлений в океане.—Исследование Земли из космоса, 1981, № 6, с. 48—57.
  14. Кондратьев К. Я. Опыт спутниковых океанографических исследований в США. I «Seasat».—Исследование Земли из космоса, 1980, № 5, с. 109—116.
  15. Нелепо Б. А. Современные проблемы спутниковой океанологии.—Исследование Земли из космоса, 1980, № 1, с. 55—63.
  16. Скляр В. Е., Федоров К. Н. Трехмерная структура фронтальной зоны Гольфстрима по синхронным данным спутника и корабля.—Исследование Земли из космоса, 1980, № 3, с. 5—13.
  17. Спутниковая гидрофизика/Б. А. Нелепо, Ю. В. Терехин, В. К. Косырев, Б. Е. Хмыров.—М.: Наука, 1983.—253 с.
  18. Федоров К. Н. Дистанционные методы исследования океана.—В кн.: Итоги науки и техники. Океанология. Т. 4.—М., ВИНТИ, 1977, с. 132—165.
  19. Федоров К. Н. Надежды и реальности космической океанологии.—Исследование Земли из космоса, 1980, № 1, с. 64—78.
  20. Федоров К. Н., Кузьмина Н. П. Океанические фронты.—Итоги науки и техники. Сер. «Океанология», 1979, т. 5, с. 4—44.
  21. Филиппов Д. М. Циркуляция и структура вод Черного моря.—М.: Наука, 1968.—135 с.
  22. Allan T. D. Monitoring the sea surface.—Proc. Techn. Conf. on "Use of Data from Meteorological Satellites", Lannion, 1979.—ESA-143, 1979, p. 205—215.
  23. Apel J. R. Past, present and future capabilities of satellites relative to the needs of ocean science.—Rep. for IOC, Unesco, Paris, France, 1977.
  24. Apel J. R. et al. Observations of oceanic internal waves from the Earth resources technology satellite.—J. Geophys. Res., 1975, v. 80, N 6, p. 865—881.
  25. Apel J. R. et al. A study of oceanic internal waves using satellite imagery and ship data.—Remote Sens. Environ., 1976, v. 5, p. 125—135.
  26. Byrne H. M. Satellite data precessing for oceanographic research—Marine Technol. Japan, 1980—81, v. 14, N 6, p. 32—40.
  27. Diets R. S. The oceans from the Skylab-4.—Sea Frontiers, 1974, v. 20, N 6, p. 359—363.
  28. Ewing G. Slicks, surface films and internal waves.—J. Mar.—Res., 1950, v. 9, p. 161.
  29. Gargett A. E., Hughes B. A. On the interaction of surface and internal waves.—J. Fluid Mech., 1972, v. 52, pt. 1, p. 179—191.
  30. Levine E. R., White W. B. Thermal frontal zones in the eastern Mediterranean Sea.—J. Geophys. Res., 1972, v. 77, N 6, p. 1081—1086.
  31. Remote sensing in meteorology, oceanography and hydrology/Ed. A. P. Cracknell.—Ellis Horwood Limited, Chichester, 1981, p. 74.
  32. Sawyer C., Apel J. R. Satellite images of internal wave signatures.—Atlantic Oceanographic and Meteorological Lab., Miami, 1976.
  33. Sidran M. Infrared sensing of sea surface temperature from space.—Remote Sens. Environ., 1980, v. 10, N 2, p. 101—114.
  34. Strong A. E., De Rycke R. J., Stumpf H. B. Extensive areas of reduced waves leeward of the Lesser Antilles.—Geophys. Res. Lett., 1974, v. 1, N 1, p. 47—49.
  35. Szerkielka K.-H. Spacecraft oceanography.—Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev., 1976, v. 14, p. 99—166.
  36. Nierenberg W. A. Oceanography from space: looking back twenty years—looking forward ten.—In: COSPAR/SCOR/IUCRM Symp. "Oceanography from Space", Venice, 1980.
  37. Vetlov I. P. and Johnson D. S. Role of satellites in WMO programmes in 80's.—Planning Rep., N 6, 36, WMO Paper N 494, Geneva, 1978.
  38. Victorov S. V., Vinogradov V. V., Terziev F. S. Studies of the Baltic Sea with the help of IR-diapason "Meteor-2" information.—In: Proc. XIII Conf. Baltic Oceanographers, Helsinki, 1982. Valton Poinatuskeskus, 1982, v. 2, p. 732—741.
  39. Wennerberg G. Anvanding av vadersatellitdata for att studera yt attentemperatur "S. M. H. I".—NB Rap. N 41, 1980.—8 p.
- К главе 11**
1. Артамонов М. А., Востоков Е. Н., Шеремет О. Г. Разломная тектоника Балтийской синеклизы и прилегаю-

- щих территорий по космическим и геолого-геофизическим данным.— Изв. вузов, Геология и разведка, 1978, № 10.
2. Артамонов М. А., Востоков Е. Н. О кольцевых структурах Балтийско-Скандинавского региона (по геолого-геофизическим и космическим данным).— Изв. вузов, Геология и разведка, 1981, № 3.
  3. Артамонов М. А., Рихтер Д. Г., Евдохин А. Г. Принципы разработки информационно-поисковой системы для отраслевого использования материалов космических фотосканерных съемок, получаемых с ИСЗ типа «Метеор».— Экспресс-информация ВИЭМС. Общая и региональная геология, картирование, 1980, № 5—6.
  4. Аэрокосмические исследования Земли.— М.: Наука, 1979.
  5. Богородский С. М., Буклин В. В., Козлов В. А., Соловьева Л. И. Некоторые вопросы методики использования космических снимков (по результатам работ на комплексных геологических полигонах).— Изв. вузов, Геология и разведка, 1978, № 10.
  6. Геологические исследования из космоса.— М.: Мир, 1975.
  7. Еремин В. К., Брюханов В. Н., Можаяев Б. Н. Состояние и основные задачи развития аэро- и космических методов геологии.— Изв. вузов, Геология и разведка, 1978, № 10.
  8. Использование космических снимков для региональных геологических исследований/В. К. Еремин, М. А. Артамонов, С. М. Богородский и др.— В кн.: Аэрокосмические исследования Земли. АН СССР.— М.: Наука, 1979.
  9. Кац Я. Г., Рябухин А. Г., Трофимов Д. И. Космические методы в геологии. Изд-во МГУ, 1976.
  10. Космогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР. Мингео СССР, 1979.

# Оглавление

Предисловие . . . . .	3	<i>Глава 7. Изучение состояния почвенного и растительного покрова . . . . .</i>	68
Введение . . . . .	6	7.1. Изучение почвенного покрова . . . . .	—
<i>Глава 1. Физические аспекты дистанционного изучения природной среды . . . . .</i>	7	7.2. Изучение состояния лесной растительности . . . . .	69
1.1. Спектральные характеристики природных объектов в оптическом диапазоне . . . . .	—	7.3. Использование спутниковой информации для оценки состояния пустынно-пастбищной растительности . . . . .	73
1.2. Искажающее влияние атмосферы . . . . .	14	7.4. Оценка состояния сельскохозяйственных угодий и хода сельскохозяйственных работ . . . . .	84
<i>Глава 2. Искусственные спутники Земли «Метеор» и «Метеор—Природа» . . . . .</i>	16	<i>Глава 8. Спутниковая информация для гидрологических целей . . . . .</i>	91
2.1. Требования к космическим аппаратам, предназначенным для изучения природных ресурсов Земли . . . . .	—	8.1. Снежный покров на водосборах . . . . .	—
2.2. Конструкция космических аппаратов . . . . .	17	8.2. Ледовая обстановка на водоемах . . . . .	95
2.3. Этапы развития программы «Метеор—Природа» . . . . .	22	8.3. Оценка разливов и затопления речных пойм . . . . .	98
<i>Глава 3. Радиотелевизионные комплексы спутников «Метеор—Природа» . . . . .</i>	25	8.4. Автоматизированная обработка спутниковых данных для гидрологических целей . . . . .	100
3.1. Эксплуатационный радиотелевизионный комплекс «Природа» . . . . .	—	<i>Глава 9. Использование спутниковой информации видимого и ИК диапазонов в океанографии . . . . .</i>	103
3.2. Экспериментальный бортовой информационный комплекс (БИК-Э) . . . . .	28	9.1. Космическая океанография на современном этапе . . . . .	—
3.3. Экспериментальный информационно-измерительный комплекс на основе многозональной сканирующей системы «Фрагмент» . . . . .	32	9.2. Наблюдения ледовой обстановки на морях и океанах, исследования распределения и динамики морских льдов . . . . .	107
<i>Глава 4. Сбор подспутниковой информации . . . . .</i>	35	9.3. Исследование вихревых образований, локальных фронтов и внутренних волн . . . . .	110
4.1. Банк дополнительной информации . . . . .	—	9.4. Исследование водных масс с различными оптическими характеристиками. Определение полей планктона и взвесей . . . . .	118
4.2. Технические средства для сбора информации . . . . .	36	9.5. Использование в региональных океанографических исследованиях спутниковых цифровых карт температуры поверхности воды . . . . .	125
4.3. Комплексные подспутниковые эксперименты . . . . .	38	<i>Глава 10. Мониторинг антропогенного воздействия на природную среду . . . . .</i>	129
<i>Глава 5. Цифровая обработка многозональной космической информации . . . . .</i>	39	<i>Глава 11. Применение космических многозональных сканерных съемок в геологии . . . . .</i>	131
<i>Глава 6. Изучение природно-территориальных комплексов . . . . .</i>	56	11.1. Геологическая информативность космических многозональных сканерных снимков . . . . .	132
6.1. Природно-территориальные комплексы Нечерноземья . . . . .	—	11.2. Этапы и последовательность геологического дешифрирования космических сканерных снимков . . . . .	—
6.2. Зона освоения Байкало-Амурской магистрали . . . . .	58	11.3. Использование космических сканерных снимков в геологии . . . . .	134
6.3. Плато Путорана . . . . .	63	<b>Заключение . . . . .</b>	146
6.4. Природно-территориальные комплексы Алтайского края . . . . .	—	<b>Список литературы . . . . .</b>	148



## *Природа Земли из космоса*

Редактор Е. И. Ильиних. Художник И. Г. Архипов. Художественный редактор Б. А. Денисовский. Технический редактор Л. М. Шишкова. Корректор А. В. Хюркес. ИБ № 1482. Сдано в набор 19.06.84. Подписано в печать 30.11.84. М-31052. Формат 60×69<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Бумага мелованная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 20,0 с вкладкой. Кр.-отт. 23,0. Уч.-изд. л. 22,16. Тираж 6300 экз. Индекс МОЛ-105. Заказ № 213. Цена 2 р. 80 к. Гидрометеиздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23. Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.