

Министерство Украины по вопросам чрезвычайных ситуаций  
и по делам защиты населения от последствий Чернобыльской катастрофы

Академия гражданской защиты Украины

Ю.А. Абрамов, В.В. Тютюник, Р.И. Шевченко

# **АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ**

Харьков 2006

ББК 85.66  
К90

Абрамов Ю.А., Тютюник В.В., Шевченко Р.И. Аэрокосмический мониторинг. – Х.: Изд-во АГЗУ, 2006. – 172 с.

Издание предназначено для специалистов в области организации дистанционного наблюдения за объектами жизнедеятельности и факторами чрезвычайных ситуаций различной природы, курсантов, студентов, слушателей высших учебных заведений III и IV уровней аккредитации и сотрудников органов управления МЧС Украины.

Рецензенты: д-р ф-м. наук, проф. А.В. Бастеев;  
д-р хим. наук, проф. В.Д. Калугин.

К90 Монография «Аэрокосмический мониторинг» объединила современные научные и практические достижения в области анализа опасных факторов чрезвычайных ситуаций с использованием средств авиационного и космического базирования.

В монографии изложены общие требования к построению систем дистанционного наблюдения в условиях чрезвычайных ситуаций. Приведены методики получения и обработки информационных потоков средствами аэрокосмического мониторинга. Обобщена информация о современных системах и средствах аэрокосмического мониторинга. Приведены требования к организации систем мониторинга и управления силами оперативного реагирования на возникновение аварий и катастроф.

**ББК 85.66**

© Абрамов Ю.А.,  
Тютюник В.В.,  
Шевченко Р.И.  
© АГЗУ, 2006

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ .....	5
1.1. Анализ опасных факторов чрезвычайных ситуаций. Классификация. Общие понятия и определения .....	5
1.2. Общая характеристика дистанционных информационных систем аэрокосмического мониторинга чрезвычайных ситуаций .....	9
1.3. Оценка негативного воздействия опасных факторов чрезвычайных ситуаций с применением дистанционных систем аэрокосмического мониторинга .....	13
Глава 2. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ОКОЛОЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ .....	24
2.1. Системы и средства околоземного базирования .....	24
2.2. Методология организации и проведения мониторинга с использованием космических летательных аппаратов .....	46
2.3. Технологии анализа и прогноза чрезвычайных ситуаций с использованием данных космических летательных аппаратов .....	84
Глава 3. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВИАЦИОННЫХ СРЕДСТВ .....	130
3.1. Организация аэромониторинга чрезвычайных ситуаций с использованием аэрофотосъемки .....	130
3.2. Организация аэромониторинга чрезвычайных ситуаций с использованием нефотографических средств .....	148
3.3. Аэромониторинг природных экосистем .....	154
ЛИТЕРАТУРА .....	169

## ВВЕДЕНИЕ

Разрушительные землетрясения, паводки, лесные пожары, аварии на АЭС и другие чрезвычайные ситуации были и остаются неотъемлемыми явлениями в жизни общества и избежать их в ближайшей перспективе не представляется возможным. Они наносят громадный материальный, экологический и социальный ущерб стране, их следствием является разрушение жизненно важных объектов, многочисленные жертвы среди населения. Ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций – важнейшая задача любого государства, поскольку речь идет о физическом и психологическом благополучии общества, сохранении окружающей среды, здоровье будущих поколений, а, следовательно, о национальной безопасности государства.

В то же время возрастающие масштабы прямого ущерба от катастроф, затрат на их ликвидацию и реабилитацию пострадавшего населения и территорий показывают, что в ближайшей перспективе по ряду показателей экономика страны будет не в состоянии восполнять потери от катастроф. В подобной ситуации переход к устойчивому развитию становится нереальным без резкого повышения уровня и эффективности предупредительных мер, уменьшающих опасность, масштабы и последствия катастроф.

Поскольку многие катастрофы и стихийные бедствия предотвратить нельзя, то борьба за уменьшение ущерба и потерь от них становится важным элементом государственной политики страны, в основу которой должны быть положены всесторонний мониторинг, прогнозирование и своевременное предупреждение людей о грозящем бедствии.

За последние годы в мировой практике накоплен определенный опыт предупредительных, поисково-спасательных и аварийно-восстановительных работ с участием аэрокосмических средств. Они применяются для прогнозирования динамики развития чрезвычайных ситуаций, предупреждения и оказания помощи пострадавшему населению, восстановления систем жизнеобеспечения, а также для решения других задач. Отечественная и зарубежная практика свидетельствует, что применение аэрокосмических средств с их высокой степенью мобильности позволяет спасти 80% человеческих жизней, сохранить имущество, урожай, бюджетные средства. Вместе с тем, на наш взгляд, высокий потенциал аэрокосмических средств используется не в полном объеме.

В книге на основе анализа характеристик чрезвычайных ситуаций рассмотрены задачи и возможности по применению средств аэрокосмического мониторинга опасных факторов в сочетании со средствами наземного базирования. Предложены пути к решению основных проблем в этой области.



# 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

## 1.1. Анализ опасных факторов чрезвычайных ситуаций. Классификация. Общие понятия и определения.

Чрезвычайные ситуации в XX в. стали неотъемлемой частью развития современной цивилизации. Несмотря на достижения технического прогресса, расширение наших знаний о причинах их возникновения и принимаемые меры предосторожности, они становятся все более ощутимыми и масштабными по своим последствиям. В первую очередь это связано с ростом населения планеты, концентрацией больших масс людей в местах легко поражаемых во время развития опасных стихийных явлений, а также обусловлено нарушениями техники безопасности при эксплуатации сложных технических систем.

Начало аэрокосмической эры выявило перспективы использования данных наблюдений с воздуха и космоса для прослеживания и изучения различных стихийных явлений катастрофического характера (прежде всего таких, как тайфуны, ураганы, наводнения). Эти перспективы связывались с оперативностью аэрокосмических наблюдений, возможностями большого пространственного охвата зон катастроф и слежения за их развитием. С появлением все большего числа специализированных самолетов и спутников, а так же с расширением технических средств наблюдений началось широкое применение арсенала аэрокосмических средств наблюдений для использования их с целью слежения за разнообразными опасными явлениями.

Но прежде чем перейти к анализу возможностей аэрокосмического мониторинга чрезвычайных ситуаций, рассмотрим базовые понятия и термины.

*Чрезвычайная ситуация (ЧС)* – это совокупность обстоятельств, возникающих в результате аварий, катастроф, стихийных бедствий, диверсий или иных факторов, когда происходит резкое отклонение протекающих явлений и процессов от нормальных, что отрицательно сказывается на жизнеобеспечении, экономике, социальной сфере и природной среде.

На основе анализа характеристик ЧС рассмотрим задачи и возможности аэрокосмического мониторинга в предупреждении ЧС и попытаемся предложить пути к решению основных проблем в этой области. Согласно принятой классификации ЧС подразделяются на природные стихийные бедствия, техногенные аварии и катастрофы, крупные террористические акты, а также гуманитарные катастрофы (рис. 1.1).

Среди *природных стихийных бедствий* особенно опасными считаются землетрясения, так как спонтанный выброс энергии недр по земным разломам наносит наибольший урон объектам, приводит к массовой гибели людей. Волна землетрясений, прокатившаяся в 2003 году по Сибири, не столь показательна, так как стихийному бедствию подверглась малонаселенная территория, а вот землетрясения в Армении (1989 г.), на Сахалине (1995 г.) и в Индонезии

(2004 г.) унесли сотни тысяч человеческих жизней. Большую опасность представляют и широкомасштабные наводнения, когда водой целиком затапливаются населенные пункты, посевы, пастбища, пути сообщения. Огромный ущерб наносят тайфуны и цунами, энергия которых разрушает практически любые сооружения, а также лесные пожары, ежегодно полыхающие в различных регионах земного шара. По частоте повторения природных катаклизмов на первом месте находятся наводнения (30%), за ними оползни, сели, лавины (20%), ураганы (14%), землетрясения (5%).

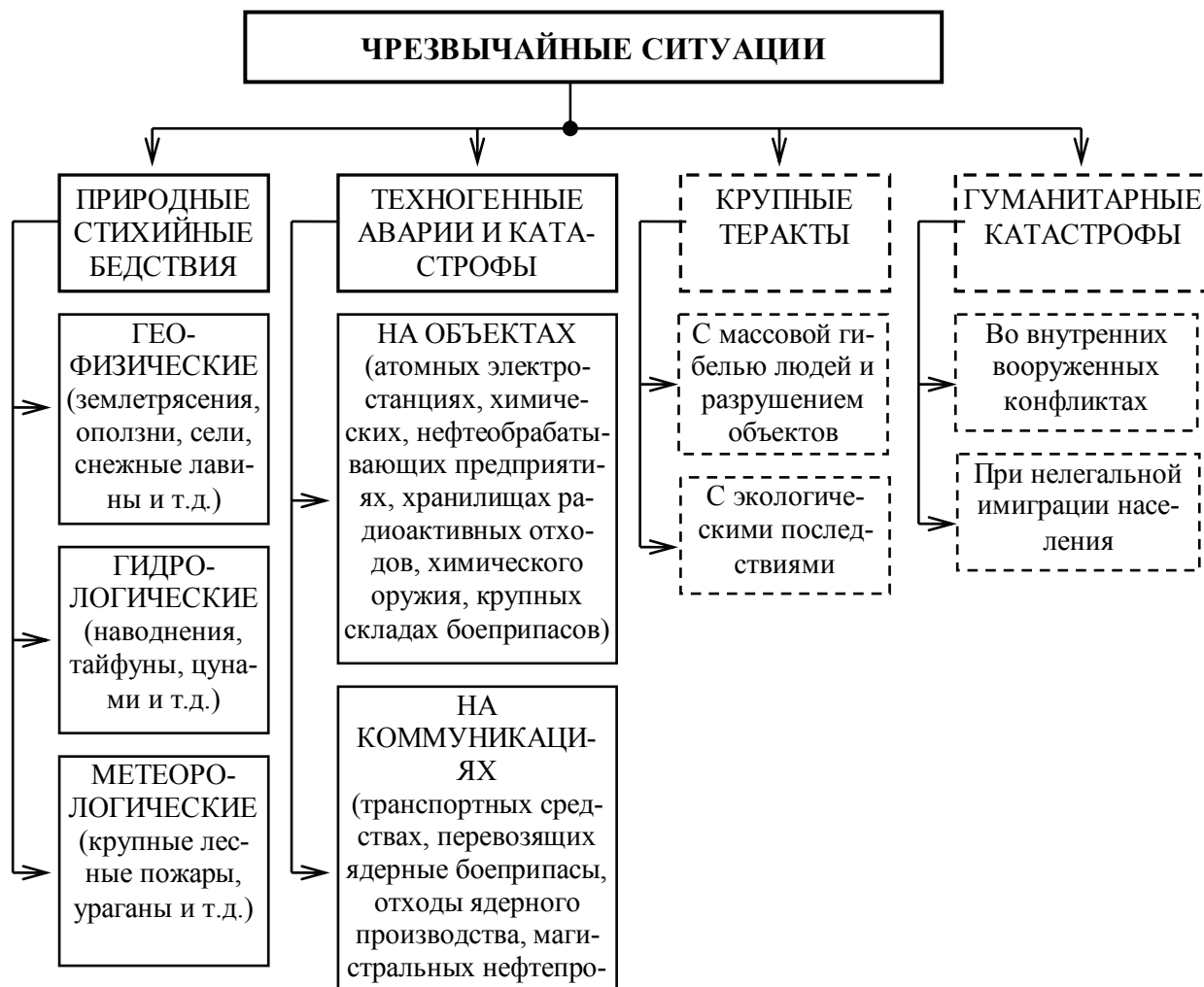


Рис. 1.1. – Классификация чрезвычайных ситуаций

Очевидно, что негативные последствия стихийных бедствий будут значительно меньше, если для наблюдения, прогноза и ликвидации последствий ЧС природного характера привлечь средства аэрокосмического мониторинга и ликвидации ЧС – космические аппараты, самолеты и вертолеты.

Среди *техногенных аварий и катастроф* наиболее опасными являются те, которые происходят на атомных электростанциях. Они приводят, как правило, к долгосрочному радиоактивному заражению окружающей среды. Авария на Чернобыльской АЭС показала, какими глобальными трагическими последствиями для населения и природы чреват взрыв даже одного энергоблока стан-

ции. Далее по степени опасности следуют аварии и катастрофы в местах хранения радиоактивных отходов, химического оружия. Потенциальными источниками крупных техногенных аварий являются также крупные склады боеприпасов, особенно с истекшими гарантированными сроками хранения. В связи с крайне ограниченным временем возможного пребывания наземных сил спасения в зонах радиоактивного (химического) заражения авиация могла бы хотя бы частично принять на себя их функции, а использование космических аппаратов позволило бы в кратчайшие сроки оценить с учетом географических свойств местности и метеоусловий район заражения. Это подтверждает ее активное участие в ликвидации аварии чернобыльского ядерного реактора с воздуха.

К традиционным, если так можно выразиться, чрезвычайным ситуациям следует отнести и не имеющие аналогов в прошлом: крупные теракты с применением биологического или радиационного оружия, нападения на хранилища ядерных боеприпасов и так называемые гуманитарные катастрофы, когда большие массы беженцев из районов боевых действий скапливаются в ограниченном пространстве, не имея элементарных условий для существования. В данной ситуации средства аэрокосмического мониторинга могут быть использованы для уточнения обстановки, перевозки гуманитарных грузов, а также для информационно-психологической поддержки населения.

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что за последнее время спектр ЧС значительно расширился. Однако, несмотря на существенные различия, все чрезвычайные ситуации возникают внезапно, связаны с большим количеством пострадавших и протекают в условиях высокой неопределенности обстановки. Поэтому для аэрокосмического мониторинга ЧС можно сформулировать основные задачи: выявлять районы ЧС, степень разрушения (затопления, заражения) объектов, вести разведку маршрутов выдвижения поисково-спасательных сил к местам бедствий; доставлять (десантировать) в труднодоступные места силы спасения, материальные средства, гуманитарные грузы, эвакуировать население; оказывать помощь местным органам власти и поддержании правопорядка, организации и проведении спасательных работ, решении хозяйственных задач.

Эти общие для всех ЧС типовые задачи аэрокосмического мониторинга в дальнейшем могут быть дополнены частными, адекватными той или иной ситуации: например, поиск пострадавших при затоплении населенных пунктов, разведка района лесных пожаров, целеуказание силам спасения, по разрушению льда и ледяных заторов на реках и т.д. Таким образом, область применения аэрокосмического мониторинга можно существенно расширить, так как используемые для этого силы способны быстро переходить от выполнения одной задачи к другой. Однако общая картина применения аэрокосмического мониторинга в ЧС далеко не тождественна боевым действиям в вооруженных конфликтах.

При изучении различных аспектов воздействия окружающей природной среды на жизнедеятельность человека наиболее эффективен факторный подход,

рассматривающий соответствующие факторы риска, последствия которых возможно обнаружить и оценить методами аэрокосмического мониторинга.

***Природные факторы:***

- метеорологические (температура, скорость и сила ветра, осадки или их отсутствие);
- орографические (разрежение атмосферы, лавины, оползни, сели);
- геофизические (бури, землетрясения, цунами, магнитные аномалии);
- гидрографические (наводнения, заболачивание, подтопление, способность подземных и поверхностных вод к самоочищению);
- геологические (наличие радона, величина радиации, тектонические разломы);
- почвенные (пылеобразование, кислотно-щелочное равновесие, состав и структура почвы);
- фауна (ядовитые и опасные животные, переносчики возбудителей болезни, пищевые ресурсы);
- флора (состояние воздуха, биоиндикация экологически вредных агентов);
- микрофлора воздуха, воды, почвы, животных, растений;
- биологические компоненты объектов (токсины, белки, продукты обмена веществ);
- биоценозы (в том числе природные очаги заболеваний).

***Социально-экономические факторы:***

- хозяйственное использование земель;
- физическое загрязнение воздуха, воды, почвы (радиация, электромагнитные поля, тепловое и звуковое воздействия, аэрозоли);
- химическое загрязнение воздуха, воды, почвы, растений, животных;
- биологические факторы (микробное загрязнение воздуха, воды, почвы, органические отходы);
- промышленные и транспортные факторы (аварии, катастрофы);
- санитарно-гигиеническое состояние и эпидемический статус.

***Комплексные факторы:***

- ландшафтные;
- зональные;
- планетарные.

Отметим, что при ЧС могут возникать как первичные, так и вторичные поражающие факторы. К первичным факторам относятся: ударная воздушная волна, оползни, сели, лавины, электромагнитные или световые воздействия и т.д. К вторичным поражающим факторам относятся: взрывы оборудования, пожары, загазованность, заражение и др., то есть результат воздействия первичных факторов на потенциально опасные элементы объекта.

При чрезвычайной ситуации для ее оценки можно выделить следующие критерии:

- временной, то есть внезапность ЧС, быстрота ее развития;

- экологический, то есть степень необратимых изменений природной среды, массовый падеж животных, эпидемии и т.д.;
- психологический, вызывающий стрессовое состояние, депрессию, страх, панику, фобии;
- политический (повышенная конфликтность, напряженность в обществе);
- экономический (материальный ущерб, выход из строя систем, сооружений, огромные затраты на восстановление, массовое использование техники, а также на подготовку специалистов);
- организационно-управленческий (своевременное прогнозирование обстановки, хода событий, принятие решений, доведение их до исполнителей, контроль выполнения решений, привлечение специалистов и организаций для решения поставленных задач).

К настоящему времени накоплен большой опыт использования результатов наблюдения Земли с воздуха и космоса для мониторинга разнообразных катастроф. Этот опыт должен быть тщательно проанализирован с целью разработки комплексной системы мониторинга природных и антропогенных катастроф.

## **1.2 Общая характеристика дистанционных информационных систем аэрокосмического мониторинга чрезвычайных ситуаций**

Наиболее эффективным средством получения данных о ЧС являются дистанционные информационные системы. К основным свойствам можно отнести: многоспектральность, многомасштабность, многовременность, непрерывность, автоматизация, многодисциплинарность.

Многоспектральность системы заключается в том, что регистрация электромагнитного поля Земли с летательных аппаратов должна производиться одновременно в разных спектральных интервалах видимой, инфракрасной и микроволновой областей спектра от 0,3 мкм до 30 см. Интерпретация такой многоспектральной информации обеспечивает получение комплексных и достоверных данных о ЧС.

Многомасштабность дистанционных систем заключается в том, что синхронно или квазисинхронно съемка Земли сплошь или выборочно должна производиться с аэро- и космических носителей с разным пространственным разрешением от 1 см до 10 км и разной обзорностью от 0,1 до  $10^8$  км<sup>2</sup>, т. е. представляет сочетание выборочной аэросъемки и глобальной космической съемки. Такая многомасштабная съемка дает основу для конкретного тематического картографирования и генерализации всех пространственных единиц экосистем от детального популяционного и внутриценотического уровня до глобального биосферного. С другой стороны, такая съемка с разных высот в виде «этажерки» способствует конечному решению обратной геофизической задачи распознавания – разложению интегрального сигнала на сумму составляющих компонент.

Многовременность дистанционной системы должна обеспечить сопоставимость получаемой информации с разной периодичностью от минут до нескольких лет. Такая система съемки дает объективные критерии для выявления пространственно-временных изменений экосистем – суточных, сезонных и многолетних, изучения ритмики и динамики биосферы.

Непрерывность дистанционной экоинформационной системы является обязательным требованием оперативных систем. Вся информация от регистрации дистанционным приемником на входе до карты или сигнала для использования или принятия решения на выходе должна обрабатываться в одном масштабе времени, т. е. инерционность системы не должна превышать периода протекания процесса ЧС.

Автоматизированность системы реализуется как в целом, так и в отдельных блоках – она предполагает выражение дистанционной информации в цифровой или аналоговой форме, введение в память ЭВМ и обработку с помощью машинных алгоритмов. Автоматизированность полная или частичная, квантификация различных блоков системы дает быструю обработку данных и объективные методы анализа, однако требует еще дополнительных методических разработок, так как многие экологические понятия трудно поддаются параметризации.

Комплексность информационной системы выражается в том, что полная система дает многодисциплинарную информацию о ЧС, которая имеет междо-ведомственное использование. Наиболее комплексны аэрофотосъемки, много-спектральные съемки с ИСЗ – они дают информацию о поверхности Земли от геологического строения до биосферы. Существуют системы и более специализированные, например, для съемки лесных пожаров, однако и для ее интерпретации необходима комплексная информация о подстилающей поверхности.

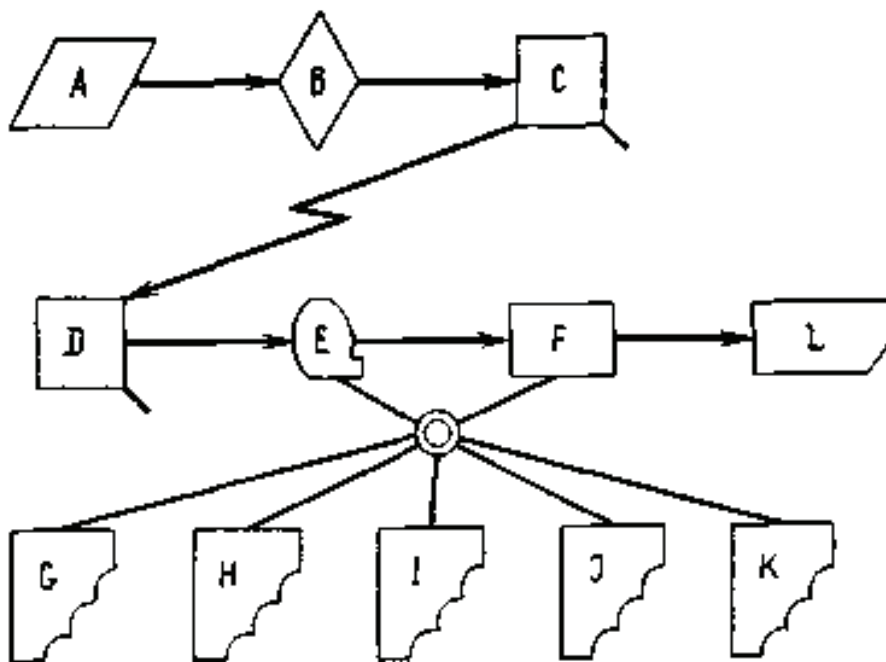
Структуры дистанционных информационных систем разнообразны, однако они состоят из ряда основных блоков (рис. 1.2).

Система включает блок формирования дистанционного изображения на летательном аппарате (А). Здесь на входе в систему информация об электромагнитном поле отражения солнечного света и собственного излучения земной поверхности регистрируется самыми разными средствами. Различают следующие виды космического дистанционного зондирования земной поверхности: фотографический, телевизионный, фототелевизионный, радиометрический, спектрометрический и визуальный (более подробно см. раздел 2).

Следующий блок системы (В) осуществляет первичную обработку на борту летательного аппарата. В фототелевизионных системах блок (В), например, – это проявление фотопленки, ее оптическое сканирование и преобразование оптической плотности в электрический сигнал. В телевизионной системе на спутнике изображение на видеоконе считывается электронным устройством, преобразуется в радиосигнал или записывается на магнитной ленте в запоминающем устройстве. При совершенствовании блока (В) большое значение имеет проблема сжатия и минимизации входной информации.

Блок передачи данных (С) работает в двух режимах. В режиме непосредственной передачи информации, трансляция проходит в реальном мас-

штабе времени на приемные станции в пределах радиовидимости последней. В этом случае инерция в получении дистанционной информации на Земле зависит только от скорости считывания, трансляции и развертки изображения. В другом режиме с помощью запоминающих устройств передача данных происходит только во время прохождения летательного аппарата в зоне радиовидимости над приемными станциями, а затем потребителю – наземными средствами. Очень многие возвращаемые съемочные системы, в особенности фотографические, работают в режиме сброса данных или наземной их сдачи (например, кассет с фотопленкой).



**Рис. 1.2.** – Структура дистанционной информационной системы (А – вход данных образования изображения; В – первичное преобразование данных на летательном аппарате; С – передача данных; D – прием данных; Е – преобразование данных на наземной станции; F – обработка данных; G – банк данных наземного эталонирования; H – банк аэросъемочных данных; I – банк данных космических съемок; J – банк цензовых данных; K – банк картографических данных; L – классификация данных)

Блок приема данных (D) – это антенные устройства или полигоны, принимающие транслируемую, сбрасываемую и сдаваемую дистанционную информацию.

Блок преобразования данных (E) включает разнообразные приемы первичной обработки аэрокосмической информации для представления в форме, пригодной для хранения в банке данных, машинного анализа или непосредственного визуального дешифрирования. При фотографической регистрации здесь производится проявление фотопленок, денситометрический контроль, определение характеристических кривых, широты и контраста, трансформирование путем исправления фотометрических и геометрических искажений. При телевизионной регистрации в первичную обработку входит запись фототелеграфного радиосигнала на магнитную ленту и перевод ее в фотографическое

изображение или цифровую форму и, наконец, дисплей. При различных формах регистрации аэрокосмических данных в блок (Е) входит широкий круг операций от улучшения, усиления, кодирования и эталонирования до цифрового преобразования изображения, фильтрации и уплотнения данных с помощью фотометрических, оптико-механических и электронно-вычислительных устройств.

Блок обработки дистанционных данных (F) является самым ответственным в системе. Он основан на обработке информации с помощью цифровых и цифро-аналоговых вычислительных машин и включает разнообразные технологии, наиболее совершенной из которых является гибридная. К блоку обработки данных (F) обратной связью подключены блоки наземного эталонирования – (G), блоки банков данных – аэросъемочных (H), космических (I), картографических (K) и цензовых (J) подсистем, а также блок классификации данных (L).

Применяемые методы вычислительной обработки данных способны использовать только спектральную информацию. Только человек может интерпретировать остающуюся структурную и понятийную информацию. Следовательно, ни один из примененных методов вычислительной обработки данных не может быть рекомендован как идеальная система для классификации и оценки опасных факторов ЧС. Только комбинация взаимосвязанной визуальной интерпретации на вычислительных дисплеях, которая получена быстро регистрирующей системой для регистрации граничных координат, как кажется, будет очень успешным путем использования космических цифровых данных. Взаимодействие ЭВМ и человека – лучшее условие.

Блок наземного эталонирования (G) имеет решающее значение для функционирования дистанционной системы, так как без него невозможна ни качественная, ни тем более количественная интерпретация аэрокосмических снимков. Производится наземное эталонирование на многочисленных районированных и специализированных ключевых участках, в стационарах станциях, морских судах, буйах. Основным средством наземного эталонирования является проведение синхронного аэрокосмического эксперимента, т. е. одновременная (или с допустимыми сдвигами во времени) съемка наземных или водных полигонов с самолетов и КЛА с разных высот однотипной аппаратурой и наземное измерение состава объектов и их оптических и радиационных свойств.

Банки данных предшествующих аэро (H) и космических (I) съемок соединены цепью обратной связи, в которые, с одной стороны, из блока (E) поступают данные первичной обработки аэрокосмической информации, а с другой – в тот же блок (E) выдаются данные для стандартизации вновь полученной информации, а в блок (F) – для ее обработки. Эти блоки банков (H) и (I) и их обратные связи с блоком обработки (F) важны для изучения динамики, так как наиболее корректные аэрокосмические методы основаны на сопоставлении старых материалов аэрокосмических съемок с новыми данными. Цифровое сопоставление исходных и полученных материалов позволяет быстро делать количественные заключения о динамике ЧС.

Блок выхода и классификации данных (L) работает в разных режимах получения итоговой информации. В одних случаях это сигнал, например, о лес-



ном пожаре, загрязнении атмосферы выше предельно допустимой концентрации того или иного химического соединения, тепловом или химическом загрязнении воды с пространственными координатами отрицательного антропогенного воздействия. В других случаях картографическая форма выхода, которая требует дополнительной интерпретации, но является более универсальной для обнаружения антропогенных экосистем. Кроме контурной карты, на выходе информационной системы широкое распространение получили значковые и цифровые карты, которые, хотя и требуют дополнительных операций (например, проведения границ), очень удобны для считывания, записи и обработки данных. Имеет место графический выход в форме регистрограмм, частотных, автокорреляционных функций и т.д. Наконец, в ряде систем на выходе даются визуализированные данные в виде монохроматических и цветных дисплеев, однако они требуют еще большей дополнительной обработки.

Дистанционная система обратной связью соединена с наземными информационными системами, в первую очередь картографическими (К), геофизическими (G) и цензовыми (I), которые хранят данные прежних съемок, описаний, измерений, переписей и т.п. С одной стороны, картографические, измерительные и цензовые данные предшествующих операций поступают в дистанционную систему, где используются для эталонирования (блок E) и обработки данных (блок F). С другой стороны, из блока классификации и выхода данных информационной системы (L) информация поступает в банки данных наземных информационных систем.

Дистанционные информационные системы делятся на глобальные, зональные и региональные. Примером глобальной информационной системы служит Всемирная служба погоды (World Wide Weather System). К работающей зональной информационной системе относится LACIE – эксперимент по инвентаризации посевов на больших площадях для учета урожайности, главным образом пшеницы, настенных территориях США, Канады, Австралии. Наиболее распространены региональные информационные системы, особенно в рамках крупных государств и международных соглашений. Они дают информацию не только о природных ресурсах, но и о воздействии хозяйственной деятельности человека. Среди них выделяются системы мониторинга окружающей среды, картографии, структуры использования земель в США (Land Use Natural Resource System) и Канаде (Canada Geographic Information System).

### **1.3 Оценка негативного воздействия опасных факторов чрезвычайных ситуаций с применением дистанционных систем аэрокосмического мониторинга**

В настоящее время внимание специалистов остро приковано к возможным глобальным катастрофам ближайшего будущего, которые обусловлены глобальными изменениями климата, ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, разрушением озонового слоя и т.д. Приведем краткую характеристику возможностей аэрокосмического мониторинга.

**Наводнения.** Это природное явление принадлежит к одному из самых опустошительных и вызывающих (наряду с землетрясениями) большие жертвы среди населения. Наводнения можно подразделить на две большие группы - на берегах рек и озер и на побережьях морей. Иногда в дельтах рек происходит объединение наводнений обоих типов. В XX в. произошел целый ряд крупных наводнений, число жертв во время каждого из них превышало 100 000 человек (в 1911 г. на р. Янцзы, Китай – около 100 000 чел.; в 1931 г. там же – 140 000 чел.; в 1970 г. на р. Ганг в Бангладеш – 265 700 чел.). Огромен материальный ущерб от наводнений (в 1951 г. в штатах Канзас и Миссури, США – 1 млрд. долл.; в 1972 г. в восточной части США -2 млрд. долл.).

Наблюдения с борта летательного аппарата позволяют оперативно выявлять районы затоплений, следить за динамикой их развития. Весьма эффективно использовались они, в частности, в 1973 г. в США во время развития крупнейшего наводнения на р. Миссисипи и ее притоках, вызванного дождями в верховьях реки. В 1933 г. здесь произошло наводнение еще большего масштаба (по оценкам, такое наводнение возможно только 1 раз за 500 лет). По снимкам из космоса всего за несколько дней была составлена обзорная карта зоны затопления побережий, протянувшейся на многие сотни километров.

По результатам картирования высокой воды по аэрокосмическим снимкам уже во время наводнения 1973 г. (наводнения такого масштаба встречаются 1 раз в 100 лет) была выявлена ранее не известная зона риска от наводнений, представляющая собой редко затопляемую высокую пойму.

Наиболее результативно совместное использование космических и аэроизображений земной поверхности (прежде всего полученных с помощью радиолокаторов с синтезированной аппаратурой, которые обеспечивают возможность всепогодного зондирования). Именно таким образом, в том числе со спутников NOAA, "Landsat" в 1991 г., в Китае был успешно осуществлен мониторинг динамики разливов во время наводнения на р. Янцзы и ее притоках. Космические и аэронаблюдения с этого времени стали ключевой частью системы наблюдений за наводнениями в этой стране.

В Индии оперативные гидрологические карты масштаба 1:50 000 составлялись по спутниковым изображениям еженедельно. Они позволяют судить о масштабах затопления, тенденциях его развития, создают основу для принятия кратко- и долгосрочных мер. Такие космические наблюдения, в том числе с индийского спутника IRS-1A, проводились, в частности, для слежения за наводнением в бассейне р. Брахмапутра.

Для мониторинга наводнений особенно перспективны радиолокационные спутниковые изображения. Снимки с ИСЗ "Космос-1500" использовались, например, для слежения за разливом р. Амур. При этом удалось контролировать основные параметры затопленных участков.

С целью оценки развития наводнений, их прогноза, в частности, для горных рек Сибири, предпринимались попытки моделирования этих явлений с учетом информации об облачности, снежном покрове, влажности почвы, также получаемой со спутников.

В ряде стран мира (США, Бангладеш, Пакистан) большие опустошения вызываются в результате затоплением морских побережий. Особенно разрушительны они в дельтах рек. Прогнозирование подобных наводнений в первую очередь требует информации о развитии циклонов. Например, в 1970 г. с помощью спутниковой информации было заблаговременно спрогнозировано затопление низменного побережья Пакистана, вызванное морской волной, пригнанной тропическим циклоном. Успешными оказались попытки использования спутниковых данных о путях перемещения циклонов для моделирования наводнений на морских побережьях Индии и Бангладеш. По космическим изображениям высокого разрешения с целью выявления зоны риска осуществлялось картирование зон затопления, в частности, в дельте р. Ганг.

**Землетрясения.** Землетрясения сопровождаются особенно большими жертвами среди населения и крупным материальным ущербом. За период с 1900 г. по 2000 г. в результате землетрясений в мире погибло около 1,4 млн. человек. Страны бывшего СССР находятся в первой шестерке государств, на территорию которых приходится свыше 82% всех погибших.

Землетрясения принадлежат к наиболее труднопредсказуемым явлениям. Некоторые полезные сведения позволяют получить наблюдения из космоса. Прежде всего они важны для выявления и картирования активных тектонических нарушений. Подобные исследования (с начала 70-х годов XX ст.) открыли возможность установить связь очагов землетрясений с активными разрывами горных пород в различных сейсмоопасных районах мира, в том числе в Калифорнии, на Аляске, на Кавказе. Весьма перспективными оказались спутниковые наблюдения в отношении территории Китая, где от подземных толчков ежегодно гибнет больше людей (54 %), чем от других природных катастроф (эта цифра превышает и среднемировую – 51 %, что связано с высокой сейсмичностью региона и проживанием в нем большого количества людей). По спутниковым изображениям ряда районов Китая в 1991 г. удалось не только выявить многие активные тектонические нарушения, но и установить высокую корреляцию с ориентировкой групп эпицентров землетрясений, отображенных на геологической карте.

Представляет большой интерес и исследование явлений, которые – предшествуют подземным толчкам. К таким, в частности, принадлежат газовые эманации, поднимающиеся к поверхности по разрывным нарушениям. Замечено, что они иногда, при их активизации, приводят к образованию облаков, вытянутых над трещинами горных пород, что фиксируется на космических изображениях. Особый интерес вызывает возникновение специфических облаков над активными разломами в районах землетрясений. Например, обнаружено, что иногда над сейсмоактивными районами за несколько дней до подземных толчков образуются кольца облаков (типа дымовых колец). Такие образования, например, фиксировались на космических изображениях Средней Азии в районе г. Газли накануне двух сильных подземных толчков в апреле и мае 1976 г.

Важным индикатором землетрясений иногда выступают тепловые аномалии земной поверхности, фиксируемые на инфракрасных космических изображениях. Так, в Китае удалось установить возникновение тепловых аномалий в

зонах развития крупных землетрясений – одного, произошедшего в ноябре 1986 г. в провинции Юньнань, район Лэншенд, и двух других, возникших в октябре 1989 г. в провинции Шэнси, район Датонг. Эти аномалии температуры земной поверхности, сформировавшиеся накануне подземных толчков, выявлены как с помощью спутниковых наблюдений, так и по данным наземного наблюдения.

Предвестниками сильных землетрясений могут быть одновременное развитие тепловых аномалий (в масштабах времени от 2 до 10 суток) и скопление фронтальных облачных полей (появляющихся за 1-2 суток). Такого рода явления неоднократно фиксировались по изображениям с ИСЗ "Метеор" и NOAA непосредственно перед сильными подземными толчками в ряде районов Средней Азии.

Съемки с летательных аппаратов полезны также и для разнообразных оценок последствий от разрушительных подземных толчков, для определения зон и степени нарушений как в естественных ландшафтах, так и в техногенных образованиях. Следует особо отметить перспективность использования радиолокационных космических изображений и интерферограмм, в частности, для изучения тектонических подвижек (с точностью до нескольких сантиметров). Так, со спутника ERS-1 удалось выявить смещение горных пород на 10-12 см после землетрясения в мае 1991 г. в Калифорнии.

**Извержения вулканов.** Вулканические извержения по масштабам и глубине воздействия на экосистемы и человечество в целом значительно уступают и землетрясениям и наводнениям, поскольку случаются реже, но, с другой стороны, они относятся к самым грозным и разрушительным природным катастрофам. Каждая из них, происходящая в густонаселенном регионе, может сопровождаться многочисленными жертвами и большим материальным ущербом. В XX в. только от извержений двух вулканов (Мон Пеле в 1902 г. на острове Мартиника и Руиз в 1985 г. в Колумбии) погибли 28 и 25 тыс. человек соответственно.

Использование аэрокосмических изображений позволяет весьма оперативно зафиксировать начало извержения вулкана – по отчетливо прослеживаемым "дымовым" выбросам. Именно таким образом были обнаружены извержения вулканов в самых отдаленных и труднодоступных районах Земли, в том числе в Арктике и Антарктике. В частности, неоднократно обнаруживалось развитие протяженного вулканического шлейфа в районе о-ва Беннет (Восточно-Сибирское море), происхождение которого, вероятнее всего, связано с активизацией подводного вулкана.

Начало взрывного извержения вулкана Сент-Хеленс (18 мая 1980 г.) было зафиксировано, в частности, по данным спектрометра в инфракрасном диапазоне спектра с ИСЗ ВВС США. Наблюдения за аэрозольно-газовым облаком, которое появилось через минуту после подземного толчка, вызвавшего извержение, осуществлялись одновременно с двух ИСЗ, что дало возможность провести триангуляционные измерения. Это позволило проследить последовательные этапы развития извержения. Спутниковые данные о протяженности, направлении и температуре вулканических шлейфов могут быть использованы для оценки энергии извержения.

Особый интерес представляют съемки вулканов со спутников в инфракрасной области спектра. На космических изображениях прослеживаются тепловые аномалии вокруг многих активных вулканов мира. Они позволяют судить о функционировании вулканов даже сквозь неплотный облачный покров (такое слежение осуществлялось за неожиданно ожившим вулканом Беренберг на о-ве Ян-Майен в Атлантике в 1970 г.). Подобные тепловые аномалии, выявленные, например, с помощью тематического картографа, установленного на спутнике "Landsat", дали возможность следить за проявлениями активности вулкана Эребус в Антарктиде и Ласкара в Чили. Появление тепловой аномалии вокруг последнего было замечено со спутника за год до извержения вулкана в сентябре 1986 г.

Разумеется, для прогноза извержения вулканов, так же как и землетрясений (явлений часто взаимосвязанных), очень важен оперативный сбор информации, получаемой и передаваемой через спутники со специальных наземных датчиков-автоматов, фиксирующих, в частности, изменения в уклонах поверхности, изменения состава газовых эманаций. Ряд вулканов Земли уже охвачен сетью такого рода наблюдений со сбором информации с помощью спутников. Анализ спутниковой информации позволяет оценить последствия извержений вулканов, что важно для оценки ущерба, нанесенного населению (например, вследствие опустошения сельскохозяйственных угодий). На изображениях из космоса отчетливо прослеживаются не только современные, но и древние лавовые поля, образовавшиеся в историческое время, например, на склонах вулканов Этна в Италии и Мауна-Лоа (Гавайские о-ва). Это важно для оценки риска для находящихся на склонах обоих вулканов поселений.

Наблюдения с самолета, вертолета или ИСЗ оказываются полезными для оценки риска схода лавин, вызванных гидротермальной вулканической активностью. Так, по снимкам с ИСЗ "Landsat" оценивалась температурная активность фумарол на склонах вулкана Монт-Бекр (штат Вашингтон), с деятельностью которых связано движение грязевых масс по склонам.

**Лесные и другие пожары.** Пожары связаны с ощутимым материальным ущербом, опустошением земель и разрушением поселений. Крупные пожары, чаще всего природно-антропогенного (или даже просто антропогенного) происхождения вспыхивают в разных регионах и природных зонах Земли. Они возникают в лесах, болотах, а также в степях и саваннах.

Во время крупнейшего лесного пожара в Индонезии в 1983 г., возникшего вследствие засухи и неосторожного обращения с огнем лесодобытчиков в восточной части о-ва Калимантан и в Северном Борнео, леса пострадали на площади 3.5 и 1 млн. га соответственно.

Данные аэрокосмических наблюдений эффективно используются с целью обнаружения лесных пожаров и особенно важны для оперативного выявления пожаров в труднодоступных и малонаселенных районах, например в тайге или лесотундре в Сибири. В дневное время пожары распознаются в видимой области по дымовым шлейфам. При этом можно очень быстро оконтурить всю зону массовых загораний леса. Так было, например, с лесными и болотными пожарами летом и осенью 1972 г., возникшими в период засушливого лета в густонаселенном

центре бывшего СССР. По снимкам с метеоспутников отчетливо фиксировалась вся обширная зона очагов лесных пожаров на левобережье р. Ока. Площадь этой зоны, отмечавшаяся несколькими десятками дымовых шлейфов, достигала 200 000 км<sup>2</sup>.

Только со спутников возможно непрерывное слежение за всей зоной развития крупномасштабных пожаров, нередко охватывающих территории площадью в несколько сотен квадратных километров и продолжающихся многие недели. Такого рода сведения можно получить даже с помощью снимков невысокого разрешения, в том числе с геостационарных спутников.

Для уточнения границ собственно очага пожара эффективно использование инфракрасных изображений, причем оптимальными для этой цели оказались спектральные интервалы 3,5 – 4,2 и 4,4 – 5,0 мкм, в которых отмечается наибольший радиационный контраст между очагом огня и фоном. Инфракрасные изображения полезны также для слежения за очагами пожаров в ночное время и, что особенно важно, за подземными, скрытыми под почвой, глубокими очагами пожара в болотах.

Развитие пожаров во время крупнейшего возгорания лесов и болот в 1983 г. в Индонезии прослеживалось по инфракрасным изображениям со спутника NOAA-7. Слежению за ними не мешала дымовая завеса. По этим снимкам отмечались очаги подземных пожаров в болотах, сохранившиеся после прохождения дождей.

В Китае, где число ежегодных возгораний достигает около 4 тыс., изображения с метеоспутников NOAA успешно применялись для слежения за лесными пожарами, начиная с 1985 г. В частности, они использовались для получения сведений о катастрофических лесных пожарах в мае-июне 1987 г. в горном районе Ксинань. Космические изображения с разным охватом территории, с разным разрешением со спутников „Landsat“, NOAA и SPOT позволили выявить новые источники горения, проследить зоны распространения огня.

Аэрокосмические наблюдения результативны также при оценке распространения дымов от пожаров и гарей, оценке опасности возникновения пожаров (по данным о влажности почв, сходе снежного покрова и т.п.), районировании территории по условиям развития на ней пожаров, а также при поисках "ресурсной" облачности (мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков) с целью вызывания осадков. Для повышения эффективности дешифрирования снимков используются различные приемы обработки. Так, для картирования в масштабе 1:250 000 последствий лесных пожаров в Провансе (Франция) в начале 80-х годов по снимкам с ИСЗ "Landsat" производилось кодирование на 16 уровней, цветокодирование, построение гистограмм, изменение контрастов и масштаба изображений в интерактивном режиме.

**Обезлесивание территории.** Одной из глобальных проблем современности является массивное прогрессирующее уничтожение лесов. Под натиском человека они отступают на всех континентах, почти во всех странах. За последние 20 лет общая площадь лесов уменьшилась на 6 %.

Уничтожение лесов приводит не только к обезлесиванию огромной территории, но и к трансформации природных условий целых географических ре-

гионов и даже смещению границ природных зон и, в конечном счете, к нарушению экологического равновесия. Последнее чревато крупномасштабной экологической катастрофой. Ценность аэрокосмических наблюдений состоит, в частности, в том, что они дают обобщенную картину реального распространения сохранившихся лесов в том или ином регионе. Одной из главных причин разрушения лесных экосистем являются вырубки. Свежие вырубки, не отображенные на картах, отчетливо прослеживаются даже на мелкомасштабных космических изображениях невысокого разрешения (первые сотни метров).

Особую тревогу вызывает вырубка влажных тропических лесов. Она, как известно, сопровождается существенным уменьшением биоразнообразия, нарушениями гидрологического круговорота, воздействиями на климат. Именно в тропических лесах и особенно, как установлено наблюдениями из космоса, в лесах Южной Америки происходит быстрое обезлесивание территории. Только в пределах семи стран этого континента ежегодно леса уничтожаются на площади  $6880 \cdot 10^3$  га. В бразильской Амазонии, по данным съемок из космоса 1988 г., сельва была уничтожена на площади  $4.8 \cdot 10^5$  га. Сильнее всего она разрушается вдоль дорог и, в частности, вдоль трансамериканского шоссе.

Деградация лесов на большой площади происходит не только вследствие вырубок, но также из-за пожаров, заболеваний леса, повреждения вредителями. Для оценок повреждений такого рода по снимкам составляются карты в масштабах от 1:100 000 до 1:500 000. В Китае для этой цели используются изображения со спутников "Landsat" и китайского спутника FY-1. На основе учета спектральных различий распознавались леса, сильно и слабо поврежденные гусеницами.

В Индии оценка состояния больших лесных массивов осуществлялась по изображениям со спутника IRS-1A с разрешением около 36 м. Точность изготовленных на их основе карт иногда превышала 80 % – это проверялось наземными исследованиями.

Съемки лесов из космоса перспективны и для оценки последствий обезлесивания. Весьма интересно использование данных микроволновой аэрокосмической съемки для изучения иссушения Амазонии, связываемого с разрушением сельвы. Перспективны исследования по инвентаризации лесной фитомассы с целью использования результатов этих разработок для оценки динамики углерода в системе лес – атмосфера. Уже сейчас возможны глобальные оценки фитомассы на основе картирования вегетационного индекса (учитывающего различия в яркостных характеристиках на разных длинах волн), в частности, по данным со спутников NOAA. Тем самым открываются реальные возможности оценки нарушений газообмена в крупных регионах и на всей планете.

**Опустынивание земель.** Опустынивание земель – явление, которое обычно определяется как деградация экосистем, сопровождающаяся снижением их биопродуктивности и происходящая как в зоне пустынь, так и особенно в маргинальных или пограничных зонах – полупустынях, сухих степях и частично даже в саваннах и степях. Деградация ландшафтов (экосистем маргинальных земель, опоясывающих пустыни, в том случае, если они достаточно заселены)

порождает экологические катастрофы. Крупнейшие из них в XX в. произошли в 30-е годы, на среднем западе США и в Сахели (Африка) в 1968-1973 гг. В настоящее время подобные явления развиты на всей планете, в том числе в странах Центральной Азии – вокруг Аральского моря, в Российской Федерации (особенно в Калмыкии) и т.д.

В Приаралье по данным космических наблюдений установлено, что наиболее значительные признаки деградации земель наблюдаются в экосистемах дельт рек Амударья и Сырдарья. Здесь фиксируется высыхание тугайных лесов вдоль протоков рек, деградация дельтовой растительности на плакорах, между протоками, образование там же участков выдувания почв, дефляции. Наблюдается также сокращение размеров и даже исчезновение из-за высыхания многих озер, которыми ранее изобиловали дельты, происходит высыхание проток рек, а также болот и образование солончаков. Указанные изменения фиксируются по данным дистанционного зондирования в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Инфракрасные изображения особенно полезны для фиксации изменений состояния увлажненности дельт. В связи с продолжающимся падением уровня Аральского моря тенденция деградации ландшафтов дельт сохраняется с 1961 г.

Аналогичные процессы происходят за последние десятилетия в Калмыкии, полупустынях на Черных землях и в окружающем их районе Сальских степей. Анализ аэрокосмических изображений показал, что здесь наблюдается прогрессирующее распространение "ядер" опустынивания, возникающих обычно вокруг колодцев. Изучение космических изображений Сахели (переходной зоны полупустынь и опустыненных саванн к саваннам в Африке) позволило обнаружить не только расширение зоны пустыни Сахары на юг. Обнаружено (и это главное), что опустынивание Сахели происходит не столько за счет расширения зоны пустыни Сахары, сколько изнутри, в самой Сахели, за счет возникновения и расширения ядер опустынивания вокруг поселений и колодцев. Эти ядра опустынивания, расширяясь, сливаются и образуют крупные очаги опустынивания, достигающие границы зоны пустынь в Сахаре.

Важную информацию о крупномасштабных тенденциях опустынивания на Земле и в том числе в Сахели содержат данные о рассчитываемом по самолетным и спутниковым данным вегетационном индексе, отражающем сезонные и внутрисезонные изменения, вариации продуктивности.

**Пылевые бури.** Этот природный феномен, принадлежащий к быстро протекающим явлениям, почти не сопровождается жертвами среди людей, однако наносит значительный ущерб почвенному покрову (в связи с выдуванием плодородного слоя почв). Пылесолевые выносы поражают растительный покров. Масштабность проявления процесса и его негативные последствия заставляют включать это явление в число катастрофических. Наиболее крупномасштабной катастрофой такого рода в XX в. считаются пылевые бури в так называемом "пыльном котле", возникшем в США в 30-е годы. Их развитие рассматривалось как национальная катастрофа. В настоящее время особое внимание привлекают пылевые бури в маргинальных зонах, окружающих пустыни, имеющие природно-антропогенное происхождение.



Наблюдения из космоса позволяют проследить распространение пылевых потоков, их динамику, временную изменчивость, а также обнаружить очаги возникновения, выявить особенности их развития и функционирования. К одному из регионов, в сильной степени подверженному пылевым бурям, относится Приаралье. Этот регион признан зоной экологического бедствия не только национального, но и международного уровня. Съёмки из космоса позволили обнаружить начало развития в этом регионе мощных пылевых выносов в 1975 г., определить главные направления их перемещения (на юго-запад, в сторону густонаселенного оазиса в дельте р. Амударья), выявить ареал пылевых выносов (около 200 000 км<sup>2</sup>), среднее (250 км) и максимальное (500 км) протяжение пылевых потоков.

Материалы съёмок из космоса (с метеорологических и природно-ресурсных спутников) позволяют выявлять ежегодное увеличение числа дней с мощными пылевыми выносами, что отражает углубление экологического кризиса в Приаралье. Было прослежено также расширение площади очагов пылевых бурь, возникновение новых очагов в полосе осушки у южного побережья моря, по окраине дельты р. Амударья (в добавление к очагам на восточном побережье моря). Наконец, данные съёмок из космоса (совместно с данными, полученными с земли и воздуха) позволили приближенно оценить количество поднимаемой пыли. При этом масса особо вредных для экосистем солей, выносимых ежегодно пылевыми бурями, была оценена в 0,9-1,5 млн. т.

Пылевые бури, прослеживаемые со спутников, стали надежным индикатором опустынивания, неблагоприятной экологической обстановки и в других регионах мира, и, в частности, в Калмыкии и особенно в Сахели. В конце 80-х годов XX ст. настораживающие признаки деградации экосистем были обнаружены на среднем западе США: со спутников было обнаружено крупномасштабное облако пыли. Оно возникло из бывшего печально известного "пыльного котла" (или "пыльной чаши") и протянулось на 2,4 тыс. км до берегов Атлантики.

***Катастрофы в городах.*** Города как центры сосредоточения большого количества людей и опасных промышленных производств должны находиться под непрерывным контролем. Большую роль здесь играют наблюдения городов и их агломераций из космоса. Они весьма эффективны для оценки природных катастроф, угрожающих городам. Например, многие из них оказались неудачно построенными в зонах воздействия вулканических извержений, землетрясений и связанных с ними явлений.

Съёмки из космоса позволяют обнаружить активные разломы, по которым происходит разгрузка земных недр. Одна из первых карт такого рода была составлена по изображениям с пилотируемого космического корабля "Аполло-7" на район г. Лос-Анджелес, расположенный в сейсмически активной зоне. Она позволила судить о зонах большей или меньшей вероятности подземных толчков.

Полезную информацию дают съёмки из космоса о больших наводнениях на реках, угрожающих жизнедеятельности городов. Во время катастрофического наводнения на р. Миссисипи в 1973 г., объявленного национальным бедствием

ем, затоплению подверглась обширная прибрежная полоса протяженностью около 2000 км, в том числе окраины множества городов. По данным спутниковых наблюдений удалось проследить за динамикой наводнения, которое продолжалось несколько недель, что было важно для принятия оперативных решений.

Существенную информацию содержат космические изображения о различных явлениях в городах, обусловленных антропогенными (техногенными) причинами. Только таким образом удалось выявить развитие крупномасштабных дымовых загрязнений в Западной Европе и на востоке Северной Америки, площадь которых достигала 200 000 км<sup>2</sup> в первом случае и свыше 1 млн. км<sup>2</sup> во втором. В зону развития загрязнения атмосферы попали и многие города, не являющиеся активными очагами загрязнения.

Наблюдения из космоса оказались полезными для оценки развития больших пожаров в городах или их предместьях, например, в Лос-Анджелесе в 1992 г. Тепловые инфракрасные изображения (на длине волны около 3,7 мкм) с ИСЗ NOAA позволили обнаружить крупные термальные аномалии, соответствующие участкам наибольшего развития пожаров, следить за их динамикой. Подобные сведения важны для оценки ситуации во время больших пожаров в городах.

Со спутников фиксируются взрывы на промышленных предприятиях. Нередко они представляют опасность также и для городов-соседей и даже для весьма больших регионов. Такого рода сведения по данным наблюдений со спутников были получены о взрыве и начале пожара на АЭС в г. Чернобыль. Во многом именно эти сведения явились главным источником информации о последующем возможном заражении радиоактивными осадками Европейского континента.

Таким образом, опыт аэрокосмических наблюдений катастрофических природных и антропогенных (техногенных) катастроф достаточно обширен. Он убеждает в ощутимом увеличении эффективности этих наблюдений за последние 35 лет, что связано главным образом с резким расширением диапазона технических средств получения информации, совершенствованием методов их обработки. Вместе с тем этот опыт далеко не всегда используется на практике в оперативных целях. В какой-то степени практическое применение съемки из космоса нашли при слежении за развитием ураганов, затоплением морских побережий, разливами рек. Известны случаи их использования в оперативных целях для слежения за развитием пожаров, пылевых бурь. Однако большинство катастрофических явлений, как упомянутых выше, так и таких, например, как обвалы, осыпи, лавины, и, в особенности, таких чрезвычайно опасных, как извержения вулканов и землетрясения, находятся вне постоянного слежения из космоса. Отчасти это связано с определенными трудностями их организации, например, в случае землетрясений, отчасти – с недооценкой такого рода наблюдений.

Среди задач по развитию аэрокосмического мониторинга чрезвычайных ситуаций, с учетом высказанных соображений, следует назвать:

- разработку требований к данным дистанционного зондирования;

- разработку единой системы наблюдений за чрезвычайными ситуациями и районами их возможного развития;
- создание единой информационной структуры (банка данных) для анализа наблюдаемых явлений;
- обеспечение комбинированного использования данных спутниковых, аэро и обычных наблюдений;
- подготовку специалистов по обработке данных дистанционного зондирования.

## 2. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ОКОЛОЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ

### 2.1. Системы и средства околоземного базирования

#### 2.1.1. Характеристика орбитальных носителей аппаратуры по исследованию земной поверхности

Для природных исследований земной поверхности используются космические платформы трех видов:

- искусственные спутники Земли (рис. 2.1);
- пилотируемые космические корабли (рис. 2.2);
- долговременные орбитальные станции (рис. 2.3).

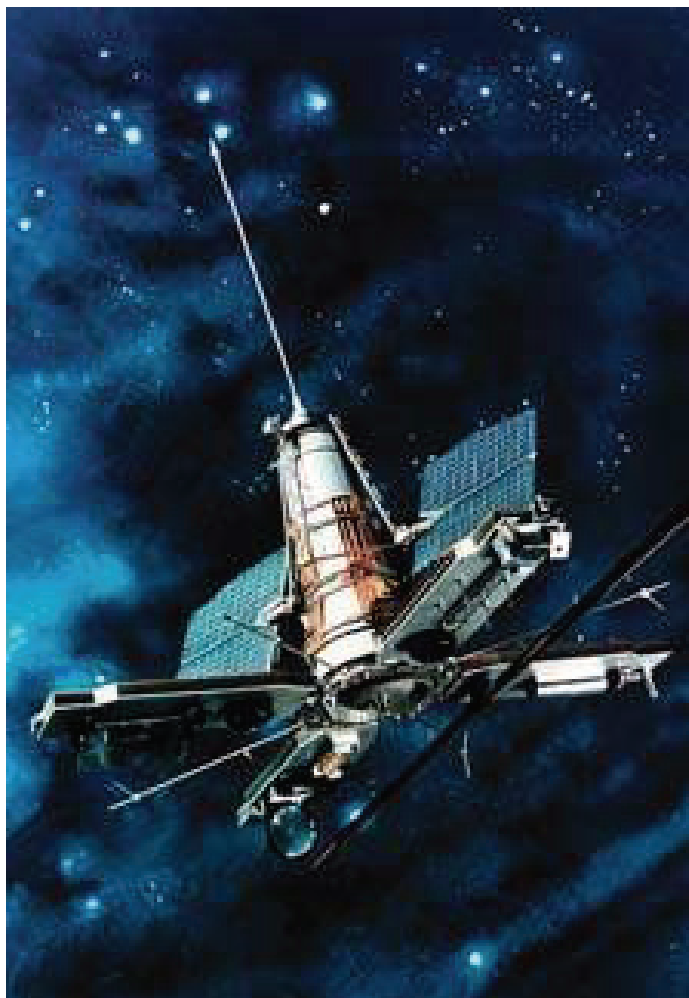


Рис. 2.1. – Искусственный спутник Земли «Сич»

Съемки из космоса Земли в целом или отдельных ее территорий осуществляют космические летательные аппараты (КЛА), движущиеся по разным орбитам на разных высотах (табл. 2.1).



**Рис. 2.2. – Пилотируемый космический корабль «Буран»**



**Рис. 2.3 – Орбитальная станция «Мир»**

Для изучения поверхности Земли обычно используют круговые или почти круговые орбиты (рис. 2.4, (а)), при съемке с которых получают снимки различных участков земной поверхности, близких по масштабу. Если поставлена задача постоянного наблюдения за глобальными процессами, например, за динамикой атмосферных образований, когда в поле зрения КЛА продолжительное время должен быть диск Земли в целом, КЛА запускают на эллиптическую орбиту (рис. 2.4,(б)).

Высота орбиты вместе с характеристиками съемочной аппаратуры определяет масштаб съемки и, соответственно, пространственную разрешающую способность съемочных материалов. Так, круговые орбиты большинства метеорологических и ресурсных искусственных спутников Земли (ИСЗ) имеют высоту в диапазоне 600 – 1500 км. Орбиты КЛА характеризуются также положением относительно Солнца или определенных районов земной поверхности. Рассмотрим геосинхронные (геостационарные) и солнечно-синхронные (гелиосинхронные) орбиты (рис. 2.5).

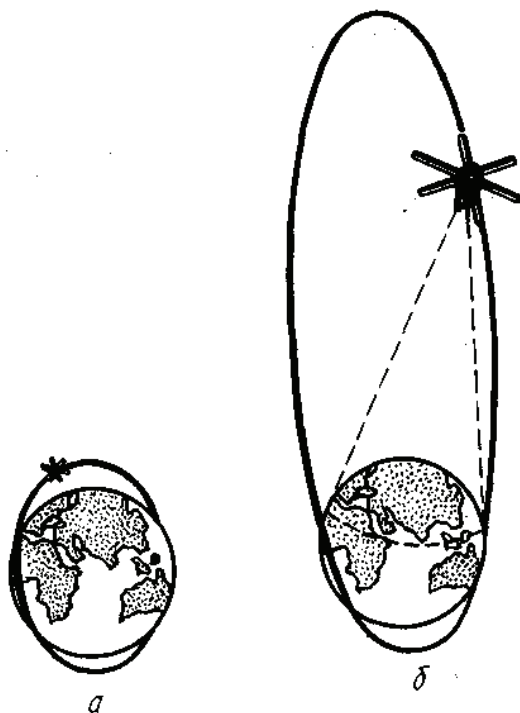


Рис. 2.4. – Орбиты ИСЗ (а – круговая; б – эллиптическая)

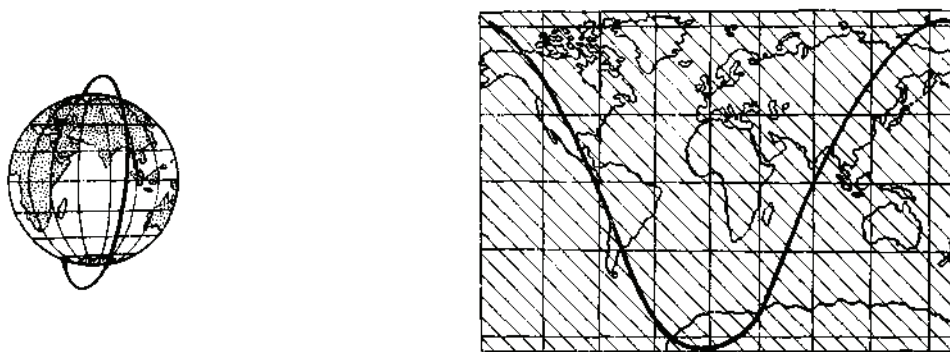


Рис. 2.5 – Схемы витков и зон возможного охвата съемкой при разных углах наклона орбит ИСЗ

На геосинхронной орбите КЛА летит вокруг Земли с угловой скоростью, равной скорости вращения Земли. Это обеспечивает синхронность движения КЛА относительно земной поверхности, над которой он находится. КЛА как бы висит над определенным районом Земли, что обеспечивает постоянное на-

блюдение за явлениями и процессами, происходящими в наблюдаемом районе. Поскольку скорость движения КЛА связана определенной зависимостью с высотой орбиты, геосинхронность обеспечивается лишь на орбите, удаленной от Земли на 36 тыс. км. Особенность солнечно-синхронной орбиты заключается в том, что КЛА проходит над каждым заданным районом в одно и то же местное время, а это позволяет проводить повторные съемки и наблюдения в одинаковых условиях освещенности

**Таблица 2.1 – Параметры космических систем, обеспечивающих съемку земной поверхности**

Космическая система носителей	Наклон орбиты к экватору, градус	Высота орбит, км	Вид съемки					Разрешение на местности ТВ, ФС, м
			ТВ	ИК	ФС	НФ С	ИК <sub>6</sub>	
<b>Искусственные спутники Земли (ИСЗ)</b>								
«Метеор»	81,2	560—930	+	+				1250
«Тайрос»	48-99	600-1000	+	+				2000
«Эсса»	97-102	700— 1500	+					3500
«Нимбус»	98—100	450— 1200	+	+			+	800
«Айтос»	102	1400	+	+			+	—
«ЭРТС-А»	90	900	+	+			+	60-100
«АТС-1», «АТС-3», «АТС-5»	0,2-2,6	36000	+				+	3000
<b>Космические корабли (КК)</b>								
«Восток»	65	170-250			+			20-100
«Восход»	65	170-500			+	+		20-100
«Союз»	51,7	180—250			+	+		20-100
«Меркурий»	32,6	160-280			+	+		20-100
«Джемини»	28,8-33,6	160—300			+	+		20-100
«Аполлон-7», «Аполлон-9»	32,0	100-300			+	+	+	20-100
<b>Долговременные орбитальные станции (ДОС)</b>								
«Салют»	51,6	212—249			+	+	+	20-100
«Скайлэб»	(50)	(420)		+	+	+	+	(50)

**Примечание.** Приведены ориентировочные сведения, характеризующие крайние значения параметров каждой системы.

Кроме США, Франции, России, Украины, Европейского космического агентства, спутники для дистанционных исследований Земли запущены Японией, Индией, Китаем, Бразилией и некоторыми другими странами.

### 2.1.2. Организация и управление орбитального движения космических летательных аппаратов

Траектория движения космического летательного аппарата называется его орбитой. При выключенных маршевых реактивных двигателях свободное движение аппарата под действием гравитационных сил и по инерции подчиняется законам небесной механики. Считая Землю строго сферической с равномерным распределением массы внутри нее, а действие гравитационного поля Земли единственной силой, действующей на спутник, можно решить задачу Кеплера, решением которой есть кривая второго порядка

$$md^2\vec{r}/dt^2 + \gamma m M \vec{r}/r^3 = 0, \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса спутника,  $M = 5,976 \cdot 10^{27}$  г – масса Земли,  $\vec{r}$  – радиус-вектор, соединяющий спутник и центр Земли,  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-14}$  м<sup>3</sup>/(г·с<sup>3</sup>) – гравитационная постоянная. Решая уравнение в полярных координатах  $r, \nu$ , получаем

$$r = p/(1 + e \cos \nu). \quad (2.2)$$

Эллиптическая орбита, по которой вращается спутник (рис. 2.6, где в точке  $S$  находится спутник, а в точке  $G$  – Земля), характеризуется следующими параметрами:  $a = AO$  и  $b = OC$  – большая и малая полуоси эллипса;  $e = (1 - b^2/a^2)^{1/2}$  – эксцентриситет орбиты; угол  $PGS$  – угловая координата  $\nu$  радиус-вектора (так называемая истинная аномалия); фокальный параметр  $p = b^2/a$ ;  $p = k^2/\gamma m^2 M$ , где  $k$  – момент количества движения спутника. К параметрам орбиты спутника относится также период обращения  $T$  – время между двумя последовательными прохождениями одной и той же точки орбиты.

В рамках задачи Кеплера спутник движется в плоскости орбиты, проходящей через центр Земли. В так называемой абсолютной или звездной системе координат плоскость орбиты неподвижна. Абсолютная система – это декартова система координат с началом в центре Земли, неподвижная относительно звезд. Ось  $z$  направлена вдоль оси вращения Земли и указывает на север, ось  $x$  направлена на точку весеннего равноденствия, в которой находится Солнце 21 марта в 0 ч по всемирному времени, а ось  $y$  перпендикулярна осям  $x$  и  $z$ .

В общем случае плоскость орбиты пересекается с плоскостью экватора Земли по так называемой линии узлов. Точка  $B$ , в которой орбита пересекает плоскость экватора при движении спутника с юга на север, называется восходящим узлом орбиты, точка  $H$  пересечения при движении спутника с севера на



юг – нисходящим узлом. Положение восходящего узла определяется долготой восходящего узла, т.е. углом  $\Omega$  между восходящим узлом и точкой весеннего равноденствия, отсчитываемым против часовой стрелки, если смотреть со стороны Северного полюса. Для линии узлов задают два угла в плоскости орбиты. Угол  $\omega$  – угловое расстояние, отсчитываемое от восходящего узла в плоскости орбиты до перигея орбиты  $\Pi$ , т.е. ближайшей к Земле точки орбиты спутника;  $\omega$  называют аргументом перигея. Угол  $i$  между плоскостью орбиты и плоскостью экватора, называемый наклонением орбиты, отсчитывается от плоскости экватора с восточной стороны восходящего узла орбиты, против движения часовой стрелки. По наклонению различают экваториальные ( $i = 0^\circ$ ), полярные ( $i = 90^\circ$ ) и наклонные ( $0 < i < 90^\circ$ ,  $90 < i < 180^\circ$ ) орбиты.

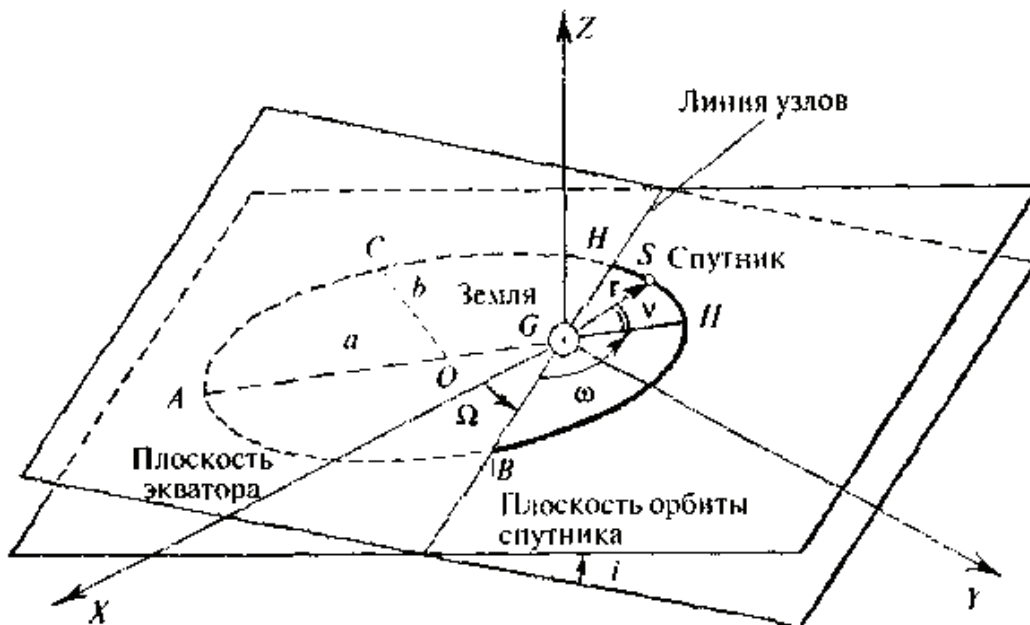


Рис. 2.6 – Эллиптическая орбита

Долгота восходящего узла  $\Omega$ , наклонение  $i$  и аргумент перигея  $\omega$  характеризуют положение плоскости орбиты и ее ориентацию в пространстве. Форму и размер орбиты задают фокальный параметр  $p$  и эксцентриситет  $e$ . Для привязки движения спутника ко времени в число элементов вводится время прохождения спутником точки начала отсчета  $t_0$ . Совокупность параметров  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $i$ ,  $p$ ,  $e$ ,  $t_0$  называется кеплеровскими элементами или элементами орбиты.

Зная параметры  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $i$ ,  $p$ ,  $e$  и положение спутника на орбите в момент  $t_0$ , можно найти это положение в любой другой момент времени  $t_1$ . Пусть спутник движется вокруг Земли  $G$  по эллиптической орбите. Проведем из центра этой орбиты  $O$  окружность радиусом, равным большой полуоси эллипса (рис. 2.7). Предположим, что в момент  $t_n$  спутник находился в перигелии орбиты  $\Pi$ , а в момент  $t_0$  сместился в точку  $S$ . Угол  $\Pi GS$  (между направлением на перигелий и радиус-вектором), как указывалось, называется истинной аномалией  $\nu$  в момент  $t_0$ . Проведем через  $S$  прямую, перпендикулярную к оси  $OP$  и пересекающуюся в

точке  $P$  с окружностью. Угол  $ПОР$  называется эксцентрической аномалией  $E$  в момент  $t_0$ . Представим теперь точку, которая выходит из перигелия одновременно со спутником и движется по окружности равномерно со скоростью, равной средней скорости движения спутника по орбите. Эта средняя скорость называется средним движением и равна  $n = 360^\circ/T$ , где  $T$  – период обращения. Если в момент  $t_0$  такая точка займет положение  $P'$ , то угол  $ПОР'$  будет равен  $\varphi = n(t_0 - t_n)$ . Эта величина называется средней аномалией в момент  $t_0$ . Решая трансцендентное уравнение

$$E - e \sin E = \varphi, \quad (2.3)$$

называемое уравнением Кеплера, можно найти эксцентрическую аномалию  $E$ .

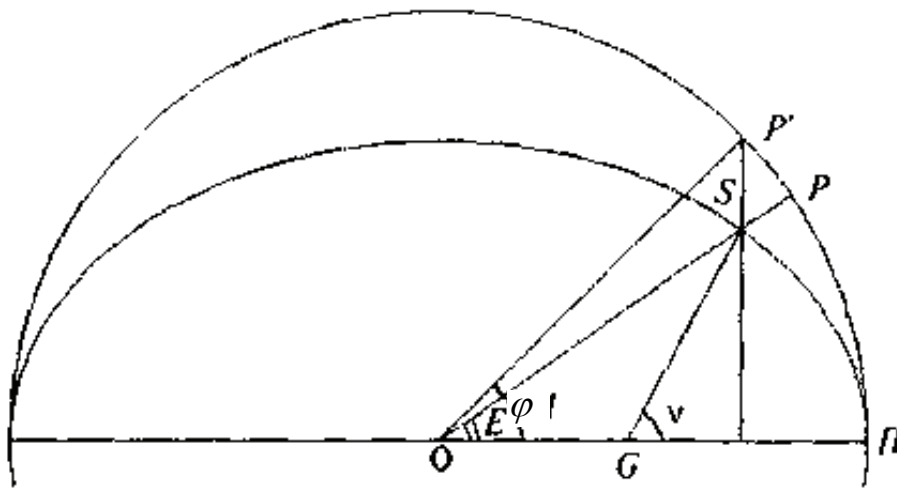


Рис. 2.7 – Диаграмма, иллюстрирующая вычисление положения летательного аппарата

Истинная аномалия  $\nu$ , характеризующая положение спутника на орбите в абсолютной системе координат в момент  $t_0$ , связана с  $E$  и эксцентриситетом  $e$  соотношением

$$\operatorname{tg} \nu/2 = [(1+e)/(1-e)]^{1/2} \operatorname{tg} E/2, \quad (2.4)$$

Зная среднее движение  $n$  и истинную аномалию  $\nu$  в момент  $t_0$ , можно вычислить  $t_n$  и далее истинную аномалию  $\nu$  в момент  $t_1$ , т.е. определить положение спутника на орбите.

Однако кеплеровские элементы дают лишь приближенное описание орбиты спутника. Во-первых, массы внутри Земли распределены неравномерно. Во-вторых, на движение спутника влияет сопротивление земной атмосферы. В-третьих, необходим учет светового давления солнечных лучей. В-четвертых, нужно учитывать притяжение Луны и Солнца и др. Влияние этих сил на движение ИСЗ мало по сравнению с силой притяжения Земли. Они называются возмущающими силами, а движение спутника с учетом их воздействия – воз-

мущенным движением. Основным источником возмущений является первый фактор. Если учитывать только первую зональную гармонику в разложении гравитационного потенциала Земли (она описывает сжатием Земли и с полюсов), то окажется, что в основном изменяется ориентация орбиты в пространстве, а форма и размеры орбиты остаются постоянными. За один оборот долготы восходящего узла  $\Omega$  и аргумент перигея  $\omega$  изменяются на

$$\Delta\Omega = -0.58^\circ (R_0/a)^2 \cos^2 i / (1 - e^2)^2, \quad (2.5)$$

$$\Delta\omega = 0.29^\circ (R_0/a)^2 (5 \cos^2 i - 1) / (1 - e^2)^2, \quad (2.6)$$

где  $R_0 = 6378,14$  км – экваториальный радиус. Эти выражения, в первом приближении определяющие поправки к долготы восходящего узла  $\Omega$  и аргументу перигея  $\omega$ , позволяют уточнить положение орбиты в абсолютной системе координат.

Спутник, движущийся в земной атмосфере, испытывает аэродинамическое торможение, зависящее от плотности атмосферы на высоте полета, от скорости спутника, площади его поперечного сечения и массы. Возмущение орбиты за счет аэродинамического торможения содержит регулярную и нерегулярную составляющие. К регулярным возмущениям приводит суточный эффект (ночью, т.е. в конусе земной тени, плотность атмосферы на данной высоте меньше, чем днем). Движение воздушных масс, влияние потоков заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем, приводят к нерегулярным возмущениям. Для природоведческих спутников сопротивление атмосферы играет заметную роль только при низких орбитах; при высоте перигея более 500 – 600 км возмущающее ускорение от неравномерности распределения масс превышает на два порядка и более ускорение от торможения в атмосфере.

При высоте перигея от 500 – 600 до нескольких тысяч километров к основному возмущающему фактору добавляется давление солнечного света (вместо сопротивления атмосферы). Влияние этого давления проявляется в дополнительных малых периодических возмущениях элементов орбиты. Если же спутник движется так, что регулярно попадает в конус земной тени, то имеют место также и небольшие постоянные изменения элементов. Но ускорение за счет давления света на несколько порядков меньше возмущающего ускорения за счет основного фактора. Еще слабее влияние притяжения Луны и Солнца.

Зная орбитальные элементы, можно предсказать время прохождения спутника над тем или иным районом, направить антенну приемной станции на спутник, выполнить географическую привязку изображений, полученных с помощью спутника. Существуют модели движения спутников по орбите, учитывающие все основные возмущающие силы. Они позволяют с высокой точностью предсказывать значения орбитальных элементов на многие месяцы вперед. Однако в практике дистанционного зондирования чаще всего применяют орбитальные элементы в формате NORAD (США) из сети Интернет (<http://www.celestrak.com>). По этому адресу представлены орбитальные элемен-

ты для спутников самого различного назначения, запущенных в разное время в различных странах (в том числе архивные материалы). Формат NORAD использует достаточно простые модели движения спутников, но орбитальные элементы постоянно корректируются по данным сети радиолокационных станций и станций оптического наблюдения (для низколетящих спутников корректировка может производиться несколько раз в день). Достоинством элементов в формате NORAD является их доступность, однако эта информация сравнительно быстро устаревает. В частности, если при расчете орбиты спутника NOAA использовать элементы NORAD недельной давности, то окажется, что подспутниковая точка сместится примерно на 50 км относительно ее истинного положения.

Формат NORAD содержит две строки данных, каждая по 69 символов. Рассмотрим пример:

```
NOAA14
1 23455 U 94089A 99244.00000000 .00000328 00000-0 20432-3 0 243
2 23455 99.1001 212.19660008831 180.9531 7.7697 14.12021817240644
```

Цифры 1 и 2 в начале каждой строки – это номер строки. Далее идет классификационный номер спутника по каталогу NORAD, для NOAA-14 – это 23455. Буква U после номера спутника в первой строке указывает, что данные общедоступны.

В первой строке: 94089A – номер спутника по международной классификации, Прием 94 – последние цифры года запуска (1994 г.), 089A – номер запуска в 1994 г.

В следующем поле приведено время  $t_0 = 99244,0000000$ , к которому относятся орбитальные элементы. Первые две цифры 99 указывают на год, т.е. 1999; 2000 г., таким образом, соответствуют цифры 00; 2001 г. – 01; 244 – это номер дня с начала года, отсчитываемый с 00 ч 1 января по Гринвичу, т.е. 1 сентября 1999 г. Цифры после точки (00000000) указывают на 1/100 000 000 долю суток, в данном случае это 00 ч 1 сентября 1999 г. по Гринвичу.

Следующие два поля: 00000328 и 00000-0 – это первая производная среднего движения, деленная на 2 (в единицах оборота за день в квадрате), и вторая производная, деленная на 6 (в единицах оборота за день в кубе). В орбитальной модели формата NORAD эти сведения не используются.

Величина 20432-3 – это сокращенная форма записи:  $B^* = 0,20432 \cdot 10^{-3}$ . В орбитальной модели NORAD  $B^*$  характеризует аэродинамическое торможение данного спутника при движении его в атмосфере на высоте орбиты. Далее представлен номер орбитальной модели. В формате NORAD это всегда модель SGP4/SDP4, на что указывает цифра 0.

Цифра 24 в принципе должна отражать номер сеанса коррекции орбитальных данных, но обычно это произвольная величина. Последняя цифра 3 в первой строке, как и 4 во второй, – контрольная сумма – остаток от деления на

10 суммы всех цифр в строке, причем буквы, пробелы, десятичные точки, знаки «+» игнорируются, а знакам «-» присваивается 1.

Во второй строке повторяется классификационный номер спутника по каталогу NORAD, далее приводятся орбитальные элементы для момента  $t_0$ :  $i = 99,1001$  – угол наклона орбиты (град);  $\Omega = 212,1966$  – долгота восходящего узла в градусах. Следующее Число 0008831 – это сокращенное обозначение эксцентриситета орбиты, который равен в данном случае  $e = 0,0008831$ . Число  $\omega = 180,9531$  – аргумент перигея в градусах;  $M = 7,7697$  – средняя аномалия в градусах;  $n = 14,12021817$  – среднее движение в оборотах за сутки, связанное с периодом обращения спутника  $T$  соотношением  $n = 1440/T$ , Здесь  $T$  выражено в мин; 240664 – номер витка с момента запуска спутника. Последнее число 4, как указывалось, это контрольная сумма.

Чтобы определить время прохождения спутника над тем или иным районом Земли, найти углы поворота антенны приемной станции в направлении на спутник, необходимо перейти от абсолютной системы координат в систему, связанную с Землей и учитывающую ее движение. Соответствующие программные продукты, ориентированные на формат NORAD, достаточно хорошо представлены в Интернет.

Спутники для дистанционного зондирования Земли запускают в основном на круговые орбиты. Малое значение эксцентриситета орбиты спутника NOAA-14, равное  $e = 0,0008831$ , достаточно типично. Такой спутник пролетает над различными участками Земли на одинаковой высоте, что обеспечивает равенство условий съемки. В этом случае справедливо соотношение

$$mV^2/R = mM\gamma/R^3, \quad (2.7)$$

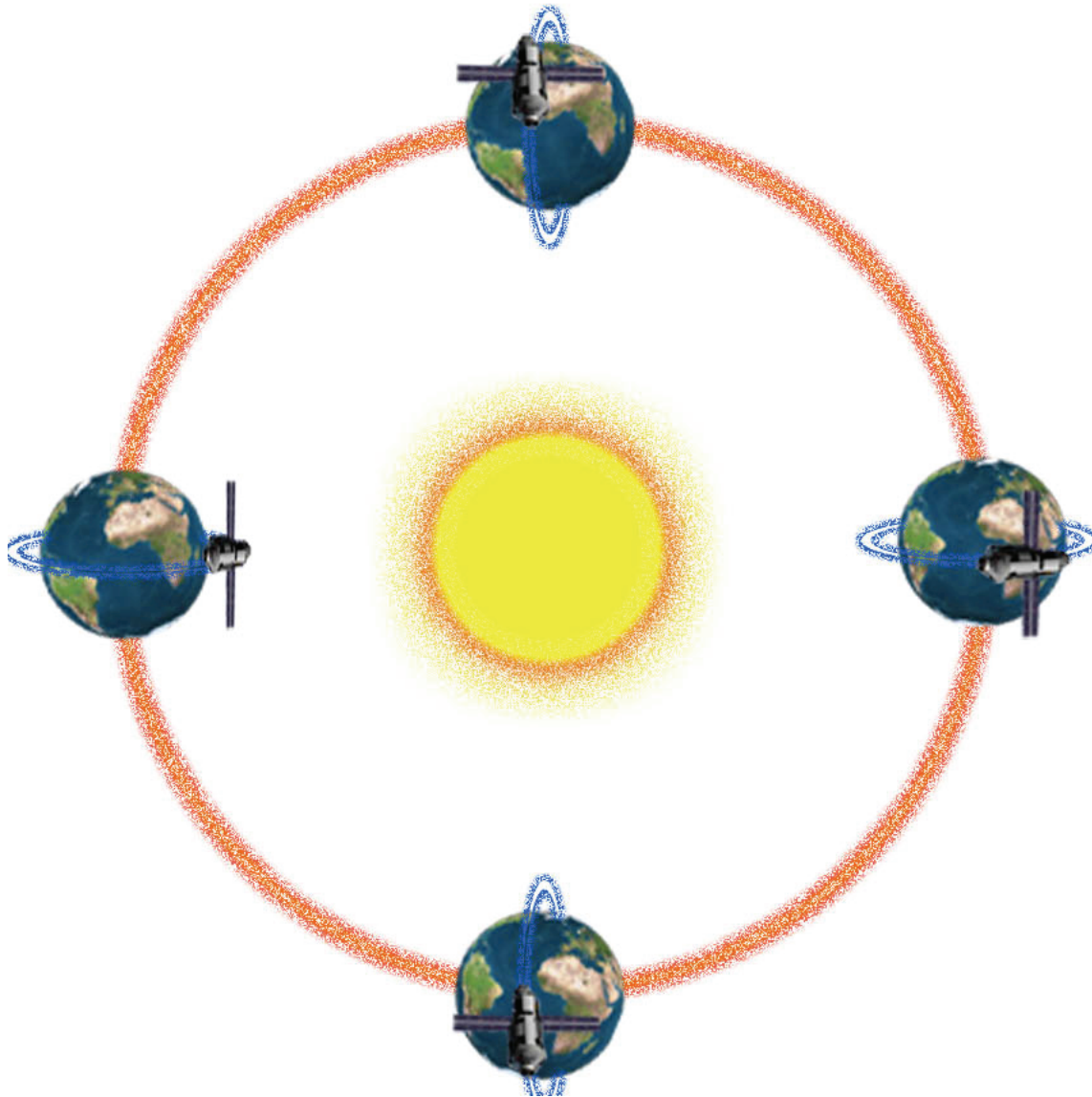
В левой части стоит центробежная сила, справа – сила притяжения спутника к Земле. Здесь  $m$  – масса спутника,  $V$  – скорость его на орбите,  $M = 5,976 \cdot 10^{27}$  г – масса Земли,  $R = R_0 + H$  – расстояние между спутником и центром Земли, причем  $R_0 = 6370$  км – радиус Земли,  $H$  – высота спутника над поверхностью Земли,  $\gamma$  – гравитационная постоянная. Таким образом,  $V = (M\gamma/R)^{1/2}$ , период обращения спутника  $T = 2\pi R/V$ . Обозначим:  $B = (M\gamma)^{1/2} = 6,31 \cdot 10^2$  км<sup>3/2</sup>/с. Тогда  $V = (M\gamma/R)^{1/2}$ ,  $T = 2\pi R/V$ .

Скорость перемещения подспутниковой точки по поверхности Земли  $V_3$  может быть определена по формуле  $V_3 = VR_0/R$ .

Пусть  $H = 1000$  км, тогда  $R = 7370$  км. Используя приведенные формулы, находим, что скорость на орбите  $V = 7,35$  км/с,  $V_3 = 6,35$  км/с, период обращения  $T = 105$  мин.

Низкоорбитальные спутники ( $R < 1000$  км) обычно выводятся на приполярные солнечно-синхронные орбиты. Эти орбиты имеют наклонение относительно экватора, близкое к  $90^\circ$ , обеспечивают съемку всей поверхности Земли, включая полярные области. Поворот орбиты относительно Земли синхронизи-

ван с вращением Земли относительно Солнца, так что в течение всего времени угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце постоянен (рис. 2.8). Это позволяет производить съемку приблизительно в один и тот же час местного времени в течение всего года. Наиболее удобное время для съемки – около 12 ч местного времени.



**Рис. 2.8 – Солнечно-синхронная орбита**

Спутник NOAA-12 имеет орбиту с наклоном  $98,86^\circ$ , так что за сутки плоскость орбиты поворачивается относительно Земли на  $0,986^\circ$ , за год – на  $360^\circ$ . Однако из-за возмущений, вызванных неравномерностью распределения масс Земли, сопротивлением атмосферы, давлением солнечных лучей и т.п., за несколько лет плоскость орбиты меняется.

Ряд метеорологических спутников запускается на геостационарную орбиту высотой 36 тыс. км с периодом 24 ч. Эти спутники находятся над одной и той же точкой на экваторе и обеспечивают постоянный обзор одной и той же части планеты от  $50^\circ$  с.ш. до  $50^\circ$  ю.ш.

### 2.1.3. Прием и передача информации о поверхности Земли

Наземные станции для приема информации с летательных космических аппаратов включают антенну с опорно-поворотным устройством (ОПУ), радиоприемное устройство и средства обработки, хранения и отображения информации (рис. 2.9).

Широко используемые в настоящее время зеркальные антенны с параболическим рефлектором наводятся ОПУ на спутник по командам компьютера, в который заложены орбитальные данные. В фокусе антенны установлен облучатель, сигнал с которого усиливается малошумящим усилителем (МШУ). Далее сигнал по кабелю поступает на приемник, цифровой сигнал с выхода которого обрабатывается на компьютере.

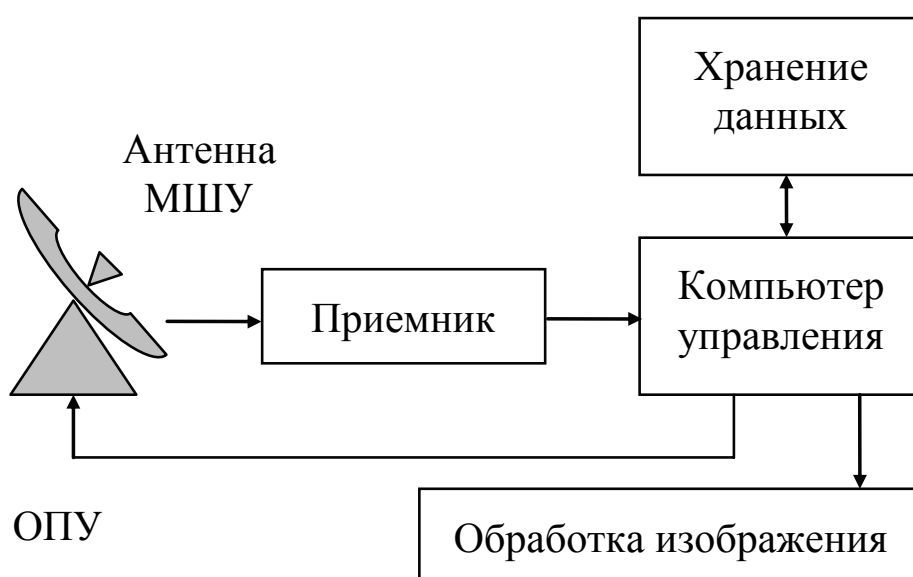


Рис. 2.9 – Структурная схема станции приема информации КЛА.

Наиболее дорогостоящей частью станции является антенна с ОПУ. Чаще всего используются ОПУ с азимутально-угломестной подвеской антенны, позволяющие разворачивать ее на  $\pm 180^\circ$  по горизонтали и на  $0-90^\circ$  по углу места, отсчитываемому от горизонта к зениту. Азимутально-угломестная подвеска обладает принципиальным недостатком: в области углов места, примыкающих к зениту, образуется «мертвая зона», в пределах которой невозможно обеспечить связь со спутником. Это объясняется тем, что с ростом угла места  $\Psi$  требуемая угловая скорость вращения антенны вокруг вертикальной оси возрастает, стремясь к бесконечности при  $\Psi \rightarrow 90^\circ$ . Поскольку реальная скорость поворота антенны конечная, то, начиная с некоторого значения угла места, луч антенны отстает от перемещения спутника, и сопровождение срывается. Таким образом, когда спутник близок к зениту, такой вид подвески не позволяет качественно принимать изображения той местности, где находится станция.

Для устранения «мертвой зоны» при прохождении спутника через зенит можно ввести в ОПУ третью ось. Однако в этом случае конструкция ОПУ резко усложнится. Во избежание этого можно сохранить двухосное поворотное устройство, но разместить ортогональные оси так, чтобы «мертвая зона» находилась в наименее существенной для поддержания связи части небесной полусферы, например, ближе к горизонту.

При выборе конструкции антенны приходится учитывать различные факторы, в частности, особенности распространения радиоволн на трассе Земля – космос. Для передачи сигналов чаще всего используют радиоволны дециметрового и сантиметрового диапазонов или соответственно частоты 300 МГц – 30 ГГц. В этом частотном диапазоне отдельные полосы переуплотнены различными радиослужбами. Так, полоса 300 МГц – 10 ГГц интенсивно используется наземными радиостанциями. При этом повышается уровень взаимных помех, снижается качество радиосвязи.

При прохождении радиоволн сквозь атмосферу Земли приходится учитывать влияние тропосферы (0 – 11 км) и ионосферы (выше 80 км), поскольку в указанном интервале частот они несколько затухают в атмосферных газах и осадках. При этом изменяется поляризация волны, возникают дисперсионные искажения.

При прохождении через ионосферу линейно-поляризованные (в частности, горизонтально и вертикально поляризованные) радиоволны расщепляются на два эллиптически поляризованных компонента (обыкновенный и необыкновенный), которые распространяются с разной скоростью из-за влияния магнитного поля Земли. В результате сложения этих компонентов в точке приема плоскость поляризации результирующей волны будет повернута на некоторый угол (эффект Фарадея), зависящий от электронной концентрации  $N_e$  в ионосфере и напряженности геомагнитного поля  $H$  вдоль пути радиоволн в ионосфере. Для него характерна регулярная зависимость от времени суток, сезона и фазы цикла солнечной активности, а также случайные изменения, связанные с геомагнитными бурями и нерегулярными ионосферными неоднородностями. На частоте 1 ГГц угол поворота лежит в пределах  $1 - 100^\circ$  и уменьшается с ростом частоты как  $1/f^2$ . Эффект поворота плоскости поляризации учтен в конструкции антенны: выбираются антенны и облучатели, способные принимать сигналы с круговой поляризацией, например, спиральные антенны и спиральные облучатели.

При прохождении через ионосферу широкополосные сигналы искажаются, поскольку время распространения составляющих его спектра будет различно. Это явление, известное как относительная дисперсия, характеризуется разностью задержек между нижней и верхней частотами спектров сигналов, распространяющихся через ионосферу.

Мощность сигнала в месте приема может быть оценена из следующих соображений. Если  $L$  – расстояние между передатчиком и приемником,  $P_{пер}$  – мощность передатчика, то при условии, что излучение энергии происходит равномерно по всем направлениям (изотропный излучатель), вся энергия рас-



пределяется по площади сферы радиусом  $R$ , равной  $4\pi L^2$ . Мощность, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$ , т.е. плотность потока мощности, соответственно равна

$$P = P_{nep} / 4\pi L^2 . \quad (2.8)$$

Реально спутник передает информацию только в нижнюю полусферу, в сторону Земли. Поэтому приведенное выражение следует умножить на так называемый коэффициент направленного действия антенны (КНД)  $D \geq 1$  – отношение плотности потока мощности, излучаемой антенной в направлении максимума ее диаграммы направленности, к плотности потока мощности, которая излучалась бы изотропным излучателем, при условии равенства общей излучаемой мощности. КНД связан с площадью апертуры  $S$  и длиной волны  $\lambda$  соотношением  $D = 4\pi S / \lambda^2$ . Если излучение происходит равномерно во всех направлениях в нижнюю полусферу, то  $D = 2$ . На природоведческих спутниках обычно устанавливают передающие антенны с  $D = 3 \div 4$ , что позволяет наземным станциям принимать информацию практически с любых направлений – от горизонта до горизонта. Таким образом,

$$P = P_{nep} D / 4\pi L^2 , \quad (2.9)$$

Приемная антенна – это барьер, поглощающий поток энергии, излучаемый передающей антенной. Если пренебречь потерями в приемной антенне, то мощность сигнала на ее выходе

$$P_{np} = SP = SP_{nep} D / 4\pi L^2 , \quad (2.10)$$

В это выражение в явном виде не входит КНД приемной антенны, но с ростом  $S$  увеличивается отношение  $S / \lambda^2$ , увеличивается  $D$  и сужается диаграмма направленности. В результате снижается уровень помех  $H$  шумов, которые могут поступать в антенну с боковых направлений. Однако слишком узкая диаграмма направленности требует большой точности наведения антенны.

Пусть радиус апертуры приемной параболической антенны  $r = 60$  см;  $P_{nep} 5,5$  Вт;  $D = 3$ ;  $840 < L < 3400$  км. Площадь апертуры антенны  $S = \pi r^2 = 1,13$  м<sup>2</sup>, при  $\lambda = 17,6$  см ее КНД около 400, ширина диаграммы направленности по ее первому минимуму, определяемая как  $0,61\lambda / r$ , около  $10^\circ$ . Эти реальные числа соответствуют мощности передатчика спутника NOAA, минимальному и максимальному расстоянию  $L$  от спутника до приемной станции, размеру антенны станции HRPT для приема информации с этого спутника. Расчет по формуле (2.10) дает максимальное значение  $P_{np} = 2 \cdot 10^{-12}$  Вт, минимальное значение  $P_{np} = 10^{-13}$  Вт. Современная радиотехника позволяет усиливать и более

слабые сигналы, но при этом усиливаются также внешние помехи, шумы и внутренние шумы радиоустройств.

Источниками внешних шумов в микроволновом диапазоне могут быть различные наземные радиопередатчики, существуют шумы и космического происхождения. Источником внутренних шумов радиоустройств прежде всего является дискретная природа электричества, так как электрический ток – это поток дискретных частиц – электронов.

Интенсивность шума принято описывать следующим образом. Все источники внешних и внутренних шумов заменяются эквивалентным источником шума в виде некоторого активного сопротивления (резистора). Известно, что на зажимах резисторов из-за хаотического теплового движения электронов возникает разность потенциалов, изменяющаяся случайным образом. Средняя мощность такого шума (его называют тепловым) описывается формулой Найквиста:  $P = 4kT\Delta f$ , где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана,  $T$  – температура резистора,  $\Delta f$  – полоса частот, в пределах которой измеряется средняя мощность шума. Если входное сопротивление приемника равно входному сопротивлению антенны (т.е. приемник и антенна согласованы), то эквивалентная мощность шума

$$P_{ш} = kT_{ш}\Delta f. \quad (2.11)$$

В нашем случае  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания приемника, равная, в свою очередь, ширине полосы частот, необходимой для передачи информации со спутника,  $T_{ш}$  – эквивалентная шумовая температура антенны и приемника, не совпадающая с термодинамической температурой, при которой находятся антенна и приемник. На прием сигналом с природоведческих спутников сильнее всего влияют внутренние шумы, и, в первую очередь, шумы первых каскадов усилителя радиосигналов. Поэтому во входных каскадах применяют малошумящие усилители (МШУ), которые конструктивно обычно совмещают с преобразователем несущей частоты сигнала в более низкую и помещают непосредственно в облучателе антенны. Современные МШУ имеют в микроволновом диапазоне  $T_{ш}$  порядка 40 – 70 К.

Пусть  $T_{ш} = 70$  К,  $\Delta f = 2$  МГц, что соответствует условиям приема сигналов со спутника NOAA. В этом случае  $P_{ш} = 2 \cdot 10^{-5}$  Вт, что на 2 – 3 порядка меньше мощности сигнала.

Мощность сигнала при прочих равных условиях определяется размерами антенны и ее КНД, средняя мощность шума – шумовой температурой. Отношение мощности сигнала к средней мощности шума (отношение сигнал – шум) является важнейшей характеристикой качественного приема и зависит, таким образом, от отношения КНД антенны к шумовой температуре. Эту величину  $D/T_{ш}$  называют коэффициентом качества антенны. В рассмотренном примере коэффициент качества равен 5,7.

Выбор размеров приемной антенны определяется требованиями к коэффициенту качества и в конечном итоге – шириной полосы частот, необходимой для передачи информации со спутника. Последняя зависит от скорости передачи информации  $C$ . Для вычисления  $C$  необходимо знать параметры сканирующего устройства и скорость перемещения подспутниковой точки  $V_3$  по Земле. Если разрешение сканера вдоль направления движения спутника равно  $\Delta L$ , то в секунду считывается информация с  $V_3/\Delta L$  строк. Пусть  $I$  – число бит, которое используется для записи яркости каждого пикселя,  $n$  – число спектральных каналов,  $K$  – коэффициент, зависящий от типа применяемого при передаче информации помехоустойчивого кодирования,  $K > 1$ ,  $N$  – число пикселей в строке, связанное с шириной полосы обзора  $b$  соотношением  $N = b/\Delta L$ . Тогда

$$C = V_3 N I K n / \Delta L = V_3 b I K n / \Delta L^2 . \quad (2.12)$$

Например, для  $\Delta L = 1,1$  км,  $V_3 = 6,56$  км/с,  $b = 1670$  км,  $I = 10$  бит,  $n = 5$ ,  $K = 1$  скорость передачи информации  $C = 500$  кбит/с. Если  $\Delta L = 100$  м, что было бы очень желательно, то при тех же условиях  $C = 50$  Мбит/с. Улучшение пространственного разрешения приводит к увеличению информационного потока, который обратно пропорционален квадрату разрешения.

Полоса частот  $\Delta f$ , необходимая для передачи информации со спутника, зависит от вида модуляции высокочастотного колебания и ориентировочно равна  $(3 - 3,5) C$ . Для первого примера  $\Delta f = 1,5$  МГц, для второго  $\Delta f \geq 150$  МГц. Очевидно, что при прочих равных условиях средняя мощность шума для второго примера на два порядка выше. Чтобы сохранить необходимое отношение сигнал – шум, требуется увеличить площадь антенны и ее КПД в 100 раз, а диаметр антенны – в 10 раз. Таким образом, если при скорости передачи в 500 Кбит/с, пространственном разрешении 1,1 км и полосе обзора 1670 км можно применять антенну диаметром 1 м, то при скорости передачи 55 Мбит/с, пространственном разрешении 100 м с сохранением той же полосы обзора – антенну диаметром 10 м.

Типичная земная станция HRPT для приема информации со спутников NOAA имеет параболическую антенну диаметром 1,2 – 1,5 м. В фокусе антенны установлен облучатель, сигнал с которого усиливается МШУ, а несущая частота сигнала преобразуется в более низкую. МШУ имеет  $T_{ш} = 60 \div 80$  К. Цифровой сигнал с выхода приемника обрабатывается на компьютерах. Обработка включает в себя секторизацию, т.е. «вырезание» из всего спутникового изображения интересующего участка, например размером 512x512 пикселей, лежащего вблизи надира. Далее выполняются геометрическая коррекция изображения и топографическая привязка его к карте, а также коррекция атмосферных искажений. Секторизованное и скорректированное изображение готово для дальнейшей обработки, целью которой обычно является улучшение качества изображения, распознавание объектов на изображении, определение их координат и других геометрических характеристик.

#### 2.1.4. Обработка получаемой информации. Распознавание образов

Под распознаванием образов (классификацией) обычно понимают процедуру, позволяющую вынести решение о принадлежности данного изображения или его фрагмента к одному из  $n$  классов,  $n > 1$ . Это решение выносится на основании наличия у изображения некоторых признаков того или иного класса. Результатом является выделение классифицированных объектов на изображении. Определение, что такое класс и каковы его признаки, зависит от задачи. На космическом изображении можно классифицировать области, покрытые снегом, с точки зрения степени загрязнения их промышленными выбросами (классы – участки с разной степенью загрязнения). На этом же изображении можно выделить участки, покрытые лесом (классы – «лес» и не-лес») и т.п. Распознавание образов относят к тематической обработке изображений, перед которой обычно выполняют предварительную обработку – восстанавливают и улучшают исходное изображение.

Задачи распознавания изображений с некоторой долей условности подразделяют на задачи идентификации и задачи определения параметров положения. Например, опознание созвездия по изображению участка звездного неба в системах астроориентации есть задача идентификации. Задача определения углов тангажа, рыскания и крена космического аппарата по положению опознанного созвездия на кадре есть задача определения параметров положения.

Иногда задачи идентификации и определения параметров положения объединяют в одну, называемую задачей распознавания. Задачи распознавания изображений решаются на основе общей теории распознавания образов.

Распознавание образов – раздел информатики, разрабатывающий принципы и методы классификации и идентификации предметов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций, т.е. всех тех объектов, которые могут быть описаны конечным набором некоторых признаков или свойств, характеризующих объект.

Под общей теории распознавания образов различают два типа задач:

- таксономии (обучение без учителя);
- собственно распознавания (обучение с учителем).

К задачам первого типа относят те, в которых предъявляемые объекты необходимо разделить на несколько групп (образов) только на основе их описаний, причем число групп может быть известно или не известно.

К задачам второго типа относят те, в которых необходимо определить лишь класс описания некоторого распознаваемого объекта. При решении этих задач предполагается, что число классов конечно и задано. Классы могут пересекаться.

Описание объекта представляет собой  $m$ -мерный вектор, где  $m$  число признаков, используемых для характеристики объекта, причем  $q$ -й компонент этого вектора равен значению  $q$ -го признака. В описании объекта информация о значении некоторых признаков может отсутствовать, т.е. некоторые компоненты описания объекта могут быть не определены.

Наиболее общая математическая формулировка задачи распознавания выглядит следующим образом. Пусть для совокупности  $N$  объектов известны образы (классы), к которым они принадлежат. Эту совокупность называют обучающей последовательностью, а составляющие ее объекты – эталонами. Исходя из обучающей последовательности, необходимо определить класс, к которому принадлежит описание некоторого объекта, подвергаемого классификации и идентификации.

Формальное решение задачи распознавания принято записывать в виде так называемой решающей функции  $i = d(x)$ , где  $i$  – номер класса, к которому принадлежит описание распознаваемого объекта – вектор признаков  $x$ .

Решающая функция строится на основе разбиения пространства признаков  $U$  на  $M$  непересекающихся классов  $U_i, i = 1, \dots, M$ :

$$\bigcup_{i=1}^M U_i = U, U_i \cap U_j = \emptyset \text{ при } i \neq j. \quad (2.13)$$

В конечном итоге решающая функция  $d$  служит для определения номера  $i$  области  $U_i$ , к которой принадлежит аргумент  $x$ . Критерием выбора решающей функции  $d$  может служить минимальная ошибка идентификации.

При числе классов более двух применяется метод последовательных дихотомий. Для наглядности вводят двоичное (бинарное) дерево распознавания, с помощью которого часто представляют множество данных при процедурах поиска, кодирования, распознавания и сортировки. Наиболее важным преимуществом использования двоичных деревьев в этих задачах является тот факт, что для идеально сбалансированного двоичного дерева число обращений к элементам исходного множества данных  $\sim \log M$  вместо  $M$  при обычном переборе.

Двоичное дерево распознавания разбивает множество  $M$  возможных классов  $M_0$  на два подмножества  $M_1$  и  $M_2$ , соответствующих крайним классам  $G_{i1}$  и  $G_{i2}$  множества  $M_0$ :

$$p(G_{i1}, G_{i2}) = \max p(G_i, G_j), M_0 = M_1 \cup M_2, \quad (2.14)$$

где  $p$  – функция расстояния на множестве  $M_0$ .

Подмножество  $M_1$  содержит векторы, более близкие к  $G_{i1}$ , чем к  $G_{i2}$ , подмножество  $M_2$ , наоборот, содержит векторы, более близкие к  $G_{i2}$ , чем  $G_{i1}$ . Подмножества  $M_1$  и  $M_2$  также разбиваются на два подмножества своих крайних элементов  $M_1 = M_{11} \cup M_{12}$  и  $M_2 = M_{21} \cup M_{22}$  и т.д.

Процесс поиска вектора признаков  $G_i$ , наиболее близкого к данному  $G_0$ , можно оформить в виде последовательных дихотомий следующим образом. Находясь в корне дерева, производим сравнение расстояний  $p(G_0, G_1)$  и  $p(G_0, G_2)$ , где  $G_1$  и  $G_2$  – векторы признаков, которыми помечены приемники корня. После этого переходим в ту вершину дерева, которая помечена ближайшим к  $G_0$  вектором признаков ( $G_1$  или  $G_2$ ). Далее, находясь в этой вершине,

продвигаемся по дуге, ведущей к ближайшему вектору, и так далее до тех пор, пока не достигнем листа дерева. После этого считаем, что наиболее близким вектором к  $G_0$  из множества всех  $M$  эталонных векторов является вектор  $G_i$ , которым помечен достигнутый лист дерева распознавания.

Подходы к распознаванию изображений. В общей теории распознавания образов существует несколько разных подходов к распознаванию, отличающихся структурой описания классов признаков.

*Детерминированный подход.* Такой подход предполагает, что в любой точке пространства признаков, используемых для распознавания, с ненулевой априорной вероятностью могут появляться реализации только одного класса. При этом необходимо из всей совокупности признаков, характеризующих распознаваемые объекты, выделить систему детерминированных свойств, т.е. таких признаков, определение которых не связано с теми или иными принципиально случайными механизмами. Примерами таких свойств для изображений могут служить топологические инварианты, нормированные интегральные геометрические параметры, компоненты разложения изображения по какой-либо системе функций, моменты изображения и т.п. Типичным примером систем распознавания изображений с использованием детерминированного подхода могут служить способы распознавания типографских букв для ввода в ЭВМ текстов с помощью настольного сканера и их последующего анализа. Один из распространенных способов распознавания букв в этих системах основан на корреляционно-экстремальном алгоритме. Для этого в памяти ЭВМ должны храниться эталоны всех символов (букв, цифр, знаков препинания и др.), которые могут встретиться в обрабатываемом тексте. Каждым считываемый символ сравнивается со всеми эталонами, среди которых встречается максимально совпадающий с текущим считанным символом.

*Непрерывно-групповой подход.* Является развитием детерминированного подхода. В задаче обработки геометрически искаженных изображений, получаемых при дистанционных исследованиях Земли из космоса, эталонной реализацией служит географическая карта. Каждый класс в пространстве признаков является орбитой своей эталонной реализации, образуемой группой допустимых преобразований пространств признаков. При непрерывно-групповом подходе в качестве признаков выступают инварианты действующей в пространстве признаков группы. В рамках этого подхода можно непосредственно определять параметры положения эталонного объекта в предъявляемой реализации.

Из-за неопределенности положения один и тот же объект (например, озеро) может самым различным образом представляться на изображении. Для математического описания преобразований изображения используют математический аппарат теории непрерывных групп. Элементами группы являются различные преобразования изображения, а в качестве групповой операции выступает композиция этих преобразований.

При постановке задачи распознавания изображений в рамках непрерывно-группового подхода, прежде всего необходимо установить, какая из групп действует на распознаваемом изображении. Допустим, что это некоторая группа  $G$ . Рассмотрим некоторый эталонный объект  $S$ , наличие аналога которого на

изображении мы предполагаем. На реальном изображении этот аналог будет выглядеть как  $gS$ , где  $g$  – априорно неизвестный элемент действующей на изображении группы  $G$ . При распознавании изображений в этих условиях обычно различают два типа (этапа) задач:

- идентификация объекта  $gS$ , выделенного на изображении, с эталоном  $S$ ;
- определение параметров положения объекта относительно датчика изображения, т.е. определение параметров (идентификация) преобразования  $g$ .

В данном случае существуют два основных подхода к решению задачи распознавания:

- с помощью нормализации;
- с помощью инвариантных признаков.

Нормализацией изображения, подвергнутого некоторому априорно неизвестному преобразованию  $g$  группы  $G$ , называют приведение изображения к так называемому нормализованному виду, т.е. к виду, соответствующему эталону. Иначе говоря, нормализации – это устранение искажений, вызванных действием преобразования  $g$ . Затем нормализованное изображение отождествляют с одним из имеющихся эталонов. После этого, зная эталон  $S$  и его исходное изображение  $gS$ , вычисляют параметры преобразования  $g$ , т.е. решают задачу определения параметров положения.

При распознавании изображений с помощью нормализации важное место занимает понятие эквивалентности. Говорят, что изображения  $f_1$  и  $f_2$  эквивалентны относительно действия группы преобразований  $G$ , если найдется такое преобразование  $gG$ , при котором  $gf_1 = f_2$ . Множество всех изображений, эквивалентных (относительно действия группы преобразований  $G$ ) заданному эталону  $S$ , называют орбитой  $S$ , а множество эквивалентных изображений – классом эквивалентности.

Простейшим примером использования нормализации может служить случай, когда  $G = G_c$  – группа смещений. В данном случае классом эквивалентности эталона является множество изображений, полученных из  $S$  путем различных сдвигов. Пусть на эталонах присутствует метка, указывающая на (условный) центр, при этом каждому классу эквивалентности соответствует один и только один эталон. На исходном, предъявляемом для распознавания изображении  $f(x, y)$  определяют центр  $(x_c, y_c)$ . Затем  $f(x, y)$  нормализуют (центрируют), т.е. подвергают преобразованию  $g$ :

$$x' = x - (x_c - x_0), \quad y' = y - (y_c - y_0), \quad (2.15)$$

где  $(x_0, y_0)$  – геометрический центр изображения. Полученное центрированное изображение  $gf(x, y) = f(x', y')$  отождествляют с одним из имеющихся эталонов (которые также центрированы). Параметрами положения в данном примере являются координаты центра относительно геометрического центра изображения, т.е.  $x_c - x_0$  и  $y_c - y_0$ .

Распознавание изображений с помощью инвариантных признаков предполагает переход из пространства изображений в пространство признаков. Выбор (синтез) признаков осуществляется так, чтобы эквивалентным изображениям соответствовали одинаковые признаки и одинаковые векторы признаков. В условиях действия некоторой группы преобразований изображений признаки изображений должны быть инвариантны относительно преобразований данной действующей группы.

Общий теоретический прием синтеза системы инвариантных признаков и нормализаторов (преобразований нормализации) строится на основе теории дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка.

Типичным примером задачи распознавания изображений с помощью инвариантных признаков может служить задача ориентации космического аппарата по изображениям участков звездного неба. При наличии в кадре  $k$  звезд с координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, k$ , полная система элементарных инвариантных признаков для этого случая (в условиях действия группы  $G_{cn}$  – смещения и поворота):  $r_i^2$ ,  $i = 1, \dots, k - 1$ ;  $r_i r_{i+1}$ ,  $i = 1, \dots, k - 2$  где  $r_i$  – двумерный вектор, проведенный на изображении от  $k$ -й точки до  $i$ -й.

*Структурно-лингвистический (синтаксический) подход.* Основан на описании геометрической структуры класса с помощью специального формального языка, алфавит которого составляют так называемые непроеизводственные элементы, структуры, операции и их композиции задаваемые грамматикой этого языка. Такой подход предполагает, что структура и характер связей между элементами всех подлежащих распознаванию объектов подчиняются вполне определенным, заранее известным правилам. К настоящему времени разработано достаточно много приложений такого подхода, к которым относятся системы распознавания человеческой речи, автоматическая классификация некоторых микрообъектов (например, хромосом), распознавание геологических образований на космических изображениях Земли и др.

Все методы распознавания, основанные на детерминированном статистическом и непрерывно-групповом подходах, предполагают разделение объектов в пространстве признаков. При синтаксическом (иногда называемом грамматическим) подходе ищут и используют правила, которым подчиняется структура рассматриваемых образов. При этом процедуры классификации и идентификации состоят из двух этапов и являются достаточно простым и естественным следствием из предположения, что конструкция или структура всех подлежащих распознаванию объектов подчиняется вполне определенным, заранее известным правилам. На первом этапе разрабатываются те правила, которым подчиняются конструкции, иначе говоря, создается своего рода грамматика в том смысле, в котором этот термин используется в лингвистике.

Когда грамматика определена, наступает второй этап, состоящий в принятии решения о том, принадлежит ли рассматриваемый объект множеству всех объектов, порождаемых этой грамматикой. В основе структурно-лингвистического подхода к распознаванию лежат основные понятия матема-



тической лингвистики, которая, в свою очередь, базируется на самых общих принципах построения различных конструкций в естественных языках.

Когда говорят о синтаксическом распознавании, то обычно имеют в виду применение этого термина к одномерным структурам. Термин «структурное распознавание» используют для двумерных (2D-данных) исходных данных, в частности, изображений. Для трехмерных структур (3D-структур) чаще применяют термины «анализ сцен» и «распознавание сцен».

Структурный подход к представлению и описанию образов можно проиллюстрировать на примере. Пусть алфавит, т.е. множество элементарных примитивных объектов (примитивов), из которых могут состоять реальные объекты на изображении, содержит 4 элемента:  $V = \{a, b, c, d\}$ , где  $a$  – стрелка вверх  $\uparrow$ ,  $b$  – стрелка вправо  $\rightarrow$ ,  $c$  – стрелка вниз  $\downarrow$ ,  $d$  – стрелка влево  $\leftarrow$ . Из этих примитивов можно составить различные фигуры, которым соответствуют слова и предложения с использованием алфавита. Слово  $b^m c^n d^m a^n$  означает, что речь идет о прямоугольнике, горизонтальные стороны которого содержат  $m$  одинаковых отрезков, а вертикальные –  $n$  отрезков.

К линейным изображениям можно применить разнообразные процедуры кодирования контуров, в том числе так называемое цепочечное (цепное) кодирование по методу Фримена, когда алфавит образован достаточно большим числом элементов, подобных упомянутому, но направленных под различными углами.

При структурном подходе под распознаванием понимается установление соответствия между предъявляемым объектом (точнее, его описанием) и одним из слов языка, порожденного используемой грамматикой.

*Статистический подход.* Предполагает, что в одной точке пространства признаков с отличной от нуля априорной вероятностью могут появляться реализации, относящиеся к различным классам. Это может быть связано с неизбежными случайными ошибками, присутствующими в детерминированных признаках, а также с использованием признаков, являющихся принципиально случайными величинами, т.е. вероятностных свойств.

Методы статистического распознавания образов наиболее часто применяют в задачах дистанционного зондирования в силу следующих причин:

- вследствие случайного характера протекания природных явлений результаты дистанционного зондирования подвержены случайным изменениям, маскирующим характерные различия между классами. Статистический анализ позволяет учесть эти изменения, потенциально уменьшить их отрицательное влияние на точность классификации;

- исследуемые классы могут перекрываться в пространстве измерений, т.е. некоторые измерения одного класса могут быть неотличимы от измерений других классов. В этих случаях методы статистического распознавания образов позволяют производить наиболее четкую классификацию.

Методы статистического распознавания образов обычно используют функции распределения вероятностей, связанные с классами образов. Однако зачастую эти функции неизвестны и должны оцениваться по множеству обу-

чающих образов. В некоторых случаях форма функции распределения вероятностей считается известной (например, нормальной) и по обучающим образам необходимо оценить только отдельные параметры, связанные с этими функциями (такие как математическое ожидание, дисперсию, функции корреляции). Такой метод называется параметрическим. Если форма функций распределения вероятностей неизвестна заранее, метод является непараметрическим. Параметрические методы обычно легче реализуются, но требуют большего объема априорной информации или фундаментальных предположений относительно природы образов.

Непараметрические методы имеют большие потенциальные возможности для точной оценки функций распределения вероятностей и для точного распознавания, но это преимущество обычно требует сложных распознающих систем, большого числа обучающих образов и, главное, больших временных затрат.

*Нейрокомпьютерный подход.* Служит мощным инструментом для решения задач распознавания изображений. Основной структурной единицей нейрокомпьютера является формальный нейрон, суммирующий входные сигналы с определенными весовыми коэффициентами и выдающий результирующий сигнал на входы других нейронов и на выход нейронной сети. Обучение нейрокомпьютера сводится к подбору весовых коэффициентов для получения требуемого результата. Существует принципиальное отличие нейрокомпьютерного подхода от классических детерминированного и статистического. В данном случае интересна не конкретная конструкция устройства или конкретный алгоритм (они, как правило, остаются неизвестными), а положительный результат распознавания, который достигнут с помощью обучения и перестройки связей нейронов в процессе обучения.

## **2.2. Методология организации и проведения мониторинга с использованием космических летательных аппаратов**

### **2.2.1. Визуальное наблюдение**

Визуальные наблюдения с пилотируемых космических кораблей (КК) производились многими космонавтами.

Космонавты наблюдали и различали с пилотируемых космических кораблей (ПКК) с высот 200 – 300 км объекты весьма незначительной протяженности и небольшого цветового контраста (рис. 2.10). К сожалению, основное внимание в программах наблюдений уделялось обнаружению компонентов культурного ландшафта. Однако ими был сделан ряд наблюдений, свидетельствующих о возможности использования визуальных методов для изучения природных условий. Космонавты наблюдали оттенки цвета морских и океанических вод разного происхождения во фронтальных зонах; контакты синих океанических вод и коричневатых оттенков сточных речных вод в подводных каньонах; глубины морского дна на банках и прибрежных шельфах; цветовые картины и

слои яркости в области горизонта в периоды сумерек или зари; поля с различным состоянием сельскохозяйственных культур и др.



**Рис. 2.10 – Визуальное наблюдение поверхности Земли**

Наблюдения космонавтов свидетельствуют о большом геометрическом разрешении человеческого глаза, которое, как отмечал космонавт Г. Купер, повышается в условиях невесомости. Визуальные наблюдения позволяют также фиксировать весьма тонкие цветовые различия. Возможности визуальных наблюдений с КК определяются рядом технических, физиологических и географических факторов.

Перспективы визуальных наблюдений геосферы с КК свидетельствуют об их весьма важной, хотя и вспомогательной роли в комплексе мониторинга поверхности Земли. Они могут быть подразделены на две части – предусмотренные и не предусмотренные программой.

Предусмотренные программой визуальные наблюдения должны быть использованы:

- для опознавания заранее намеченных объектов фотографирования и спектрометрирования;
- для выбора объектов из ряда аналогичных по наиболее благоприятным условиям фотографирования и спектрометрирования в зависимости от распределения облачности, освещенности, видимости и прозрачности атмосферы во время полета, имея в виду осуществление замены заданных объектов фотографирования и спектрометрирования, закрытых облачностью, аналогичными объектами, где непрозрачный облачный покров отсутствует;

– для проведения экспериментов по фотографированию и спектрометрированию одних и тех же объектов в разных ракурсах – для определения индикатрис отражения, а также при разной высоте Солнца, освещенности и погоде – для определения природных условий съемки и, наконец, на разных пленках, с разными светофильтрами – для выбора оптимального датчика с целью получения изображений;

– для проведения экспериментов по опознаванию геометрических и цветовых тестов для определения разрешающей способности зрения в космическом пространстве в зависимости от различных условий освещения, угла зрения, физиологического состояния.

Разумеется, могут решаться и многие другие задачи. Не предусмотренные программой визуальные наблюдения Земли с КК включают:

– наблюдения (а также фотографическую и спектрометрическую регистрацию) природных объектов и явлений, состав, строение и пространственное распределение которых не могут быть объяснены космонавтом-исследователем, исходя из известных ему научных данных;

– наблюдения (а также фотографическую и спектрометрическую регистрацию) природных и антропогенных процессов и явлений, которые возникли и развились во время полета, или информация о которых не могла быть получена во время подготовки к полету.

Такие не предусмотренные программой наблюдения могут обнаружить ряд явлений кратковременного характера: следы дождей, приливы, обвалы, плотинные озера, лесные пожары, пыльные и песчаные бури, цунами, вулканические извержения, землетрясения, ураганы и др.

### **2.2.2. Методы дистанционного наблюдения за развитием чрезвычайных ситуаций**

Дистанционный контроль окружающей среды представляет собой совокупность методов и средств измерения параметров физического состояния атмосферы, земной поверхности, морей и внутренних водоемов с помощью приборов, расположенных на некотором расстоянии от объекта исследования. Дистанционные исследования проводятся с различных измерительных платформ – искусственных спутников Земли (ИСЗ), летательных аппаратов, судов, а также с поверхности Земли.

Использование в качестве носителя измерительной аппаратуры ИСЗ обеспечивает осуществление глобальных наблюдений, в том числе и над труднодоступными регионами Земли. Для проведения дистанционных наблюдений применяют устройства, регистрирующие излучение системы «Земля – атмосфера» в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 1 м. Этот широкий участок спектра принято подразделять на ряд диапазонов: 0,25...0,4 мкм – УФ; 0,4...0,7 мкм – видимый; 0,7...2,5 мкм – ближний ИК; 2,5...25 мкм – средний ИК; 25...500 мкм – дальний ИК; 500 мкм...1 м – миллиметровый и микроволновый диапазоны. Последний диапазон используют в пассивных сверхвысокочастотных (СВЧ) системах дистанционного контроля, остальные – в пассивных оптикоэлектронных

системах возможно использование следующих основных дистанционных средств для изучения Земли:

- панхроматическая фотография;
- спектральная фотография;
- инфракрасная фотография;
- цветная фотография;
- инфракрасная цветная фотография;
- инфракрасная радиометрия;
- инфракрасные изображения;
- радиолокационная съемка;
- микроволновая радиометрия и съемка.

Различные виды дистанционной индикации (рис. 2.11) имеют свои преимущества и недостатки при измерении физических, химических и биологических характеристик воды, при картировании снежного покрова и оценке подземных вод, при гляциологических и геоморфологических исследованиях, при оценке влагопереносов атмосферы. И хотя «фотографические датчики являются сейчас и останутся в ближайшее время основным средством в получении информации с больших площадей», комплексное использование различных дистанционных средств значительно расширяет круг исследований. Если в классической гидрологии использовались в основном точечные наблюдения за длительные промежутки времени, то современный мониторинг использует комплексную систему, включающую как дискретные наблюдения, так и обзорные съемки обширных районов. Дистанционные средства как раз и обеспечивают получение качественных и количественных характеристик с больших площадей.

Есть и другие примеры оценки применения дистанционных космических датчиков для исследования свойств Земли. Особенно перспективным является микроволновый диапазон спектра ( $\lambda = 0,3 \div 10$  см). Рассматривается принципиальная возможность применения его для определения следующих гидрологических характеристик:

- общего влагосодержания атмосферы;
- осадконесущих облачных систем;
- площадного распространения осадков;
- распределения паводочных вод и характера стока;
- роста и разрушения ледяных полей;
- площадного распределения и изменений снежного покрова;
- влагосодержания почв.

Существует три больших «окна прозрачности атмосферы», перспективных для дистанционного изучения земной поверхности:

- 1) 0,4—1,0 мкм (видимый участок спектра)
- 2) 3,5—4,1; 8,0—9,5; 10,5—12,5 мкм (инфракрасный участок)
- 3) 1—10 см (микроволновый участок).

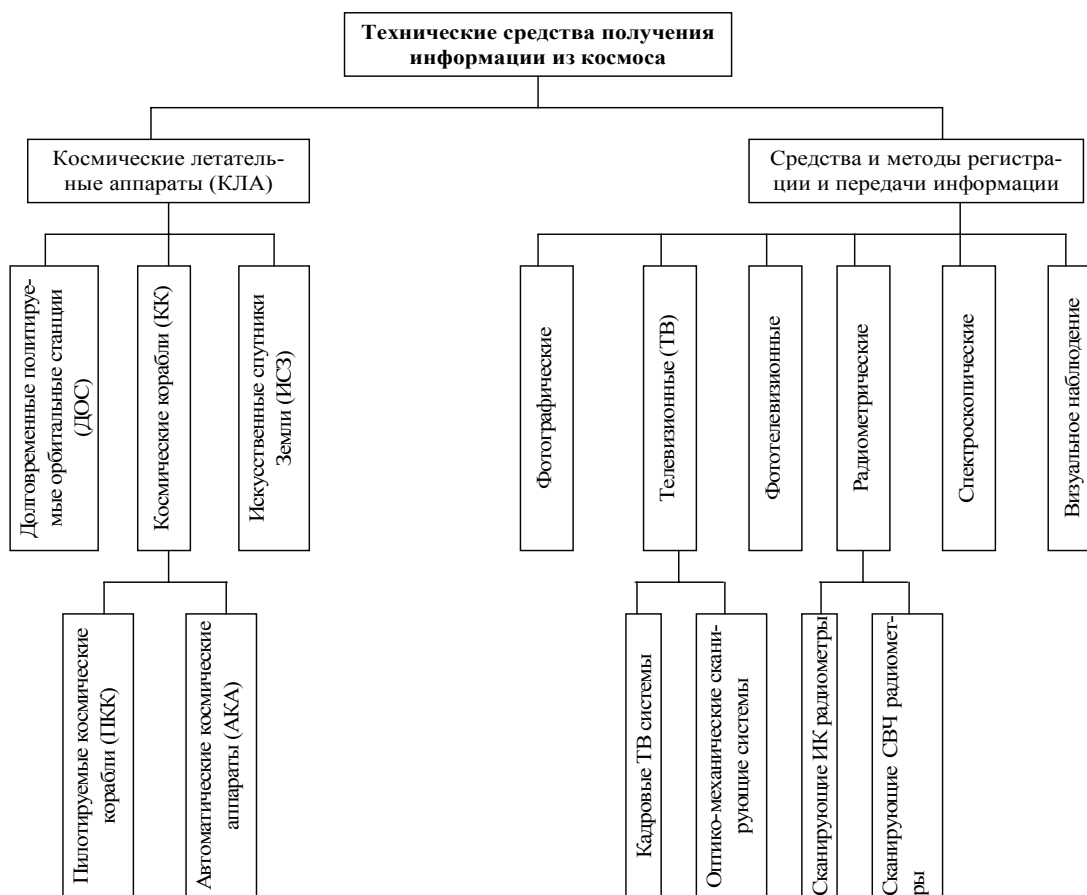


Рис. 2.11 – Классификация методов космического дистанционного зондирования земной поверхности

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов отражения ( $r$ ), поглощения ( $\epsilon$ ) и пропускания ( $t$ ) некоторых видов поверхностей Земли

Вид поверхности	Участки спектра								
	0,4-1,0 мкм			5-4,1; 8,0-9,5; 10,5-12,5;			1-10 см		
	Коэффициенты								
	$\epsilon$	$t$	$r$	$\epsilon$	$t$	$r$	$\epsilon$	$t$	$r$
Морская поверхность	0,9	0	0,1	1	0	0	0,5	0	0,5
Влажная почва	0,8	0	0,2	0,9	0	0,1	0,8	0	0,2
Сухая почва	0,7	0	0,3	0,9	0	0,1	0,9	0	0,1
Снег	0,1	0	0,9	0,9	0	0,1	0,6	0	0,4
Кучевая облачность	0	0,2	0,8	0,9	0,1	0	0,2	0,5	0,3
Слоистая облачность	0	0,4	0,6	0,6	0,4	0	0	1	0

Оптические свойства разных поверхностей различны в каждом «окне прозрачности». Это позволяет использовать для идентификации нужных эле-

ментов поверхности наиболее характерный участок спектра. В таблице 2.2 приведены значения коэффициентов отражения ( $r$ ), поглощения ( $\varepsilon$ ) и пропускания ( $t$ ) некоторых видов поверхностей в рассмотренных «окнах прозрачности атмосферы».

В настоящее время для космических исследований поверхности Земли используются в основном следующие виды информации:

- фотографические изображения (черно-белые, цветные, спектральные);
- телевизионные изображения;
- инфракрасные изображения в ближней зоне (до 1,3 мкм);
- инфракрасные изображения в дальней зоне ( $\lambda = 8 \div 12$  мкм);
- данные радиометрирования (в основном в зоне 8 – 12 мкм) в цифровой форме или в виде изолиний радиационных температур.

Фотосъемка производится обычно с пилотируемых космических носителей. Она обеспечивает хорошее качество материалов, но значительно уступает телекамерам в оперативности и обзорности. Для изучения ЧС особенно важны постоянство наблюдения за земной поверхностью, многократность последовательных съемок, быстрота получения информации, обеспечиваемые автоматическими спутниковыми системами. Поэтому наибольшее внимание исследователей привлекают телевизионные и инфракрасные изображения, передаваемые со спутников. По масштабам в зависимости от обеспечиваемого обзора и уровня генерализации все изображения подразделены на четыре вида: глобальные, региональные, локальные и детальные. Диапазон используемых масштабов изображений от 1:1000000 до 1:60000000.

Важной характеристикой, в большой степени определяющей объем получаемой по снимкам полезной информации, является разрешающая способность изображений, т. е. способность отдельно передавать детали изображения. Космические снимки принято характеризовать величиной, обратной разрешающей способности, – наземным разрешением или разрешением на местности. Современные съемочные системы позволяют получить космические изображения умеренно контрастных деталей с наземным разрешением 30 м, а сильно контрастных – до 10 м. Разрешение телевизионных изображений с метеорологических ИСЗ значительно ниже: 1 – 3 км, а инфракрасных изображений – до 8 – 15 км.

Фотографирование и телевизионная съемка. Как отмечалось выше, наибольший объем информации среди всех видов регистрации электромагнитного поля геосферы для изучения природных ресурсов с целью прогноза ЧС дает фотографирование в видимой и ближней инфракрасной областях спектра в диапазоне длин волн от 0,3 мкм до 1,1 (1,5) мкм. Все изображения Земли по способу их получения и анализа можно разделить на: 1) оригинальные фотографии, полученные с КК или автоматических космических аппаратов и доставленные на Землю; 2) телевизионные изображения, переданные с ИСЗ и принятые на Земле по телевизионным телеметрическим каналам. Определенный интерес представляет получение фотографий и телевизионных изображений

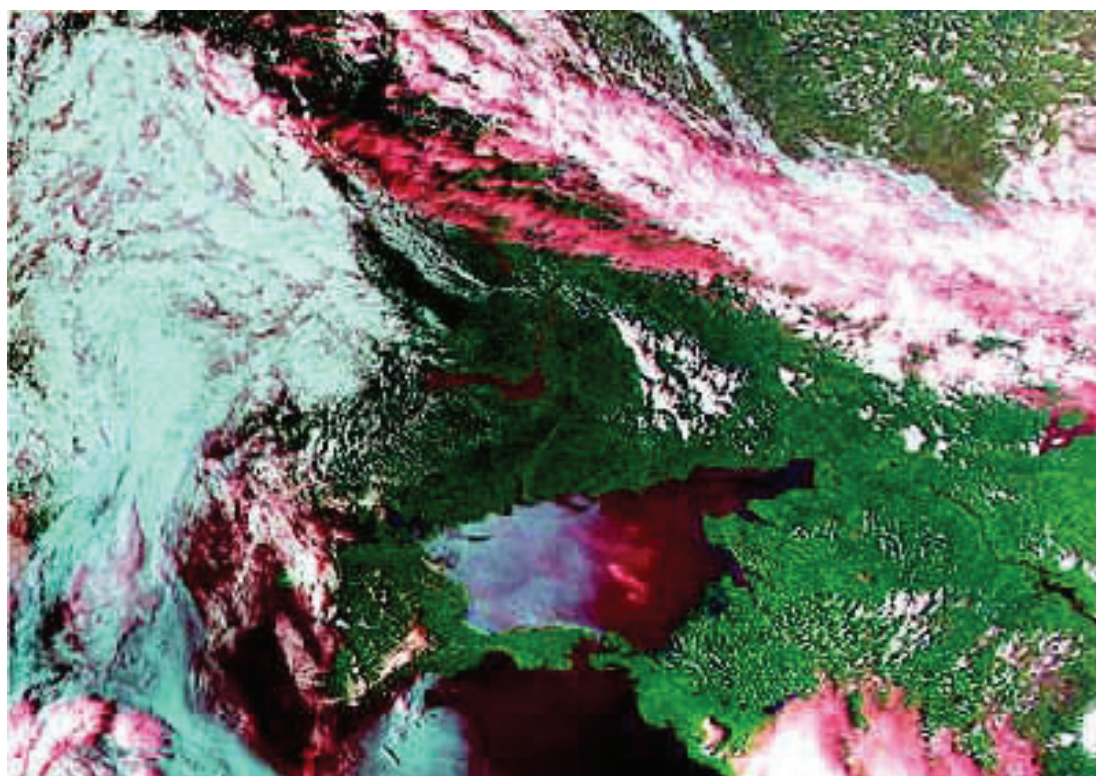


Земли с такой платформы, как Луна, о чем свидетельствует опыт функционирования КК «Аполлон-11» и «Аполлон-12».

Указанные способы получения изображений имеют некоторые специфические преимущества: первый – в высокой разрешающей способности фотографий, второй – в большей регулярности получения последовательных изображений поверхности Земли, и в этом плане дополняют друг друга.

Направления научной разработки и практического применения данных спутниковой фотографии и телевизионной съемки разнообразны и обширны. Обсудим здесь лишь основные черты их применения для изучения отдельных компонентов геосферы с целью мониторинга ЧС.

Наиболее развитой областью применения спутникового телевидения и фотографирования является метеорология и физика атмосферы (рис. 2.12). Телевизионные съемки облачного покрова Земли с метеорологических спутников обеспечивают получение глобальной информации для метеорологических целей. Такие съемки дают чрезвычайно много для мониторинга ЧС. Развитие исследований в этой области сейчас достигло такого уровня, что встал вопрос об автоматизации обработки и анализа всей получаемой телевизионной информации.



**Рис. 2.12 – Фотоснимок Земли с ИСЗ**

В области океанологии интерпретация космических фотографий с КК и телевизионных изображений с ИСЗ также дает заметные результаты. Серьезные успехи достигнуты в изучении распределения и динамики ледового покрова, морских течений, состояния поверхности океана. Ряд исследований привел к интересным результатам. К этому кругу проблем относятся: изучение рельефа дна



в пределах прибрежных шлейфов и банок; получение данных о течениях и температуре воды, флюоресценции и др.

В области гидрологии суши наибольшие успехи достигнуты в изучении распространения воды в твердой фазе. Несколько новых структур ледяных щитов, горных ледников и тепловых аномалий было изучено по космическим изображениям Антарктиды, Гренландии, Центральной Азии. Получена последовательная объективная картина схода и становления снежного покрова на равнинах и в горах, что особенно ценно для мест, не обеспеченных достаточной сетью снегомерных станций.

Отдельные опыты геологической интерпретации, в особенности оригинальных космических фотографий, полученных с КК, были также весьма успешны, как и разработки в области гидрометеорологических и океанологических исследований. Интерпретация горных пород и тектонической структуры производится с детальностью геологических карт масштаба 1:1 000 000, причем получены новые данные о геологическом строении ряда слабоизученных районов. Выяснилось, что космические фотографии содержат больше информации, чем геологические карты того же масштаба. Успешные региональные опыты по геологическому анализу проведены в Западной Сахаре, Пакистане и Южной Аравии.

Геоморфологическая интерпретация является одним из наиболее перспективных направлений использования космических фотографий для изучения земной поверхности. По космическим фотографиям изучаются и прослеживаются формы макро- и мезорельефа, которые в наземных условиях проследить не удастся, например, продольные дюны в Южной Аравии, подводный рельеф и др. Стереофотограмметрическая обработка космических фотографий и телевизионных изображений Земли позволяет уточнить топографические карты слабоизученных районов Антарктиды.

Вопросы изучения почв, растительности и сельскохозяйственных угодий остаются наименее разработанными и слабо отраженными в исследовательских программах, хотя очевидно, что ввиду существенно выраженной физиономичности возможности их изучения по космическим фотографиям бесспорны.

В почвоведении имеются всего лишь единичные примеры использования космической фотографии. Космические фотографии могут быть применены для учета влагозапасов в равнинных областях степной и полупустынной зоны после недавно прошедших дождей. Малое количество работ свидетельствует лишь о недостатке научных и программных разработок в этом направлении. При геоботанических исследованиях космические фотографии и телевизионные изображения позволяют изучать макро- и мегакомбинации растительности, распространение лесов, осуществлять инспектирование состояния лесов, обнаруживать лесные пожары, прослеживать фенологию растительности.

Наиболее перспективным является комплексная ландшафтная интерпретация космических изображений, основанная на одновременном анализе территориальных единиц разного порядка (зоны, области, ландшафты, местности, урочища) и совмещенном распознавании отдельных компонентов геосферы (атмосферы, литосферы, гидросферы, биосферы и культурного ландшафта), которые интегрируются в определенные системы (зоны, районы, ландшафты).

В отличие от отраслевого использования информации с ИСЗ (метеорологических, океанологических, геологических и пр.) в настоящее время развивается идея комплексного подхода для разностороннего изучения состояния земной поверхности. Такой подход позволил бы, с одной стороны, более полно использовать дорогостоящую спутниковую информацию для различных отраслей науки и народного хозяйства, что резко повысило бы их эффективность, а с другой стороны, – интегрировать полученную информацию для мониторинга и оценки чрезвычайных ситуаций.

Спектрометрическая индикация. На основе использования спектральных различий в отражении радиации различными природными образованиями в видимом участке спектра, ближней и дальней инфракрасной областях спектра, спектральных особенностей собственного теплового излучения естественных поверхностей в настоящее время разрабатываются косвенные методы, которые позволяют решать следующую обратную задачу: по сигналам, принятым регистрирующими приемниками, установленными на различного рода носителях, идентифицировать природные образования, удаленные от приемника на сотни километров.

Космическая спектрометрия основана на регистрации спектров отражения солнечного света, а также собственного излучения земной поверхности и атмосферы на участке спектра от  $\lambda = 300$  нм до микроволнового диапазона. Преимущество спектральной съемки состоит в том, что при наличии соответствующих приемников и диспергирующих систем можно получать избирательные оптические характеристики в узких зонах спектра и при необходимости коррелировать отдельные узкополосные спектральные измерения.

Таким образом, избирательность спектрометрической регистрации позволит получить новые виды информации о земной поверхности, которые не могут быть получены методами обычной фотографии. Важное преимущество такого рода данных состоит в возможности осуществлять замкнутый цикл их автоматической обработки и анализа при помощи ЭВМ.

По характеру получаемой информации и особенностям методики измерений космическую спектрометрию следует дифференцировать соответственно следующим трем областям спектра: 1) видимая и близкая инфракрасная (300 – 1100 нм), 2) инфракрасная или тепловая (3,0 – 300 мкм) и 3) микроволновая (миллиметровое, сантиметровое и дециметровое излучения). В настоящее время актуальным стало направления применения спектрометрических измерений земной поверхности со спутников для мониторинга ЧС.

Так, например, систематическая регистрация спектров отражения природных образований, которая осуществлялась с КК, позволила получить спектры теплового излучения Земли. Опыт использования результатов спутниковых измерений, наземных и воздушных спектрометрических исследований позволяет определить перспективы спектральной съемки Земли со спутников и наметить пути применения этих данных. В зависимости от конкретных задач выявления той или иной группы природных объектов особенности методики съемки будут различны. Рассмотрим их соответственно упомянутой выше дифференциации.

Первые космические спектральные измерения отражения от природных образований произведены с ПКК «Союз-7». Были изучены спектры облачного покрова и подстилающих поверхностей пустынного типа. Однако эти данные немногочисленны и всего лишь иллюстрируют возможности решения некоторых задач космической спектрометрической индикации. Для решения задач космической спектрометрии большое значение имеют совмещенные эксперименты – с одновременными наземными, самолетными и спутниковыми наблюдениями. Первый опыт такого совмещенного эксперимента осуществлен во время группового полета космических кораблей «Союз-6», «Союз-7» и «Союз-8».

Лабораторные, наземные и самолетные измерения альbedo и коэффициентов спектральной яркости природных образований сравнительно многочисленны. Такие работы велись, в частности, с целью определения теоретических возможностей космической спектрометрии земной поверхности, а также с целью определения требований к конструированию спектрометрической аппаратуры, устанавливаемой на ИСЗ. Следует заметить в этой связи, что инфракрасная аппаратура, использовавшаяся, например, на метеорологических ИСЗ, имеет слишком низкое геометрическое и спектральное разрешение, чтобы дать материал, пригодный для локального анализа.

Исследования по изучению коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) и альbedo природных поверхностей проводятся в течение многих лет. Эти исследования обнаружили большую сложность и многовариантность оптических характеристик природных объектов. Оказалось возможным разделить все природные образования на четыре класса: 1) почвы и горные породы, 2) растительность, 3) снежные и ледяные поверхности и 4) водные поверхности. В дополнение к этим классам, позднее был выделен класс облачных образований. Более детальные спектрометрические исследования указывают на существование весьма тонких специфических зависимостей между спектральными коэффициентами яркости и альbedo, с одной стороны, и составом природных объектов – с другой.

На рис. 2.13 представлены спектральные кривые альbedo, характерные для упомянутых классов. Величины альbedo облачности приведены по расчетным данным, относящимся к слоистым водяным облакам (оптическая толщина облаков  $\tau_0 = 30$ , высота Солнца  $h_\odot = 60^\circ$ ). Значения альbedo, указанные для длин волн 0,55 и 0,70 мкм, являются средними для слоистых и слоисто-кучевых облаков при  $h_\odot = 60^\circ$ . Следует отметить, что по расчетным данным альbedo облаков в видимой области спектра не зависит от длины волны. Из рис. 2.13 отчетливо видна характеристичность спектральной отражательной способности различных природных образований.

Располагая спектральными характеристиками альbedo различных поверхностей, можно предпринять попытку решения обратной задачи, т. е. идентификации поверхности по данным о спектральной отражательной способности. Естественно, что спектр в целом является наиболее информативным. Однако можно попытаться найти более простое решение задачи, рассматривая отношение альbedo для двух длин волн.

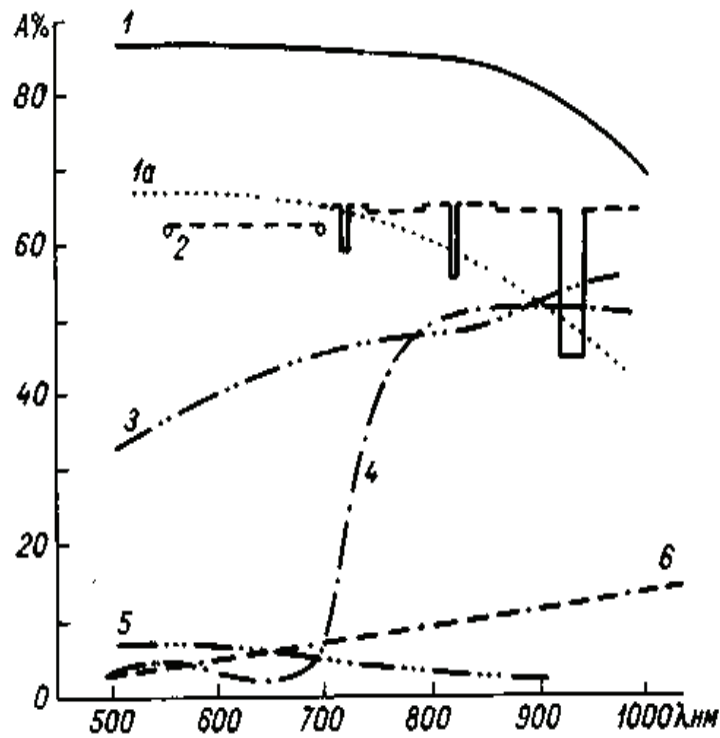


Рис. 2.13 – Спектральное альbedo естественных подстилающих поверхностей и облаков (1 – снежная поверхность (снег свежесвыпавший), высота Солнца  $h_{\odot} = 30^{\circ}$ ; 1a – снежная поверхность (снег мокрый),  $h_{\odot} = 30^{\circ}$ ; 2 – облака (слоистые),  $h_{\odot} = 60^{\circ}$ , оптическая толщина облаков  $\tau_0 = 30$ ; 3 – песок (белый),  $h_{\odot} = 47^{\circ}$ ; 4 – люцерна (сомкнутый травостой),  $h_{\odot} = 52^{\circ}$ ; 5 – водная поверхность (озеро глубиной 70 см),  $h_{\odot} = 58^{\circ}$ ; 6 – чернозем,  $h_{\odot} = 48^{\circ}$ )

С точки зрения интерпретации данных спутниковых измерений можно искать решение поставленной задачи, исследуя, например, альbedo ( $A$ ) для двух участков спектра 0,65 и 0,85 мкм и определяя отношение,

$$K = A_{85} / A_{65} . \quad (2.16)$$

Выбор указанных участков спектра обусловлен, с одной стороны, высокой прозрачностью атмосферы для соответствующих длин волн, с другой – наиболее высокой «чувствительностью» коэффициента ( $K$ ) к типу природного образования. Использование данных наземных наблюдений, а также расчетных величин альbedo облаков приводит к следующим значениям ( $K$ ): 4 – 15 (покрытые растительностью поверхности), 1,2 – 3,0 (почвы), 0,75 – 1,0 (снежная поверхность), 0,9 – 1,0 (водная поверхность и водяные облака).

Аналогичный коэффициент для длин волн 1,6 и 0,7 мкм ( $K = A_{1,6} / A_{0,7}$ ) составляет в среднем следующие величины: 5 (снег); 1,4 (песок); 0,85 (водные облака); 0,25 (свежий снег).

Очевидно, что одно только отношение альbedo для двух длин волн не является однозначной характеристикой типа природного образования; это означает, что нужно искать более полные, комплексные показатели (ясно, например,

что использование в качестве дополнительной характеристики абсолютного значения альбедо в видимой области спектра уже внесет большую определенность). Лишь зеленый растительный покров четко выделяется высоким значением коэффициента ( $K$ ), что обусловлено резким увеличением отражательной способности в близкой инфракрасной области спектра. На рис. 2.14 представлено спектральное распределение относительной яркости пшеницы и овса в видимой и близкой инфракрасной областях спектра (вертикальные размеры кружков и прямоугольников характеризуют диапазон изменения яркости). Этот пример наглядно демонстрирует преимущества идентификации растительного покрова по спектрам отражения, которые дают возможность осуществлять эту идентификацию достаточно однозначно благодаря обилию информации.

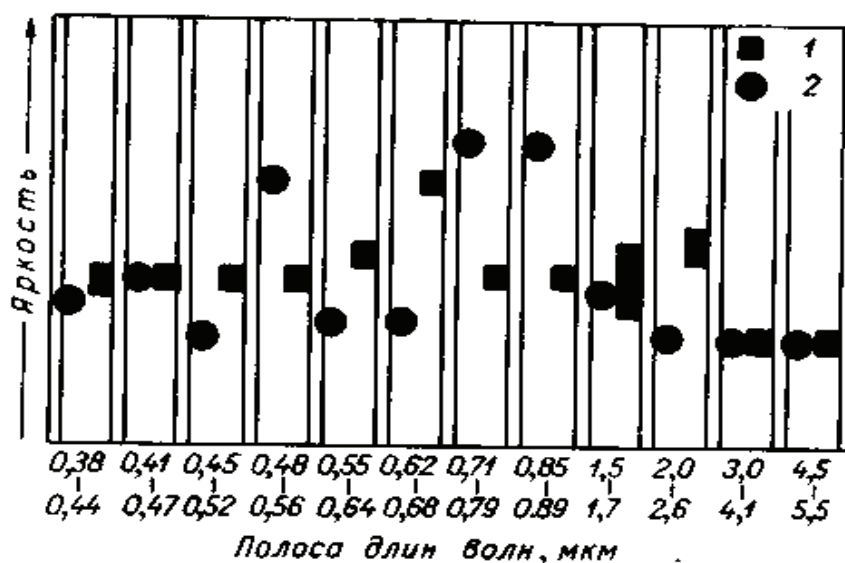


Рис. 2.14 – Спектральное распределение относительной яркости пшеницы (1) и овса (2) в видимой и близкой инфракрасной областях спектра

Горные породы при аэроспектрометрической съемке в видимой области спектра дифференцируются главным образом в зависимости от их минералогического состава. Анализ коэффициентов спектральной яркости в видимой области спектра может быть настолько дифференцированным, что позволит, например, различать не только пески разного происхождения (аллювиальные и элювиальные, копетдагские и памиро-алайские и т. п.), а и осуществлять мониторинг ЧС экологического и геологического характера, связанных с изменением состояния суши.

Почвы по спектральным коэффициентам яркости дифференцируются главным образом по их физическим свойствам: степени увлажнения, содержанию гумуса, механическому и минералогическому составу. Это позволяет идентифицировать ЧС связанные с наличием тяжелых металлов в почве, деградацией почв из-за эрозии и засоления и т. д.

Следует подчеркнуть, что успешному решению задач спектрометрической дистанционной индикации препятствует фрагментарность данных о коэффициентах спектральной яркости природных образований.

Большое значение имеет также разработка методов объективной идентификации природных образований по их спектрам. Весьма перспективным является использование для этой цели методов опознавания образов.

В настоящее время следует считать наиболее актуальной разработку методик интерпретации данных о природной среде, получаемых при помощи спутников, путем оптимального сочетания средств автоматической (машинной) обработки и ручного анализа.

Данная методика опознавания и классификации геометрических форм была успешно испытана на примерах, относящихся к изображениям поверхности Луны и облачного покрова Земли. При этом большое значение может иметь во всех случаях использование не только данных о спектрах, но и временной изменчивости различных параметров (например, спектральной яркости природных образований).

Известно, что спектры в диапазоне длин волн 3,0 – 30 мкм (космическая спектрометрическая (тепловая) индикация) отражения и собственного теплового излучения являются специфичными для различных природных поверхностей (в частности, они зависят от состава последних). В особенности это относится к спектрам излучения. Высокочувствительные приемники теплового излучения дают возможности анализа геофизические опасные явления. На рис. 2.15 представлены в качестве иллюстрации спектры теплового излучения полированных образцов различных минералов и горных пород в направлении нормали к поверхности: кварцита, полевого шпата, дунита и кальцита (заштрихованные области соответствуют диапазонам поглощения радиации атмосферой).

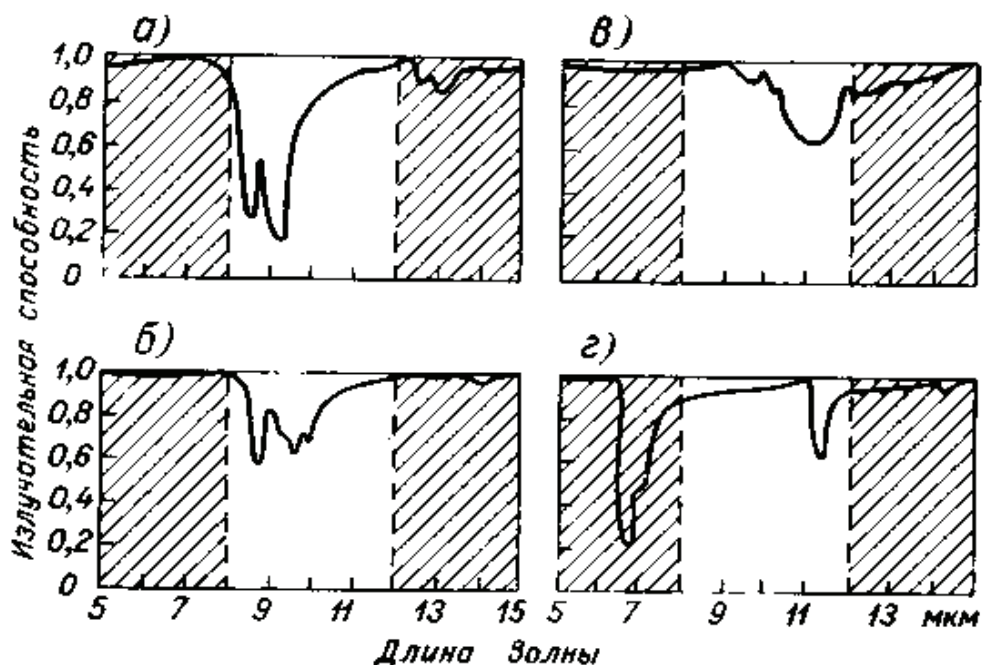


Рис. 2.15 – Относительная излучающая способность полированных образцов в направлении нормали к поверхности: а – кварц, б – полевого шпат, в – дунит, г – кальцит

Как видно, кривые спектрального распределения интенсивности излучения различаются очень заметно. Для кварцита характерно наличие минимумов ин-

тенсивности излучения при длинах волн 8,4 и 9,2 мкм, для полевого шпата – при длинах волн 8,6; 9,5 и около 10 мкм, а для дунита и кальцита – при 11,2 и 11,4 мкм. Очень характерный минимум излучения кальцита около  $\lambda = 6,7$  мкм оказывается в зоне полного поглощения радиации атмосферой. Следует, впрочем, подчеркнуть, что даже в окне прозрачности атмосферы 8 – 12 мкм, которое схематически изображено на рис. 2.15 как свободное от поглощения, существует заметное селективное поглощение, особенно в области полосы озона 9,6 мкм.

Естественно, что спектральные особенности теплового излучения существенно зависят от структуры (шероховатости) поверхности. Если, например, образец находится в мелко раздробленном состоянии, то его спектр соответствует излучению серого тела, т. е. теряет характерные особенности.

На рис. 2.16 изображены спектры излучения кварца в зависимости от состояния его поверхности и степени раздробленности. Эти данные показывают, как сильно по мере размельчения образца стираются индивидуальные черты спектра (лишь слабо заметный минимум около  $\lambda = 9,35$  мкм сохраняется при очень мелком раздроблении).

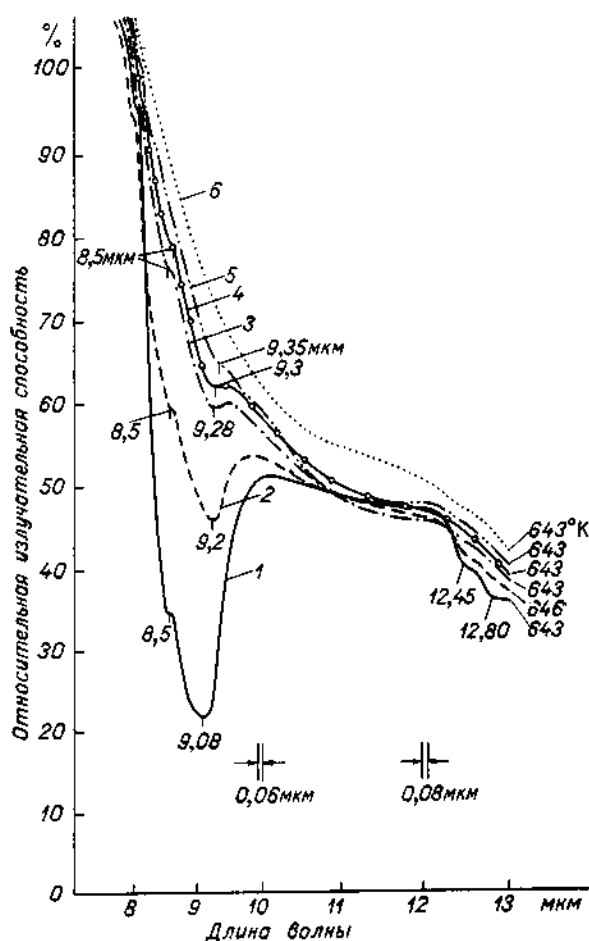


Рис. 2.16 – Относительная излучающая способность кварца в зависимости от состояния поверхности и степени размельчения: 1 – полированная поверхность, 2 – шероховатая поверхность, 3 – частицы размером 25 – 40 мкм, 4 – частицы размером 10 – 25 мкм, 5 – частицы размером 1—10 мкм, 6 – абсолютно черное излучение при температуре воздуха. Излучающая поверхность находилась при температуре  $643 \pm 3^{\circ} \text{K}$

Обнаружено, например, что идентификация графита и дунита по спектрам излучения возможна лишь в том случае, если размер частиц больше 100 мкм. Примерно такой же критерий применим и для многих других пород и минералов.

Перспективным направлением тепловой индикации является изучение вулканических образований тектонически-активных областей и термальных зон. Как показали съемки в диапазонах 3,5 – 5,5 и 8 – 15 мкм, подобные явления регистрируются при аэросъемке в ночное время со значительных высот.

При гидрологических и океанологических исследованиях тепловая индикация может быть использована для характеристики поверхностных вод различной температуры, мутности, загрязненности, а также фитопланктона и прибрежно-водной растительности. Могут быть использованы ИК снимки в этой зоне спектра для ледовой разведки, изучения морских течений и границ водных масс разного теплового режима.

При изучении растительного покрова диапазон тепловых длин волн (8 – 15 мкм) может быть использован в первую очередь для обнаружения лесных пожаров и определения их границ, когда дым мешает проведению обычной аэрофотосъемки. Как показали более детальные исследования, многие типы растительности существенно различаются по спектрам в диапазонах волн 3,5 – 5,5 и 8 – 18 мкм.

*Космическая микроволновая и радарная индикация.* Применение космической микроволновой и радарной съемки находится в стадии отработки методик. Для большинства задач опознавания нет принципиальных ограничений, если микроволновая и радиолокационная аппаратура будет использована на ИСЗ, хотя, конечно, потребуются преодолеть ряд технических трудностей, связанных с условиями работы в космосе, необходимостью создания высокочувствительной аппаратуры, обеспечения надежности и достаточной продолжительности работы и др. Перспективы использования диапазона длин волн от 1 мм до 30 см определяются тем, что в данном случае возможно получение информации в любое время суток и почти независимо от погодных условий. Естественно, следует различать методы пассивной и активной радиолокации в указанном диапазоне длин волн.

Радиотеплолокационная съемка регистрирует радиояркие температуры и контрасты радиоярких температур, что позволяет оценить энергетические контрасты различных компонентов геосферы путем дистанционной индикации.

При изучении атмосферы этот диапазон может быть использован для определения общего содержания водяного пара в атмосфере и вертикального распределения температуры. При этом точность спутниковых измерений общего влагосодержания может достигать 8 %, а влагосодержания облаков – 15%.

В океанологии и гидрографии микроволновый диапазон может быть использован для обнаружения айсбергов и оценки ледовитости, поскольку отражение в этой зоне спектра у воды больше, чем у льда. Перспективным является также использование радиотеплолокации для измерения влагосодержания снега и обнаружения зон осадков в пределах облачных полей.



Космическая активная радиолокация перспективна для решения ряда опознавательных задач, например, для изучения облаков и осадков. Анализ основного радиолокационного уравнения показывает, что потребные значения излучаемой мощности и чувствительности приемника в настоящее время достаточны, чтобы обеспечить энергетическое разрешение, необходимое для обнаружения локальных неоднородностей на поверхности Земли. Для обнаружения разных объектов предлагаются различные диапазоны длин волн.

Для обнаружения облаков и осадков со спутников с вероятностью не ниже 0,9 рекомендуется оптимальный диапазон длин волн 2 – 3 см. Радиолокационные методы могут быть использованы также для определения параметров волнения поверхности морей. Принцип изучения волнения основан на измерении когерентной и некогерентной составляющих отражения радиосигнала от поверхности моря. Этот метод позволяет при аэро радиолокации на длинах волн около 3 см определять балльность волнения, получать сведения об эффективной крутизне волн и существовании на морской поверхности мелких неоднородностей, отличать ветровые волны от зыби и т. п.

Для радиолокационной индикации твердых наземных образований оптимальный диапазон находится в пределах длин волн 3 – 70 см. Применение радиолокации требует использования многочастотных и многополяризационных систем для увеличения количества и повышения надежности информации. Это приведет в свою очередь к сложной статистической обработке сигналов для получения информации с необходимой вероятностью.

При изучении морского ледового покрова радиоволновая индикация может обеспечить прослеживание кромки льдов, обнаружение айсбергов, полыней и разводьев, а возможно и торосистости льдов и трещин в многолетнем льде, скрытых под снегом.

При изучении и прослеживании гидрографической сети на суше удастся обнаружить речные системы первого и второго порядка, а в ряде случаев и третьего. При установлении корреляционных связей с топографическими параметрами станет возможным определение площади водосбора, периметра бассейна, протяженности притоков, крутизны склонов долин.

При геологических исследованиях радиолокационная съемка позволяет выявить черты геологического строения и состава коренных пород, не фиксируемых на обычных аэрофотоснимках. Перспективность радарной съемки определяется значительной глубиной проникновения радиоизлучения (до 3 – 4 м) и тем, что растительность, снеговой покров и облачность почти не влияют на распознавание коренных пород.

При изучении растительности и сельскохозяйственных угодий с помощью радиолокационной индикации определяются границы полей и лесов, площади и даже виды посевов и угодий (леса, луга, кустарники, болота).

### **2.2.3. Средства дистанционного контроля**

Системы дистанционного контроля делятся на две обширные группы – системы получения спектральных данных и системы, формирующие изображе-

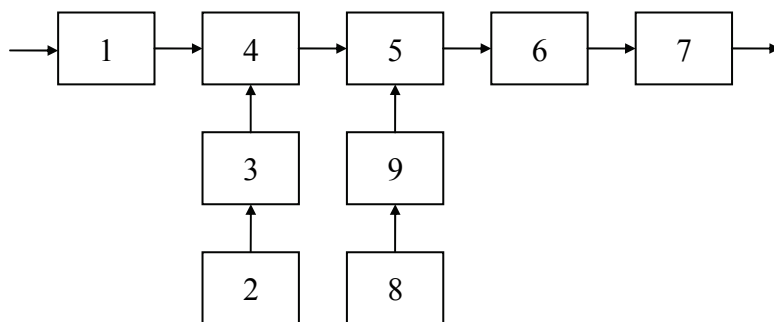
ние. Системы получения спектральных данных не формируют изображения, а дают детальную спектральную информацию об объекте. Системы, формирующие изображение, дают информацию о пространственной структуре объекта и некоторую спектральную информацию.

Системы спектральных данных получают информацию путем спектрального сканирования (в отличие от пространственного сканирования в формирующих изображение системах). Системы, формирующие изображение, бывают двух типов: кадровые и сканирующие. В кадровых системах элементы изображения, или пиксели (pixels), получаются одновременно в основной единице изображения – кадре. В сканирующих системах элементы изображения получаются последовательно и после получения могут быть переведены в формат кадра. Оба типа таких систем дают спектральную информацию, создавая многоспектральные элементы изображения, состоящие из набора измерений в выбранных диапазонах длин волн спектра.

К числу часто встречающихся особенностей спектральных измерений для задачи исследования природных ресурсов с борта КЛА и вытекающих из них требований к аппаратуре для этих измерений относятся:

- необходимость практически одновременного получения информации о спектре излучения исследуемого объекта в нескольких спектральных диапазонах с высоким спектральным разрешением;
- измерение спектральной интенсивности излучения в средней и длинноволновой частях ИК-области спектра, где абсолютные величины сигналов очень малы;
- жесткие эксплуатационные требования – стабильность и жесткость конструкции, уменьшение габаритов, массы и потребляемой мощности, особенности установки прибора на борту КЛА и др.

Структурная схема типового бортового автоматического спектрорадиометра приведена на рис. 2.17.



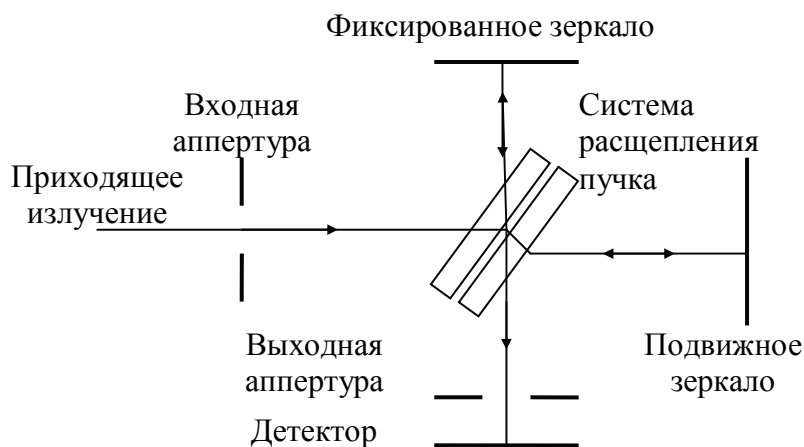
**Рис. 2.17 – Структурная схема бортового автоматического спектрорадиометра**

Поток излучения (например, от исследуемой земной или морской подстилающей поверхности) проходит через оптическую систему 1 измерительного канала и поступает на модулятор 4. Поток от опорного излучателя 2 проходит через оптическую систему 3 опорного канала и поступает также на модулятор

4. Выходящий из модулятора 4 промодулированный поток попадает на входную щель монохроматора 5, расположенную в фокальной плоскости оптических систем 1 и 3. Монохроматор разлагает поступающий на него поток в спектр. С помощью программного устройства 8 и привода 9 осуществляется сканирование этого спектра. Проходящее через выходную щель монохроматора излучение попадает на чувствительную площадку приемника излучения 6. Затем электрический сигнал поступает на вход электронного канала 7, где происходит его усиление, предварительная и тематическая обработка.

В настоящее время разработано большое число бортовых спектральных приборов, в которых разложение в спектр регистрируемого полихроматического потока излучения может осуществляться интерферометром, диспергирующей призмой, дифракционной решеткой или набором переключающихся узкополосных интерференционных фильтров. Рассмотрим их подробнее.

На рис. 2.18 схематически изображен ход лучей в интерферометре и его диспергирующие элементы. Детектор установлен таким образом, чтобы регистрировать световое поле в точке расщепления пучка, в которой сходятся два отраженных луча. Два луча интерферируют друг с другом, либо усиливаясь, либо ослабляясь в зависимости от длины хода каждого из них по мере прохождения им соответствующего оптического пути. Расщепитель пучка устроен таким образом, что длины оптических путей обоих лучей примерно одинаковы и отличаются только на часть длины волны. Детектор устроен так, что он нацелен только на центральное пятно интерференционного кольца Ньютона.



**Рис. 2.18 – Ход лучей в интерферометре**

Прибор не дает изображения в его поле зрения, а просто наблюдает интерференционную картину, возникающую вследствие регистрации приходящего на приемник излучения.

Предположим, что на прибор падает пучок монохроматического света. Так как положение подвижного зеркала меняется, пятно, то яркое, то темное, появляется в точке схождения лучей расщепителя пучка и, следовательно, наблюдается детектором. Это происходит из-за того, что поочередно на расщепителе пучка возникает то ослабляющаяся, то усиливающаяся интерференция, ко-

гда длина пути, связанная с подвижным зеркалом, изменяется относительно длины пути, связанной с фиксированным зеркалом. Если движение подвижного зеркала сделать линейным во времени, то детектор будет экспонировать поочередно темнеющую и светлеющую интерференционную картину, так что электрический сигнал на выходе детектора будет меняться по времени с частотой, зависящей от скорости движения зеркала и длины волны проходящего пучка света. Если будет изменяться длина волны проходящего монохроматического пучка, то будет изменяться и число пересекаемых подвижным зеркалом на данном расстоянии (или за данное время) длин волн; поэтому будет меняться и число изменений интенсивности интерференционной картины для данного механического движения зеркала. Если на прибор падает полихроматический (т.е. состоящий из нескольких световых длин волн) пучок света, то каждая частотная составляющая выходящего из детектора сигнала будет связана с компонентой длины волны проходящего пучка излучения. Таким образом, если выполнить частотный анализ выходного сигнала, то можно восстановить волновую структуру проходящего пучка излучения. При выполнении такого анализа можно использовать численное преобразование Фурье. Кроме того, средняя яркость интерференционной картины прямо пропорциональна интенсивности излучения.

Интерферометры используют в прикладных задачах, требующих измерения спектра с очень высоким разрешением. Интерференционный Фурье-спектрометр является лучшим прибором для получения спектра теплового излучения подстилающей поверхности в широком спектральном диапазоне. При этом обеспечивается погрешность измерения яркости порядка 1% и спектральный предел разрешения 0,05...0,01 мкм на длине волны 10 мкм. Однако интерференционный Фурье-спектрометр конструктивно и технологически сложен и требует точной стабилизации температуры основных элементов его конструкции. В качестве примера на рис. 2.19 приведена принципиальная оптическая схема американского Фурье-спектрометра IRIS.

Вход оптической системы образуется входной апертурной диафрагмой 15, перед которой расположено сканирующее зеркало 16. Это плоское зеркало можно направлять на Землю, в космос или на встроенный в прибор излучатель для калибровки прибора в процессе работы.

Входным зрачком оптической системы служит неподвижное зеркало 10 интерферометра Майкельсона. Пучки лучей от объекта, направленные сканирующим зеркалом через апертурную диафрагму 15, разделяются светоделителем 9 на два потока, которые после отражения от зеркал, неподвижного 10 и подвижного 8, фокусируются объективом 13 на приемнике излучения 12.

Угловое поле IRIS равно  $8 \times 8^\circ$ , поэтому при протяженных объектах излучения объектив радиометра не дал бы выигрыша в освещенности входного зрачка прибора. Отсутствие объектива несколько ухудшает качество изображения за счет некоторой непараллельности пучков, падающих на светоделитель.

Для облегчения юстировки оптической системы путем визуального наблюдения интерференционных колец в монохроматическом свете и повышения точности стабилизации скорости движения подвижного зеркала 8 (приводимого

в движение устройством 7) в приборе IRIS введен референтный канал, который состоит из неоновой лампы 14, конденсора 6, плоского зеркала 11, центральной части светоделителя 9, зеркал интерферометра 8 и 10, зеркала 2, системы фильтров 1 и 3, объектива 4 и приемника излучения 5.

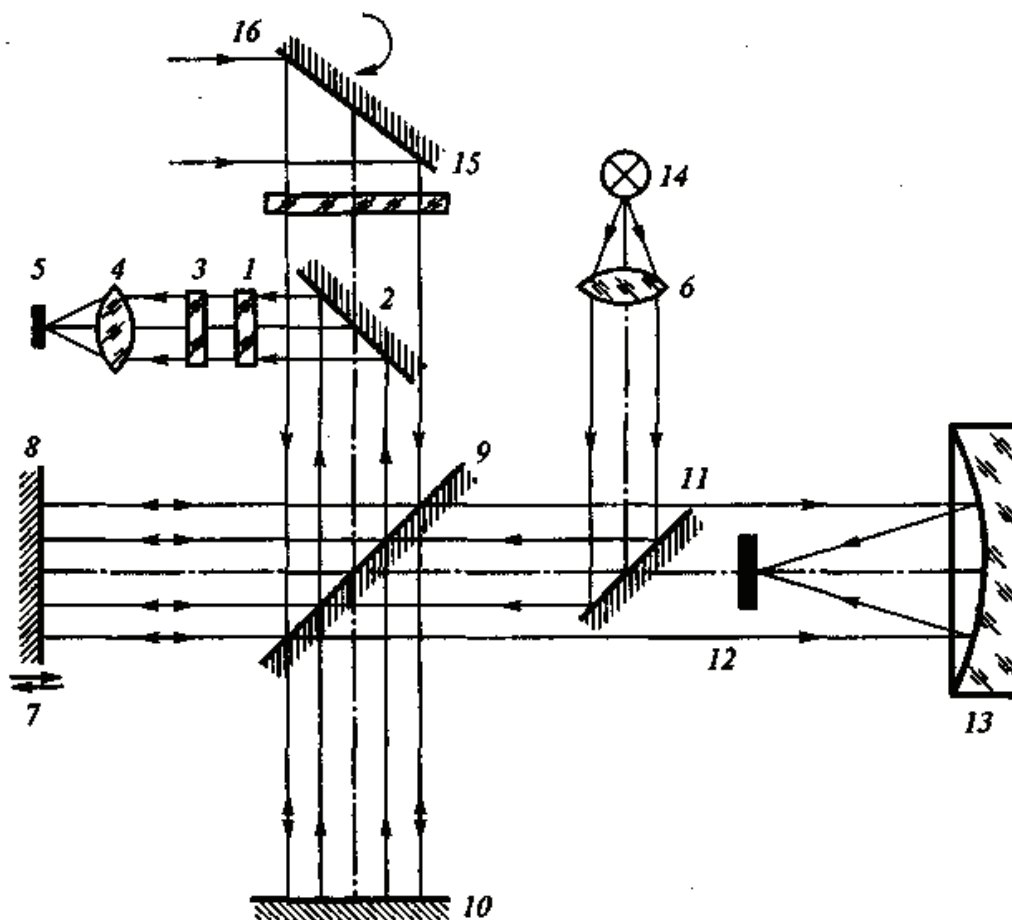


Рис. 2.19. – Оптическая схема Фурье-спектрорадиометра ERIS

Одним из типов спектральных приборов, наиболее часто используемых в дистанционных исследованиях, являются приборы с дифракционными решетками. На рис. 2.20 приведена схема прибора с дифракционной решеткой. В приборе обычно применяется отражательная дифракционная решетка. Приходящее излучение попадает на дифракционную решетку и отражается, разделяясь на различные спектральные составляющие. Особенностью прибора с дифракционной решеткой служит то, что в заданном направлении отражаются несколько порядков спектра (к одному и тому же порядку относятся кратные частоты излучения). Поэтому необходимо провести сортировку порядков (т.е. выделение нужных спектральных составляющих), используя срезающие фильтры перед детектором.

Приборы с дифракционной решеткой имеют высокое пространственное разрешение, так как результирующий спектр растягивается на большую площадь. Однако данный прибор требует более аккуратного обращения и с его помощью обычно нельзя провести быстрое спектральное сканирование, поскольку механизм, используемый для крепления дифракционной решетки, массив-

ный и сложный (чтобы обеспечить правильное положение дифракционной решетки в данном диапазоне спектра).

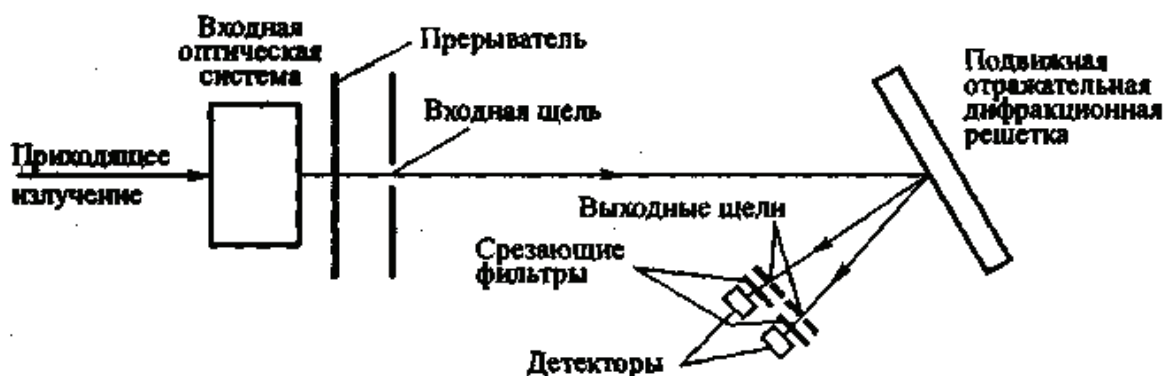


Рис. 2.20 – Схема прибора с дифракционной решеткой

В этих приборах изображение, вырезаемое щелью, разлагается в спектр. Полученный кадр считывается мозаичным (матричным) приемником. Каждая строка кадра соответствует изображению одной и той же узкой полосы сканируемой поверхности в определенной области спектра, т.е. число спектральных поддиапазонов равно числу строк фотоматрицы.

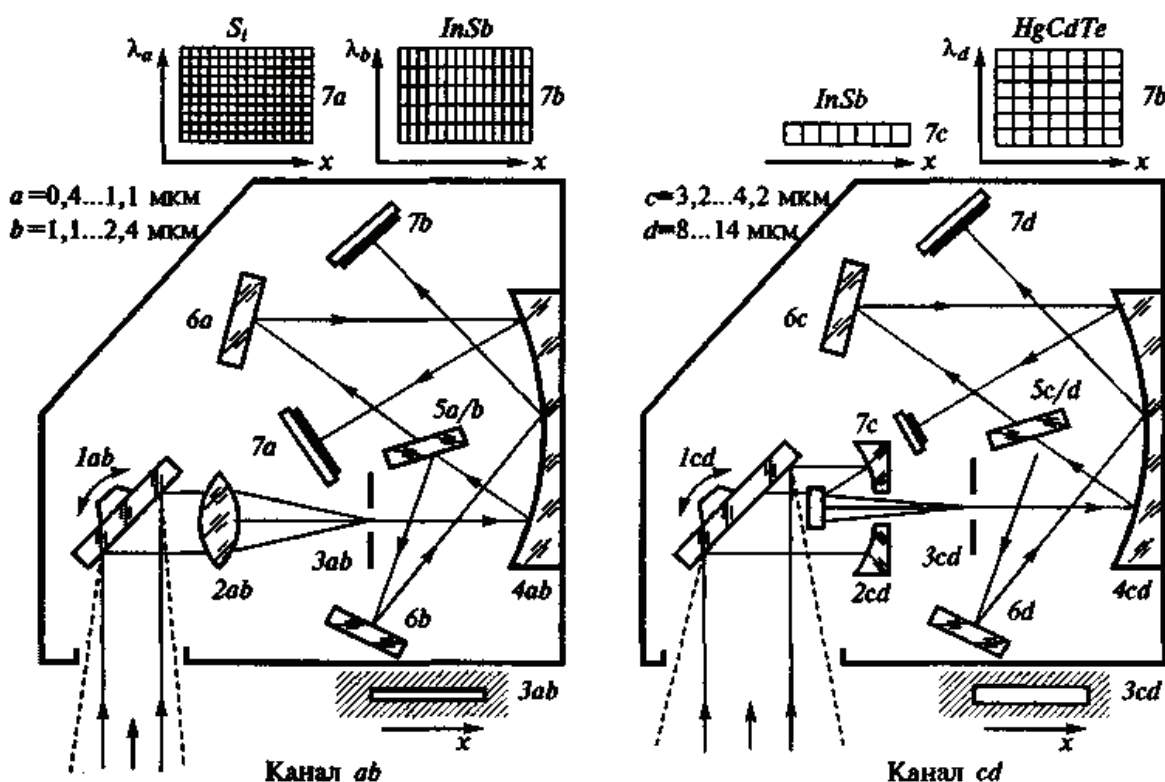


Рис. 2.21 – Схема прибора с диспергирующей призмой

Примерами приборов с диспергирующим элементом, в которых сканирование осуществляется путем колебаний дифракционной решетки, являются спектрометр, установленный на борту ИСЗ «Космос-45», и прибор, применявшийся на межпланетной автоматической станции «Викинг», в котором

выделение пяти спектральных диапазонов в районе 1,4 мкм осуществлялось 5-элементным фоторезистором с радиационным охлаждением.

Третий тип бортовых спектральных приборов – приборы, в которых в качестве основного диспергирующего элемента применяются призмы. На рис. 2.21 приведена схема прибора с призмой. Диспергирующая призма дает единственный порядок спектра в данном направлении, и нет необходимости в сортировке порядков (в установке фильтра). Пространственная дисперсия прибора с диспергирующей призмой меньше, чем у прибора с дифракционной решеткой, и поэтому установить детекторы в приборе с диспергирующей призмой технически гораздо сложнее.

Прибор с диспергирующей призмой имеет более простую конструкцию и поэтому он способен на более быстрое спектральное сканирование (чем прибор с дифракционной решеткой). Однако спектральный диапазон этого прибора ограничивается материалом, из которого изготовлена призма. Для того чтобы охватить весь оптический диапазон спектра, для изготовления диспергирующих призм должны использоваться материалы различных типов.

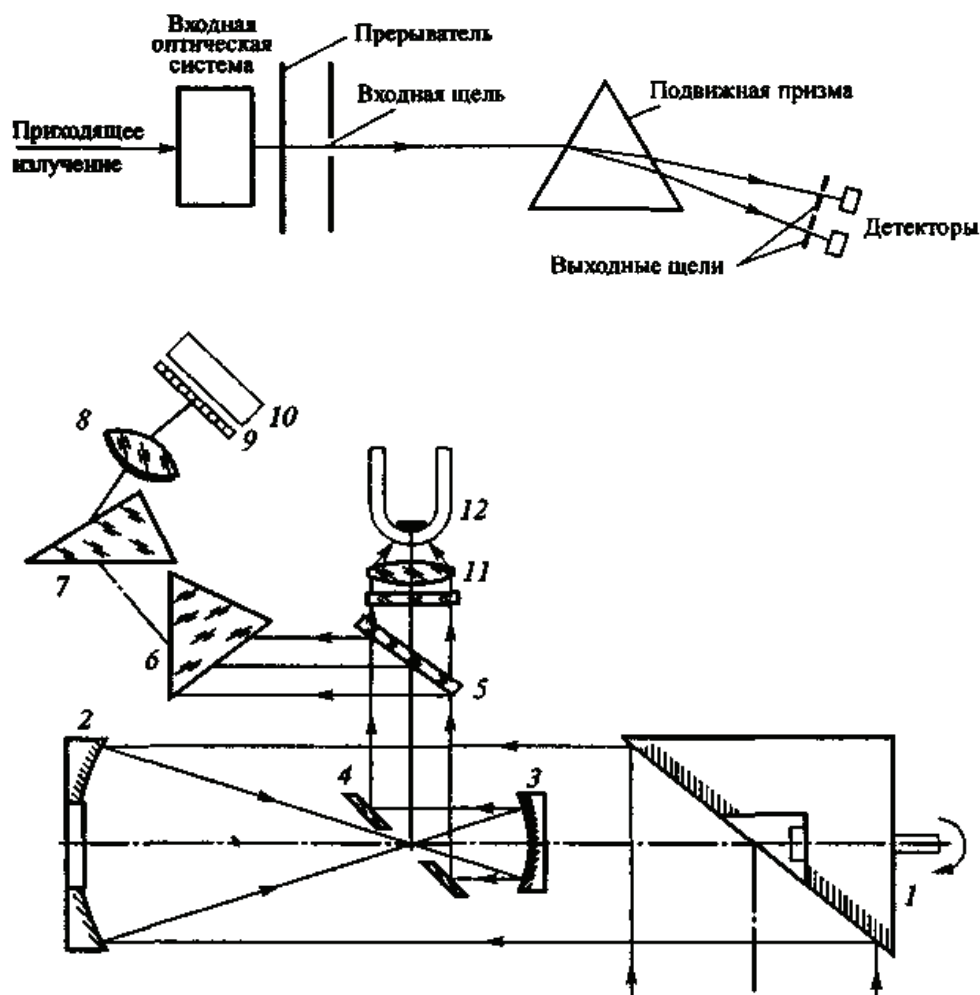
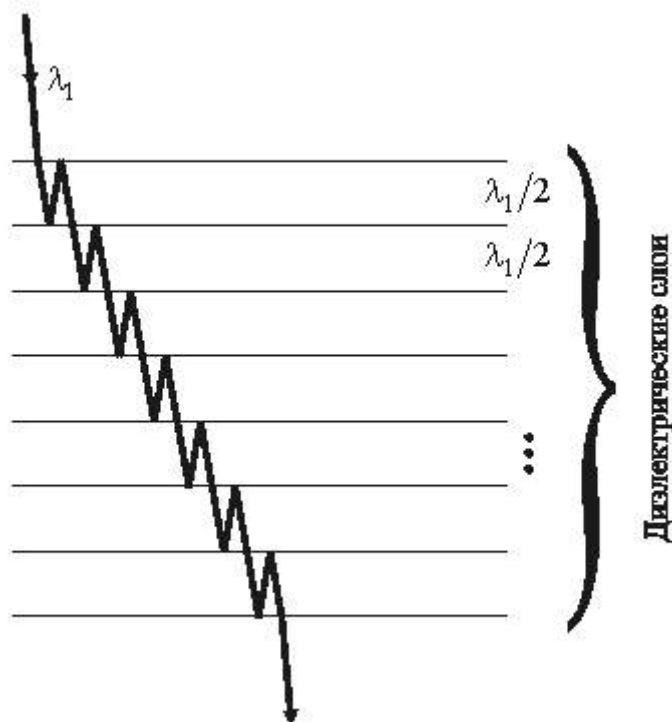


Рис. 2.22 – Схема сканирующего спектро радиометра

Схема сканирующего спектро радиометра с диспергирующими призмами показана на рис. 2.22. В этом спектро радиометре видимый и ближний ИК-

диапазоны разделяются на большое число узких поддиапазонов, а средневолновый ИК-диапазон перекрывается в пределах всего атмосферного окна прозрачности 8...12 мкм или значительной его части. Излучение от исследуемых объектов попадает на сканирующее вращающееся зеркало, направляющее его на зеркало 2 приемного объектива. С помощью зеркал 3 и 4 поток поступает на дихроичный фильтр-светоделитель 5. На призмы 6 и 7 монохроматора направляется видимое и коротковолновое ИК-излучение, которое, будучи разложенным в спектр после объектива 8 и фильтра 9, попадает на охлаждаемый многоэлементный приемник излучения 10. Каждый из элементов приемника чувствителен лишь в узкой спектральной области. Средневолновое ИК-излучение с помощью элемента 11 направляется на охлаждаемый приемник 12, расположенный в сосуде Дьюара.

В приборах с интерференционными диспергирующими элементами используются интерференционные фильтры. Интерференционный фильтр – это многослойная диэлектрическая структура, через которую проходит излучение. В результате многократных отражений и пропусканий возникает явление интерференции. Только одна спектральная полоса, соответствующая определенной длине волны, интерферирует с усилением и поэтому проходит эту многослойную структуру без существенного ослабления. Схематически этот процесс изображен на рис. 2.23.

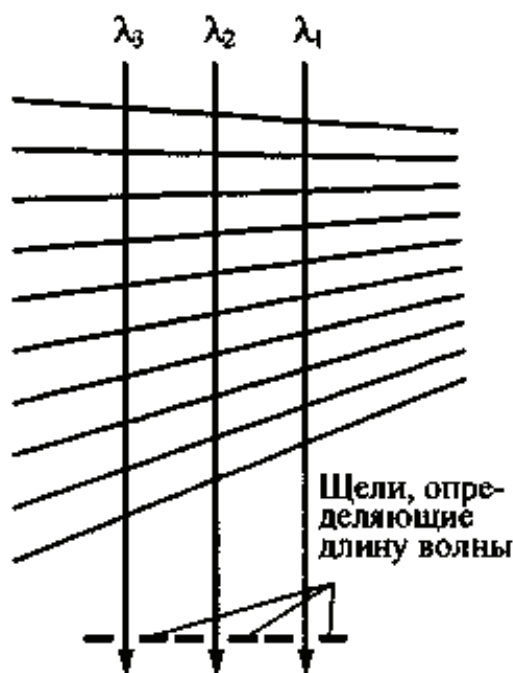


**Рис. 2.23 – Интерференция в многослойном диэлектрическом интерференционном фильтре**

Данный метод диспергирования требует такой же сортировки порядков, как и в системах с дифракционной решеткой. Любая длина волны, кратная пер-



вичной длине волны, прошедшей через интерференционный фильтр, тоже пройдет через фильтр, так как интерференция с усилением будет также иметь место и для компонент кратных длин волн. Следовательно, необходим фильтр, способный удалять все кратные порядки первичного излучения, падающего на него. Длина волны, способной пройти через интерференционный фильтр, зависит от толщины диэлектрических слоев. Поэтому, чтобы сделать регулируемый диспергирующий элемент, удобно использовать конический интерференционный фильтр, как показано на рис. 2.24.



**Рис. 2.24 – Конический интерференционный фильтр**

Вместо того чтобы применять щели, определяющие кратные длины волн, как показано на рисунке, можно поставить перед входной щелью детектора прибора такой фильтр и изменять его положение относительно щели, чтобы выделить из приходящего потока излучения спектральную компоненту.

На рис. 2.25 представлена упрощенная функциональная структурная схема прибора МСУ-СК (многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения с конической разверткой), в котором в качестве диспергирующих элементов используются интерференционные фильтры. МСУ-СК является оптико-механическим сканером среднего разрешения с конической разверткой. Излучение от подстилающей поверхности под углом  $39^\circ$  к вертикали собирается сферическим зеркалом 1 и направляется в одну из четырех оптических ветвей 2. 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 устройства, преломляется и далее расщепляется в спектроделительной системе 4. Фотоприемник 5 преобразует поток излучения в видеосигнал, который после формиро-

вания в усилителях 6 поступает на выход прибора. МСУ-СК входит в состав бортовой аппаратуры космического аппарата «Ресурс-01».

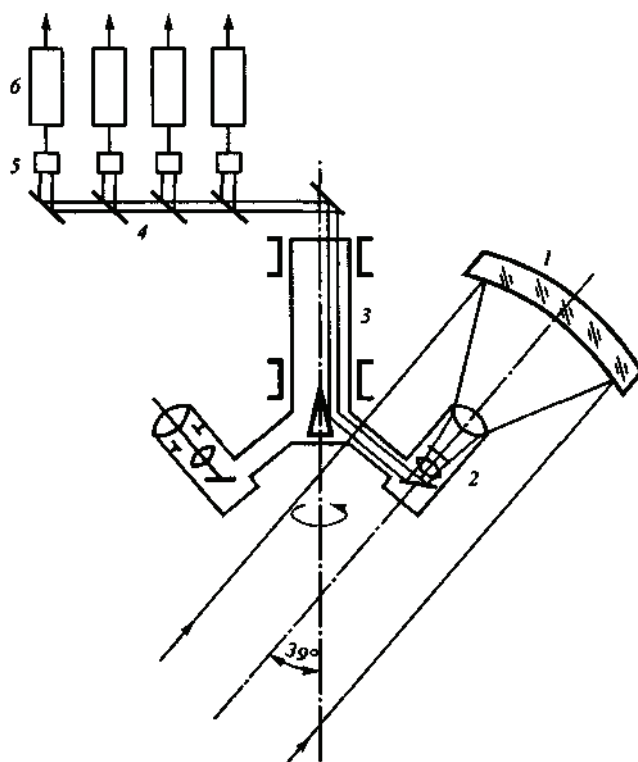
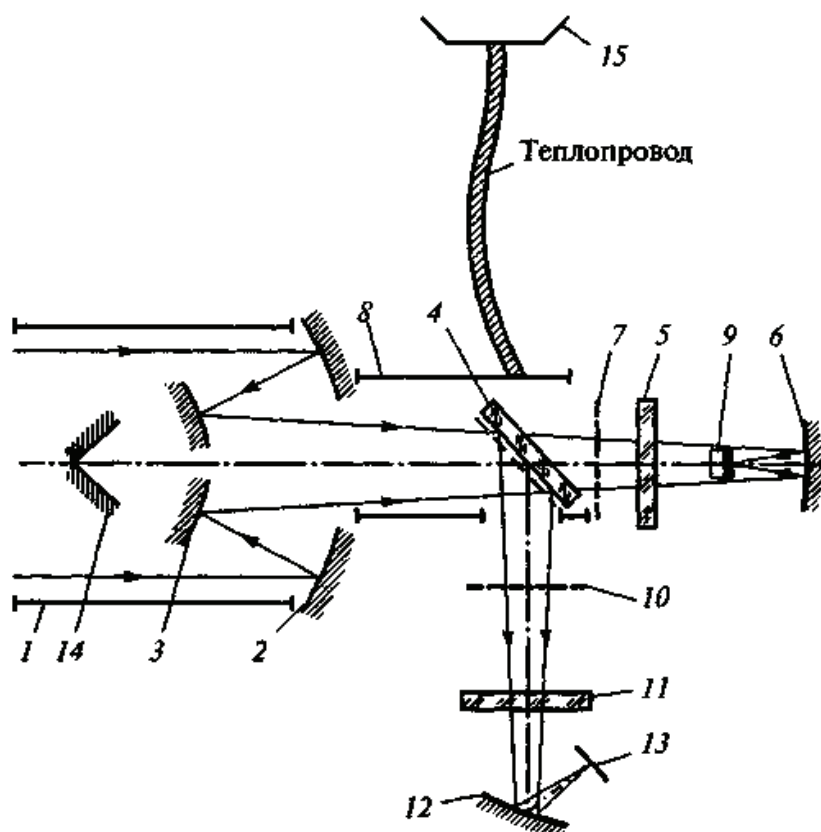


Рис. 2.25 – Структурная схема МСУ-СК

Приборы МСУ-Э (многоканальное сканирующее устройство высокого разрешения), МСУ-С (многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения), МСУ-М (многоканальное сканирующее устройство малого разрешения) используют в качестве монохроматора с непрерывным сканированием по спектру в двух спектральных диапазонах объектив по схеме Кассегрена. Он защищен внешней блендой 7, имеет два эллиптических зеркала 2, 3 и формирует поток излучения, попадающий (внутри бленды 8) на светоделитель 4, разделяющий поток на два канала. Длинноволновой канал (3,6... 14 мкм) состоит из камертонного вибромодулятора 7, интерференционного клиновидного фильтра 5, эллиптического конденсора 6 и приемника излучения 9 (GeHg), охлаждаемого до температуры 22 К. Коротковолновый канал (1,9...6,0 мкм) имеет камертонный модулятор 10, фильтр 11, конденсор 12 и приемник излучения 13 (PbSe), работающий при температуре 175 К за счет радиационного охлаждения. Конический зеркальный отражатель 14 предназначен для уменьшения фона, создаваемого деталями прибора. Охлаждение терморегулирующей поверхностью 75, выставленной в открытый космос и экранированной от корпуса КЛА, до температуры 238 К и стабилизация температуры внутренней бленды и модулятора длинноволнового канала на уровне 175 К обеспечивает снижение уровня внутренних помех и повышение чувствительности прибора. Применение в этом приборе фильтрового монохроматора возможно из-за не слишком широкого

спектрального диапазона длинноволнового канала по сравнению, например, с диапазоном (7... 36 мкм) спектрорадиометра «Космос-45».



**Рис. 2.26 – Оптическая схема спектрорадиометра IRS**

В табл. 2.3 приведена краткая характеристика приборов с различными диспергирующими элементами.

Примером систем дистанционного контроля, формирующих изображение, являются тепловизионные системы. Тепловизионные системы предназначены для создания видимого аналога теплового изображения. В них происходит преобразование оптического изображения, полученного в ИК-области спектра, в адекватное изображение в видимой области.

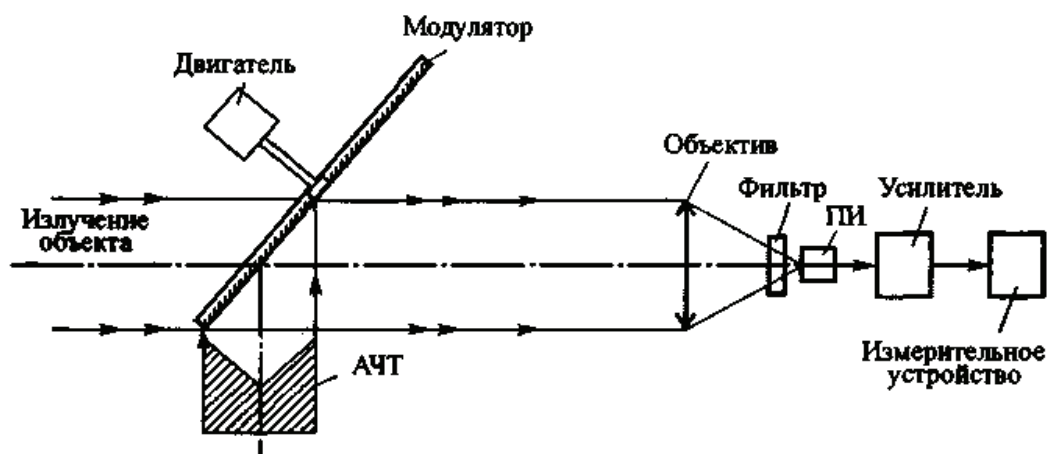
Отметим особенности тепловых изображений, т.е. изображений, полученных в ИК-области спектра. Распределение контрастов в тепловом изображении (в ИК-области спектра) может существенно отличаться от соответствующего распределения в видимом изображении. Если в видимой области спектра распределение контрастов обусловлено различиями в отражательной способности природных образований, то в ИК-области это распределение обусловлено также (или главным образом) различиями в их излучательной способности. Поэтому тепловое изображение не имеет теней. Поскольку в тепловом изображении фиксируется различие в излучательных способностях, то возможно обнаружение объектов, имеющих одинаковую температуру, но различные коэффициенты излучения.

**Таблица 2.3 – Краткая характеристика приборов с различными диспергирующими элементами**

Тип прибора	Диспергирующий элемент	Скорость спектрального сканирования	Спектральное разрешение	Механическая прочность	Чувствительность	Особенности
Прибор с интерферометром	Структура пластины интерферометра	Средняя	Очень высокое	Очень хрупкая	Средняя	Необходимо преобразование Фурье
Прибор с диспергирующей призмой	Призма, изготовленная из пропускающего материала	Высокая	Среднее	Средняя	Средняя	Неудобство: много диспергирующих элементов
Прибор с дифракционной решеткой	Отражательная или пропускающая дифракционная решетка	Низкая	Высокое	Хрупкая	Высокая	Необходима сортировка порядков
Прибор с интерференционным фильтром	Изменяющаяся интерференция	Высокая	Низкое	Прочная	Высокая	То же

Принципиальная схема ИК-радиометра приведена на рис. 2.27. В состав радиометра входят следующие основные элементы:

- приемник излучения (ПИ);
- эталонный источник излучения (абсолютно черное тело (АЧТ));
- модулятор, осуществляющий (с помощью двигателя) попеременное облучение чувствительной площадки приемника внешним или эталонным источниками;
- электронная схема, преобразующая и усиливающая электрический сигнал с выхода приемника;
- измерительное устройство.



**Рис. 2.27 – Принципиальная схема ИК-радиометра**

Различают тепловизионные системы без сканирования, системы с фотоэлектронным сканированием и системы с оптико-механическим сканированием. Современные тепловизионные системы с оптико-механическим сканированием имеют частоту сканирования, соизмеримую с частотой сканирования в телевизионных системах.

Функциональная схема тепловизионной системы с оптико-механическим сканированием представлена на рис. 2.28.

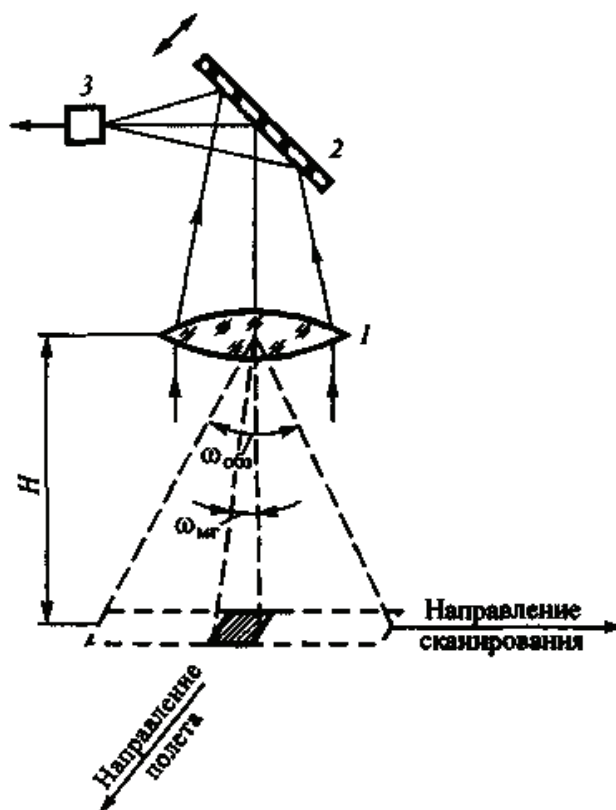


Рис. 2.28.– Функциональная схема тепловизионной системы: 1 – оптическая система; 2 – сканирующая система; 3 – приемник излучения; 4 – предусилитель; 5 – устройство для обработки и формирования сигналов; 6 – система охлаждения приемника излучения; 7 – устройство синхронизации

Из тепловизионных систем наиболее известны пятиканальный радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), устанавливаемый на американских метеорологических спутниках «NOAA»; датчик ATSR (Along Track Scanning Radiometer) спутников «ERS», а также многоканальный сканер с конической разверткой МСУ-СК, используемый на спутниках «Ресурс» и «Океан-0».

В тепловизионных системах для исследования природных ресурсов с одноэлементным сканированием наиболее часто применяется построенопрямолинейная траектория сканирования, причем для развертки вдоль траектории полета (по кадру) используется собственное движение ЛА, а развертка в перпендикулярном направлении (по строке) осуществляется с помощью оптико-механических дефлекторов. Такие системы по принципу построения аналогичны однострочным телевизионным системам. В схеме тепловизионной системы

с одноэлементным сканированием в качестве дефлектора использовано плоское качающееся зеркало, расположенное в сходящемся пучке лучей за приемником излучений. Примером такой тепловизионной системы является радиометр AVHRR, в котором используется линейное сканирование (рис. 2.29).

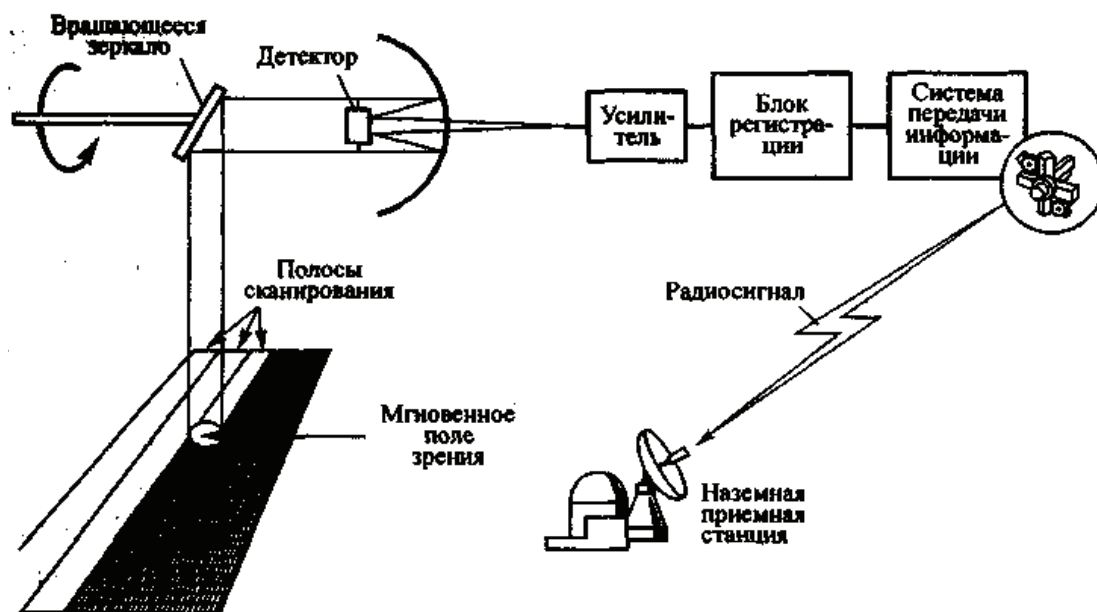


Рис. 2.29 – Сканирующий ИК-радиометр AVHRR с линейной механической разверткой

Приведем основные технические характеристики датчика ATSR, который имеет наилучшие метрологические характеристики из всех упомянутых ИК-радиометров. Датчик ATSR состоит из двух приборов: ИК-радиометра (Infrared Radiometer – IRR) и микроволнового радиометра (Microwave Sounder – MWR).

Радиометр IRR разработан и создан консорциумом из нескольких лабораторий: Резерфордской лабораторией прикладной физики, Оксфордским университетом, Метеорологической службой Великобритании, CSIRO из Австралии. Главной целью создания IRR является прецизионное измерение глобальной температуры морской поверхности. Абсолютная точность измерения температуры составляет 0,5 К при усреднении по пространству в 50x50 км и при условии, что хотя бы 20% наблюдаемой территории свободны от облаков. Для свободных от облачности участков относительная точность составляет 0,1 К при элементе разрешения 1x1 км.

Для достижения таких показателей IRR был сконструирован как радиометр получения изображений с четырьмя параллельными спектральными каналами, имеющими длины волн 1,6; 3,7; 10,8 и 12 мкм, формируемыми отдельными лучами и многослойными интерференционными фильтрами.

Мгновенное поле зрения прибора при обзоре в надир имеет размеры 1x1 км и формируется как изображение на детекторах после параболического зеркала. Для уменьшения собственных шумов детекторы, размещенные в фокальной плоскости, охлаждены до 80 К охладителем Стирлинга.

Область одновременного обзора перемещается по поверхности Земли через поворот плоскости зеркала таким образом, что это дает два направления обзора: надирное с углом падения  $0^\circ$  и переднее с углом падения  $55^\circ$ . Такой угол выбран не случайно, поскольку при нем расстояние визирования в надир и вперед по полету отличается ровно в два раза.

Сканирующее зеркало отклоняется на максимальный угол  $23,45^\circ$  от вертикали. Номинальная ширина полосы обзора составляет 500 км, при этом передний и надирный сканы разнесены на 900 км вдоль трассы. Подобная геометрия обеспечивает просмотр одного и того же элемента на подстилающей поверхности под двумя различными углами, что позволяет одновременно использовать и многоканальную, и многоугловую методики восстановления температуры поверхности моря. Период сканирования составляет 150 мс, а каждый скан состоит из 2000 пикселей. Для калибровки каналов в течение каждого периода сканирования в IRR формируются сигналы, соответствующие температурам двух бортовых черных тел (одного холодного и одного горячего). После сжатия данных на борту пакет из 960 пикселей передается на Землю вместе со служебными данными.

В радиометре только 3 канала из 4-х могут работать одновременно (каналы 12 мкм и 10,8 мкм работают постоянно). Переключение между каналами 1,6 мкм и 3,7 мкм происходит автоматически по уровню отраженного ИК-излучения.

Основной задачей микроволнового датчика MWR является измерение влагосодержания в атмосфере (как испарений, так и в жидком виде) для использования в расчетах наиболее неизученной части задержки сигналов спутникового альтиметра. MWR имеет два канала, работающих на частотах 23,8 и 36,5 ГГц, каждый с шириной полосы 400 МГц.

В ИК-радиометре датчика ATSR-2, установленного на борту спутника ERS-2, дополнительно добавлены 3 канала видимого диапазона с длинами волн 0,555; 0,669 и 0,865 мкм. Эти каналы калибруются с использованием новой системы по рассеянному солнечному свету один раз за виток. Точность радиометрической калибровки видимых каналов составляет 2% и отношение сигнал – шум равно 20 для 20% альбедо.

#### **2.2.4. Анализ погрешности измерений при проведении мониторинга поверхности Земли**

Типичными для общего случая являются три составляющие погрешности измерений, обусловленные свойствами измерительных приборов системы мониторинга (ИПСМ):

– погрешность, обусловленная неидеальностью собственных свойств ИПСМ, т.е. отличием действительной функции преобразования ИПСМ в нормальных условиях от номинальной функции преобразования. Эта составляющая называется основной погрешностью ИПСМ;

– погрешность, обусловленная реакцией ИПСМ на изменения внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относи-

тельно их нормальных значений. Эта составляющая зависит как от свойств ИПСМ, так и от изменений влияющих величин, она называется дополнительной погрешностью ИПСМ;

– погрешность, обусловленная реакцией ИПСМ на скорость (частоту) изменения входного сигнала. Эта составляющая, определяющая динамическую погрешность измерений, зависит как от динамических свойств ИПСМ, так и от частотного спектра входного сигнала, она называется динамической погрешностью ИПСМ. Таким образом, режим измерений (статический или динамический) определяется соотношением между скоростью изменения входного сигнала и динамическими свойствами ИПСМ.

Первые две составляющие представляют собой статическую погрешность ИПСМ. Третья составляющая представляет собой динамическую погрешность ИПСМ. Выделение статической и динамической погрешностей ИПСМ как суммируемых составляющих допустимо не всегда. В общем случае при измерении изменяющейся величины погрешность ИПСМ зависит от скорости (частоты) изменения измеряемой величины таким образом, что выделить независимую от скорости (частоты) составляющую погрешности ИПСМ, обусловленную только неидеальностью элементов ИПСМ и воздействием на их параметры влияющих величин, не представляется возможным. Выделение динамической погрешности ИПСМ, как суммируемой составляющей, допустимо только в частном, правда, весьма распространенном случае, когда можно считать, что ИПСМ – линейное динамическое звено. Можно показать, что при данном условии, учитывая, что погрешности обычно достаточно малы, погрешность ИПСМ допустимо приближенно представлять как сумму двух независимых составляющих статической и динамической. При измерении постоянной или весьма медленно меняющейся величины погрешности ИПСМ равна только одной из составляющих – статической, динамическая погрешность при этом равна нулю. Такое представление погрешности ИПСМ не необходимо, но весьма удобно. Если погрешность ИПСМ является суммой двух независимых составляющих, то удобнее нормировать эти составляющие отдельно. При этом упрощаются методы контроля характеристик погрешностей на соответствие нормам. Если же нормируются характеристики полной погрешности ИПСМ без выделения динамической и статической составляющих, то их придется контролировать. Поэтому тогда, когда это допустимо, целесообразно представлять погрешность ИПСМ как сумму статической и динамической составляющих.

*Статистическая погрешность* ИПСМ, обусловлена собственными свойствами ИПСМ. Если эти характеристики для ИПСМ данного типа существенно изменяются при воздействии на ИПСМ влияющих величин, то их нормируют для нормальных условий, т. е. как характеристики основной погрешности. Если же эти характеристики для ИПСМ данного типа при указанных условиях изменяются незначительно по сравнению с нормированными значениями, то их нормируют для рабочих условий применения ИПСМ. В этом случае основная погрешность и, следовательно, ее характеристики не выделяются. Поскольку первая ситуация является более характерной для современных ИПСМ, при



дальнейшем изложении будем полагать, что в первую группу входят характеристики основной погрешности.

Моменты систематической составляющей  $\Delta_{0_s}$  основной погрешности  $\Delta_0$  – математическое ожидание  $M[\Delta_{0_s}]$  и дисперсия  $D[\Delta_{0_s}]$  или среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\Delta_{0_s}]$  – характеристики, позволяющие при расчете характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений приближенно учитывать разброс значений систематической погрешности для различных экземпляров ИПСМ данного типа.

Конечно, при строгом учете этого случайного разброса надо было бы использовать закон распределения вероятностей величины  $\Delta_{0_s}$ . Однако это привело бы к неоправданному чрезвычайному усложнению методов расчета погрешностей измерений и контроля ИПСМ на соответствие нормам.

Характеристики  $M[\Delta_{0_s}]$  и  $\sigma[\Delta_{0_s}]$  отражают свойства не каждого отдельного экземпляра ИПСМ, а всей совокупности ИПСМ данного типа, для которого они нормированы. Следовательно, они не могут служить критериями качества отдельных экземпляров ИПСМ.

При установлении нормируемых характеристик, отражающих основную погрешность каждого отдельного экземпляра ИПСМ данного типа, необходимо выбрать ее математическую модель. Параметры этой модели и должны представлять, с одной стороны, свойства, а с другой – требования к основной погрешности ИПСМ.

В основу выбора математической модели основной погрешности ИПСМ положено предположение о том, что основные погрешности отдельных экземпляров ИПСМ относятся к таким нестационарным случайным процессам  $\Delta_0(t)$ , которые в общем случае могут быть представлены суммой математического ожидания  $M[\Delta_{0_s}]$ .

Такое представление является приближенным, однако, если ввести некоторую условность в определение систематической погрешности  $\Delta_{0_s}$ , оно будет достаточно хорошо отражать общие физические свойства ИПСМ. С другой стороны, такое представление основной погрешности ИПСМ позволяет установить относительно простые характеристики свойств ИПСМ. Усложнение математической модели основной погрешности, существенно не улучшая оценки инструментальных составляющих погрешностей измерений, привело бы к весьма значительному усложнению как системы нормирования, так и методов их контроля.

Условность определения систематической погрешности  $\Delta_{0_s}$  заключается в следующем. Обычно под систематической понимают погрешность, являющуюся постоянной, либо изменяющейся по известному закону, детерминированной величиной. Ее оценивают как среднее определенное количество реализаций погрешности. При этом, если систематическая погрешность – функция времени, то реализации погрешности, усреднением которых определяют значение систематической погрешности в некоторый момент времени  $t$ , должны учи-

тываться в течение такого небольшого интервала времени  $\Delta t$ , чтобы изменением систематической погрешности за этот интервал времени можно было пренебречь.

В приведенном выше определении математической модели основной погрешности ИПСМ как нестационарной случайной функции

$$\Delta_0(t) = \Delta_{0_s}(t) + \Delta'_0(t) + \Delta'_{0_q}, \quad (2.17)$$

вся "нестационарность" отнесена к составляющей  $\Delta_{0_s}(t)$ , поскольку составляющая  $\Delta'_0(t)$  по определению является стационарной, а составляющая  $\Delta'_{0_q}$  – случайной величиной, т. е. ее параметры во времени не изменяются. Таким образом, свойства составляющей  $\Delta_{0_s}(t)$ , строго говоря, отличаются от свойств систематической погрешности в общепринятом смысле.

Однако, сфера практического использования понятия "систематическая погрешность" в общепринятом смысле, т. е. как детерминированной величины, крайне ограничена. Действительно, если эта погрешность определена как детерминированная величина и ее значение известно, то ее просто исключают введением поправки. Другого способа использования систематической погрешности как детерминированной величины быть не может. Если из физических соображений ясно, что некоторая составляющая погрешности постоянна или закономерно изменяется, т. е. по определению является систематической, но ее значение неизвестно, а известны лишь некоторые пределы, в которых это значение может находиться, то учитывать эту погрешность можно только как случайную величину, лежащую в определенных пределах.

Характеристики систематической погрешности – характеристики случайной величины, лежащей в определенных пределах:  $M[\Delta_{0_s}]$ ;  $\sigma[\Delta_{0_s}]$ ;  $\Delta_{0_{sp}}$  – пределы допускаемых значений. Первые две характеристики используются при расчетах характеристик инструментальных составляющих погрешностей измерений, характеристику  $\Delta_{0_{sp}}$  контролируют при поверках. В этих характеристиках в общем случае не отражена нестационарность погрешности ИПСМ, которая, как указано выше, в принятой модели отнесена к систематической погрешности. В случае целесообразности характеристики  $M[\Delta_{0_s}]$  и  $\sigma[\Delta_{0_s}]$  могут выражаться как функции времени.

Физический смысл составляющих в формуле (2.17) следующий. Составляющая  $\Delta_{0_s}(t)$  включает в себя постоянные и настолько медленно, в том числе случайно, изменяющиеся во времени погрешности, что их изменением можно пренебречь за максимально возможное время проведения опытов, при которых применяют ИПСМ данного типа. Таким образом, предполагается, что в течение обычной для ИПСМ данного типа продолжительности опытов составляющая  $\Delta_{0_s}(t)$  погрешности ИПСМ является постоянной (для ИПСМ, для которых это

предположение несправедливо, характеристики систематической погрешности  $M[\Delta_{0_s}]$  и  $\sigma[\Delta_{0_s}]$  могут регламентироваться как функции времени).

Кроме того, при контроле погрешности ИПСМ данную составляющую оценивают путем усреднения ряда реализаций погрешности, полученных за некоторый малый интервал времени. Вследствие этих двух обстоятельств составляющая  $\Delta_{0_s}(t)$  и отнесена к систематическим.

Составляющая  $\Delta_{0_s}(t)$  основной погрешности ИПСМ обусловлена неточностью градуировки и регулировки ИПСМ, а также медленными временными изменениями (типа временного старения) свойств материалов и элементов, из которых состоит ИПСМ.

Составляющая  $\Delta'_0(t)$  – представляет собой временные изменения погрешности ИПСМ, группирующиеся вокруг систематической погрешности. Эти изменения вызываются случайными временными изменениями свойств материалов и элементов ИПСМ, не имеющими определенной направленной тенденции, в том числе внутренними процессами в электронных и полупроводниковых элементах. В частности, к этой составляющей относятся явления типа дрейфа, шума и т.п. Следует учитывать, что  $\Delta'_0(t)$  может иметь весьма широкий частотный спектр, причем, как правило, неравномерный. Может оказаться целесообразным выделить и рассматривать отдельно типичные спектральные составляющие. Можно выделить две типичные составляющие. Первая имеет такой спектр, что ее интервал корреляции заведомо меньше интервала времени, необходимого для получения отдельного выходного сигнала (показания) ИПСМ данного типа. Эту составляющую  $\Delta'_{0_{hf}}(t)$  удобно назвать высокочастотной. Вторая составляющая  $\Delta'_{0_{lf}}(t)$  – низкочастотная. Она имеет спектр, лежащий между спектрами составляющих  $\Delta'_{0_{hf}}(t)$  и  $\Delta_{0_s}(t)$ .

Таким образом,

$$\Delta'_0(t) = \Delta'_{0_{hf}}(t) + \Delta'_{0_{lf}}(t) \quad (2.18)$$

и

$$\Delta_0(t) = \Delta_{0_s}(t) + \Delta'_{0_{hf}}(t) + \Delta'_{0_{lf}}(t) + \Delta'_{0_q} \quad (2.19)$$

Удобство такого разделения погрешности  $\Delta_0(t)$  обусловлено следующими соображениями. По способам использования выходных сигналов ИПСМ все измерения могут быть разделены на две группы. Первая группа, которую условно можно назвать группой простых измерений, характеризуется тем, что каждое значение выходного сигнала (результат измерения) используют по отдельности, различные результаты измерений не подвергают никакой совместной обработке. Вторая группа, условно называемая группой сложных измерений, характеризуется тем, что отдельные результаты измерений подвергают какой-либо совместной обработке с целью получения конечного результата, яв-

ляющегося функцией отдельных первичных результатов измерений. Во вторую группу входят, например, косвенные измерения.

За окончательную оценку погрешности измерений обычно принимают интервал, за границы которого с заданной вероятностью погрешность не выходит. Для оценки этого интервала при измерениях первой группы можно пользоваться первыми двумя моментами распределения погрешности измерений – математическим ожиданием (систематической погрешностью) и дисперсией.

Для оценки интервала погрешности при измерениях второй группы знания первых двух моментов распределения недостаточно. Необходимо вводить в расчет также параметр двумерного распределения погрешности – автокорреляционную функцию погрешности.

Однако при оценке погрешности ИПСМ даже при измерениях первой группы также необходимо знать автокорреляционные функции (или однозначно с ней связанные спектральные плотности) основных погрешностей.

Таким образом, при оценке характеристик инструментальных составляющих погрешностей измерений в общем случае необходимо знать автокорреляционную функцию основной погрешности ИПСМ.

*Дополнительная погрешность* ИПСМ обусловлена изменениями влияющих величин относительно своих нормальных значений. Она проявляется постольку, поскольку параметры материалов и элементов, из которых состоят ИПСМ, и их конструктивные параметры зависят от значений влияющих величин. Следовательно, дополнительная погрешность является функцией влияющих величин. Для каждого экземпляра ИПСМ эта функция имеет определенный вид и определенные значения параметров. Наиболее представительной характеристикой дополнительной погрешности является функция зависимости характеристик погрешности от влияющих величин, имеющая определенные параметры, т.е. функция влияния. Для разных экземпляров ИПСМ данного типа могут различаться как вид рассматриваемой функции, так и ее параметры. Однако, в принципе, для всех экземпляров ИПСМ данного типа эти функции должны быть подобны, а их параметры близки. Поэтому в качестве основной характеристики дополнительной погрешности принята некоторая средняя для ИПСМ данного типа функция зависимости погрешности от изменения влияющих величин с указанием ее параметров. Такая функция названа номинальной функцией влияния. Кроме того, должны также нормироваться пределы допускаемых отклонений функций влияния относительно номинальной функции, в которых должны находиться функции влияния всех экземпляров приборов данного типа.

Для некоторых типов измерительных приборов характерно то обстоятельство, что функции влияния для различных экземпляров ИПСМ данного типа существенно между собой различаются. Это иногда наблюдается для таких измерительных приборов, в схемах которых применена компенсация влияния влияющих величин, например, температуры. Для типов ИПСМ, характеризующихся существенными различиями видов и параметров функций влияния для разных экземпляров приборов, нормирование номинальных функций влияния, по-видимому, не имеет смысла. В этих случаях целесообразно нормировать или

граничные функции влияния или другую характеристику дополнительной погрешности, относящуюся к группе традиционных характеристик, – пределы допускаемых значений дополнительной погрешности, т. е. изменений погрешности.

Влияющие величины могут вызывать изменения не только погрешности ИПСМ, но и других метрологических характеристик измерительных приборов. Поэтому для необходимых случаев целесообразно предусмотреть нормирование функций влияния и на другие метрологические характеристики. Особенности нормирования функций влияния не зависят в общем случае от того, на какую характеристику функции влияния нормируются.

Функции влияния  $\phi(\xi)$  определены как зависимости изменений метрологических характеристик от изменений влияющих величин в рабочих условиях применения ИПСМ. Их следует нормировать для тех метрологических характеристик, которые нормируются для нормальных условий. Если некоторые метрологические характеристики нормируют для рабочих условий применения ИПСМ, то соответствующие функции  $\phi(\xi)$  не нормируют.

*Динамические характеристики* отражают динамические свойства ИПСМ. Традиционно эти свойства представляются, как правило, двумя характеристиками: временем установления показаний (выходного сигнала) и амплитудно-частотной (редко фазово-частотной) характеристикой. Первая характеристика не может быть использована при расчете динамической составляющей погрешности измерений. Ею можно оценить лишь время, необходимое для проведения единичного измерения.

Частотные характеристики, если их нормируют в том или ином виде, выражаются как наибольшие допускаемые изменения амплитуды или фазы синусоидального выходного сигнала ИПСМ при изменении частоты входного синусоидального сигнала с постоянными амплитудой и фазой. Эти характеристики могут позволить оценить наибольшую возможную динамическую составляющую погрешности измерений при граничных значениях частоты входного сигнала, но только лишь для тех случаев, когда входной сигнал – синусоидальный.

Это весьма частный случай современной измерительной техники. Поэтому практически частотные характеристики в таком виде, как их традиционно нормируют, являются скорее качественными характеристиками и для расчета динамической составляющей погрешности измерений при входном сигнале, характеризуемом некоторым спектром частот, непригодны.

Динамические свойства ИПСМ влияют не только на динамическую составляющую погрешности измерений. В тех случаях, когда измерительный прибор комплектуют в систему мониторинга, динамические свойства системы влияют и на статическую погрешность прибора. В любой измерительной системе имеется последовательное соединение нескольких средств измерения. Последующие в этом соединении средства измерения преобразуют (трансформируют) статические погрешности предыдущих измерительных приборов. Как показано выше, статическая погрешность ИПСМ в общем случае представляет

собой случайный процесс, т.е. характеризуется некоторым частотным спектром.

При нормировании погрешности это свойство отражается автокорреляционной функцией или спектральной плотностью. Для оценки статической погрешности системы мониторинга необходимо иметь возможность определить влияние динамических свойств некоторого ИПСМ на преобразование им статической погрешности (случайного процесса) другого измерительного прибора, включенного в систему перед ним. Частотные характеристики, традиционно нормируемые, такой возможности не дают, поэтому наряду с характеристиками динамических свойств средств измерения, традиционно нормируемыми, пригодными в указанных выше частных случаях. Надо отметить, что по этим "новым" динамическим характеристикам достаточно просто могут быть определены и указанные выше характеристики, нормируемые традиционно.

Для линейных ИПСМ такими характеристиками являются передаточная функция (или амплитудно-фазовая характеристика), переходная, импульсная и т. п. характеристики. Все они относятся к группе так называемых полных динамических характеристик, представляющих собой функции, связывающие между собой изменяющийся во времени входной сигнал и вызываемый им выходной сигнал.

Эти характеристики для линейных звеньев между собой связаны однозначно, поэтому в каждом конкретном случае следует нормировать ту из них, которой в данном случае удобнее пользоваться и которую удобнее экспериментально оценивать (контролировать).

Полные динамические характеристики линейных аналоговых ИПСМ однозначно связаны между собой следующими соотношениями:

переходная характеристика

$$h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau, \quad (2.20)$$

импульсная переходная характеристика

$$g(t) = \frac{dh(t)}{dt}, \quad (2.21)$$

амплитудно-фазовая характеристика

$$G(j\omega) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (2.22)$$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.23)$$

$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (2.24)$$

где  $A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  – амплитудно- и фазово-частотная характеристики, соответственно.

Передаточная функция

$$G(S) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-St} dt. \quad (2.25)$$

Для оценки инструментальной составляющей погрешности измерений наиболее удобна амплитудно-фазовая характеристика, однако, она не всегда может быть экспериментально определена с помощью прямых методов измерений.

При экспериментальном определении наиболее удобными динамическими характеристиками являются переходная и амплитудно-частотная характеристики. В самом деле, при подаче на вход ИПСМ испытательного ступенчатого сигнала единичного размера можно с помощью прямых измерений выходного сигнала получить переходную характеристику. Амплитудно-частотная характеристика также может быть получена с помощью прямых измерений амплитуды выходных гармонических сигналов при действии на входе гармонических сигналов требуемой частоты и единичной амплитуды.

Однако здесь возникает трудность, связанная с ограниченными возможностями точного воспроизведения формы сигналов тех или иных измеряемых величин. Например, затруднительно воспроизвести гармоническое изменение температуры, концентрации компонентов сложных веществ, влажности, расхода и других измеряемых величин. С другой стороны, скачкообразное изменение таких величин, как, например, скорости, ускорения и других, воспроизвести труднее, чем гармоническое.

Все перечисленные обстоятельства следует учитывать при выборе той или иной динамической характеристики для нормирования. Нормировать рекомендуется такую характеристику, которая может быть экспериментально определена с помощью наиболее простых методов измерений.

Допустим, что в конкретном случае для датчика температуры выбрана в качестве нормируемой переходная характеристика, которая непосредственно не может быть использована для вычисления динамической составляющей погрешности измерений. В таком случае, наряду с нормируемой характеристикой, которая должна контролироваться при испытаниях ИПСМ, целесообразно в качестве справочной указывать ту характеристику, которую использовать удобнее. Эта характеристика не должна контролироваться при испытаниях, потому что между динамическими характеристиками существует однозначная связь, поэтому, если нормируемая характеристика оказывается в норме, то и справочная характеристика также соответствует норме.

Для моделирования динамической составляющей погрешности измерений наиболее удобны импульсная переходная и амплитудно-фазовая характеристики, а также передаточная функция.

Импульсная переходная характеристика используется при цифровом моделировании путем приближенного вычисления выходного сигнала ИПСМ

$$y(t) = \int_0^t g(t - \tau)x(\tau)d\tau, \quad (2.26)$$

Амплитудно-фазовая характеристика и передаточная функция используются для моделирования ИПСМ как на аналоговых, так и на цифровых вычислительных машинах.

Для расчета метрологических характеристик измерительных каналов ИПСМ, состоящих из последовательно соединенных усилителей, коммутаторов, аналого-цифровых преобразователей и т.п., наиболее приемлемы передаточная функция и амплитудно-фазовая характеристика. Так, передаточная функция последовательно соединенных преобразователей равна произведению передаточных функций отдельных преобразователей. При параллельном соединении передаточная функция такого соединения равна сумме передаточных функций составляющих. Известны правила вычисления передаточных функций звеньев, охваченных обратной связью. Такими же свойствами обладает амплитудно-фазовая характеристика.

Что касается импульсной переходной характеристики, то для последовательного соединения она равна свертке импульсных переходных характеристик отдельных блоков, а для параллельного соединения сумме импульсных характеристик.

Основной задачей является определение измеряемой величины по известному выходному сигналу и известной динамической характеристике. По сути дела, решение этой задачи приводит к частичной компенсации динамической составляющей погрешности. Если известна импульсная переходная характеристика, то задача сводится к нахождению  $x(t)$  из интегрального уравнения (2.26).

Следует отметить, что в теории и практике автоматического регулирования и управления, автоматических устройств, в теории и практике связи, передачи информации, т.е. в областях, где измерительная техника является важнейшей составной частью, подходы к оценке динамических погрешностей и динамических характеристик средств измерения давно стали классическими.

## **2.3. Технологии анализа и прогноза чрезвычайных ситуаций с использованием данных космических летательных аппаратов**

### **2.3.1. Анализ гидрометеорологических явлений**

Технология анализа и прогноза стихийных гидрометеорологических явлений (СГЯ) существенно зависит от имеющегося диагностического и прогно-



стического материалов и способов их представления. Для составления качественного и достоверного краткосрочного прогноза оператор должен получить из крупного метеорологического центра результаты крупномасштабных анализов и прогнозов для анализируемой территории, а также более детальных анализов, по крайней мере, у поверхности Земли, для конкретных районов. При наличии данной информации космические снимки облачного покрова в видимом и инфракрасном участках спектра могут существенно облегчить задачу анализа и прогноза стихийных гидрометеорологических явлений. При этом на первом этапе следует рассматривать крупномасштабные анализы и прогнозы, а также эволюцию крупномасштабных облачных систем за последние 6 – 12 часов и идентифицировать возможную проблему дня: приближение подвижной фронтальной зоны, попадание в зону стационарного фронтального раздела и т.д., т.е. определять возможность появления синоптической ситуации, в которой следует ожидать развития интенсивной конвекции, поскольку с ней связано подавляющее большинство случаев возникновения ЧС.

Если такая «подозрительная» ситуация возникает, целесообразно провести более детальный анализ последней фактической информации: спутниковых, радиолокационных и обычных данных. При этом особое внимание необходимо уделить связи скоплений облачности с мезомасштабными синоптическими объектами: циклонами, фронтами и т.п. Кроме того, непрерывные в пространстве данные об облачности позволяют при анализе дискретных синоптических наблюдений заметить некоторые детали в структуре метеорологических полей, которые ускользают из поля зрения прогнозиста без этих данных

Выделение мезомасштабных зон конвергенции, депрессий и связанных с ними очагов облачности завершает второй этап анализа, на котором определяются «подозрительные» с точки зрения конвекции объекты.

На следующем этапе производятся анализ и прогноз эволюции и смещения выделенных зон облачности, для которого целесообразно использовать следующие эмпирические правила:

- по фактическим или прогностическим высотным картам (либо по расчетным данным вертикального зондирования атмосферы TOVS, полученным со спутников NOAA) необходимо рассчитать среднюю скорость и направление воздушного потока и использовать их для прогнозирования будущего положения облачного массива (ОМ), поскольку после образования ОМ имеет тенденцию двигаться со средним потоком в слое с давлением 500 – 700 гПа (гектопаскалей);

- для оценки эволюции ОМ целесообразно использовать данные об изменении температуры верхней границы облаков, применяя для этого систему TOVS. При интерпретации ИК-изображений следует помнить, что осадки у Земли начинаются при температуре верхней границы облаков (ВГО) примерно  $-32^{\circ}$ . При тенденции понижения температуры ВГО следует ожидать в ближайшие 2 – 4 часа увеличения интенсивности осадков и их площади, и наоборот;

- обострения зоны конвекции и усиления интенсивности развития в ней кучево-дождевых облаков следует ожидать при ее смещении в район более влажного и неустойчиво стратифицированного воздуха. Поэтому по имеющим-

ся данным о температуре и влажности дистанционного вертикального зондирования TOVS следует оценить степень неустойчивости и влагосодержания атмосферы в районе, куда смещается ОМ.

Оценив в процессе предварительного анализа общие тенденции развития синоптических процессов в интересующем районе или регионе, направление и скорость смещения опасных зон и их эволюцию, можно переходить к анализу этих зон на предмет образования в них опасных и стихийных гидрометеорологических явлений.

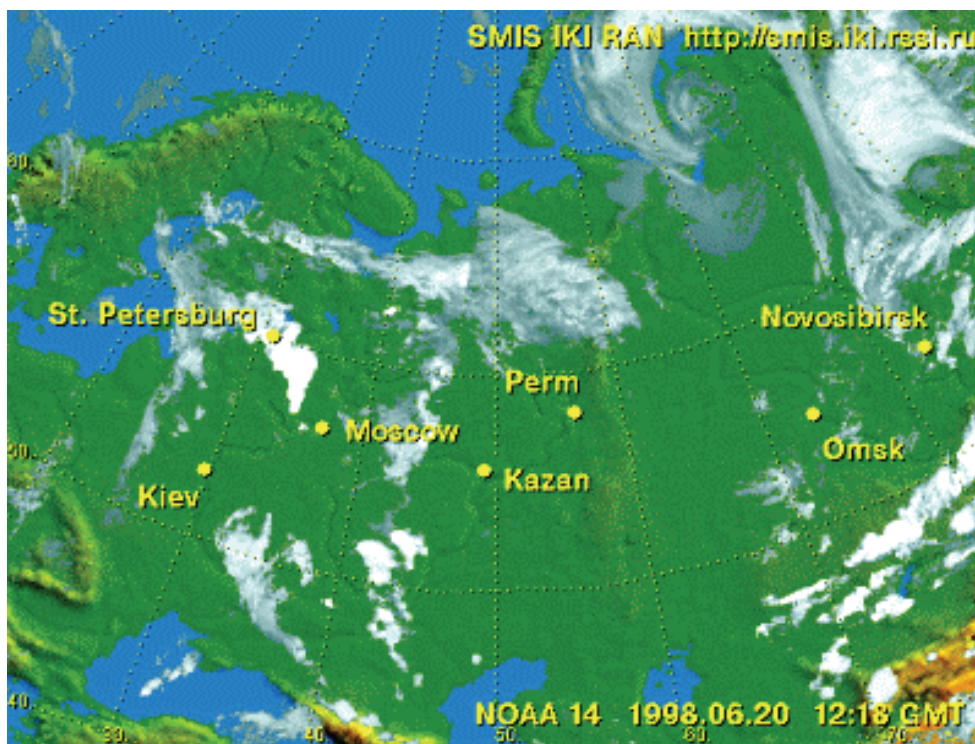
*Прогнозирование сильных шквалов и смерчей.* Шквалы и смерчи относятся к локальным явлениям погоды, возникают внезапно (чаще после полудня), кратковременны (часто несколько минут) и охватывают сравнительно небольшие площади. Это определяет трудности их исследования и прогноза. Шквал – резкое усиление ветра до 25-30 м/с с изменением направления в течение короткого времени. Он всегда связан с развитием активной конвекции и сопровождается интенсивными осадками и градом. Внутримассовые шквалы в жаркую летнюю погоду, обусловленные мощными кучево-дождевыми облаками, не представляют серьезной опасности, скорость ветра не превышает 20 м/с. Фронтальные шквалы, образуемые на атмосферных, преимущественно холодных фронтах, представляют собой довольно опасное явление. Шквалы сопровождаются кучево-дождевыми облаками (КДО) с низким основанием и высокой вершиной.

Анализ облачности на космических снимках в дни с развитием шквалов разной интенсивности показал, что перед их возникновением в районах их развития или вблизи этих районов уже в ночные или утренние часы выявляются характерные скопления кучево-дождевых облаков, имеющие следующие параметры:

- округлую, овальную, в редких случаях неправильную форму с четкими границами;
- линейные размеры скоплений в 90% случаев в пределах 100 – 150 км, в 10% случаев более 450 км и всегда более 100 км;
- если характерные скопления кучево-дождевых облаков появляются в дневное время, но с ними могут быть связаны только слабые шквалы.

На рис. 2.30 показано изображение облачности для случаев развития сильных шквалов.

Шквалы, особенно очень сильные, имеют много общего со смерчами. Смерчем называют вихрь с вертикальной осью вращения (в отличие от шквалов с горизонтальной осью), сопровождающийся колоссальными скоростями ветра. Большинство смерчей связано с линиями шквалов или активными холодными фронтами с грозами. Обычно при смерче из грозового облака отщепляется облачный столб в виде воронки. Скорость ветра внутри смерча может достигать 100 м/с и более. Условия образования смерчей наиболее благоприятны непосредственно на линии приземного фронта, вблизи поверхности Земли (это узкая полоса шириной около 50 км по обе стороны линии фронта).



**Рис. 2.30 – Зона с опасными явлениями природы по данным спутника NOAA**

К таким условиям относятся:

- наличие развитых мощных скоплений КДО, которые хорошо видны на снимках облачности с ИСЗ на территориях до 200—400 км. Верхняя граница КДО в большинстве случаев составляет более 13 км;
- наличие фронта с большими градиентами скорости ветра по высоте, способствующими образованию вихрей;
- наличие большой неустойчивости и большой доли влаги во всей толще воздушной массы.

*Прогнозирование сильных осадков в холодный период года.* В умеренных широтах значимые осадки выпадают из слоисто-дождевых облаков с вкраплениями в них кучево-дождевых, в которых создаются условия для увеличения скорости падения водных капель или ледяных кристаллов по сравнению со скоростью восходящих движений воздуха. Особо опасными считаются осадки при интенсивности более 20 мм за 12 часов. В холодный период года осадки такой интенсивности формируются на атмосферных фронтах при подъеме влажных теплых воздушных масс в циклонах. Продолжительные по времени и интенсивности восходящие движения способствуют накоплению больших запасов влаги в облачных системах, а механизм циркуляции воздушных частиц в облачных системах – к образованию и выпадению осадков. Очень сильные осадки связаны с прохождением через пункт хорошо развитых циклонов преимущественно с юга или юго-запада. На космических снимках хорошо развитым южным циклонам соответствуют обширные облачные вихри диаметром более 500 км и с верхней границей облачности более 7 км. Сильные и очень сильные осадки никогда не отмечаются при перемещении воздушных масс с севера, северо-востока, востока и юго-востока.

В 100% случаев СГЯ на космическом снимке отмечены центральные части облачных вихрей. Более чем в половине случаев СГЯ отмечаются яркие широкие облачные полосы. Таким образом, опасные снегопады можно связать с облачностью циклонов и атмосферных фронтов.

*Прогнозирование осадков сильной интенсивности теплого полугодия.* К конвективным осадкам теплого полугодия относятся ливневые дожди и град. С сильными ливнями чаще всего связаны сели, паводки, подтопления, повреждения сельскохозяйственных культур и пр., а с градом – повреждения сельскохозяйственных и садовых культур, построек и автотранспорта.

Опасные и особо опасные конвективные осадки развиваются в основном в мезомасштабных облачных системах. Эти системы не всегда можно обнаружить в поле температуры и влажности. На космических снимках они появляются за 6 – 12 часов до осадков. Поэтому большое значение имеет методика прогноза опасных и особо опасных конвективных явлений с использованием всего комплекса синоптических, радиолокационных и спутниковых наблюдений.

Прогнозы всех указанных явлений можно составлять по следующей схеме:

- определение (расчет) траектории перемещения облачной системы за период прогноза;
- определение исходных параметров облачной системы вдоль траектории перемещения;
- определение эволюции параметров облачной системы;
- расчет прогнозируемого явления по существующим формулам или графикам.

Следует иметь в виду, что для образования града необходимо достижение верхней границы облака уровня естественной кристаллизации влаги, в противном случае прогнозируется выпадение ливневого дождя. Вероятность выпадения града определяют высотой изотермы 0°.

Опасный и особо опасный град возникает в определенных облачных системах, выделяющихся на снимках с ИСЗ в скоплениях кучево-дождевых облаков с четкими границами овальной, круглой или грибообразной формы размерами более 300 км или в зонах конвективной облачности молодого циклона с активным холодным фронтом.

### **2.3.2. Лесопожарный мониторинг**

Анализ возникновения пожаров в природных экосистемах показал, что возникающий пожар имеет характерную форму кольца, вытянутого в направлении ветра. При этом подветренная часть кромки (фронт) имеет увеличенную ширину по сравнению с наветренной (тыл), а их отношение пропорционально скорости ветра под пологом древостоя. Так, в сосняке при скорости ветра 3 м/с (4-й класс пожарной опасности) и температуре воздуха 300 К через 25-30 мин сформируется кольцо пожара, занимающее площадь около 0,4 га. Скорость фронта составляет около 2 м/мин, тыла – 0,3 м/мин. Ширина фронтальной кромки будет примерно равной 2,0 м, в том числе пламенной зоны 1,2 м и зоны горе-

ния углеродистых остатков 0,8 м. Для тыльной кромки эти значения составляют 0,3 и 0,1 м соответственно. Излучательные характеристики представляются в виде:

- на фронте средняя термодинамическая температура пламенной зоны  $T_n = 1100$  К, углеродистой зоны  $T_y = 800$  К, пульсации температуры в газовой фазе  $A_T = 200$  К, средняя частота пульсаций  $f = 10$  Гц;
- в тыльной области температуры  $T_n = 1000$  К и  $T_y = 800$  К.

В соответствии с формулой Планка при  $T = 1100$  К максимум излучения приходится на  $\lambda = 2,6$  мкм, при  $T = 1000$  К — на  $\lambda = 2,9$  мкм, при  $T = 800$  К — на  $\lambda = 3,6$  мкм. Коэффициент теплового излучения пламени  $\varepsilon = 0,8$ . Спектральные особенности наблюдаются на полосах поглощения воды и углекислого газа. Для углеродистой зоны коэффициент излучения близок к 1. Эти данные позволяют оценить средний по кромке ЛП лучистый поток в диапазоне 2 – 14 мкм. Он составляет около 80 кВт/м<sup>2</sup>. Мощность излучения кромки горения площадью 100 м<sup>2</sup> равна 24 000 кВт, т.е. лишь около 20% энергии пожара, остальные 20% расходуются на прогрев слоя атмосферы над пожаром (конвекционной колонки), почвы и несгоревших материалов.

Восходящее от пожара излучение ослабляется пологом древостоя и атмосферой. Коэффициент пропускания ИК-излучения пологом варьируется от 0,3 до 0,9. Принимая его среднее значение 0,6, получаем мощность результирующего лучистого потока, выходящего в атмосферу,  $\Phi = 14000$  кВт.

При обычных метеоусловиях пожары не причиняют существенного вреда и даже в ряде случаев приносят пользу лесному хозяйству. Они очищают лес от уже погибших деревьев и кустарников, тем самым снижая пожарную опасность, уничтожают очаги насекомых-вредителей и т.д. Такие пожары способствуют возобновлению леса. Вместе с тем на фоне длительной засухи пожары действуют как разрушительный фактор.

В настоящее время спутниковые данные — это единственно доступная информация о лесных пожарах в неохраемых лесах, существенно дополняющая данные, получаемые с помощью обычных методов на охраняемых территориях. Космический лесопожарный мониторинг способен решать следующие задачи:

- оценивать пожарную опасность лесных регионов и прогнозировать ее динамику;
- обнаруживать очаги лесных пожаров и определять их интенсивность, а также прогнозировать поведение крупных пожаров;
- проводить инвентаризацию послепожарного состояния лесов.

Пожарная опасность лесных регионов и возможность возникновения ЛП определяются влагосодержанием проводников горения. К их числу относятся: напочвенный покров (при низовых пожарах), подстилающая поверхность и торф (при подземных пожарах), древесно-кустарниковый ярус (при верховых пожарах). Подавляющее большинство ЛП возникает в результате загорания напочвенного покрова, что позволяет ограничиться при оценке условий их возникно-

вения расчетом влагосодержания только этой группы лесных горючих материалов (ЛГМ).

Каждый вид ЛГМ в напочвенном покрове характеризуется предельным влагосодержанием, при котором возможно распространение горения. Для зеленых мхов оно составляет 35 – 40%, для кустистых лишайников – 25 – 35%, отмершей травы и листьев – 20 – 25%, лесной подстилки – 50 – 60%, торфа – 40 – 50%. Такое состояние ЛГМ обычно наступает в лесу через 85 – 150 часов сушки в случае отсутствия жидких осадков, при наличии солнечной радиации и слабой облачности.

Интенсивность высыхания лесных горючих материалов в большей мере определяется температурой материала  $T_m$ , чем температурой воздуха  $t$ , поскольку последняя не отражает напрямую процесс радиационного теплообмена ЛГМ с окружающей средой. Оказалось, что если в течение периода сушки суммировать ежедневные температуры ЛГМ, то накопленная сумма температур  $\sum T$  будет связана линейной зависимостью с влагосодержанием ЛГМ: чем выше  $\sum T$ , тем меньше влагосодержание. Коэффициенты корреляции между суммой температур ЛГМ и влагосодержанием равны  $p = 0,68$  для травяной ветоши,  $p = 0,88$  для спада хвой сосны,  $p = 0,74$  для спада листвы березы. Тесная связь между  $\sum T$  и влагосодержанием ЛГМ позволяет по сумме температур за некоторый период оценивать влагосодержание и определять пожарную опасность как степень готовности лесных горючих материалов к самопроизвольному поддержанию горения. Это позволит использовать спутниковую информацию о радиационных температурах ЛГМ для оценки пожарной опасности. Коэффициент теплового излучения ЛГМ  $\varepsilon = 0,94 - 0,96$ , и потому радиационная температура  $T_p$  меньше температуры материала  $T_m$  всего на 4 – 6%. Максимум излучения подстилающей поверхности лежит в диапазоне 8 – 14 мкм, попадающем в окно прозрачности атмосферы. Таким образом, радиационная температура  $T_p$  – достаточно надежная оценка температуры ЛГМ  $T_m$ , определяемая, например, с помощью спутника NOAA (4-й и 5-й каналы сканера AVHRR). При этом учитывается, что хотя кроны деревьев и могут частично экранировать излучение, восходящее от подстилающей поверхности, но сами имеют такую же или даже несколько большую температуру, чем подстилающая поверхность.

Существующая система оценки пожарной опасности базируется на комплексном метеорологическом показателе Нестерова, учитывающем осадки, температуру и влажность воздуха на основании метеорологических наблюдений. Пожарная опасность ЛГМ оценивается косвенным путем по авторегрессионному соотношению

$$G_j = \xi G_{j-1} + t_j (t_j - \tau_j), \quad (2.27)$$

где  $\tau$  – температура точки росы в момент наблюдений, ближайший к 12 часам местного времени, °С,  $t$  – температура воздуха в тот же момент, °С,  $\xi$  – коэф-

фициент учета осадков,  $G_{j-1}$  и  $G_j$  – комплексные метеорологические показатели предшествующего и текущего дня.

К сожалению, очень неравномерная сеть метеостанций сокращается, это не позволяет надежно прогнозировать пожарную опасность по всей лесной территории. Выход из положения состоит в применении дистанционного спутникового зондирования, основанного на оценке пожарной опасности по сумме радиационных температур. В отличие от показателя Нестерова этот метод использует информацию, получаемую непосредственно с подлежащих контролю лесных территорий.

Иначе говоря, метод состоит в суммировании поля радиационных температур подстилающей поверхности. Суммирование производится ежедневно от одного момента выпадения жидких осадков до другого по результатам съемки в 13-15 часов местного времени, когда наблюдается суточный минимум влагосодержания ЛГМ. Моменты выпадения жидких осадков определяются по данным метеостанций и информации о влажности воздуха, получаемой с радиометра HIRS спутника NOAA. Далее, используя пороговый метод классификации, участки лесной территории относят к определенному классу пожарной опасности путем сравнения с заданными порогами суммы температур для каждого пикселя. Анализ серии полей радиационных температур дает прогноз динамики пожароопасной ситуации.

Если на момент съемки часть поверхности закрыта кучево-дождевыми облаками, поля радиационных температур дополнительно анализируются на других витках, полученных в тот же день, путем взаимного наложения полей и исключения облачности.

Показатель суммы радиационных температур хорошо коррелирует с метеорологическим комплексным показателем пожарной опасности Нестерова. По результатам расчета ежедневно составляются картосхемы текущей пожарной опасности (рис. 2.31).

Данные мониторинга лесных пожаров передаются в органы МЧС и авиалесоохраны. Эти сведения помогают подразделениям авиалесоохраны планировать полеты патрульных самолетов и, в конечном итоге, приносят экономический эффект.

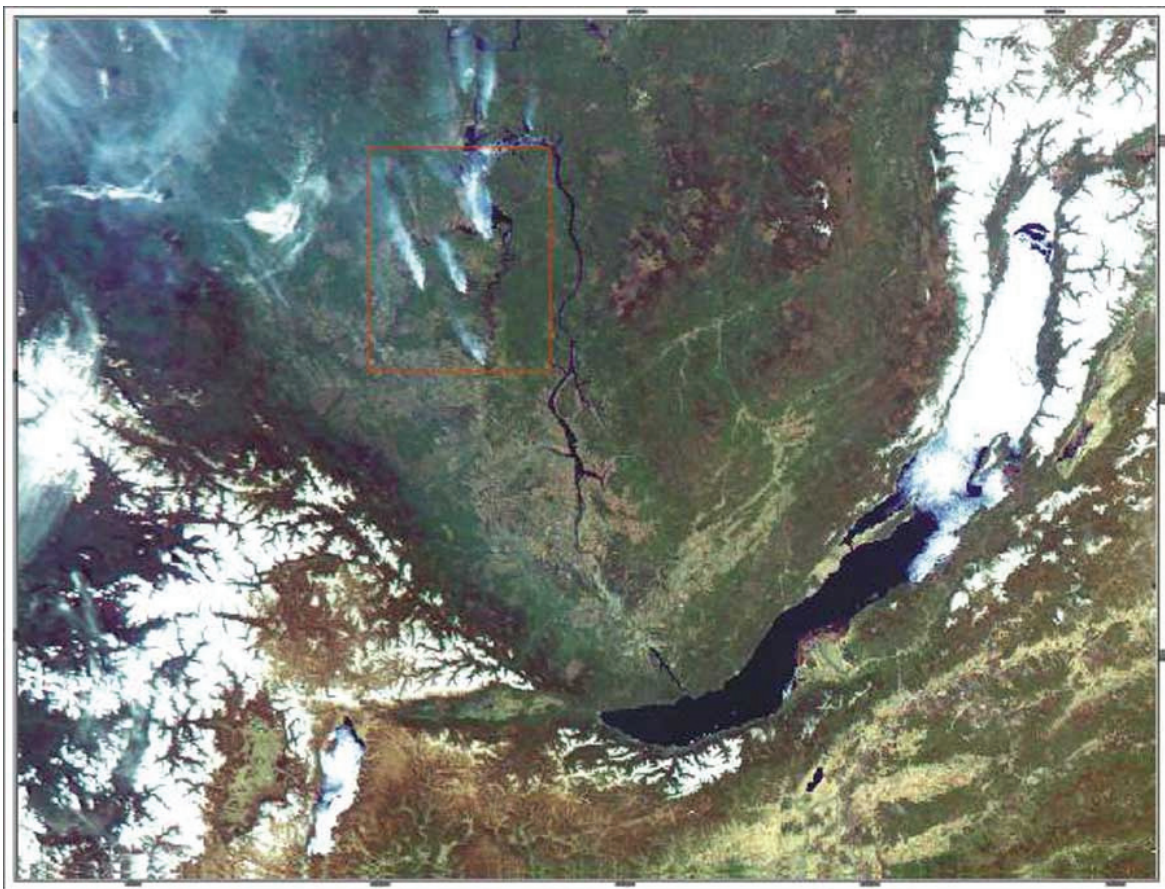
Обнаружение лесных пожаров – наиболее сложная часть лесопожарного мониторинга с использованием искусственных спутников Земли. При обнаружении ЛП возникают трудности, связанные как с природными причинами: затененностью лесного пожара кронами, облачностью, дымом, так и с техническими: недостаточной разрешающей способностью и чувствительностью регистрирующей аппаратуры космических средств, несовершенством элементов схемы передачи и обработки информации.

В настоящее время известно несколько подходов к обнаружению ЛП и использованием данных радиометра AVHRR, установленного на спутниках серии NOAA. Вегетационные индексы могут быть использованы не только для контроля состояния растительности, но и для обнаружения пожаров. Нормализованный вегетационный индекс рассчитывается по формуле



$$NDVI = (f_2 - f_1) / (f_2 + f_1), \quad (2.28)$$

где  $f_1$  – яркость объекта в видимом диапазоне (1-й канал радиометра AVHRR – 0,58—0,68 мкм);  $f_2$  – яркость объекта в ближнем инфракрасном диапазоне (2-й канал радиометра AVHRR – 0,725 – 1,0 мкм). Для растений в нормальном состоянии  $f_1$  и  $f_2$  заметно различаются. Интенсивность рассеянного солнечного излучения частицами дыма в этих каналах  $f_1 \approx f_2$ , поэтому при использовании  $NDVI$  можно построить изображение, на котором шлейфы дыма от ЛП выделяются на фоне растительности (рис. 2.32). Кроме дымовых шлейфов  $NDVI$  позволяет обнаруживать оставленный сильным повреждением растительности шрам в ландшафте, который может использоваться как исходные данные для оценки площади распространения пожара.



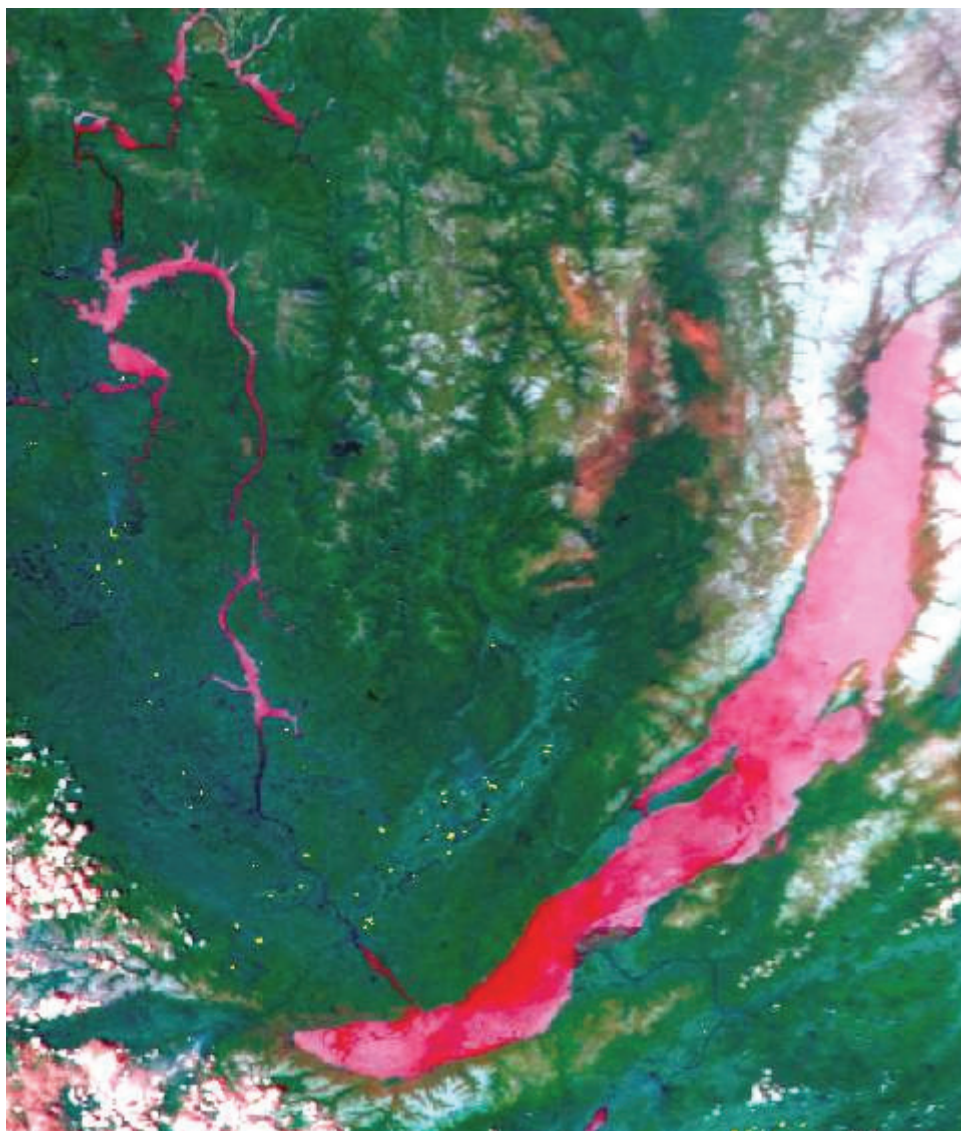
**Рис. 2.31 – Карта пожарной опасности, составленная по спутниковым данным**

Как уже указано, максимум теплового излучения от объекта с температурой  $T = 800$  К приходится на  $\lambda = 3,6$  мкм. Длина волны 3,5 – 4 мкм попадает в окно прозрачности атмосферы.

Сканер AVHRR спутника NOAA, 3-й канал которого работает на волнах длиной 3,55 – 3,93 мкм, можно эффективно использовать для обнаружения ЛП. К достоинствам спутника NOAA относятся также свободный доступ к данным, возможность наблюдать один и тот же участок поверхности 4-6 раз в сутки (при наличии двух-трех спутников), широкая (около 3000 км) полоса обзора. Однако



зависимость сигнала на выходе датчика 3-го канала от освещенности нелинейная, с выраженным насыщением.



**Рис. 2.32 – Применение вегетационного индекса при анализе лесопожарного состояния территории**

Самым существенным недостатком сканера AVHRR является сравнительно большое мгновенное поле зрения и соответственно невысокое разрешение –  $1,1 \times 1,1$  км, один пиксель вмещает изображение в 121 га при наблюдении в надир. Для наиболее успешного тушения ЛП необходимо оперативно обнаруживать пожары площадью не более 1 га. Опыт авиационной охраны лесов показывает, что средняя площадь обнаруживаемых с самолета пожаров составляет 3 – 5 га. Такие пожары ликвидируются десантом из 4-6 человек. Площадь свыше 25 га для одного и даже двух десантов считается критической, и пожары зачастую выходят из-под контроля.

Существующая методика мониторинга лесных пожаров позволяет обнаруживать с помощью сканера AVHRR пожары площадью меньше 10 га. При малоразмерном пожаре в мгновенное поле зрения радиометра попадает как вы-

сокотемпературная зона лесного пожара, которая занимает некоторую долю  $p$  пикселя ( $0 < p < 1$ ) и имеет температуру  $T = 800$  К, так и «холодный» фон, который занимает остальную часть пикселя ( $1 - p$ ) и имеет температуру  $T_\phi$ .

Пусть  $f_3$  – яркость некоторого пикселя в 3-м канале. При наличии мало-размерного пожара без учета влияния атмосферы

$$f_3 = pf_{3n} + (1 - p)f_{3\phi}, \quad (2.29)$$

где  $f_{3n}$  – яркость от пожара, если бы он занимал весь пиксель,  $f_{3\phi}$  – яркость от фона, если бы он занимал весь пиксель. По измеренному значению  $f_3$  с использованием формулы Планка можно оценить эффективную температуру  $T_3$  исследуемого пикселя. Наличие пожара вызывает увеличение  $T_3$ .

На первом этапе обнаружения пожара значение  $T_3$  сравнивается и порогом  $T_0$ . Если  $T_3 > T_0$ , то возникает подозрение на наличие пожара в пределах этого пикселя. Обычно пороговое значение температуры  $T_0 = 110 - 320$  К. Более точный подбор  $T_0$  обусловлен временем наблюдения и погодой. Днем в ясную солнечную погоду порог устанавливается более высоким, чем вечером или ночью

Однако обнаружение пожаров только по значению температуры в 3-м канале затруднено наличием засветок из-за отражения солнечного излучения от облачного покрова и водной поверхности. К тому же, высокое значение  $T_3$  может быть вызвано, например, приемом излучения от нагретой солнцем поляны, полностью занимающей весь пиксель.

На втором этапе анализируются координаты пикселя. Если пиксель попадает на водохранилище, озеро, реку, то это действительно ложная засветка от водной поверхности. Для распознавания облаков используют 1-й и 2-й каналы сканера AVHRR.

На третьем этапе информация 4-го или 5-го канала позволяет отличить мало-размерный пожар от нагретой поляны или аналогичного объекта. Для пожаров с температурой  $T_n = 800$  К разность температур 3-го и, например, 5-го каналов  $I_n = T_3 - T_5$  будет больше такой же разности для нагретой поляны. Здесь учтено, что радиационная температура пикселя, вычисленная по яркости  $f_4$  в 4-м или  $f_5$  в 5-м канале, определяется, в основном, температурой фона  $T_\phi$ , а излучение от пожара или отражение от облачного покрова не оказывают существенного влияния на  $f_4$  и  $f_5$ .

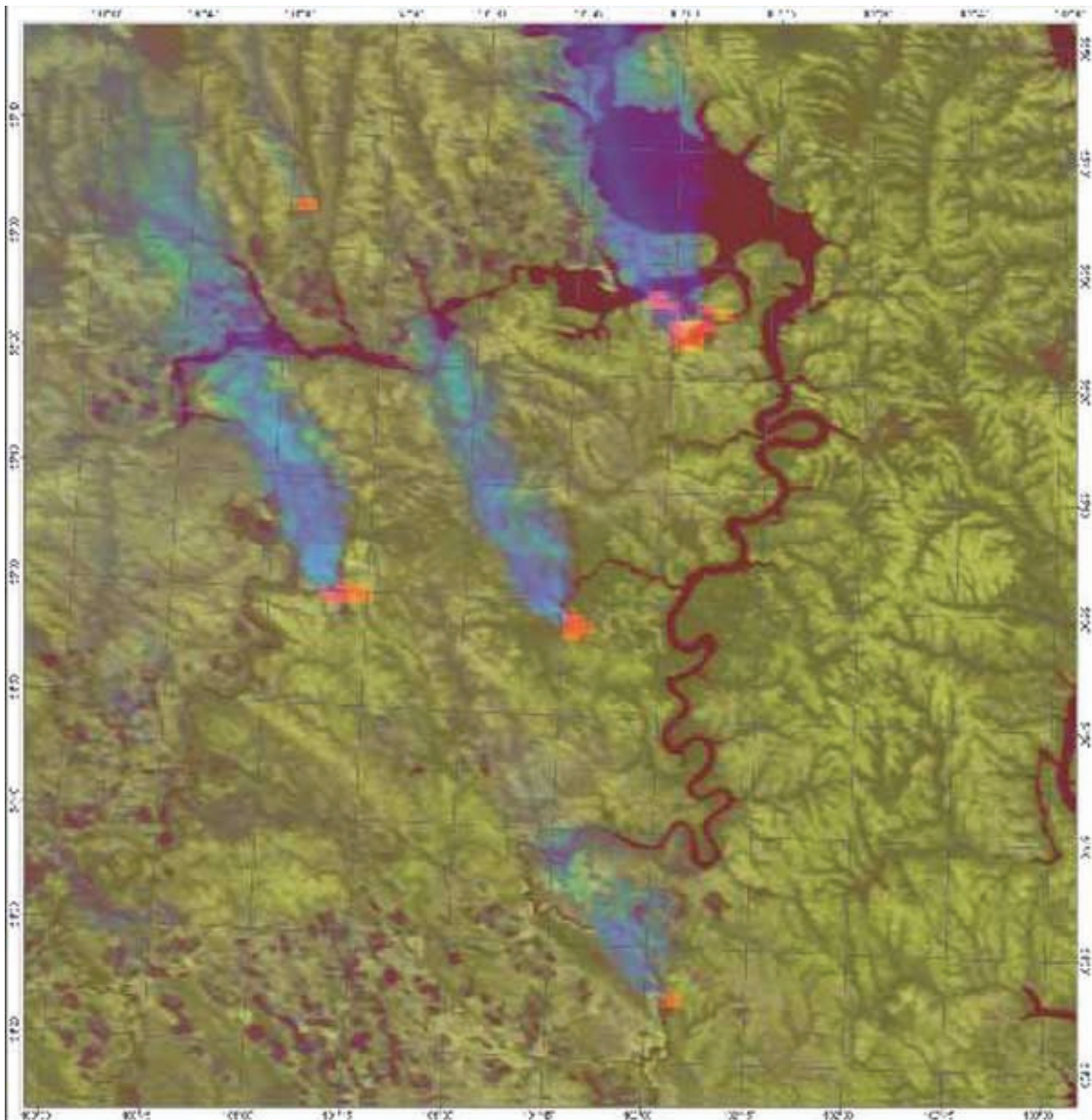
При наличии пожара  $I_n$  лежит в пределах 8 – 14 К. Величину  $I_n$  можно использовать как пожарный индекс, характеризующий интенсивность лесного пожара и зависящий от времени суток, погодных условий и времени года.

На последнем этапе уточняется площадь высокотемпературной зоны пожара. Соотношение (2.29) следует решать относительно  $p$ , так как  $f_{3n}$  можно заранее вычислить с помощью формулы излучения Планка при стандартной  $T_n$ . Яркость фона  $f_{3\phi}$  можно оценить по интенсивности излучения от пикселей с низким значением  $T_3$ . Из (2.29) находим, что относительная площадь высокотемпературной зоны равна

$$p = (f_{3n} - f_{3\phi}) / (f_3 - f_{3\phi}), \quad (2.30)$$

а абсолютная площадь  $S_n = pS$ , где  $S = 121$  га для спутника NOAA при наблюдении в надир. Площади высокотемпературной зоны соседних пикселей суммируются.

Результаты обнаружения отображаются на карте в электронном виде (рис. 2.33), а в таблицу вносятся номер пожара, его географические координаты, субъект и район, в котором он обнаружен, ближайший населенный пункт, расстояние от него до очага пожара, направление от населенного пункта на очаг пожара, площадь пожара в пикселях и гектарах. Эти сведения по каналам связи немедленно передаются в органы МЧС и авиалесоохраны.



**Рис. 2.33 – Цифровая карта лесных пожаров, составленная по результатам лесопожарного мониторинга КЛА**

Метод позволяет обнаруживать пожары полностью в автоматическом режиме. Тестирование с использованием экспериментальных пожаров показало,

что с помощью сканера AVHRR можно уверенно обнаруживать пожары площадью 6 га и более.

Послепожарная инвентаризация леса, т.е. оценка последствий лесных пожаров – один из главных компонентов мониторинга лесных пожаров, – представляет значительный интерес с точки зрения лесной экологии и углеродного баланса. Эта задача с использованием космической информации решается методами распознавания образов, рассмотренных нами в п.2.1.4. Опыт показал, что при послепожарной инвентаризации лучшие результаты дает метод наращивания областей.

### 2.3.3. Мониторинг растительного покрова

Контроль состояния наземных растительных покровов – одна из важнейших задач, решаемых методами дистанционного зондирования и включающих мониторинг посевов и пастбищ (рис. 2.34), а также лесов, лесостепных, степных и пустынных территорий. Приведем примеры использования космических средств для мониторинга сельскохозяйственных угодий и лесов.

Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий, контроль над землепользованием, прогноз урожаев – важные составляющие современной сельскохозяйственной практики. Установлено, что биомасса, накопленная растением за время  $T$ , линейно зависит от количества солнечной радиации, поглощенной растением:

$$P = \varepsilon_0 S \int_0^T I[t] dt, \quad (2.31)$$

где  $P$  – продуктивность, г/(с·м<sup>2</sup>),  $\varepsilon_0$  – скорость накопления биомассы г/Дж,  $I(t)$  – доля солнечной радиации, поглощаемая растением, с,  $S$  – солнечная постоянная, Вт/м<sup>2</sup>. Вегетационный индекс  $NDVI$  характеризует способность растения поглощать солнечную радиацию. Следовательно,  $NDVI(t)$ , отнесенный к единичному интервалу времени, и доля  $I(t)$  фотосинтетически активной солнечной радиации  $PAR$  приблизительно пропорциональны. Получаем

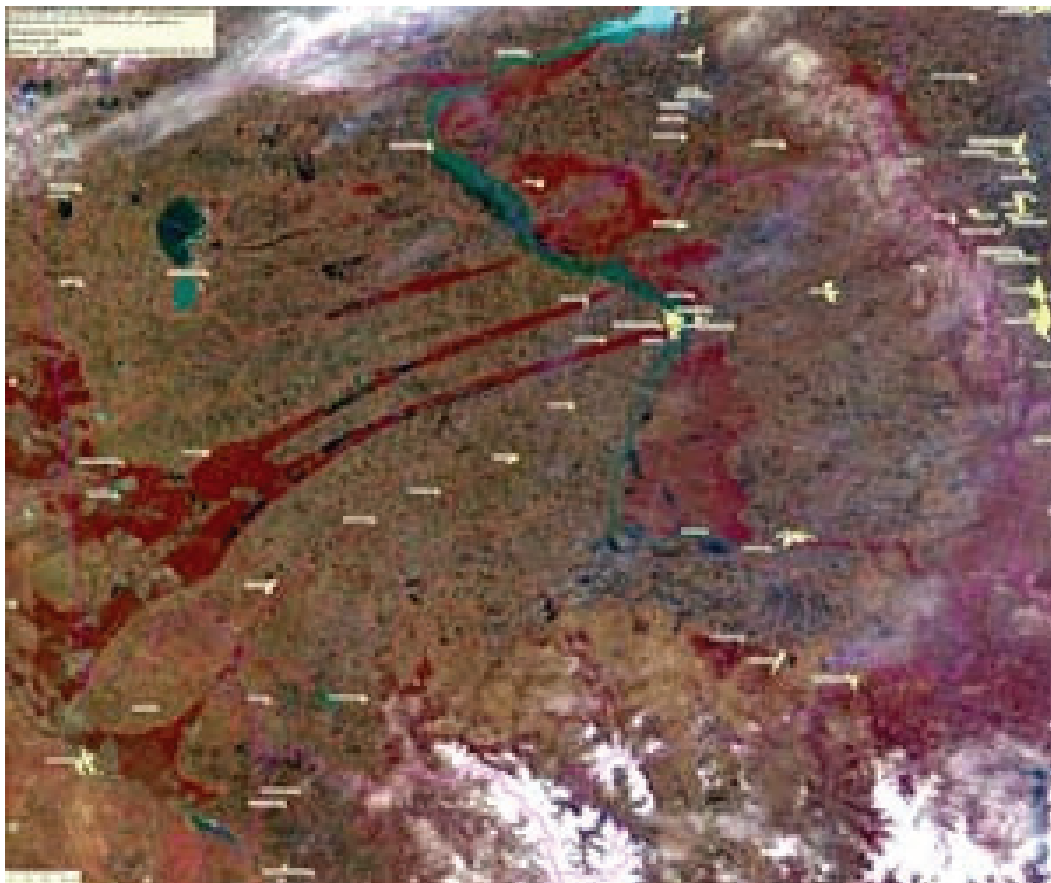
$$P \approx \varepsilon_0 S \int_0^T NDVI(t) dt. \quad (2.32)$$

Приведенные соотношения открывают возможность оценки по  $NDVI$  прироста биомассы, урожая и других характеристик, хотя для оценки урожая требуется использовать временной ряд  $NDVI$ , которым необходимо определять с большой точностью.

На точность определения  $NDVI$  влияют многочисленные факторы, в том числе корректность учета зенитного угла Солнца и геометрии наблюдений, влияние атмосферы, дрейф калибровки аппаратуры, дрейф орбиты спутника, искажения



изображения при наблюдении не в надир и др. Установлено, например, что дрейф калибровки аппаратуры, приведший к изменению *NDVI* всего в 0,05, приводит к погрешности в 30% при определении продуктивности пастбищ в тропиках. Разумеется, на продуктивность влияют многие факторы: сорт растения, местные условия – освещенность, температура, влажность, наличие удобрений и др., но часть из них в определенной степени отражена в *NDVI*.

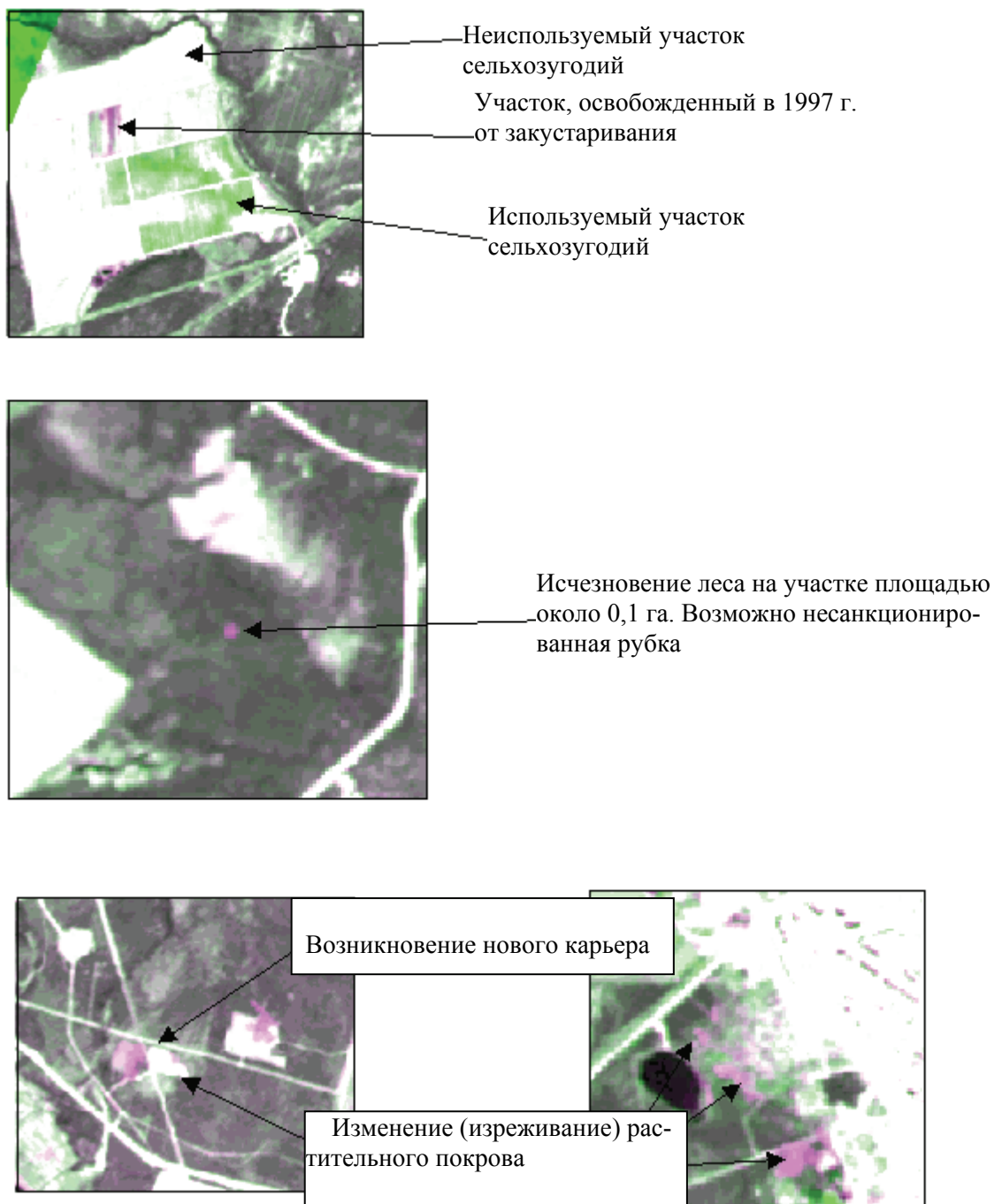


**Рис. 2.34 – Анализ пожара травы на сельскохозяйственных полях**

Многие авторы приводят корреляционные соотношения между *NDVI* (или другими оптическими характеристиками, измеряемыми дистанционно) и урожаем некоторых сортов сельхозкультур в определенных зонах, районах, условиях. Например, на засоленной почве урожай хлопка можно оценить как  $L = -679 + 4536,8 \cdot NDVI$  (кг/га). Более простой и чаще применяемой на практике процедурой является распознавание видов сельхозкультур, растущих в некотором районе, определение их состояния, занимаемой площади и границ (рис. 2.35). Для этого используются многоспектральные данные, как правило, высокого разрешения со сканеров МСУ-Э (спутник «Ресурс-01»), MSS (Landsat), HVR (SPOT).

Наконец, спутниковая информация позволяет обнаруживать районы, пораженные засухой, вредителями, вредными техногенными выбросами (рис. 2.36).

В последнее десятилетие в связи с появлением опасности глобального изменений природной среды и климата возрос интерес к лесному покрову (рис. 2.37) как к регулятору биосферных процессов.



**Рис. 2.35 – Анализ состояния сельскохозяйственных угодий**

Леса признаются наиболее надежной природной системой, связывающей углерод и способность предотвратить возникновение парникового эффекта. В связи с этим проблема сохранения лесов и усиления их экологических функций выходит за национальные рамки и становится частью мировой экологической политики. Изучение лесов в глобальном масштабе можно реализовать только с применением искусственных спутников Земли. Важной составляющей исследования состояния лесов является лесопожарный мониторинг, рассмотренный ранее. Используя искусственные спутники Земли, удастся распознавать породный состав леса и его изменения, контролировать вырубки (рис. 2.38). Только космические средства позволяют оценивать повреждения леса на больших территориях.

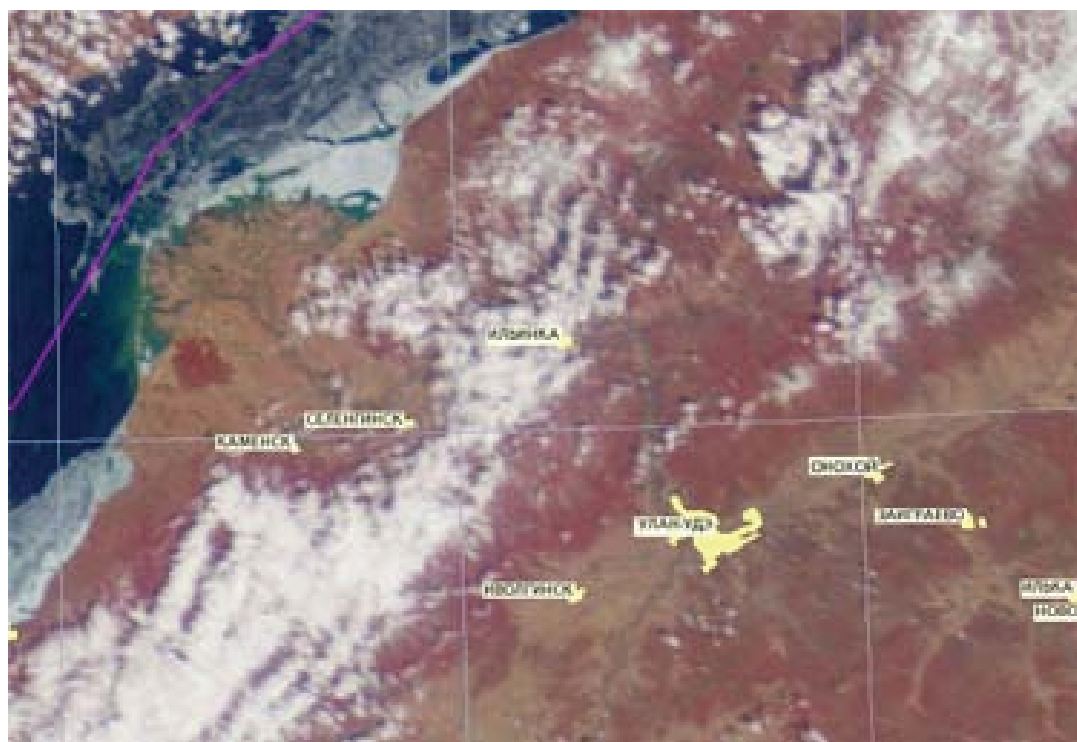


Рис. 2.36 – Снимок, характеризующий состояние территории (перенос взвешенных частиц)

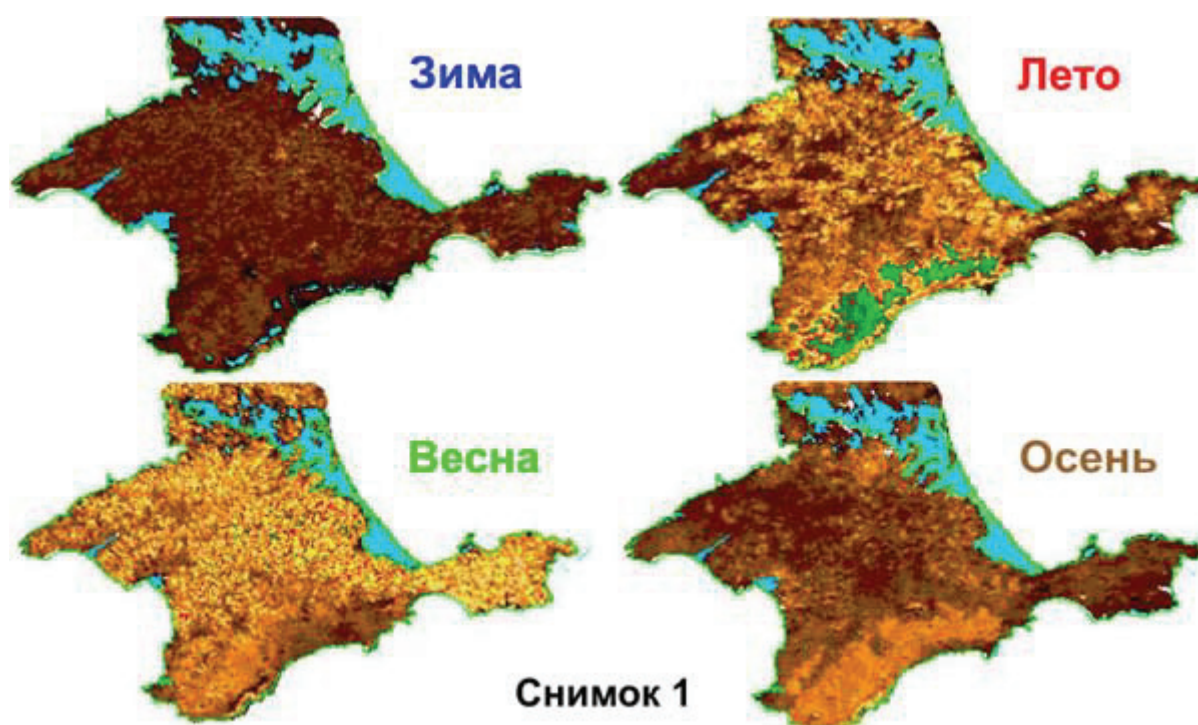


Рис. 2.37 – Анализ растительного покрова Крымского полуострова (в различные времена года)

Ежегодный выброс  $SO_2$  – основного загрязнителя воздуха, составляет около 2 млн. т. в год. В течение вегетационного периода растений техногенные выбросы переносятся преимущественно в юго-восточном направлении. При исследованиях в 70-80-е годы применялись черно-белые фотоснимки со спутника «Ме-

теор-Природа» (многозональные изображения в спектральных интервалах 0,5 – 0,6; 0,6 – 0,7 и 0,7 – 0,8 мкм с разрешением 50 м). Зимние снимки масштаба 1:2500000 применились для дешифрирования ореола загрязнений вокруг источников эмиссии. В 90-е годы, использовались данные, полученные с помощью аппаратуры МСУ-Э (спутник «Ресурс-01»), MSS (спутник Landsat) и AVHRR (NOAA).

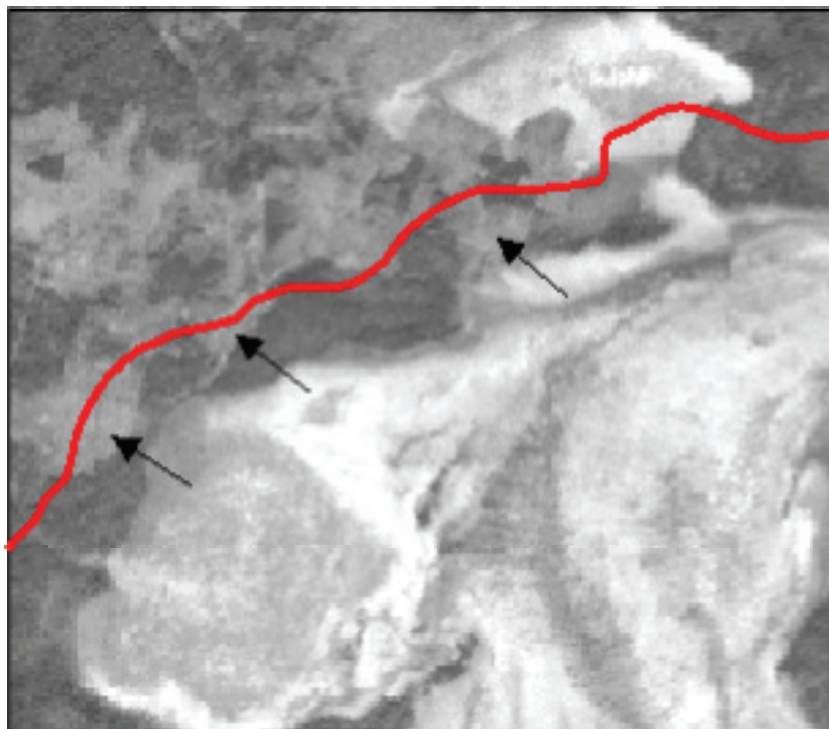


Рис. 2.38 – Анализ вырубки леса

#### 2.3.4. Мониторинг состояния водоемов

Космические средства контроля окружающей среды очень эффективные при изучении Мирового океана и внутренних водоемов. Для исследования Мирового океана созданы специальные спутники – «Океан-О» (Россия), MOS (Япония), SeaWiFS (США) и др. В частности, на спутнике NIMBUS-7 (США) был установлен сканер CZCS со спектральными каналами:

1-й – 0,433 – 0,453 мкм (голубой) для измерения хлорофилла в воде;

2-й – 0,51 – 0,53 мкм (зеленый) для измерения хлорофилла в воде;

3-й – 0,54-0,56 мкм (желтый) для измерения содержания желтого вещества в воде, для определения солености воды;

4-й – 0,66 – 0,68 мкм (красный) для оценки содержания аэрозоля в атмосфере;

5-й – 0,7 – 0,8 мкм (ближний ИК) для выделения суши и облаков;

6-й – 10,5 – 12,5 мкм (дальний ИК) для определения температуры.

Океан – это не только кладовая ресурсов, но и один из главных элементов общей системы экологического равновесия на Земле. Он сильно влияет на со-

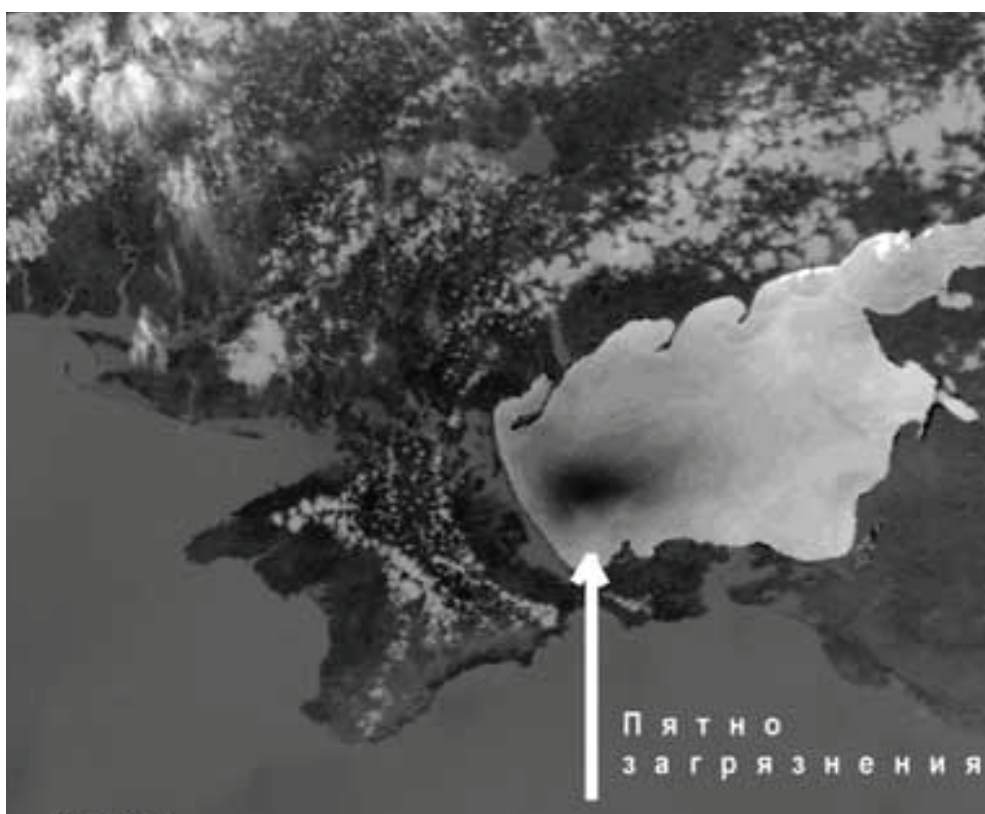


стояние атмосферы, формирование погоды, климат, энергетический и газовый балансы планеты, круговорот веществ в природе.

Возьмем, к примеру, одну из экологических проблем Автономной республики Крым - проблему контроля загрязнения Крымских морских прибрежных акваторий. Не стоит никому объяснять важность этой проблемы для крымского курорта. В отличие от африканской пыли, которая долетает в Крым изредка, мазутная пленка дарит радужный окрас лазурной морской глади каждый день. Одних только морских судов каждый день проплывает возле Крыма бесчисленное количество. Да и сама природа вносит в дело загрязнения свой вклад, создавая естественные выходы нефти из грифонов на морском дне.

Контролем загрязнений моря занимается гидрологическая служба. Однако при современном состоянии этой службы слово контроль применять не корректно. С натяжкой можно сказать - наблюдения.

Сегодня в решении таких проблем самый верный, надежный и оперативный помощник – космос. Круглосуточно, в любую погоду современные космические аппараты отслеживают места загрязнений морской глади с точным определением их географических координат (рис. 2.39)



**Рис. 2.39 – Анализ загрязнения Азовского моря в районе Северо-Казантипского газового месторождения**

Существующие методы мониторинга пространственной структуры, состояния и продуктивности морских и пресных водоемов, а также биоценозов суши на основе измерения распределения фитопигментов и биомассы в биосфере, позволяют оперативно определять продуктивные зоны, следить за их динамикой. Используется информация со сканеров CZCS и AVHRR, при дешифрирова-

нии космических данных учитывается подспутниковая информация с тестируемых участков, применяется атмосферная коррекция. На первом этапе обработки спутниковых данных пиксели с входными спектрами объединяются в классы по критерию минимальных расстояний, при этом выделяются основные объекты суши, воды и атмосферы. Далее оцениваются характеристики природных вод. Программные средства используют алгоритмы многомерного статистического анализа и учитывают оптические свойства вод. В частности, концентрация хлорофилла в воде определяется по уравнениям регрессии, связывающим концентрацию и яркость водной поверхности в разных спектральных каналах. Подобным же образом формируется информация о концентрации минеральных взвешенных веществ в термодинамической структуре вод, интенсивности волнения и других характеристиках, описывающих состояние водных экологических систем. Найденные характеристики лежат в основе классификации типов вод непараметрическими статистическими методами классификации с обучением.

Разработанная информационная система мониторинга позволяет по первичной продуктивности оценивать динамические процессы во вторичных экосистемах и выдавать диагноз отклонений от среднесноголетнего для данного района и времени года, своевременно регистрировать и отслеживать динамику и развитие последствий экологических катастроф, оценивать антропогенное воздействие на живую оболочку Земли, прогнозировать изменения экологических систем на основе обучения модели по циклической динамике.

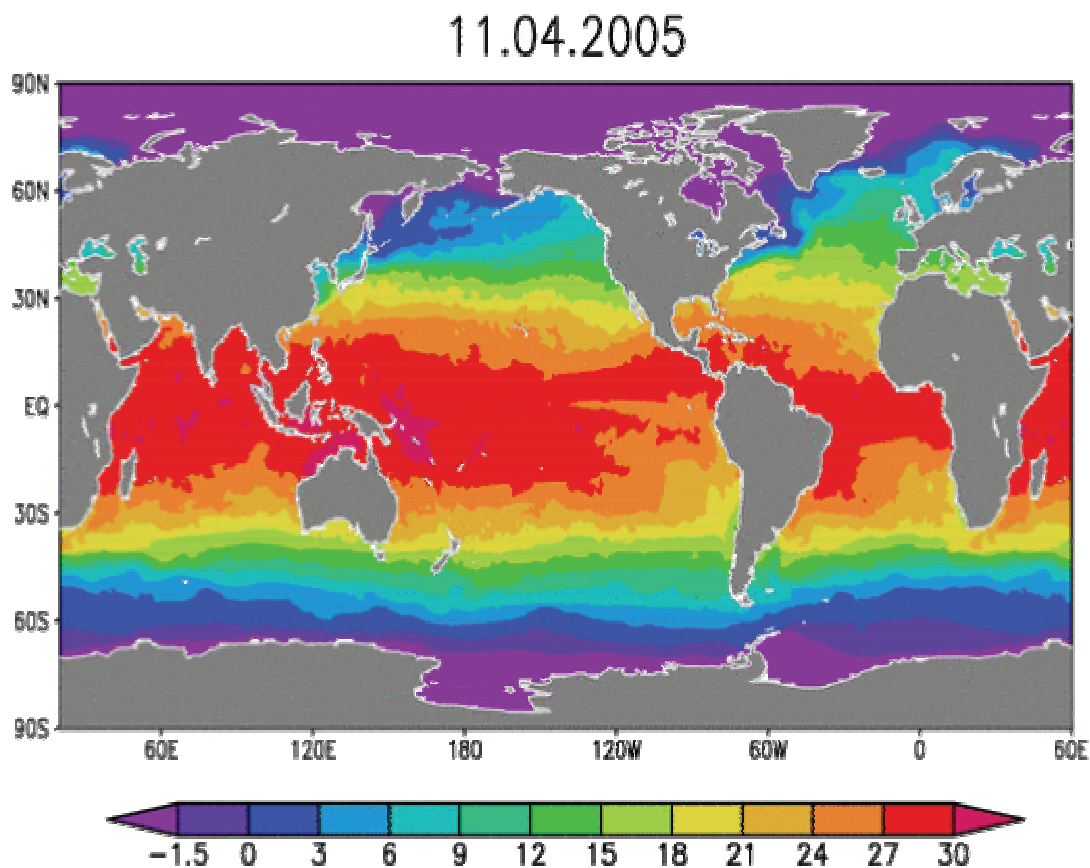
В качестве примера рассмотрим результаты спутникового мониторинга пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Тихого океана. Температура воды в океане – наиболее важная характеристика поверхностных водных масс. Распределение температуры воды определяется не только зональными климатическими особенностями, но и формированием высокоградиентных температурных зон (температурных фронтов) из-за взаимодействия различных структур течений, круговоротов и вихрей.

Данные о состоянии крупномасштабных полей температуры поверхности океана (ТПО) и температурных фронтов позволяют обнаружить зоны аномального нагрева или выхолаживания вод, что важно при оценке энергообмена между океаном и атмосферой. Кроме того, карты фронтальных зон и данные о горизонтальных градиентах ТПО необходимы для оценки действия различных гидродинамических процессов в океане, таких как ветровые нагоны, синоптические вихри, меандрирование течений.

Важным свойством фронтальных зон является формирование гидробиологических неоднородностей в океане. Фронтальные зоны могут влиять на распределение планктона и рыб или служить своеобразной границей, существующей длительное время и ограничивающей взаимодействие с другими типами вод и соответственно с биологическими структурами.

В северной части Тихого океана выявлена фронтальная зона, устойчивая уже в течение шести лет и образованная течениями Ойясио и Куроисио (рис. 2.40). Размеры этой зоны около 2000 км в поперечнике и 41 400 км в длину. Средние температурные градиенты составляют 1,7 – 0,8 К/км. Для сезонной изменчивости этой фронтальной зоны характерна структура в виде прерывистых

фронтальных зон размерами порядка 1000 км. Сезонная изменчивость в этом районе проявляется в размывании границ фронтальной зоны весной и осенью из-за уменьшения разности температур водных масс Ойясио и Куроисио и ослаблении процесса переноса вод. При переходе от холодного сезона к теплему в Беринговом море формируется фронтальная зона, ось которой может иметь как зональное, так и меридиональное направление.



**Рис. 2.40** – Глобальный объективный анализ температуры поверхности океана за декаду в градусах Цельсия по данным спутниковых наблюдений

По спутниковым данным проведены значительные по объему исследования сезонной и межгодовой динамики концентрации хлорофилла в поверхностном слое Мирового океана в глобальном и региональном масштабах. Это, в частности, позволяет находить зоны, перспективные для океанического рыболовства.

Разработанные программные средства используются для выявления динамики гидробиологических и гидрологических характеристик водохранилищ с помощью спутниковых измерений. Эти средства можно также применять для исследования динамики пигментов фотосинтеза наземной растительности и решения практических задач при диагностике антропогенного воздействия крупных энергетических комплексов и промышленных предприятий на окружающую среду, при мониторинге других природных динамически процессов, таких как лесные пожары, весеннее снеготаяние и паводки.

Программа «NOA» предназначена для анализа температурных полей океанической поверхности и использует карты распределения температуры, полученные путем усреднения по квадратам размерностью  $18 \times 18$  км спутниковых данных со сканеров CZCS и AVHRR. В процессе анализа необходимо выявить пространственно-временную изменчивость температуры поверхности океана, построить последовательные изображения, на которых прослеживается динамика фронтальных зон и фронтальных разделов.

### **2.3.5. Мониторинг состояния снегового и ледового покрова**

Важнейшее практическое применение спутниковая информация находит в гидрологии и гляциологии при наблюдении снегового и ледового покрова, при мониторинге паводковых явлений, при обеспечении судоходства в морях.

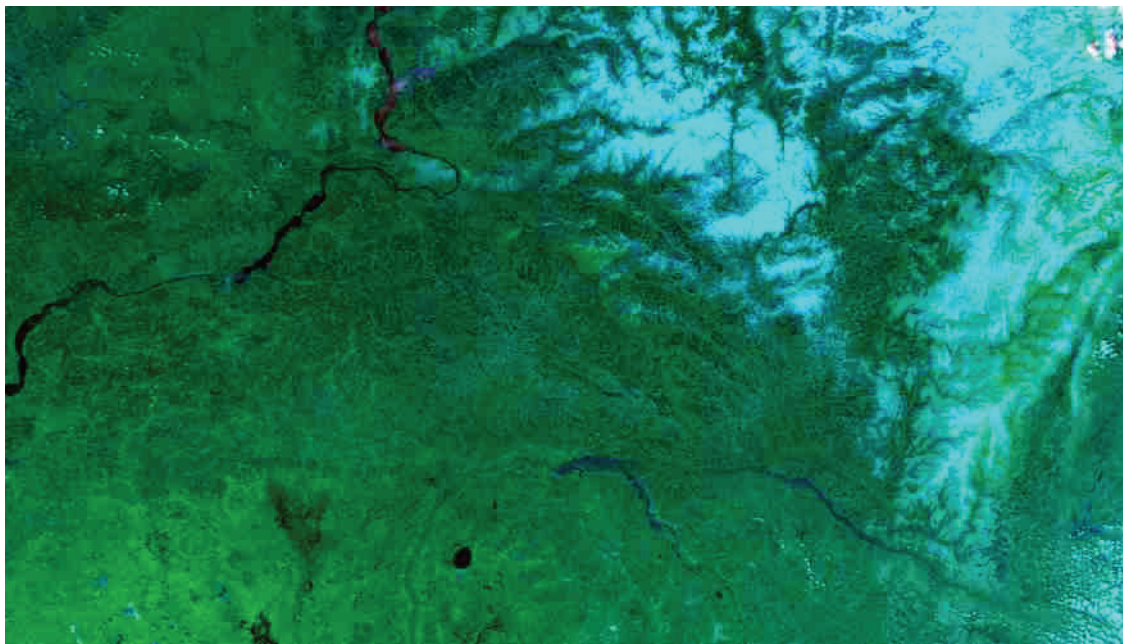
*Обнаружение техногенного загрязнения местности.* Снеговой покров зимой и в начале периода снеготаяния – удобный индикатор техногенного загрязнения местности. Например, при исследовании деградации лесов в промышленном районе выявлено соответствие между ореолом загрязнения снегового покрова, обнаруженного по зимним космическим снимкам, и концентрацией тяжелых металлов (Cu, Ni, Co) в почве, которая в верхних почвенных горизонтах (0 – 10 см) превосходит фоновый уровень в 10 – 1000 раз в радиусе до 40 км от источника эмиссий.

*Определение площади заснеженности.* Важной задачей наблюдения снегового покрова является оперативное определение площади заснеженности, что необходимо для прогноза стоков рек. В качестве примера рассмотрим результаты исследований, проведенных с использованием информации со спутника NOAA. При обработке изображений, прежде всего, было необходимо разделить пиксели на три вида: а) содержащие изображение снега (льда); б) относящиеся к изображению облаков; в) содержащие изображения почвы и растительности. Снег и облака обуславливают наиболее яркие фрагменты изображения в видимой части спектра (1-й канал AVHRR – 0,58 – 0,68 мкм), причем облака имеют приблизительно одинаковую яркость в видимой области и в нижнем инфракрасном диапазоне (2-й канал – 0,725 – 1,0 мкм). Яркость снега (льда) во 2-м канале меньше, чем облаков, и может составлять менее 60% их яркости. Изображения почвы и растительности имеют во 2-м канале большую яркость, чем в 1-м.

Для разделения пикселей на три указанных вида целесообразно использовать вегетационный индекс *NDVI*, что позволяет в удобной форме выделять снег (лед) на фоне облаков и участков, свободных от снега (льда) (рис. 2.41).

Это дает возможность уверенно различать снег, облака и свободную от снега поверхность. При этом талый, насыщенный водой снег выглядит серосиним или даже сине-черным. Четко выявляется рисунок рельефа: в долинах, где теплее, мокрый снег более серый, чем сухой снег на водоразделах, который выглядит здесь светло-голубым. В долинах снег сходит раньше, поэтому красно-бурые участки сначала появляются на дне долин. В ходе таяния они постепенно разрастаются, поднимаясь на возвышенные водораздельные пространства. Об-

лака верхнего яруса (перистые и перисто-слоистые), отличающиеся незначительной водностью и почти прозрачные для солнечной радиации, как бы накрывают участки изображения поверхности земли белой прозрачной вуалью, через которую «проглядывают» голубой снег и красно-бурые талые участки. Сплошные слоисто-кучевые облака с высокой водностью и значительной вертикальной мощностью изображаются в виде рисунка белого сравнительно однородного тона.



**Рис. 2.41 – Анализ границы снежного покрова**

Для нахождения площади заснеженности используется следующая методика. Оператор выбирает фрагменты изображения, на которые интересующая площадь свободна от облаков. Для создания обучающих выборок задается два типа эталонных участков: заведомо заснеженный и заведомо свободный от снега (например, расположенным ниже по высоте или южнее исследуемого района). Для каждого типа эталонов и каждого спектрального канала подсчитывается среднее значение яркости пикселя и стандартное отклонение яркости. Таким образом, получаются восемь характеристик эталонов: средние значения яркости для снега (льда) и для фона (почва, растительность) в 1-м и во 2-м каналах, а также стандартные отклонения в 1-м и во 2-м каналах.

Для автоматического разделения изображения в пределах выделенного водосбора на участки двух классов – заснеженные и свободные от снега – используется соответствующий алгоритм. Заключительная процедура состоит в подсчете числа пикселей, относящихся к заснеженным участкам, и в вычислении площади заснеженности.

*Обнаружение ледовых заторов на реках.* Используя космически информацию, можно своевременно обнаруживать опасные природные явления на реках. Как и при определении площади заснеженности, подсчитывался вегетационный индекс  $NDVI$  на интересующие районы. Это позволило различать облака, снег/лед, свободную ото льда поверхность воды и участки суши. На космических



изображениях хорошо просматривались затопленные площади. Эти данные, немедленно передаваемые в орган и МЧС, незаменимы при мониторинге чрезвычайных ситуаций и служат основой для планирования мероприятий по уничтожению затором.

*Контроль ледового покрова.* Получению четких изображений в оптическом диапазоне сильно мешает облачность (рис. 2.42). С этой точки зрения перспективно применение радиолокационных изображений с искусственных спутников Земли. Особенно активные радиоволновые методы целесообразно использовать для оперативного контроля кромки ледостава на реках и водохранилищах в осенний, зимний и весенний периоды, для своевременного обнаружения и картирования зажорно-заторных явлений, для обнаружения разливов рек, пленки нефтепродуктов на поверхности водоемов.



**Рис. 2.42 – Анализ ледового покрова Черного и Азовского морей**

Одной из важнейших задач, которую можно успешно решать методами активной радиолокации, является ледовая разведка в морях. Судоходство связано с плаванием судов в сложной ледовой обстановке. Навигационный период обычно проводится при неблагоприятных погодных условиях – частых снегопадах и туманах, густой облачности. Это затрудняет использование авиации и применение спутниковых данных оптического диапазона при разработке безопасных маршрутов караванов судов.

Даже при снегопаде, тумане, облачности на радиолокационных изображениях хорошо просматриваются участки, свободные ото льда. На них среди льдов любого возраста отчетливо видны каналы и разводья. Различные по своим параметрам льды по-разному воспроизводятся на изображениях, имеют свои

отличительные особенности и характерный рисунок. Ряд особенностей ледяного покрова выявляется только при радиолокационном обзоре и не обнаруживается в оптическом диапазоне. Радиоволны без существенного ослабления проникают сквозь снежный покров толщиной 40 см и более, если он не насыщен водой. Под слоем снега четко просматривается структура льда, выделяются замерзшие каналы и разводья, а также некоторые другие особенности ледяного покрова. Однако определение важнейшей характеристики ледяного покрова – его возраста – наиболее сложный элемент радиолокационной ледовой разведки, так как возраст можно оценить лишь по косвенным признакам.

### **2.3.6. Мониторинг состояния атмосферы**

К важным достижениям космического дистанционного зондирования относится оперативное определение поля вертикальных профилей земной атмосферы (параметры: температура (рис. 2.43), влажность и др.). В настоящее время аппаратура TOVS для исследования поля вертикальных профилей атмосферы установлена на спутниках серии NOAA.

Радиометр TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) представляет собой комплекс из трех независимых систем, данные которых могут быть использованы для восстановления вертикальных профилей температуры, влажности воздуха, поля ветра и других параметров:

- 20-канальный сканирующий ИК-спектрофотометр HIRS-2I имеет 19 спектральных каналов в инфракрасной области спектра и один видимой, разрешение в подспутниковой точке 17,4 км, полоса обзора 2600 км;

- 3-канальный сканирующий стратосферный ИК-спектрофотометр Stratospheric Sounder Unit (SSU) имеет три спектральных канала в полосе поглощения углекислого газа, разрешение в подспутниковой точке 147,4 км, полоса обзора 1470 км;

- 4-канальный сканирующий радиометр Microwave Sounder Unit (MSU) микроволнового диапазона 50 – 58 ГГц имеет четыре канала в полосе поглощения кислорода, разрешение в подспутниковой точке 109,0 км, полоса обзора 2350 км.

В состав программного обеспечения станции входит пакет вертикального зондирования атмосферы TOVS ITPP. Пакет содержит программы выделения из потока данных информации TOVS, радиометрической калибровки, географической привязки, собственно определения вертикальных профилей атмосферы. С помощью этого пакета можно вычислить вертикальное распределение температуры воздуха, температуру точки росы, значение общего содержания озона в атмосфере, температуру и давление на поверхности Земли и на верхней границе облачности. Поле вертикальных профилей атмосферы определяется на неравномерной сетке точек (до 600). Объем получаемых данных с одного прохода спутника составляет около 250 кбайт.

Расположенные на различной высоте слои атмосферы имеют разную температуру и давление, при этом вертикальное распределение концентрации некоторых газовых составляющих, например, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, можно считать известным

и неизменным. Для измерения характеристик атмосферы используют методы спектроскопии газов. Элемент атмосферы излучает, поглощает, рассеивает радиацию во всех направлениях. Интенсивность и длина волны линий в спектрах ряда газов, например,  $\text{CO}_2$ , зависит от параметров состояния элемента атмосферы (температуры, давления). Производя измерения на различных длинах волн внутри конкретной полосы поглощения, удается выполнять вертикальное сканирование атмосферы в определенном диапазоне высот, т.е. измерять высотные профили температуры или удельной концентрации газовых составляющих атмосферы (в зависимости от выбранной полосы поглощения).

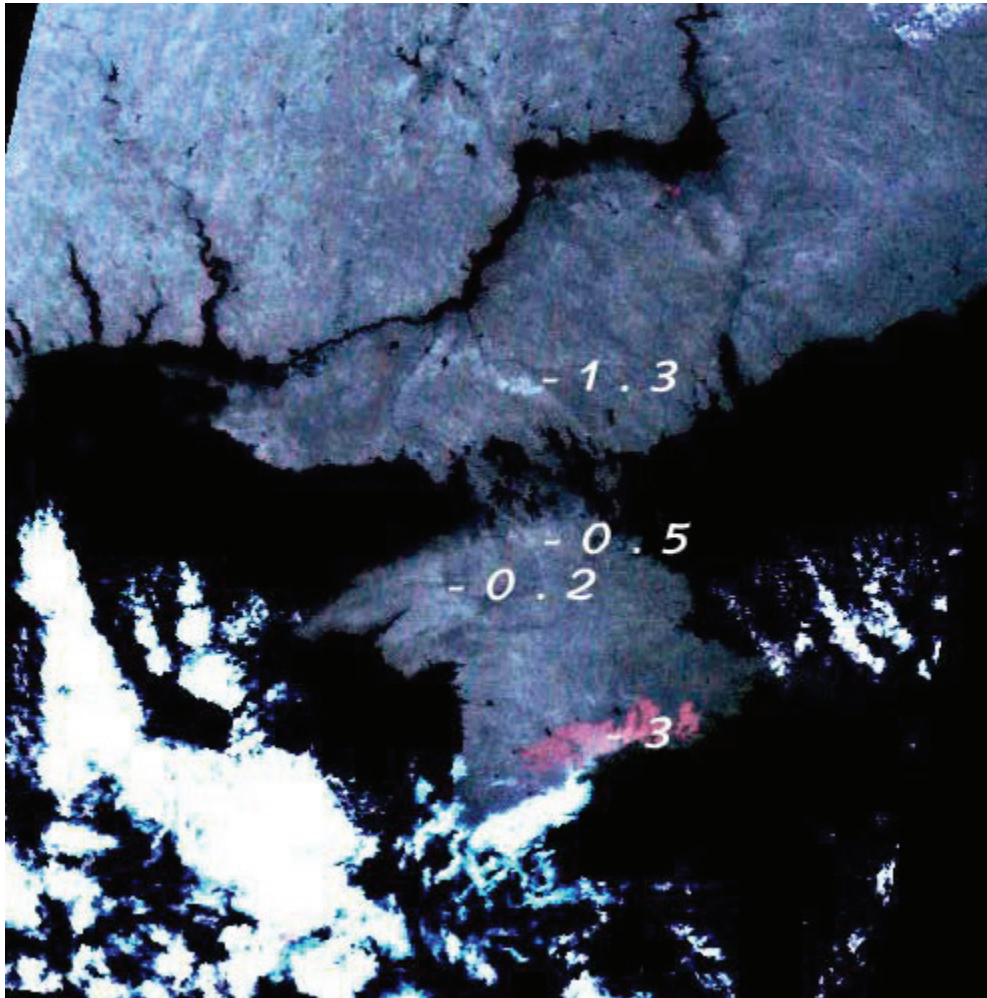


Рис. 2.43 – Анализ профилей температуры атмосферы (юг Украины)

Совокупность процессов излучения, поглощения, рассеяния радиации элементом атмосферы описывается уравнением радиационного переноса, которое в общем виде имеет сложный характер. В ИК-диапазоне можно пренебречь рассеянием и упростить уравнение. Принимая ряд других упрощающих предположений (безоблачная плоскопараллельная атмосфера в состоянии термодинамического равновесия, независимость коэффициента теплового излучения  $\epsilon$  подстилающей поверхности от длины волны, пренебрежение эффектом переизлучения атмосферой радиации от подстилающей поверхности), можно записать уравнение радиационного переноса в виде:



$$I(\lambda, \varphi) = \varepsilon B[\lambda, T(p)] g[\lambda, T(p), q(p), \varphi]_{p=p_0} - \int_0^p B[\lambda, T(p)] T \{ \partial g[\lambda, T(p), q(p), \varphi] \} dp, \quad (2.33)$$

где  $I(\lambda, \varphi)$  – интенсивность излучения в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$  на верхней границе атмосферы (давление  $p = 0$ ), регистрируемая датчиком космического аппарата,  $B(\lambda, T)$  – функция излучения,  $T(p)$  и  $q(p)$  – профили температуры и концентрации поглощающих компонентов в зависимости от давления  $p$ ,  $g[\lambda, T(p), q(p), \varphi] = g(\varphi, p)$  – функция пропускания вверх на уровне давления  $p$  для угла визирования  $\varphi$  с вертикалью в точке измерения,  $p_0$  – давление на уровне подстилающей поверхности.

Первое слагаемое этого уравнения описывает излучение подстилающей поверхности (уровень  $p_0$ ), ослабленное поглощением в атмосфере, второе – собственное излучение атмосферы, прошедшее через слои и являющееся суперпозицией излучения разных слоев атмосферы.

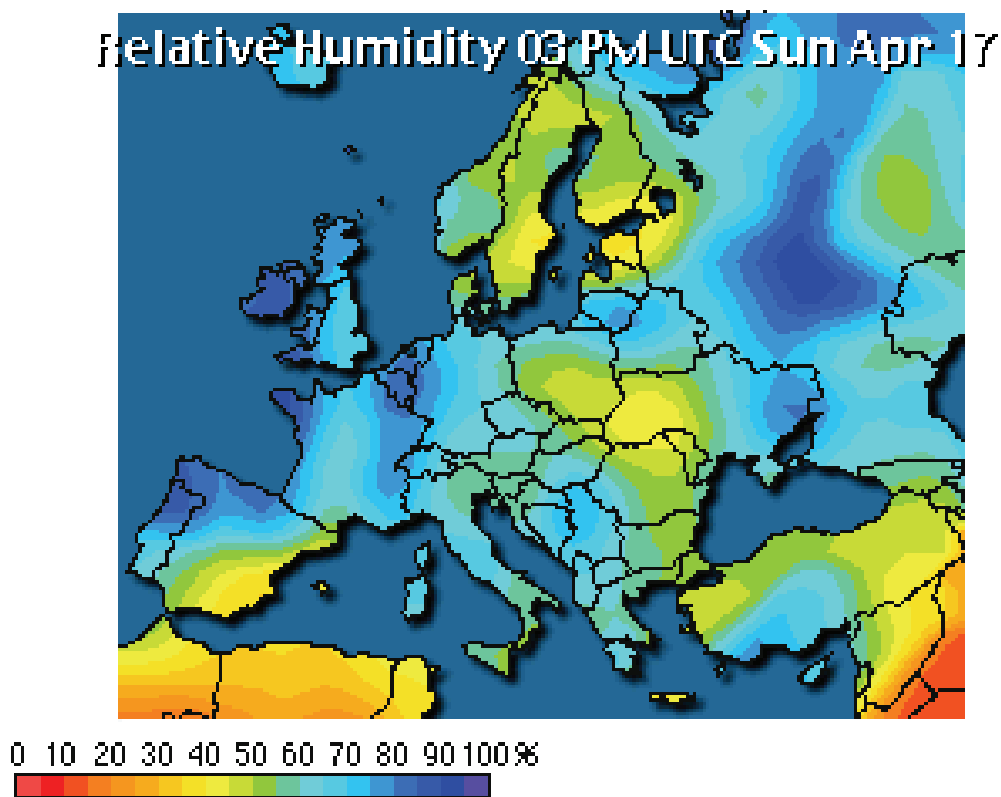
Приведенное уравнение или его модификации лежат в основе интерпретации спектральных измерений, используемых для дистанционного зондирования атмосферы. Вид функций пропускания, входящих в уравнение переноса, определяется характеристиками конкретных спектральных линий или полос: интенсивностью, формой и шириной контуров линий.

Количественная информация о распределении основных метеорологических параметров получается в результате интерпретации спектральных измерений в полосах поглощения углекислого газа, водяного пара. Предположение о том, что вертикальное распределение  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  известно и неизменно, позволяет разделить переменные в выражении для уходящего излучения, зафиксировать все параметры, кроме температуры, и найти профиль температуры.

Наличие облачности усложняет задачу. Для ее успешного решения используются новые длины волн, совершенствуется методика измерений. Если на спутниках первого поколения измерения проводились в полосе поглощения  $\text{CO}_2$  на 15 мкм и в окне прозрачности атмосферы 8 – 12 мкм, то в настоящее время наряду с расширением измерений в ИК-диапазоне привлекается радиометрия в микроволновом диапазоне.

Главная трудность нахождения функций  $T(p)$  и  $q(p)$  заключается в том, что процедура обращения полученного интегрального уравнения, относится к классу некорректных задач математической физики. Обратный оператор задачи неограничен, а решение является неединственным и неустойчивым по отношению к возмущениям. Поэтому для нахождения решений, адекватных реальному состоянию атмосферы, привлекается априорная информация, в качестве которой используется реперные среднеклиматические профили температуры  $T_0(p)$  и влажности. В частности, в пакете TOVS ITPP использована стандартная модель атмосферы NOAA, применяемая в США.

Уравнение относительно температуры нелинейное. Для его линеаризации можно искать не  $T(p)$ , а разность  $T(p) - T_0(p)$ . Полученные решением обратной задачи профили температуры и влажности (рис. 2.44) являются основой для вычисления других параметров атмосферы



**Рис. 2.44 - Карта влажности атмосферы, полученная на основе анализа спутниковой информации**

Интегрируя уравнение состояния влажной атмосферы при известном профиле температуры, получают профиль геопотенциала – потенциальной энергии тяготения, отнесенной к единице массы. При этом учитывается, что ускорение силы тяжести различно в разных точках на поверхности и над поверхностью Земли. Геопотенциальной поверхностью поля силы тяжести принято называть поверхность, перемещение по которой в любом направлении не требует затраты работы против этой силы. В метеорологии единицей геопотенциала считается геопотенциальный метр (гпм), который численно приблизительно равен обычному метру, но имеет размерность (Дж/кг). При обработке данных HIRS в качестве характеристики влажности воздуха определяется зависимость точки росы и ее дефицита от высоты. В метеорологии точка росы – это температура, до которой должен охладиться водяной пар, чтобы достичь состояния насыщения при данном влагосодержании и неизменном давлении, дефицит точки росы в °С характеризует скорость испарения воды.

По полю геопотенциала рассчитываются направление и скорость геотрофического ветра (рис. 2.45) – идеализированного равномерного и прямолинейного движения воздуха при отсутствии силы трения по изобарелиний равного давле-

ния. Действительный ветер в слоях атмосферы, лежащих выше 1 км, может быть близок к геострофическому.

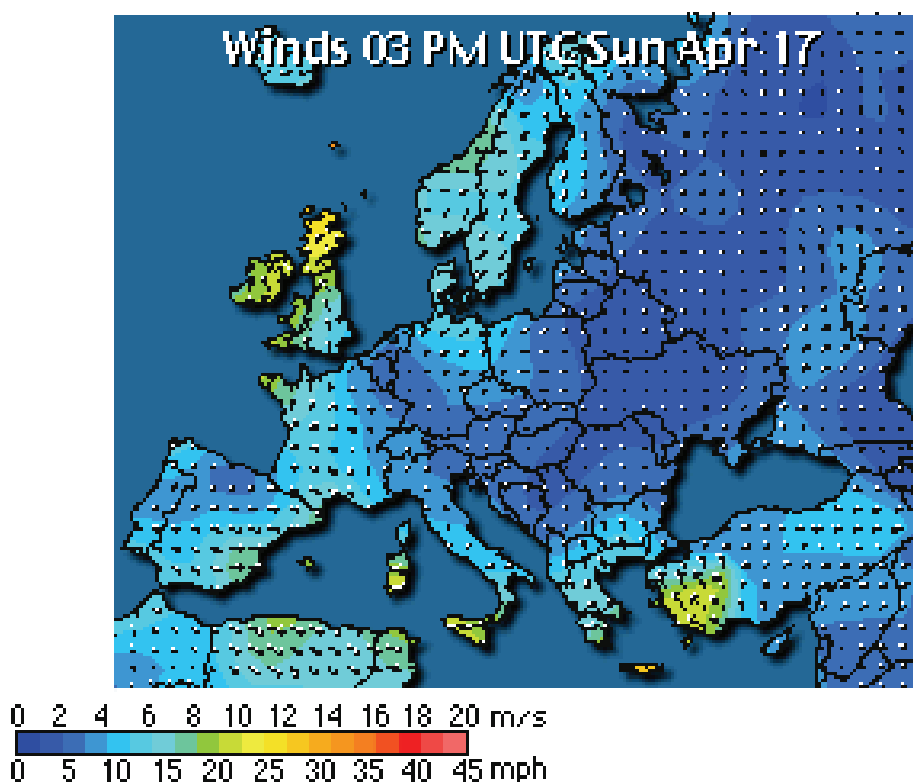


Рис. 2.45. – Карта скорости и направления ветра

Результаты спутниковых исследований вертикальных профилей атмосферы представляют значительный интерес для метеорологии и авиации. С точки зрения лесопожарного мониторинга важно дистанционное определение температуры и влажности в приземном слое и на различных высотах над поверхностью. Альтернативным методом получения вертикальных профилей атмосферы является аэрологическое зондирование с помощью радиозондов – миниатюрных метеостанций, поднимаемых на баллонах в воздух и снабженных радиопередатчиком. Данные о перемещении радиозонда характеризуют скорость и направление ветра.

Представляет интерес сравнение спутниковых данных и данных Аэрологического зондирования. Решение такого рода задач – необходимая часть дистанционных исследований, которые нуждаются в постоянной проверке их достоверности, точности, надежности. После запуска спутника обычно проходит продолжительный период верификации передаваемой информации, необходимой также в течение всего периода эксплуатации аппарата.

### **2.3.7. Мониторинг малых газовых компонент антропогенного загрязнения**

Изменение концентрации ряда газовых составляющих может вызвать нарушение разнообразных естественных процессов, протекающих в атмосфере и определяющих погоду и климат, а также различные нарушения экологического равновесия. За последние десятилетия зарегистрировано, например, неуклонное

повышение содержания в атмосфере углекислого газа, существенно влияющего на радиационный режим атмосферы.

Возрастание содержания таких компонент атмосферы, как, например, сернистый газ, может также вызвать дополнительное образование аэрозольных частиц, что, в свою очередь, обусловит изменение альбедо системы «Земля – атмосфера» и ее радиационных и физических свойств.

В табл. 2.4. приведены данные о влиянии малых газовых компонент атмосферы на природную среду. Приведенные в таблице примеры не исчерпывают, конечно, всего многообразия явлений, связанных с изменением газового состава атмосферы (так, в последнее время установлено существенное влияние фреонов и галогеносодержащих соединений на озоновый слой), однако они наглядно показывают настоятельную необходимость экологического мониторинга состава атмосферы для контроля над содержанием наиболее важных малых газовых компонент (МГК) атмосферы. Такие глобальные наблюдения за составом атмосферы в любое время суток позволяют осуществлять методы спутникового контроля.

**Таблица 2.4 – Влияние малых газовых компонент на окружающую среду**

<b>Газ</b>	<b>Влияние на окружающую среду</b>
CO	Токсичен, участвует в образовании смога и динамике озонового слоя
CH <sub>4</sub>	Образование аэрозольных частиц в газофазных реакциях, участие в кругообороте окиси углерода, образование водорода, H <sub>2</sub> O и формальдегида в стратосфере
N <sub>2</sub> O	Источник других окислов азота в стратосфере
NO	Образование NO <sub>2</sub> , атомарного кислорода и N <sub>2</sub> , влияние на динамику озонового слоя
HNO <sub>3</sub>	Связывает свободные окислы азота, что уменьшает их воздействие на озоновый слой, при диссоциации образует атомарный кислород, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>
Другие окислы азота (NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Вместе с NO влияют на динамику озонового слоя
NH <sub>3</sub>	Образование водяного пара при взаимодействии с гидроксидом, образование субмикронных аэрозолей
SO <sub>2</sub>	Образование субмикронных аэрозолей, влияние на концентрацию ионов водорода
H <sub>2</sub> S	При окислении образует SO <sub>2</sub>
Фреоны Cl, Br	Образование свободного хлора в стратосфере Активно участвуют в разрушении озона

В настоящее время для определения МГК атмосферы используют три пассивных спутниковых метода (рис. 2.46):

- прозрачности (ПРО). В котором информация о содержании МГК извлекается из спектров поглощения солнечного излучения при восходе и заходе Солнца за горизонт планеты;
- теплового излучения (ТИ). Метод, использующий измерения спектральной и (или) угловой зависимости собственного излучения планеты;
- отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ), в котором информация о содержании МГК извлекается из измерений восходящего излучения в УФ-, видимой и ближней ИК-областях спектра.

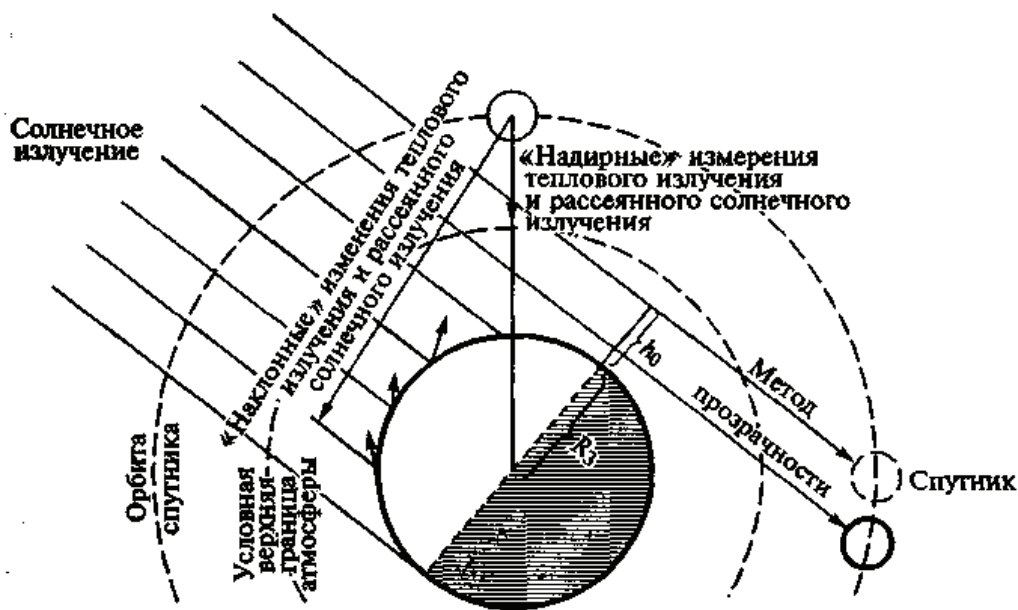


Рис. 2.46 – Спутниковые пассивные методы и геометрия измерений:  $R_З$  – радиус Земли;  $AO$  – прицельная высота (минимальное расстояние луча визирования от Земли)

При спутниковых измерениях МГТС применяют два типа геометрии измерений – надирную и касательную (на горизонт планеты), существенно отличающихся пространственным разрешением. Если при касательной геометрии может быть достигнуто относительно высокое вертикальное разрешение (1 – 4 км в зависимости от угловой апертуры спутникового прибора), но наблюдается довольно существенное горизонтальное осреднение (300 – 500 км и более), то при надирных измерениях имеет место обратная ситуация: вертикальное разрешение составляет 8 – 10 км и хуже, а горизонтальное может достигать 10 км.

Физической основой всех дистанционных методов измерения МПС является наличие спектрально локализованных полос поглощения в атмосфере, соответствующих различным малым газовым компонентам.

Как правило, дистанционные методы определения МКГ имеют комплексный характер, так как измеряемая на спутнике яркость излучения зависит не только от интересующего нас параметра, например, содержания МГТС в атмосфере, но и от других параметров физического состояния атмосферы и подстилающей земной поверхности. Так, в методе ПРО существенное влияние на ослабление излучения могут оказывать молекулярное и аэрозольное ослабление. В методе ТИ существенное влияние на формирование уходящего излучения

оказывает вертикальный профиль температуры атмосферы, а в методе ОРСИ – атмосферный аэрозоль и характер подстилающей земной поверхности. Кроме того, полосы поглощения (излучения) различных МПС могут перекрываться, что также является причиной необходимости комплексного подхода при решении задач дистанционного определения содержания МГК. Необходимо также отметить, что комплексный характер задачи предъявляет и соответствующие требования к спектральным характеристикам спутниковых приборов, обуславливая, в частности, необходимость измерения в более широком диапазоне спектра для исключения влияния «мешающих» параметров.

Специфика спутниковых измерений МГК состоит в том, что они включают в себя не только аппаратуру для измерений тех или иных характеристик полей излучения, но и совокупность исходной (априорной) информации и алгоритмов интерпретации данных измерений, используемой в этих алгоритмах для получения искомых параметров. В связи с этим точность дистанционных измерений МГК атмосферы зависит от следующих факторов:

- характеристик спутниковой аппаратуры, используемой для измерения; области спектра; числа, положения, ширины спектральных каналов измерений; угловой апертуры прибора; погрешности регистрации излучения и т.п.;
- точности задания оптических характеристик взаимодействия МГК с излучением (как исследуемого газа, так и мешающих компонент);
- точности задания (определения) других параметров физического состояния атмосферы (температуры, аэрозольного ослабления и т.п.);
- влияющих на перенос излучения;
- методики интерпретации данных измерений.

Прежде чем перейти к подробному рассмотрению методов ПРО, ТИ и ОРСИ, которые широко используются в спутниковых измерениях пространственно-временных вариаций МГК в атмосфере, приведем некоторые количественные данные о содержании МГК в атмосфере.

Основными газовыми составляющими атмосферы являются азот и кислород. Большое число других газовых компонент присутствуют в атмосфере в малых количествах. Концентрация многих из них существенно зависит от времени и места наблюдения. Ниже приводятся краткие данные о средних характеристиках содержания малых газовых компонент в земной атмосфере, об их пространственно-временной изменчивости, а также об источниках и стоках этих газов, что, в частности, необходимо для реальной оценки целесообразности использования тех или иных дистанционных методов измерений.

*Окись углерода (СО).* В настоящее время получены довольно обширные сведения о содержании СО в тропосфере и стратосфере. Окись углерода довольно хорошо перемешана в тропосфере. В тропосфере концентрация СО с высотой медленно убывает от  $8 \cdot 10^{-2}$  млн<sup>-1</sup> на высоте 4 км до  $4 \cdot 10^{-2}$  млн<sup>-1</sup> на уровне около 15 км.

Наблюдаются заметные широтные вариации содержания СО в атмосфере. Концентрация окиси углерода в южном полушарии в четыре раза меньше, чем в северном. Контроль над приземным содержанием СО позволил установить его

сезонный ход. Максимум наблюдается в конце мая, начале июня. Концентрация CO в эти месяцы возрастает примерно на 30%.

Анализ газового состава льдов Гренландии и Антарктиды показал, что за последние 100 лет значительного увеличения содержания CO в атмосфере не произошло.

*Метан (CH<sub>4</sub>).* Из всех известных примесных газов метан имеет, пожалуй, наибольшую тропосферную концентрацию. Средняя концентрация CH<sub>4</sub> в тропосфере составляет по многочисленным оценкам около 1,41 млн<sup>-1</sup>. Хорошо известны особенности вертикального распределения CH<sub>4</sub>. Выше тропосферы концентрация метана убывает со значительным градиентом, достигая значения приблизительно 0,7 млн<sup>-1</sup> на высоте около 28 км, а затем медленно уменьшается до значения порядка 0,25 млн<sup>-1</sup> на высоте 50 км. Резкое уменьшение концентрации CH<sub>4</sub> выше тропопаузы связано с его разрушением при взаимодействии с гидроксидом. В более высоких слоях атмосферы метан разрушается при взаимодействии с возбужденными атомами кислорода.

Отсутствие измерений концентрации метана в южном полушарии не позволяет сделать выводы о его широтном распределении. Достаточных данных о сезонных вариациях CH<sub>4</sub> в настоящее время нет.

Анализ состава льдов Арктики и Гренландии показал, что за последние 100-200 лет содержание метана в атмосфере повысилось (в отличие от CO) примерно в два раза. Это связано, вероятно, с постоянным увеличением количества метана, поступающего в атмосферу от предприятий нефтеперерабатывающей промышленности и транспорта

*Закись азота (N<sub>2</sub>O).* Закись азота довольно хорошо перемешана в тропосфере (среднее значение концентрации 0,25 млн<sup>-1</sup>). Выше тропосферы наблюдается значительное уменьшение концентрации N<sub>2</sub>O до 0,10 млн<sup>-1</sup>. Отсутствие достаточных экспериментальных данных о содержании N<sub>2</sub>O в атмосфере, особенно в верхних слоях тропосферы, не позволяет сделать каких-либо выводов о ее пространственных и временных вариациях.

*Окись азота (NO).* Измерений вертикального профиля NO очень мало. Приземные измерения концентрации окиси азота в атмосфере Лос-Анджелеса дали максимальные значения содержания NO около 1 млрд<sup>-1</sup>. Имеющиеся данные о его концентрации в стратосфере весьма противоречивы, так, например, по экспериментальным данным значения концентраций окиси азота в слое 11...26 км равны 1,0±0,2 млрд<sup>-1</sup>, теоретические расчеты примерно для тех же высот (17...23 км) дают значение концентрации NO на порядок меньше. Для высоты порядка 50 км значение концентрации окиси азота составляет около 0,66 млрд<sup>-1</sup> и уменьшается до 2,4·10<sup>-2</sup> млрд<sup>-1</sup> на высоте около 80 км.

*Другие окислы азота (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).* Измерений содержания высших окислов азота в атмосфере в настоящее время очень мало. Имеются лишь приземные измерения и измерения выше 20 км. В приземном слое воздуха концентрация NO<sub>2</sub> достигает значения порядка 0,1 млрд<sup>-1</sup>. Стратосферные измерения позволили обнаружить стратосферный слой, в котором концентрация NO<sub>2</sub> возрастает от 0,8 млрд<sup>-1</sup> на высоте 20 км до 7,8 млрд<sup>-1</sup> на высоте 28 км, а на высоте

50 км она убывает до  $0,23 \text{ млрд}^{-1}$ . В более высоких слоях атмосферы концентрация двуокиси азота становится еще меньше и на высоте около 70 км составляет  $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ млрд}^{-1}$ .

*Азотная кислота* ( $\text{HNO}_3$ ). Максимальные значения концентраций азотной кислоты примерно  $6 - 7 \text{ млрд}^{-1}$  наблюдаются на высотах 20...27 км, но они сильно зависят от времени и места измерения. Измерения содержания  $\text{HNO}_3$  в атмосфере позволяют сделать вывод о широтных изменениях ее концентрации. Содержание  $\text{HNO}_3$  возрастает в стратосфере по направлению от экватора к полюсу. Широтные вариации содержания азотной кислоты составляют порядка  $7 \text{ млрд}^{-1}$  для измерений в январе и июле в области высот около 22 км.

*Аммиак* ( $\text{NH}_3$ ). Концентрации  $\text{NH}_3$  в атмосфере незначительны. Так, например, получены следующие значения приземных концентраций аммиака: Франкфурт-на-Майне – 0,027 зимой и 0,025 летом, Санта-Мозиц – 0,0065, ФРГ – 0,009; Флорида – 0,007; Гавайи – 0,003  $\text{млрд}^{-1}$ . Основным источником  $\text{NH}_3$  является микробиологическая активность.

*Соединения серы* ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Большинство измерений  $\text{SO}_2$  проводились для приземных слоев атмосферы. Максимальные концентрации, наблюдающиеся в городах и промышленных районах, могут достигать  $0,3 \text{ млн}^{-1}$ . В связи с искусственным происхождением соединений серы и неравномерным распределением ее источников пространственные вариации  $\text{SO}_2$  очень велики от  $0,3$  до  $0,0002 \text{ млн}^{-1}$ . Последнее значение было зарегистрировано у поверхности океана. Содержание  $\text{SO}_2$  быстро уменьшается в приземном слое 0...1 км, а затем ее концентрация медленно приближается к значению порядка  $1 \text{ млрд}^{-1}$  на высоте около 3 км. Данные измерений для верхней тропосферы и стратосферы малочисленны, однако можно предполагать, что в верхних слоях атмосферы двуокись серы хорошо перемешана, среднее значение ее концентрации составляет около  $1 \text{ млрд}^{-1}$ . Отдельные вертикальные профили концентрации  $\text{SO}_2$  до высоты 3 км могут существенно отличаться друг от друга в зависимости от температурной стратификации атмосферы.

Сведения о содержании в атмосфере сероводорода ( $\text{H}_2\text{S}$ ) почти отсутствуют, за исключением нескольких измерений в промышленных районах, где его концентрация изменяется от 1 до  $10 \text{ млрд}^{-1}$ . В табл. 2.5 приведены средние концентрации, источники и стоки малых газовых компонент в атмосфере.

*Определение содержания малых газовых компонент на основе интерпретации измерений спектров прозрачности.* Одним из наиболее чувствительных и точных дистанционных методов определения содержания МГТС является метод, основанный на интерпретации измерений спектров прозрачности. Это обусловлено, в частности, большими значениями коэффициентов поглощения, а также возможностями измерений поглощения излучения на длинных трассах. Одним из широкораспространенных и эффективных методов рассматриваемого типа является метод измерения ПРО по Солнцу в видимой, УФ- и ИК-областях спектра (рис. 2.47).



**Таблица 2.5 – Средние концентрации, источники и стоки малых газовых компонент в атмосфере**

Газ	Средняя концентрация		Источники	Стоки
	в тропосфере	в стратосфере		
CO	0,12 млн <sup>-1</sup>	0,05 млн <sup>-1</sup>	Океан, автотранспорт, CH <sub>4</sub> , диссоциация CO <sub>2</sub> , разрушение хлорофилла почвы и водах, деятельность растений, лесные пожары	Окисление в стратосфере, биологическая активность в почве и водах, деятельность растений
CH <sub>4</sub>	1,41 млн <sup>-1</sup>	0,5 млн <sup>-1</sup>	Разрушение органической материи, океаны, нефтеперерабатывающие предприятия	Окисление гидроксидом, взаимодействие с возбужденным атомом кислорода
N <sub>2</sub> O	0,25 млн <sup>-1</sup>	0,1 млн <sup>-1</sup>	Океан, почва, неорганические удобрения	Фотодиссоциация в стратосфере, взаимодействие с возбужденным атомом кислорода
NO	–	0,5 млрд <sup>-1</sup>	Разрушение азота в стратосфере, разрушение аммиака, автотранспорт, мощные электростанции	Преобразование в NO <sub>2</sub> , водяным паром и атомарным азотом
HN0 <sub>3</sub>	–	6 млрд <sup>-1</sup>	Взаимодействие двуокси азота с гидроксидом, взаимодействие N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> с NO <sub>3</sub> водяным паром	Диссоциация с образованием атомарного кислорода, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub>
NO <sub>2</sub>	0,001 млн <sup>-1</sup>	5 млрд <sup>-1</sup>	Химические и фотохимические процессы в стратосфере (взаимодействие NO с озоном), транспорт	Химические и фотохимические процессы в стратосфере
NH <sub>3</sub>	0,08 млрд <sup>-1</sup>	–	Микробиологическая активность	Окисление гидроксидом
S0 <sub>2</sub>	1 млрд <sup>-1</sup>	–	Промышленность, вулканы, окисление сероводорода	Океан, вымывание дождями, сухое выпадение в осадок
H <sub>2</sub> S	1...10 млрд <sup>-1</sup>	–	Почва, океан	Окисление озоном в S0 <sub>2</sub>

Метод ПРО относительно прост в интерпретационном смысле, так как в первом приближении можно учитывать только один процесс трансформации излучения в атмосфере – истинное поглощение газовыми составляющими. Однако в ряде случаев необходимо оценивать и принимать во внимание ослабление за счет рассеяния и поглощения на аэрозоле. Именно с помощью этого метода было обнаружено присутствие в атмосфере многих МГТС. В настоящее время метод ПРО широко используют при изучении состава атмосферы в наземных, самолетных, аэростатных и спутниковых экспериментах.

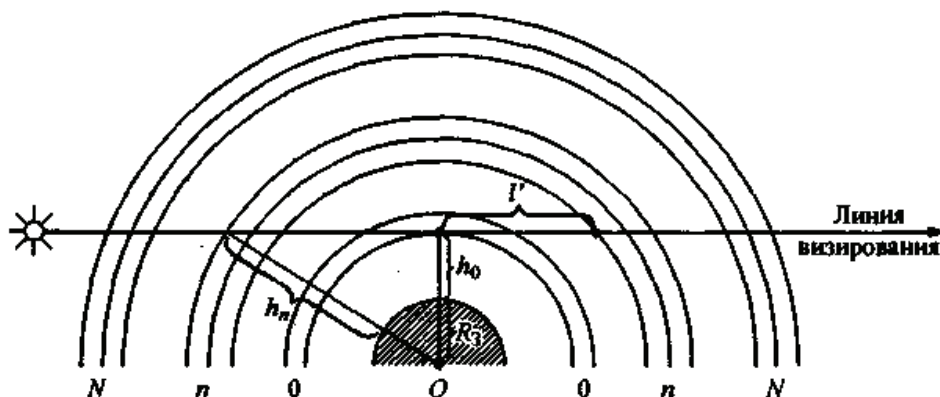


Рис. 2.47 – Схема измерений методом ПРО:  $h_n$  — высота  $n$ -го слоя сферически симметричной атмосферы ( $n = 0, \dots, N$ )

Информация о составе атмосферы в этом методе извлекается из измерений солнечного излучения, прошедшего через толщу атмосферы по траектории, определяемой геометрией эксперимента. Полагая, что для рассматриваемого случая можно пренебречь собственным излучением атмосферы и многократным рассеянием, имеем:

$$L = L(0) \exp \left\{ - 2 \int_0^{\infty} K_m [p(l'), T(l')] \rho(l') dl' - 2\tilde{\tau} \right\}, \quad (2.34)$$

где  $L(0)$  – яркость внеатмосферного солнечного излучения;  $l'$  – расстояние вдоль траектории луча ( $l' = 0$  в точке перигея при минимальном расстоянии траектории луча от Земли);  $p(l')$ ,  $T(l')$ ,  $\rho(l')$  – распределение давления, температуры и плотности измеряемой МПС вдоль траектории луча;  $K_m = \frac{K}{\rho}$  – мас-

совый показатель поглощения измеряемой МПС, зависящий в общем случае от высотных профилей давления и температуры;  $K$  – показатель поглощения малой газовой компоненты;  $2\tilde{\tau}$  – оптическая толщина всей атмосферы вдоль траектории луча, обусловленная «посторонними» факторами – аэрозольным ослаблением и поглощением других (кроме измеряемой МПС) молекулярных составляющих атмосферы.

Для определения интегрального содержания поглощающего газа необходимо выбрать характеристику, определяемую по спектру и однозначно связан-

ную с количеством искомой газовой компоненты. Наиболее часто в качестве характеристики, определяемой по измерениям спектров, используются:

- абсолютное пропускание в линии (полосе) поглощения исследуемой МПС – абсорбционный метод;
- отношение пропускания в различных спектральных интервалах (в областях сильного и слабого поглощения исследуемой МПС) – метод дифференциального поглощения.

В первом случае, когда можно положить  $\tilde{\tau} = 0$ , абсолютные измерения прозрачности  $P_\lambda = \frac{L}{L(0)}$  в полосе поглощения исследуемого газа позволяют получить его интегральное содержание в атмосфере вдоль траектории луча визирования

$$u = \int_0^\infty \rho(l') dl'. \quad (2.35)$$

Полагая массовый показатель поглощения  $K_m$ , не зависящим от расстояния  $l$ , т.е. заменяя его на некое среднее эффективное значение

$$K_{эф} = \frac{\int_0^\infty K_m(l') \rho(l') dl'}{\int_0^\infty \rho(l') dl'} \quad (2.36)$$

и логарифмируя (2.35), получаем

$$u = -\frac{1}{K_{эф}} \ln[P_\lambda]. \quad (2.27)$$

Таким образом, используя данные о  $K_{эф}$  и  $L(0)$ , можно восстановить интегральное содержание поглощающего газа.

Во втором случае выбирают две длины волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  таким образом, чтобы одна из длин волн находилась в полосе поглощения исследуемого газа, а вторая – на участке прозрачности, расположенном в спектре в непосредственной близости от первой на таком расстоянии, чтобы атмосферное поглощение другими молекулярными составляющими и аэрозольное ослабление на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно было бы считать равными. В этом случае интегральное содержание МГК на трассе распространения излучения можно найти из соотношения

$$u = \frac{1}{\Delta K_m} \ln \left[ \frac{L_{\lambda_1}(0)L_{\lambda_2}}{L_{\lambda_2}(0)L_{\lambda_1}} \right] = \frac{1}{\Delta K_m} \ln \left[ \frac{P_{\lambda_2}}{P_{\lambda_1}} \right], \quad (2.38)$$

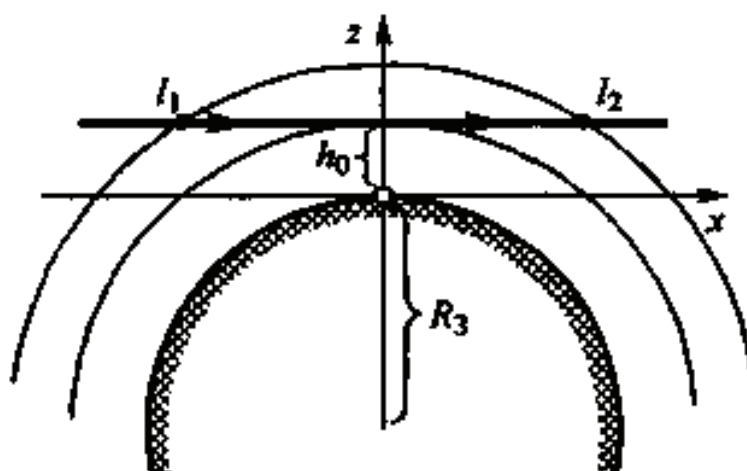
где  $\Delta K_m = K_m(\lambda_1) - K_m(\lambda_2)$ ;  $L_{\lambda_1}(0)$ ,  $L_{\lambda_2}(0)$  – яркости внеатмосферного солнечного излучения на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $L_{\lambda_1}$ ,  $L_{\lambda_2}$  – яркости регистрируемого солнечного излучения на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $P_{\lambda_1}$ ,  $P_{\lambda_2}$  – пропускание атмосферы вдоль траектории луча визирования на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн, соответствующие максимальному и минимальному поглощению излучения исследуемым газом.

Для получения сведений о высотном распределении поглощающего газа требуется проведение многоспектральных измерений.

*Определение содержания малых газовых компонент на основе интерпретации измерений теплового излучения.* Наклонная трасса. Математической основой для формулировки обратной задачи определения вертикальных профилей МГК по измерениям уходящего теплового излучения является интегральная форма уравнения переноса теплового излучения. Когда линия визирования проходит мимо поверхности Земли и для яркости уходящего в наклонном направлении излучения (рис. 2.48) можно записать следующее выражение:

$$L(h_0) = \int_{l_1}^{l_2} L^0[\nu, T(l)] \frac{\partial P(h_0, l, l_2)}{\partial l} dl, \quad (2.39)$$

где  $L^0[\nu, T(l)]$  – спектральная яркость абсолютно черного тела (АЧТ) для частоты  $\nu$ ,  $P(h_0, l, l_2)$  – функция пропускания от точки наблюдения  $l_2$  (верхней границы атмосферы) до произвольной точки  $l$  вдоль линии визирования;  $T(l)$  – профиль температуры (вдоль наклонной трассы);  $h_0$  – минимальное расстояние луча от поверхности планеты. Функция пропускания  $P(h_0, l, l_2)$  является нелинейным функционалом от характеристик состава атмосферы.



**Рис. 2.48 – Схема измерений при регистрации теплового излучения в наклонном направлении**

В условиях изотермической атмосферы ( $T(l) = T = \text{const}$ ) уравнение (2.39) можно переписать в виде:

$$L(h_0) = L^0[\nu, \bar{T}](1 - P(h_0, l_1, l_2)); \quad (2.40)$$

В этом случае при известной температуре атмосферы  $\bar{T}$  измерения теплового излучения дают функцию пропускания  $P(h_0, l_1, l_2)$  на всей трассе формирования излучения. Это позволяет свести исходную задачу интерпретации измерений уходящего теплового излучения к более простой задаче определения общего содержания газовой компоненты по измерениям прозрачности толщи атмосферы вдоль линии визирования от точки  $l_1$  до  $l_2$ :

$$P(h_0, l_1, l_2) = \exp\left\{-\int_{l_1}^{l_2} K_m(l)\rho(l)dl\right\}, \quad (2.41)$$

где  $K_m$ ,  $\rho(l)$  – массовый показатель поглощения и плотность малой газовой компоненты.

Другой подход определения содержания МГК основан на использовании корреляционных связей между радиационными температурами в отдельных каналах спутникового радиометра и концентрацией поглощающего газа. Преимущество этого подхода состоит в том, что он, с одной стороны, не связан с решением обратной задачи, а с другой – позволяет оценить влияние неопределенностей, связанных с изменчивостью атмосферы, на точность определения содержания газа.

В качестве примера приведем регрессионную методику определения содержания паров воды в атмосфере. Модель влажности в первом приближении может быть представлена в виде уравнения линейной регрессии. Уравнение выражает зависимость содержания влажности в атмосфере (переменная  $y$ ) от радиационных температур (независимые переменные  $x_k$ ), измеренных в различных каналах спутникового радиометра, для  $N$  ситуаций:

$$y_i = b_0 + b_1x_{1i} + \dots + b_px_{pi} + \xi, \quad (2.42)$$

здесь  $i = 1 \dots N$  – число наблюдений;  $p$  – число рассматриваемых каналов измерения;  $b_0 \dots b_p$  – коэффициенты регрессии;  $\xi$  – помеха.

Минимизируя сумму квадратов отклонений:

$$\Delta = \sum [y_i - (b_0 + b_1x_{1i} + \dots + b_px_{pi})]^2, \quad (2.43)$$

можно найти коэффициенты регрессии  $b_0, \dots, b_k, \dots, b_p$  для всех рассматриваемых каналов измерения.

Для количественных измерений содержания озона в ИК-области спектра наибольший интерес представляет сильная полоса поглощения озона  $\nu = 1043$

см<sup>-1</sup> ( $\lambda = 9,6$  мкм), расположенная в центре окна прозрачности атмосферы 8...12 мкм, где на пропускание атмосферы влияют практически только пары воды.

Яркость восходящего излучения  $L^\uparrow$  (при  $\delta = 1$ ) в некотором спектральном интервале в полосе озона 9,6 мкм можно представить в следующем виде:

$$L^\uparrow = L^{\uparrow 0} P_{O_3} P_{H_2O} + \int_{p_t}^{p_s} L^0 [T(p)] d[P_{O_3}(p) P_{H_2O}(p)], \quad (2.44)$$

где  $L^{\uparrow 0}$  – яркость излучения на нижней границе рассматриваемой атмосферы (в частности, это может быть излучение подстилающей земной поверхности, верхней границы облаков или их комбинация);  $P_{O_3}$ ,  $P_{H_2O}$  – функции пропускания всей толщи атмосферы, обусловленные озоном и парами воды;  $P_{O_3}(p)$ ,  $P_{H_2O}(p)$  – функции пропускания от уровня  $p$  до верхней границы атмосферы  $p_t$ ;  $T(p)$  — вертикальное распределение температуры в атмосфере;  $L^0(T(p))$  — спектральная яркость, рассчитываемая по функции Планка;  $p$ ,  $p_t$ ,  $p_s$  – текущий изобарический уровень и изобарические уровни соответствующие верхней и нижней границам атмосферы.

Учитывая тот факт, что слой озона в земной атмосфере расположен на высотах 20...30 км, в то время как пары воды сосредоточены в основном в приземном слое, уравнение (2.44) можно преобразовать:

$$L^\uparrow = JP_{O_3} + L^0[\bar{T}_{O_3}][1 - P_{O_3}], \quad (2.45)$$

где

$$J = L^{\uparrow 0} P_{H_2O} + L^0[\bar{T}_{H_2O}][1 - P_{H_2O}]. \quad (2.46)$$

В (2.45) и (2.46) введены некоторые средние температуры слоев озона ( $\bar{T}_{O_3}$ ) и водяного пара ( $\bar{T}_{H_2O}$ ), получаемые осреднением вертикального температурного профиля с весовыми функциями, соответствующими распределениям озона и водяного пара в атмосфере. Из уравнения (2.45) при условии, что  $J$  и  $\bar{T}_{O_3}$  известны, можно определить  $P_{O_3}$  и при известной зависимости  $P_{O_3}$  от общего содержания озона оценить искомое интегральное содержание озона  $u_{O_3}$ .

Обычно для определения интегрального содержания озона из уравнений (2.45) и (2.46) значение  $\bar{T}_{O_3}$  оценивается независимо по данным радиозондирования или данным дистанционного температурного зондирования; значение  $J$  определяется по измерениям в окне прозрачности ( $\nu = 899$  см<sup>-1</sup>), где поглощение озона пренебрежимо мало; величина  $L^0[\bar{T}_{O_3}]$  рассчитывается по функции

Планка, а зависимость  $P_{O_3}$  и  $u_{O_3}$  аппроксимируется экспоненциальной функцией вида

$$P(u) = \exp(-0,483u), \quad (2.47)$$

где  $u$  – в атм · см.

Для тепловых методов существенно, что вариации температуры атмосферы вносят существенный вклад в общие вариации излучения. В связи с этим задача определения состава атмосферы должна рассматриваться совместно с определением ее термического состояния.

Основным соотношением, которое позволяет связать измеряемую величину – яркость излучения с распределением температуры в атмосфере, является интегральная форма уравнения переноса. Запишем выражение для восходящего теплового излучения на верхней границе атмосферы в вертикальном направлении в следующем виде:

$$L^\uparrow = L^0(T_0)P(p_0) + \int_{p_0}^0 L^0[T(p)] \frac{\partial P(p)}{\partial p} dp, \quad (2.48)$$

где  $L^0(T)$  – спектральная яркость, рассчитываемая по функции Планка;  $P(p)$  – функция пропускания слоя атмосферы от верхней границы до изобарического уровня  $p$ . Нижним индексом «0» обозначены величины, относящиеся к подстилающей земной поверхности.

Для определения искомой зависимости  $T(p)$  уравнение (2.48) сводят к линеаризованной форме с помощью представления спектральной яркости  $L^0(T)$  в виде

$$L^0[T(p)] \cong L^0[\bar{T}(p)] + \frac{\partial L^0(T)}{\partial T} \Delta T(p). \quad (2.49)$$

В этом приближении уравнение (2.48) можно представить как линейное интегральное уравнение Фредгольма первого рода:

$$\Delta L = \int_{p_0}^0 K(p) \Delta T(p) dp, \quad (2.50)$$

где  $K(p) = \frac{\partial L^0(T)}{\partial T} \frac{\partial P(p)}{\partial p}$  – ядро интегрального уравнения;  $\Delta L = L^\uparrow - \bar{L}^\uparrow$ ;  $\bar{L}^\uparrow$  –

яркость излучения, соответствующая среднему распределению температуры атмосферы  $\bar{T}(p)$ . Яркость излучения рассчитывают по формуле



$$\bar{L}^\uparrow = L^0(T_0)P(p_0) + \int_{p_0}^0 L^0[\bar{T}(p)] \frac{\partial P(p)}{\partial p} dp. \quad (2.51)$$

Физической основой возможности успешного извлечения информации о термической структуре атмосферы является тот факт, что излучение, воспринимаемое прибором на различных частотах, генерируется различными слоями атмосферы. На рис. 2.49 приведены типичные функции  $\frac{\partial P_{\Delta\nu_i}(\log p)}{\partial \log p}$  – ядра уравнения (2.48) для семи спектральных интервалов в 15 мкм полосе поглощения углекислого газа для случая наблюдений со спутника. Эти функции часто называют «весовыми».

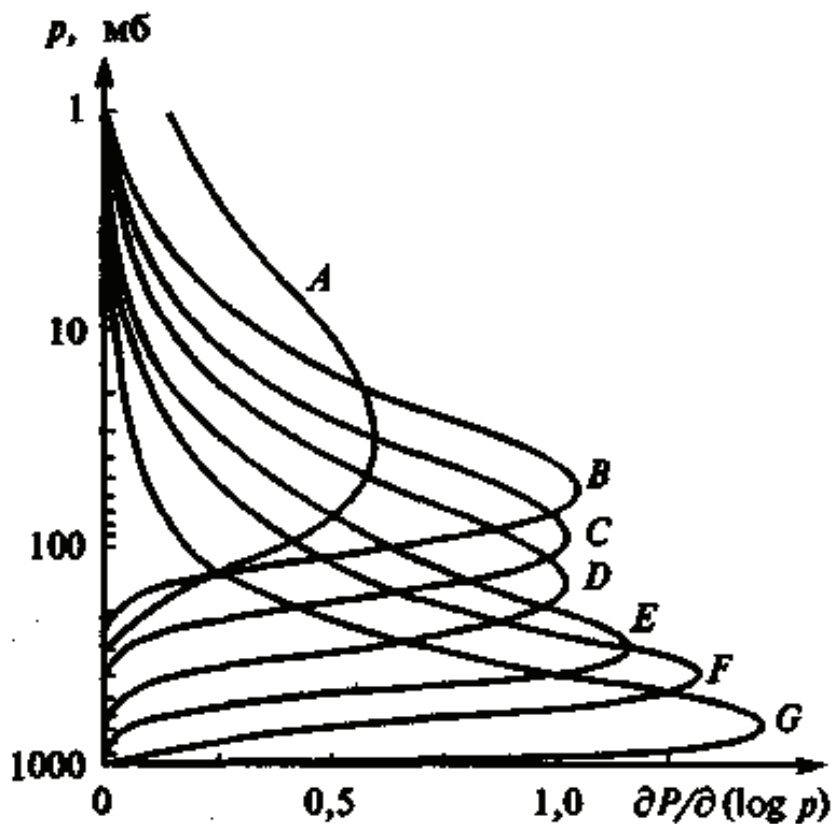


Рис. 2.49 – Ядра уравнения (2.48) для семи спектральных интервалов: А –  $\nu = 669 \text{ см}^{-1}$ ; В –  $\nu = 677,7 \text{ см}^{-1}$ ; С –  $\nu = 691 \text{ см}^{-1}$ ; D –  $\nu = 697 \text{ см}^{-1}$ ; E –  $\nu = 703 \text{ см}^{-1}$ ; F –  $\nu = 709 \text{ см}^{-1}$ ; G –  $\nu = 743 \text{ см}^{-1}$

Характерными особенностями весовых функций, показанных на рис. 2.49, являются: конечная «толщина» функций; наличие максимумов для разных спектральных каналов на разных высотах; взаимное перекрытие функций, соответствующих разным спектральным каналам. Конечная толщина весовых функций приводит к тому, что измерения восходящего излучения несут в себе информацию о термическом состоянии ограниченных по толщине (хотя и достаточно протяженных) слоев атмосферы. Именно толщина весовых функций

определяет в значительной степени вертикальное разрешение термического метода.

*Определение содержания малых газовых компонент по измерениям рассеянного солнечного излучения.* Результаты измерения рассеянного системой «Земля—атмосфера» солнечного излучения в области 0,2...4 мкм содержат информацию о вертикальных профилях и общем содержании МГТС атмосферы. Это обусловлено наличием в данной области спектра полос поглощения различных МПС и заметным влиянием молекулярного поглощения на формирование уходящего от Земли излучения.

При проведении измерений с ИСЗ с целью определения общего содержания компонент атмосферы или их вертикального распределения возможны два варианта ориентации прибора:

- в направлении горизонта;
- в направлении в надир.

Схема измерений с ИСЗ методом спектроскопии рассеянного атмосферой излучения (лимбовый метод) представлена на рис 2.50. Когда линия визирования проходит мимо поверхности Земли, второе слагаемое в формуле (2.52) отсутствует и измеряемая величина – профиль спектральной яркости  $L(\theta_0, h_0)$  дневного горизонта – описывается соотношением:

$$L(\theta_0, h_0) = \int_{l_i} B(\theta_0, h_0, l) \exp[-\tau(h_0, l)] dl, \quad (2.52)$$

где  $B(\theta_0, h_0, l)$  – спектральная яркость излучения, пришедшего в точку  $l$  линии визирования и рассеянного в направлении к ИСЗ вдоль линии визирования (функция источника);  $\tau(h_0, l)$  – спектральная толщина атмосферы по линии визирования  $l_i$ , (см. рис. 2.50) от точки  $l$  в направлении к ИСЗ.

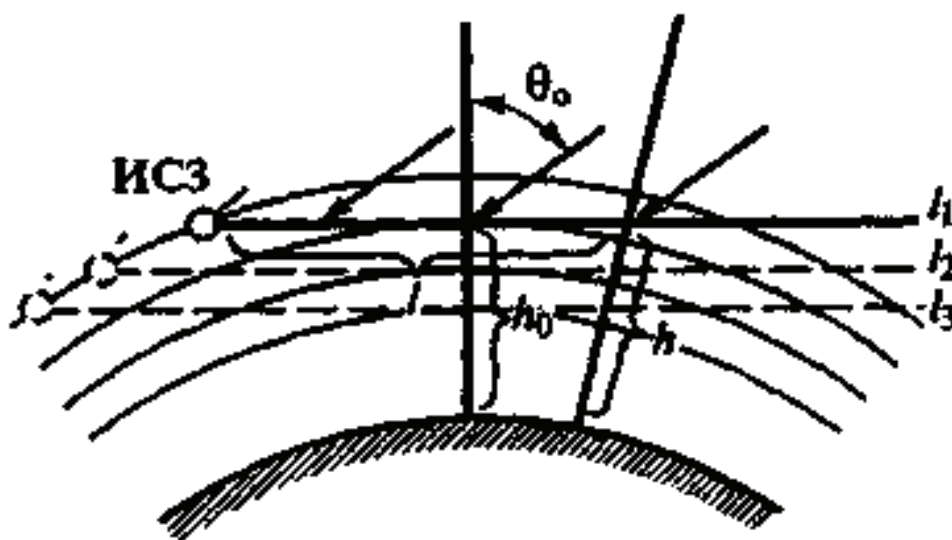


Рис. 2.50 – Схема измерений с ИСЗ методом спектроскопии рассеянного атмосферой излучения (лимбовый метод)

В общем случае состав излучения, принятого расположенным на ИСЗ прибором, сложен. Спектральный состав различных компонент уходящего излучения, рассчитанный с использованием общепринятых моделей атмосферы, представлен на рис. 2.51. Функции интенсивности  $L_p$  и  $L_{p+omr}$  соответствуют типичным условиям над сушей и океаном при значении зенитного угла Солнца  $\theta_0 = 45^\circ$ . Интенсивности  $L_{omr}$  и  $L_{p+omr}$  рассчитаны при двух значениях альбедо подстилающей земной поверхности  $A$  (0,2 – для суши и 0,02 – для океана). Интенсивность теплового излучения подстилающей поверхности с температурой  $T = 300$  К рассчитана при двух значениях коэффициента излучения подстилающей земной поверхности  $\delta$  (0,98 и 0,8).

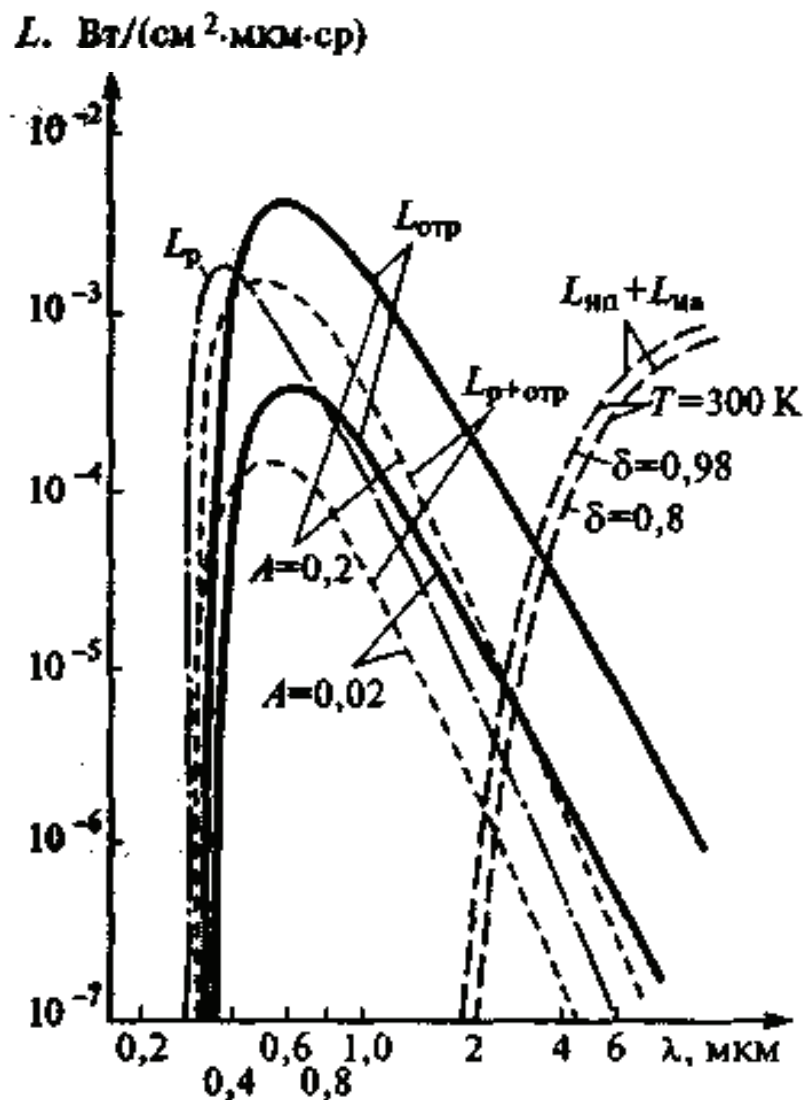


Рис. 2.51 – Спектральный состав компонент уходящего излучения:  $L_p$  – одно-кратно и многократно рассеянное атмосферой солнечное излучение;  $L_{omr}$  – отраженное подстилающей поверхностью солнечное излучение;  $L_{p+omr}$  – излучение, претерпевшее отражение поверхностью и рассеяние в атмосфере;  $L_{na}$  – собственное тепловое излучение атмосферы;  $L_{in}$  – тепловое излучение подстилающей поверхности

Таким образом, каждая конкретная задача по определению содержания газовых компонент атмосферы с использованием измерений рассеянного излучения с ИСЗ требует тщательного анализа спектров излучения источников, попадающих в поле зрения прибора, моделирования механизмов переноса этого излучения в атмосфере и разработки упрощенных моделей, применение которых требует определения возможно меньшего числа параметров.

Одним из примеров использования упрощенной модели в спутниковых измерениях рассеянного излучения является определение общего содержания озона и его высотного профиля прибором, ориентированным в надир. Солнечная радиация в УФ-области спектра 0,2 – 0,3 мкм сильно поглощается озоном, содержащимся в слое атмосферы 10 – 50 км, и практически не достигает земной поверхности. Вместе с тем солнечная радиация в УФ-области спектра 0,2 – 0,3 мкм сильно рассеивается молекулами воздуха и аэрозолями даже в разреженной земной атмосфере, лежащей выше слоя озона. Поэтому некоторая доля солнечной радиации в этой области спектра отражается земной атмосферой в мировое пространство, не достигнув тех уровней, где концентрация озона велика. Для среднеширотной модели озона максимум концентрации приходится на высоты 20 – 24 км.

Выражение для интенсивности восходящего в надир излучения в приближении однократного молекулярного рассеяния можно записать в следующем виде:

$$L(\theta_0) = S_\lambda \frac{3\sigma_m}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta_0) \int_0^{p_0} \exp\{-(1 + \sec \theta_0)[kX(p) + \sigma_m]\} dp, \quad (2.53)$$

где  $\pi S_\lambda$  – солнечная постоянная;  $k$  – показатель поглощения озона, который в записи (2.53) предполагается независимым от  $T$  (и, следовательно, от  $p$ );  $X(p)$  – количество озона выше уровня с давлением  $p_0$ ;  $p_0$  – давление на уровне подстилающей земной поверхности;  $\sigma_m$  – показатель молекулярного рассеяния;  $\frac{3}{16\pi}(1 + \cos^2 \gamma) = \chi_m(\gamma)$  – индикатриса молекулярного рассеяния (для надирного наблюдения  $\gamma \equiv \theta_0$ , где  $\theta_0$  – зенитный угол Солнца).

Рассмотрим применимость соотношения (2.53) для решения задач дистанционного зондирования с точки зрения анализа вклада рассеяния на аэрозоле и вклада отражения от подстилающей поверхности на величину восходящего излучения для трех длинноволновых каналов в полосе поглощения озона и трех высот Солнца ( $\theta_0 = 15, 45$  и  $75^\circ$ ) и надирных измерений.

В табл. 2.6 приведены ошибки (в процентах) в расчетах яркости излучения в УФ-диапазоне спектра, связанные с неучетом рассеяния на аэрозолях и отражения от земной подстилающей поверхности (альbedo поверхности полагалось равным  $A = 0,15$ ) для трех длин волн. Как следует из этой таблицы, наибольшие погрешности, обусловленные неучетом аэрозоля и отражения от подстилающей земной поверхности, наблюдаются для самого длинноволнового из

рассмотренных каналов измерений (0,31 мкм) и при больших высотах Солнца ( $\theta_0 = 15^\circ$ ). С уменьшением длины волны и увеличении зенитного угла Солнца точность приближений модели улучшается. Так, при  $\theta_0 = 75^\circ$  погрешности в расчетах яркости восходящего излучения не превышают 1% для всех длин волн. Для длины волны 0,302 мкм ошибки меньше (чем в других каналах) для всех трех рассмотренных значений зенитного угла Солнца.

**Таблица 2.6 – Ошибки в расчетах восходящего излучения в УФ-диапазоне спектра**

Условия расчета	$\lambda$ , мкм							
	0,302	0,305	0,310	0,302	0,305	0,310	0,302	0,305
	$\theta_0 = 15^\circ$			$\theta_0 = 45^\circ$			$\theta_0 = 75^\circ$	
С учетом аэрозоля, $A = 0$	0,40	2,0	3,7	0,25	1,1	2,3	–	0,25
Без учета аэрозоля, $A = 0,15$	0,32	5,6	10,4	0,06	2,9	7,8	0,01	0,08
С учетом аэрозоля, $A = 0,15$	0,56	5,5	10,9	0,28	2,7	6,6	0,03	0,28

В ряде численных методов интерпретации данных измерений, а также при анализе потенциальных возможностей дистанционного метода определения содержания озона уравнение (2.53) преобразуют к следующему виду:

$$Q(\theta_0) = \int_0^{p_0} \exp\{- (1 + \sec \theta_0) [kX(p) + \sigma_m]\} dp, \quad (2.54)$$

где

$$Q(\theta_0) = \frac{L(\theta_0) 16\pi}{S_\lambda 3\sigma_m (1 + \cos^2 \theta_0)}; \quad (2.55)$$

Принимая высотный профиль озона выше максимума вида:

$$X(p) = Bp^{1/\sigma}, \quad (2.56)$$

здесь  $B$  и  $\sigma$  – константы и, полагая, что поглощение озоном значительно превосходит молекулярное рассеяние, т.е.  $kX(p) \gg \beta$ , можно выражение (2.54) переписать в следующем виде:

$$Q = \int_0^{p_0} \exp\left[- (r^{1/m} p)^m\right] dp, \quad (2.57)$$

где  $r = [(1 + \sec \theta_0)kB]$ ;  $m = \frac{1}{\sigma}$ .

Так как вклад в интеграл (2.57) дают только слои атмосферы, расположенные выше уровня  $p_0$  (т.е. уровни, имеющие  $p$  меньше  $p_0$  – от  $p_0$  до 0), то можно приближенно положить  $p_0 = \infty$  и вычислить интеграл по формуле

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_0^{p_0} \exp\left[-\left(-r^{1/m} p\right)^m\right] dp \cong \frac{1}{mr^{1/m}} \Gamma\left(\frac{1}{m}\right) = \\
 &= \frac{1}{r^\sigma} \Gamma(\sigma + 1) = [(1 + \sec \theta_0)kB]^{-\sigma} \Gamma(\sigma + 1),
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция.

### **3. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВИАЦИОННЫХ СРЕДСТВ**

#### **3.1. Организация аэромониторинга чрезвычайных ситуаций с использованием аэрофотосъемки**

Аэрофотосъемка – это съемка местности на фотоматериал при помощи аэрофотоаппаратов, устанавливаемых на летательных аппаратах (самолетах, вертолетах и др.). В настоящее время аэрофотографирование земной поверхности производят преимущественно с самолетов. Тип самолета зависит от физико-географических особенностей района и целевого назначения аэрофотосъемки. При крупномасштабной аэрофотосъемке применяют менее скоростные самолеты, а при мелкомасштабной – более скоростные.

К самолетам, используемым для аэрофотосъемки, предъявляют следующие требования: 1) улучшенный обзор местности и удобство размещения аэрофотоаппаратов и других приборов; 2) скорость полета, не превышающая некоторого предела, обусловливаемого допустимым сдвигом изображения (120 – 450 км/ч); 3) достаточно высокий рабочий потолок (3 – 4 км для равнинной и 8 км для горной местности); 4) запас горючего, рассчитанный на продолжительность полета 7 – 8 ч; 5) малый разбег при взлете и посадке и нетребовательность к взлетной дорожке; 6) хорошая устойчивость в горизонтальном положении и маневренность.

По принципиальной схеме фотографирования аэрофотосъемку подразделяют на кадровую, щелевую и панорамную.

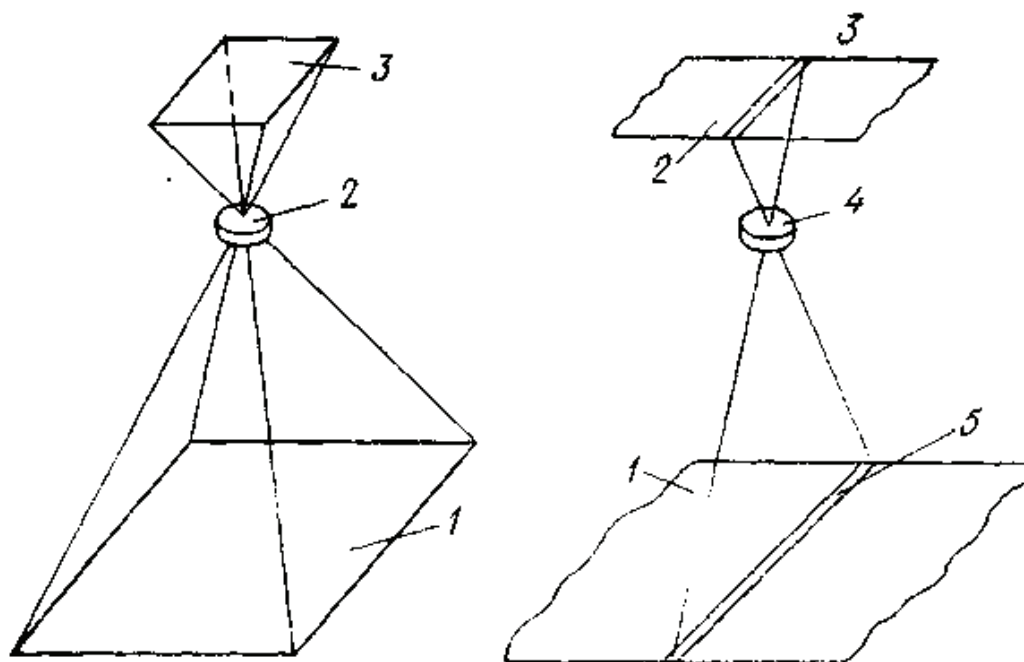
При кадровом фотографировании изображение местности получают в виде отдельных снимков, представляющих центральную проекцию фотографируемой местности (рис. 3.1.а).

Щелевое фотографирование – это непрерывная съемка местности на движущуюся пленку через постоянно открытую щель, расположенную в фокальной плоскости объектива перпендикулярно направлению полета носителя (рис. 3.1.б). Скорость перемещения аэропленки и носителя синхронизирована, экспонирование непрерывное. Изображение местности получают в виде сплошной ленты, причем в поперечном направлении (по ширине аэропленки) щелевой аэрофотоснимок представляет центральную проекцию, а в продольном – ортогональную.

При панорамном фотографировании (рис. 3.2) применяют объектив, вращающийся вокруг оси, проходящей через его заднюю узловую точку параллельно образующей цилиндра, на котором располагается фотопленка. Объектив вместе с раструбом, заканчивающимся в фокальной плоскости щелью, вращается на своей оси перпендикулярно направлению полета. Панорамный снимок получается в результате последовательного экспонирования фотопленки через



перемещающуюся щель. При панорамном фотографировании снимки прямоугольной формы изображают местность обычно от горизонта до горизонта.



**Рис. 3.1 – Схема: а) кадрового фотографирования (1 – участок местности; 2 – объектив; 3 – плоскость с фотопленкой); б) щелевого фотографирования (1 – участок местности; 2 – фотопленка; 3 – постоянно открытая щель; 4 – объектив; 5 – фотографируемая полоса)**

В зависимости от положения оптической оси аэрофотоаппарата аэрофотосъемку подразделяют на горизонтальную, плановую и перспективную.

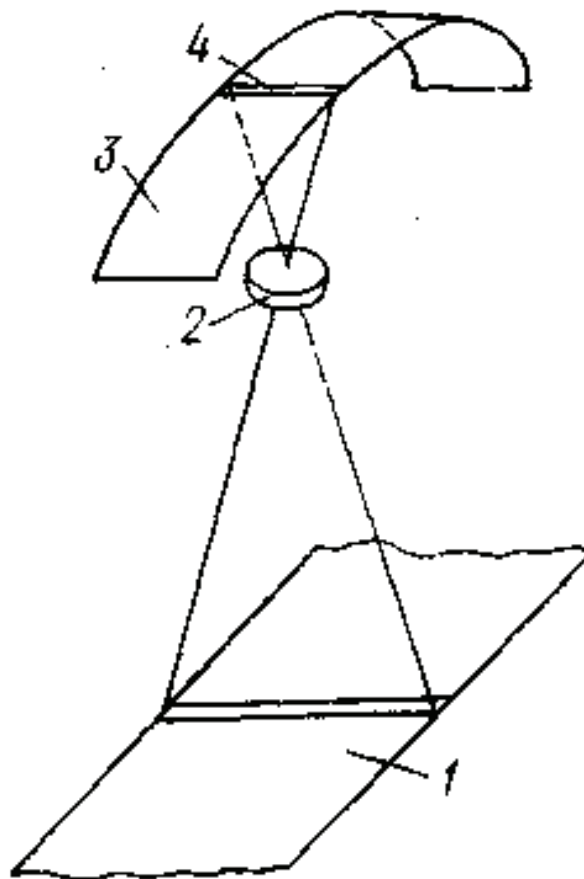
Под горизонтальной понимают такую аэрофотосъемку, при которой главная оптическая ось аэрофотоаппарата находится в строго вертикальном положении, а плоскость негатива в горизонтальном.

Плановой называют аэрофотосъемку, когда оптическая ось аэрофотоаппарата отклоняется от отвесной линии в пределах  $3^\circ$ . При использовании гиросtabilизирующего устройства оптическая ось аэрофотоаппарата отклоняется от вертикального положения не более чем на  $30-40'$ .

К перспективной относят аэрофотосъемку, при которой оптическая ось аэрофотоаппарата значительно (на  $45-60^\circ$ ) отклоняется от вертикального положения. Перспективный аэрофотоснимок может быть с видимым горизонтом, когда на нем изображена часть неба, и без него, если изображена только земная поверхность.

В зависимости от характера покрытия местности аэрофотоснимками различают съемку одинарную, маршрутную и площадную (сплошную).

При одинарной аэрофотосъемке отдельные объекты местности или небольшие участки леса (например, гари, ветровалы, семенные участки и пр.) фотографируют одиночными и парными аэрофотоснимками, связанными между собой перекрытиями.



**Рис. 3.2 – Схема панорамного фотографирования (1 – участок местности; 2 – объектив; 3 – фотопленка; 4 – щель)**

При маршрутной аэрофотосъемке фотографируют узкую полосу местности, уместающуюся по ширине на одном-трех съемочных маршрутах. В зависимости от конфигурации объекта маршрут полета может быть прямолинейным, ломаным или криволинейным. Маршрутную аэрофотосъемку широко применяют при изыскании лесовозных и лесохозяйственных дорог, гидрометрических обследованиях рек и изысканиях линий электропередач и т.п.

При площадной, или сплошной, аэрофотосъемке фотографируют значительную площадь лесного массива либо другой территории сплошь путем приложения ряда прямолинейных, параллельных и перекрывающихся частично между собой маршрутов (рис. 3.3). В этом случае выдерживают заданную величину продольного перекрытия (между снимками вдоль маршрутов  $q_x$ ) 56-60%, а поперечное (между снимками смежных маршрутов  $q_y$ ) составляет 30-40%. Площадную аэрофотосъемку осуществляют в рамках трапеции международной разграфки, а также в пределах границ административной и природной территории, которую намечено заснять.

Плановую аэрофотосъемку условно подразделяют на сверхкрупномасштабную (крупнее 1:2000), крупномасштабную (от 1:2000 до 1:10000), среднemasштабную (от 1:10000 до 1:30000), мелкомасштабную (от 1:30000 до 1:100000) и сверхмелкомасштабную (мельче 1:100000).

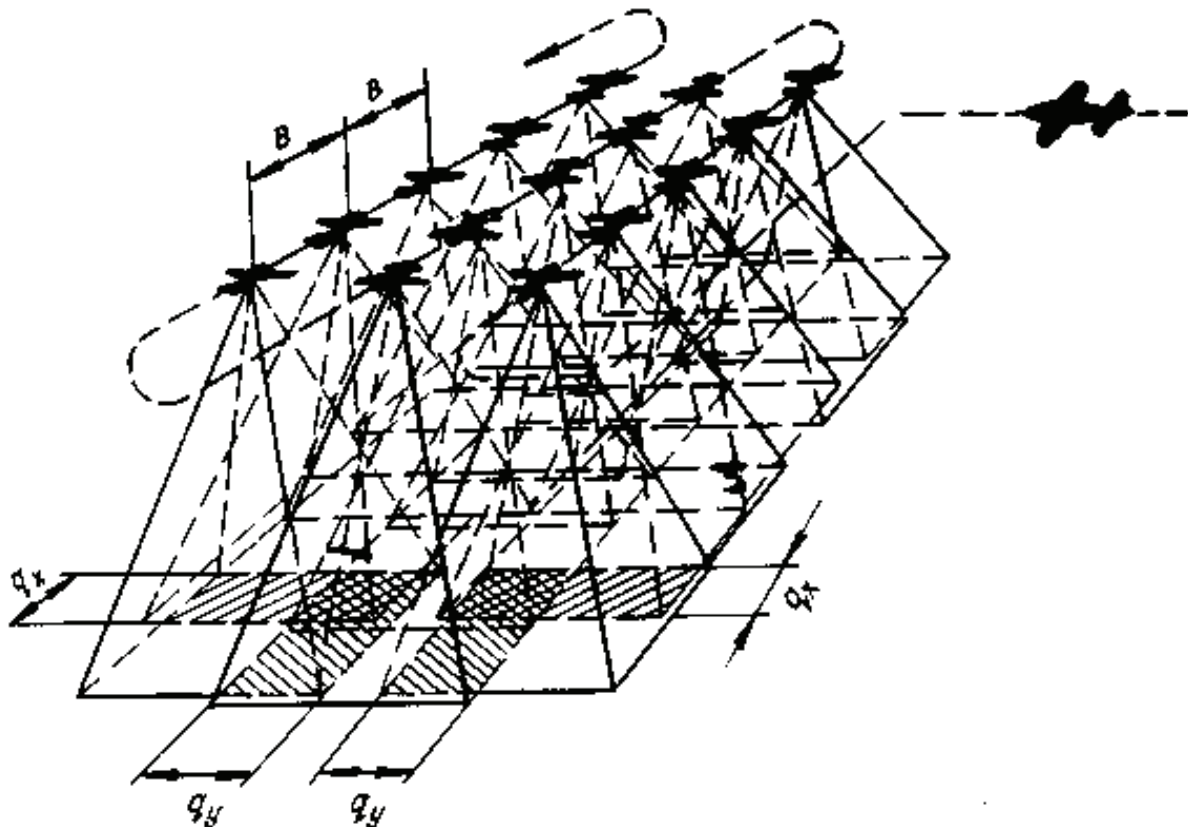


Рис. 3.3 – Схема площадной аэрофотосъемки ( $q_x$  – продольное перекрытие;  $q_y$  – поперечное перекрытие;  $B$  – базис фотографирования)

### 3.1.1 Средства аэрофотомониторинга чрезвычайных ситуаций

Аэрофотоаппараты (АФА) – сложные автоматические оптико-механические приборы, которые служат для получения изображения объектов местности на фотоматериалах с летательных аппаратов, находящихся на различной высоте над земной поверхностью. АФА классифицируют по разным признакам. В зависимости от способа экспонирования различают кадровые, щелевые и панорамные АФА. В кадровом экспонировании происходит прерывисто, отдельными кадрами вдоль длины аэропленки, в щелевых непрерывно по всей длине аэропленки. В том и другом случае направление оптической оси относительно предметной плоскости не меняется, тогда как в панорамных АФА она непрерывно меняет свое направление.

Кадровые АФА состоят из следующих основных частей: аэрокамеры I, кассеты II, аэрофотоустановки III и командного прибора IV (рис. 3.4).

В корпусе 6 аэрокамеры расположены объектив 11, затвор и распределительный механизм 7. Верхнее основание корпуса является прикладной рамкой 5, к которой при помощи выравнивающего устройства 4 (прижимного столика и выравнивающего стекла) прижимается в момент экспонирования фотопленка 3. На прикладной рамке имеются координатные метки, определяющие положение координатных осей аэрофотоснимка. Корпус аэрокамеры прикреплен к аэрофотоустановке III. В верхней его части смонтирована кассета II, в нижней ус-

тановлены светофильтры 10 и защитная бленда 9. В кассете размещена пленка 3, которая в процессе аэрофото съемки перематывается с катушки 12 на катушку 2. Аэрофотоустановка – устройство, предназначенное для монтирования АФА над люком самолета, сохранения нужного положения АФА и уменьшения его вибраций, возникающих от работы мотора и толчков при взлете и посадке. Простейшая аэрофотоустановка состоит из металлического каркаса в виде кольца и укрепленного внутри него карданного устройства. Каркас опирается на корпус самолета при помощи пружинных амортизаторов.

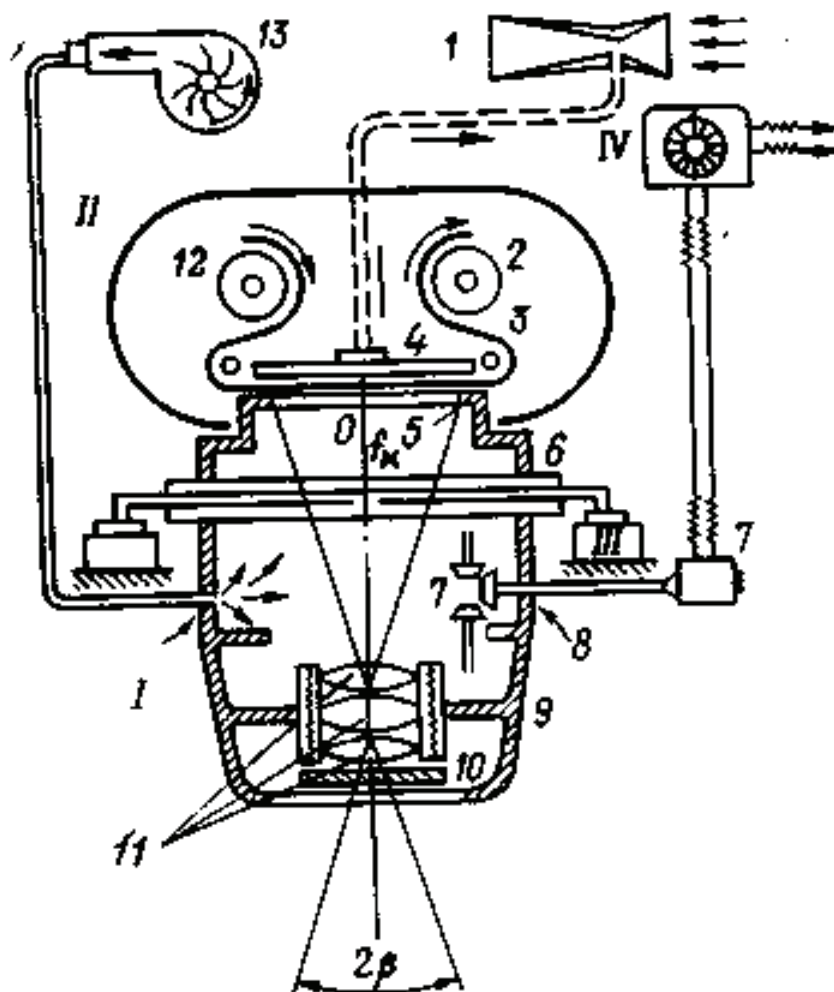


Рис. 3.4 - Схема устройства АФА (I – аэрокамера; II – кассета; III – аэрофотоустановка; IV – командный прибор; 1 – трубка разрезания; 2, 12 – катушки; 3 – фотопленка; 4 – прижимный выравнивающий столик; 5 – прикладная рамка; 6 – корпус; 7 – распределительный механизм; 8 – конус; 9 – защитная бленда; 10 – светофильтр; 11 – объектив; 13 – воздуходувка;  $f_k$  – фокусное расстояние)

В настоящее время широко применяют гиросtabilизирующую аэрофотоустановку (гирораму). В отличие от обычной аэрофотоустановки она автоматически и непрерывно удерживает АФА в заданном положении ( $\alpha = \pm 30 - 40'$ ). Это достигается работой двух гироскопов: одного – вдоль оси самолета, другого – поперек. Частота вращения гироскопов 20 тыс. об/мин, причем они сохраняют неизменное положение своих осей, имеющих одну точку опоры (идея

волчка). При наклоне самолета вращающиеся гироскопы сохраняют ось АФА в вертикальном положении. Командный прибор IV (см. рис. 3.4) служит для управления работой аэрофотокамеры, аэрофотоустановки и других приборов.

Все АФА снабжены приборами (часами, счетчиком кадров, уровнем, высотомером и др.), регистрирующими дополнительные данные, необходимые для последующей обработки аэрофотоснимков.

Оптическая система АФА включает объектив, светофильтр, отенители, выравнивающее стекло, иногда призмы и зеркала. Фотографический объектив – одна из основных частей, представляет собой оптическую систему, предназначенную для построения изображения на аэропленке. Он состоит из нескольких линз, центры которых лежат на одной прямой – главной оптической оси объектива. Главные показатели, характеризующие фотографический объектив, следующие: фокусное расстояние, угол поля зрения, относительное отверстие и светосила, разрешающая способность, ортоскопичность и глубина резкости. Фокусное расстояние объектива  $f_k$  (см. рис. 3.4) – одна из величин, определяющих масштаб изображения. Объективы, применяемые на аэрофотосъемке, по длине фокусного расстояния условно делят на короткофокусные (55 – 100 мм), средне- (140 – 200 мм), длинно- (250 – 300 мм) и сверхдлиннофокусные (более 300 мм). С фокусным расстоянием связан угол поля зрения объектива.

Поле зрения – это создаваемый объективом на экране световой круг, в пределах которого наблюдается освещенность, а угол зрения объектива  $ASB = 2\alpha$  – под которым диаметр поля зрения наблюдается из центра объектива. Центральную часть поля зрения, в пределах которой изображение удовлетворительное по равномерности резкости и яркости, называют полем изображения. Угол  $CSD = 2\beta$ , под которым диаметр поля изображения наблюдается из центра объектива, – это угол изображения объектива  $2\beta$  (рис. 3.5).

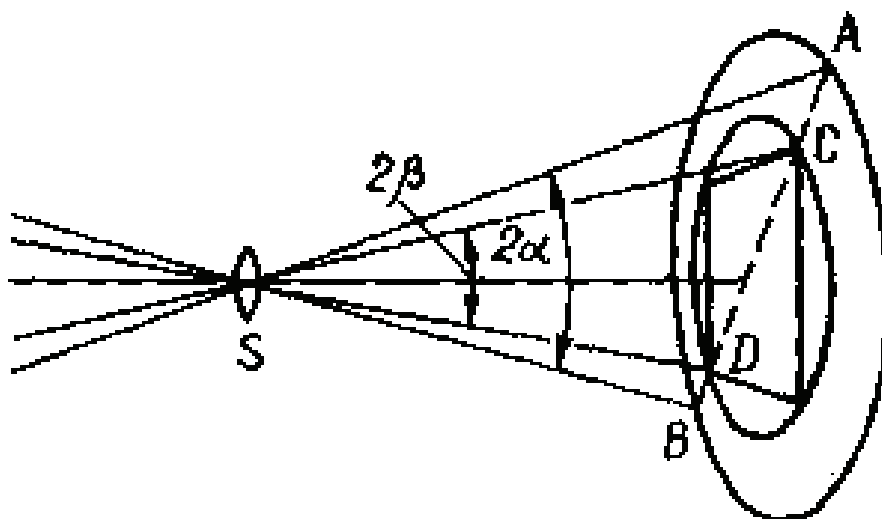


Рис. 3.5 – Угол поля зрения  $2\alpha$  и поля изображения  $2\beta$  объектива

Все поле изображения объектива в фотоаппарате не используют. Максимальный формат светочувствительного материала, применяемого при съемке,

определяется квадратом, вписанным в поле изображения, диагональ которого равна диаметру поля. В зависимости от величины угла поля зрения объективы подразделяют на четыре группы: узкоугольные ( $2\alpha < 50^\circ$ ), нормально- ( $50^\circ < 2\alpha < 90^\circ$ ), широко- ( $90^\circ < 2\alpha < 110^\circ$ ) и сверхширокоугольные ( $2\alpha > 110^\circ$ ).

Относительное отверстие объектива  $1/n$  – это отношение диаметра действующего отверстия объектива  $d$  к главному фокусному расстоянию. Величина относительного отверстия определяет яркость оптического изображения. Для сравнительной оценки объективов введено понятие светосила; последняя пропорциональна квадрату относительного отверстия  $(d/f_k)^2$ . По величине относительного отверстия различают сверхсветосильные, светосильные, нормальные и малосветосильные объективы. Основные аэрофотосъемочные объективы имеют относительное отверстие 1:6,3 – 1:6,8 и по светосиле относятся к нормальным.

Разрешающая способность объективов (а также фотоматериалов и других носителей съемочной информации) – свойство давать раздельное изображение двух близко расположенных линий (точек). Она характеризуется числом раздельно передаваемых линий, приходящихся на 1 мм оптического изображения специального тест-объекта-миры (лин/мм или мм-1). Объективы АФА имеют разрешающую способность 30 – 100 лин/мм в центре изображения и 10 – 20 лин/мм на краях.

Ортоскопия объективов характеризуется их способностью давать неискаженное изображение. Искажения возникают из-за аберраций, астигматизма и дисторсии объектива. При сферической аберрации лучи, прошедшие сквозь объектив, не пересекаются в одной точке; при хроматической лучи того или иного цвета пересекаются в разных точках; при астигматизме оптическое изображение невозможно сделать резким по всему полю зрения; дисторсия – искажение геометрических форм объектов в плоскости снимка. При конструировании объективов стремятся к тому, чтобы все аберрации были минимальными, искажения форм не снижали точности фотограмметрических измерений, остаточная дисторсия не превышала 0,02 – 0,03 мм. Глубина резкости, или глубина резко изображаемого пространства, – степень резкости изображения предметов, находящихся на разном от объектива расстоянии.

Одной из важных деталей АФА, которая имеет большое значение для улучшения дешифровочных свойств аэрофотоснимков, является светофильтр. Это плоскопараллельное окрашенное стекло, предназначенное для частичного или полного поглощения определенных лучей спектра. Свойства светофильтра характеризуются цветом и густотой (плотностью) окраски, а также кратностью. Цвет окраски определяет, какие лучи спектра пропускает и поглощает светофильтр, а густота – с какой интенсивностью (чем он гуще окрашен, тем сильнее поглощает лучи). Кратность показывает, во сколько раз должна быть увеличена выдержка по сравнению с выдержкой при фотографировании без светофильтра.

По избирательной способности поглощать или пропускать лучи разных зон спектра светофильтры подразделяют на три группы: монохроматические –

пропускающие лучи одного какого-либо цвета и поглощающие остальные; селективные – пропускающие лучи нескольких цветов спектра и поглощающие остальные; компенсационные – частично поглощающие лучи одной зоны спектра и полностью пропускающие лучи остальных цветов. Светофильтры первых двух групп используют при многозональной съемке для получения нескольких изображений одного объекта в разных зонах спектра; последнюю – для ослабления лучей сине-фиолетовой и голубой частей спектра, которые, интенсивно рассеиваясь атмосферой, образуют дымку, и для выделения наиболее информативных зон спектра, чтобы повысить дешифровочные свойства аэрофотоснимков. Выбор того или иного светофильтра определяется свойствами аэропленки, характером объектов съемки и атмосферно-оптическими условиями фотографирования. Для исключения вредного влияния атмосферной дымки чаще применяют желтые светофильтры и компенсационные, поглощающие коротковолновую часть спектра (до 450 – 500 нм) фиолетовые и синие лучи. Однако при фотографировании на высоте более 3000 м рекомендуется применять оранжевый светофильтр с зоной поглощения до 580 нм. При выделении информативных зон спектра в комбинации с разными типами пленок используют оранжевые и красные светофильтры.

По назначению кадровые АФА подразделяют на топографические и нетопографические. Первые предназначены для фотографирования местности с целью составления топографических карт и должны обеспечивать получение аэрофотоснимков с высокими изобразительными и измерительными свойствами. Для этого топографические АФА снабжают ортоскопическими объективами с хорошей контрастно-частотной характеристикой. Они, как правило, имеют широкоугольные или сверхширокоугольные объективы с размером кадра 18x18 см. Нетопографические АФА служат для аэрофотосъемок с целью получения аэрофотоснимков, предназначенных для специальных видов дешифрирования, т. е. опознания и определения количественной и качественной характеристик объектов целевого назначения, в связи с чем снижается требование к ортоскопичности объективов. Поэтому к нетопографическим, которые можно было бы назвать специальными, относят кадровые с размером кадра 30x30 см АФА, а также щелевые и панорамные. Нетопографические АФА снабжены обычно более длиннофокусными объективами, чем топографические.

Для аэрофотосъемки лесов при инвентаризации применяют топографические и нетопографические АФА. Наиболее приемлемы нормально- и широкоугольные АФА с углом поля зрения 70 – 100° и  $f_k = 100 – 200$  мм. Широкоугольные, а тем более сверхширокоугольные при всех их преимуществах перед узко- и нормальноугольными для лесной аэрофотосъемки непригодны, так как дают сильно искаженные изображения насаждений в краевых частях аэрофотоснимка в виде «развала» деревьев, что затрудняет и даже исключает стереоскопическое просматривание полога древостоев и измерение их высоты.

Щелевыми называют АФА, в которых светочувствительный материал перемещается синхронно с движением носителя и экспонирование происходит непрерывно через щель, расположенную перед объективом. Такие АФА имеют две основные системы механизмов: синхронизации движения аэропленки и ре-



гулирования ширины щели. Чаще они бывают двухобъективными, благодаря чему можно выполнять двухмаршрутное фотографирование с некоторым перекрытием маршрутов, стереоскопическое фотографирование, при котором стереоскопический базис получается из-за смещения объективов в разные стороны от щели, и аксонометрическое, которое дает фотографическое изображение объекта с разных направлений.

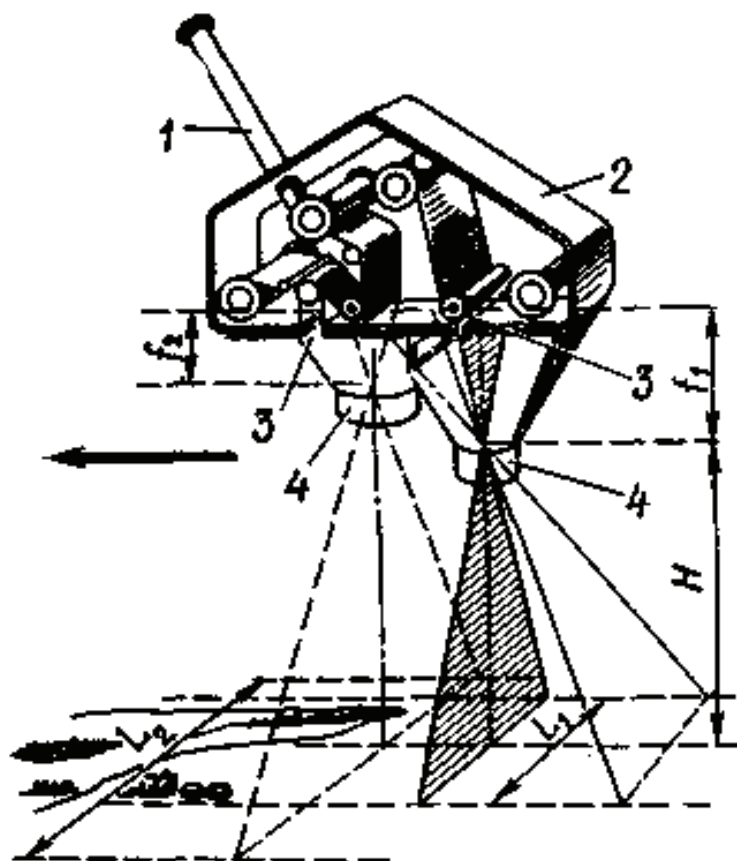


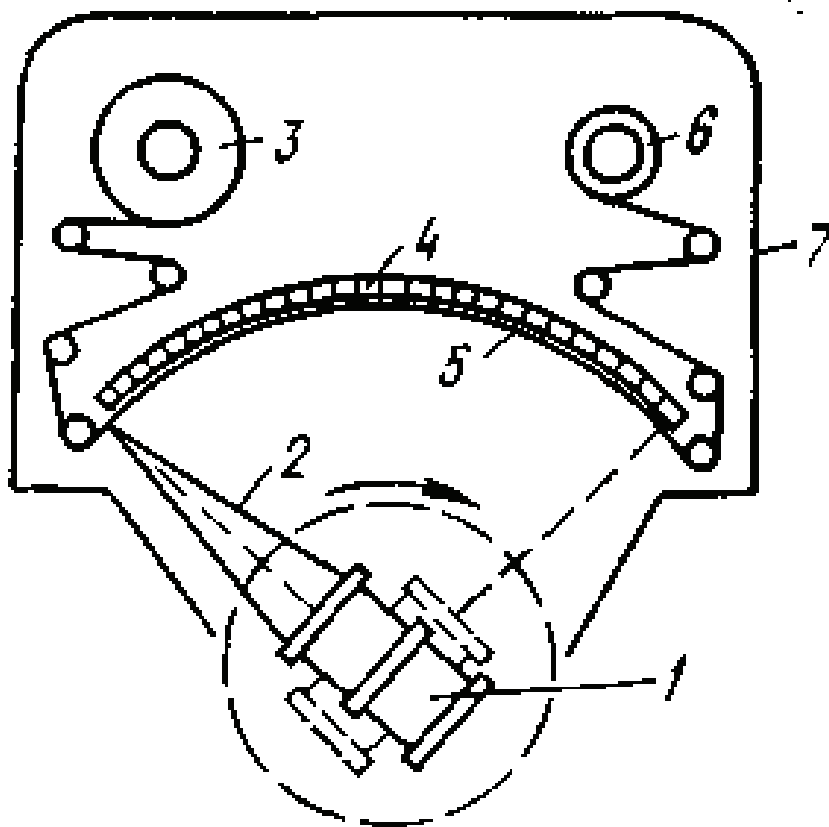
Рис. 3.6 – Щелевой двухобъективный АФА (1 – визир; 2 – камера; 3 – щели; 4 – объективы;  $f_1$ ,  $f_2$  – фокусные расстояния;  $H$  – высота полета;  $L_1$ ,  $L_2$  – ширина снимаемой полосы местности)

Щелевой двухобъективный АФА (рис. 3.6) состоит из кассетной части, где размещены две группы механизмов перемотки пленки, и оптического блока, имеющего две изолированные части, в которых расположены объективы.

Панорамными называют аэрофотоаппараты (ПАФА), которые фотографируют на цилиндрическую поверхность путем сканирования местности плоским пучком проектирующих лучей. Аэропленка располагается на поверхности цилиндра, ось которого совпадает с осью вращения оптического блока. ПАФА применяют для получения аэрофотоснимков, охватывающих широкую полосу местности. Они бывают прямого и косвенного сканирования. Прямое сканирование достигается качанием объектива, косвенное – вращением призмы, установленной перед объективом. В ПАФА прямого сканирования (рис. 3.7) объектив размещен в кожухе с раструбом 2 и непрерывно качается относительно пленки 5. В раструбе есть щель, которая ограничивает проектирующий пучок.



Для перемотки аэропленки имеются специальные устройства 3 и 6. При экспонировании пленка прижимается к цилиндрической поверхности 4 при помощи валиков, расположенных на конце раструбы.



**Рис. 3.7 – Схема ПАФА прямого сканирования (1 – объектив; 2 – кожух с растройбой; 3, 6 – сматывающая и наматывающая катушки; 4 – прижимная выравнивающая поверхность; 5 – аэрофотопленка; 7 – корпус)**

В современных ПАФА скорость сканирования изменяется в пределах от 30 до 700 см/с, ширина щели от 1 до 10 мм и величина выдержки от 1/25 до 1/12000 с.

Для определения действительной высоты съемки каждого аэрофотоснимка на аэросъемочных самолетах устанавливают два специальных прибора – радиовысотомер и статоскоп. Первый позволяет определить расстояние от объектива АФА до ближайшей к самолету точки на земной поверхности. Он работает синхронно с АФА; состоит из радиопередатчика, радиоприемника, антенны, вспомогательных приборов и устройств.

Радиовысотомер работает по принципу радиолокации и фиксирует на фотопленке моменты подачи сигнала и приема его после отражения земной поверхностью. В момент съемки, когда открывается затвор АФА, передатчик излучает направленные на землю и следующие один за другим через определенные интервалы импульсы электромагнитных волн. Некоторая часть отраженных земной поверхностью электромагнитных волн улавливается приемником. Принятые сигналы поступают в индикатор, внутри которого непрерывно вра-

щается по ходу часовой стрелки электронный луч. В момент излучения импульса электронный луч отклоняется в радиальном направлении и образует выступ, соответствующий началу излучения сигнала. После возвращения сигнала электронный луч снова отклоняется, в результате чего возникает второй выступ, соответствующий приему отраженного сигнала. Экран индикатора фотографируется на фотопленку шириной 60 мм в момент, когда происходит срабатывание затвора АФА. Отсчеты берут по шкале по начальным точкам выбросов. Полный оборот электронного луча на индикаторе составляет 500 м. При полетах выше 500 м отсчет увеличивается на кратное число полных оборотов луча. Приближенная высота фотографирования известна из паспорта полета. Разность отсчетов на шкале точек выбросов дает расстояние от самолета до ближайшей точки местности с точностью  $\pm (2-3)$  м.

Для фиксирования колебаний высоты полета относительно поверхности постоянного давления (изобарической поверхности) применяют статоскоп, показания которого позволяют уточнить расчеты, полученные по радиовысотометру. Во время полета этот прибор автоматически регистрирует все изменения, на основании которых вычисляют колебания высоты полета. Моменты срабатывания затвора АФА фиксируются на фотопленке в виде точек, каждая из которых соответствует своему аэрофотоснимку. Статоскоп дает профиль полета самолета. По данным одновременной синхронной работы радиовысотомера и статоскопа можно вычислить фактическую высоту съемки каждого аэрофотоснимка.

Земную поверхность фотографируют преимущественно на аэрофотопленку, состоящую из основы (подложки) и светочувствительного слоя (эмульсии). В качестве подложки используют целлулоидную основу или лавсан, который мало деформируется при фотолабораторной обработке. Светочувствительный слой состоит из мелких кристалликов ( $d \approx 1$  мкм) бромистого серебра с примесью йодистого серебра, равномерно взвешенных в желатине.

Фотографические свойства пленки характеризуются общей и спектральной светочувствительностью, вуалью, контрастностью, шириной и разрешающей способностью. Эти качественные показатели пленки устанавливают по результатам сенситометрических испытаний при помощи комплекта специальной аппаратуры: сенситометра, проявительного прибора и денситометра. При испытаниях пленку помещают в сенситометр и подвергают действию света, проходящего через оптический клин со ступенями различной плотности. Эти ступени в разной степени ослабляют падающий на них свет. После фотолабораторной обработки получают пленку, состоящую из участков различной степени почернения, называемую сенситограммой. Затем эту сенситограмму помещают в денситометр и измеряют оптические плотности каждой ее ступени. По полученным данным строят так называемую характеристическую кривую – график зависимости плотности изображения  $D$  от логарифма количества освещения или экспозиций  $\lg H$  (рис. 3.8).

Общая светочувствительность пленки – ее способность после экспонирования и проявления чернеть, т. е. достигать определенной оптической плотности. Численно светочувствительность есть величина обратно пропорциональная экспозиции, создающей на фотографической эмульсии некоторую плотность  $D$

(см. рис. 3.8). Светочувствительность аэропленки определяют по экспозиции, которая создает почернение, превышающее плотность вуали на величину равную 0,85.

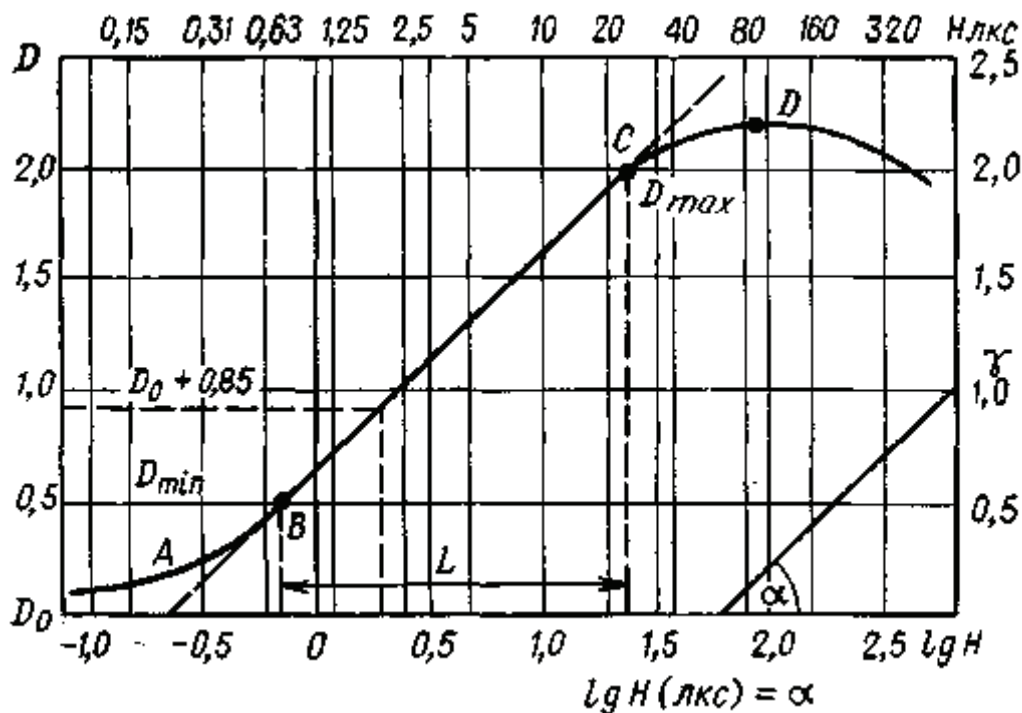


Рис. 3.8 — Характеристическая кривая (*AB* — область недодержек; *BC* — нормальных экспозиций; *CD* — передержек; *L* — фотографическая широта)

Спектральная чувствительность или цветочувствительность — чувствительность пленки к определенным зонам спектра. Этот показатель определяет свойства эмульсии передавать цвета фотографируемых объектов разной степени почернения на черно-белых пленках или различными цветовыми оттенками на цветных и спектрально-цветных пленках. Отрезок кривой *AB* — область недодержек, которая соответствует наименьшей величине экспозиции, *BC* — область нормальных экспозиций, *CD* — передержек (см. рис. 3.8). Отрезок *L* на оси абсцисс представляет фотографическую широту, которая характеризует способность пленки воспроизводить соотношение яркости фотографируемых объектов при колебаниях экспозиции. Чем больше широта эмульсии, тем меньше ошибки экспозиции влияют на качество фотоизображения. Вуаль — это способность неэкспонированной пленки к почернению. Она практически неощутима у новой пленки, но ее плотность возрастает при длительном хранении. Область вуали на рис. 3.8 расположена левее точки *A*.

Контрастность пленки характеризует способность эмульсии передавать различие в яркости отдельных частей снимаемых объектов. Коэффициент контрастности определяют по характеристической кривой как тангенс угла наклона прямолинейного отрезка *BC* к оси  $\lg H$ , т.е.  $\operatorname{tg} \alpha$ . Чем больше угол  $\alpha$ , тем выше контрастность эмульсии. По степени контрастности различают фотопленки мягкие с контрастом 1,0 и ниже, нормальные — от 1,1 до 1,4, контраст-

ные – от 1,5 до 1,9, особо контрастные – свыше 2,6. Разрешающая способность пленки определяется фотоэмульсией и зависит от светочувствительности и размеров кристалликов галоидного серебра. Пленки, применяемые для аэрофотосъемки, имеют разрешающую способность около 60 лин/мм.

Сенситометрический метод испытания пленки не обеспечивает в полной мере контроль качества цветных спектральных аэронегативов. Поэтому в настоящее время, кроме вышеуказанных показателей, определяют контрастно-частотную характеристику (КЧХ). КЧХ фотографирующей системы (объектив – аэропленка) можно получить по фотографируемому изображению тест-объекта-миры и расчетным путем.

Для определения КЧХ по фотографическому изображению миры применяют прибор, состоящий из оптической скамьи (коллиматора) и регистрирующего микрофотометра. Фотографическое изображение миры с постепенным изменением частоты штрихов рассматривают на микрофотометре и в результате получают регистрограмму; по результатам ее обработки строят кривую, определяющую КЧХ.

При определении КЧХ расчетным путем сначала устанавливают связь между КЧХ всей фотографирующей системы и КЧХ отдельных ее звеньев по формуле

$$T(N)_\phi = T(N)_o T(N)_s T(N)_\omega T(N)_\kappa, \quad (3.1)$$

где  $T(N)_\phi$  – результирующая КЧХ (КЧХ системы);  $T(N)_o$  – КЧХ объектива;  $T(N)_s$  – КЧХ аэропленки;  $T(N)_\omega$  – КЧХ, описывающая влияние нерезкости изображения, обусловленной перемещением аэрофотокамеры при экспонировании;  $T(N)_\kappa$  – КЧХ, описывающая влияние воздушной дымки.

Расчет КЧХ осуществляют по графику отдельных систем (рис. 3.9), где по оси ординат откладывают коэффициент передачи контраста  $T(N)$ , а по оси абсцисс пространственную частоту  $N$ .

Аэрофотопленки подразделяют на три группы: черно-белые – однослойные, цветные – трехслойные и спектральные – двух-трехслойные.

Черно-белые пленки в зависимости от сенсibilизации (очувствления фотоэмульсии путем введения в нее специальных органических веществ – оптических сенсibilизаторов) подразделяют на 7 видов: 1) несенсibilизированная (простая), у которой эмульсионный слой чувствителен только к фиолетовым, синим и голубым лучам в зонах спектра  $\lambda = 390 - 505$  нм; 2) ортохроматическая, дополнительно чувствительная к зеленым и желтым лучам при  $\lambda \leq 585$  нм с некоторым понижением чувствительности в пограничной зоне голубых и зеленых лучей ( $\lambda = 500 - 525$  нм); 3) изоортохроматическая, чувствительная к тем же лучам, но без понижения чувствительности к зеленой зоне; 4) панхроматическая, чувствительная ко всей зоне видимой области спектра ( $\lambda = 400 - 730$  нм), но с понижением чувствительности в зоне зеленых лучей ( $\lambda = 500 - 550$  нм); 5) изопанхроматическая, которая имеет такую же чувствительность, как и панхроматическая пленка, но почти без понижения чувстви-

тельности в зеленой зоне; б) инфрахроматическая, имеющая в области чувствительности – в видимой (синей) и невидимой (ИК) частях спектра ( $\lambda > 750$  нм); 7) панинфрахроматическая, чувствительная ко всем лучам видимой области спектра и частично к ИК зоне невидимого спектра.

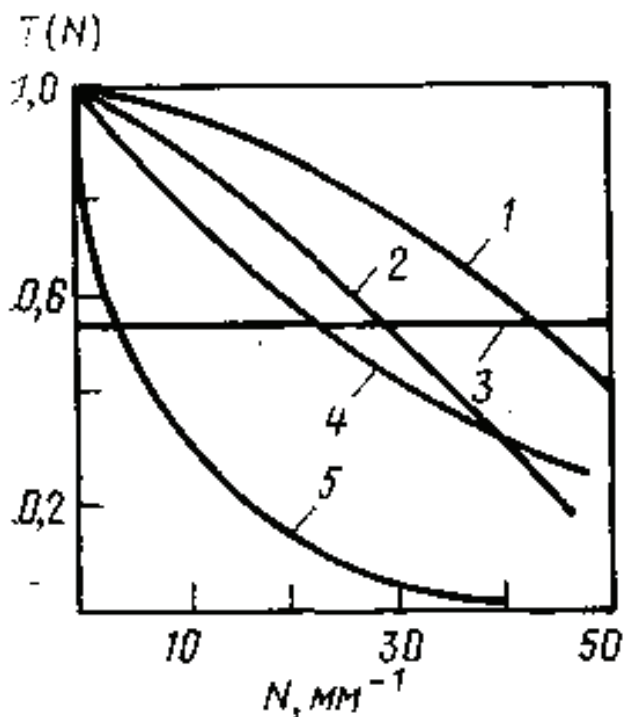


Рис. 3.9 – Пример расчета КЧХ (1 – КЧХ объектива; 2 – КЧХ, вызванная влиянием отсутствия резкости изображения; 3 – КЧХ аэрофотопленки; 4 – КЧХ, вызванная влиянием воздушной дымки; 5 – результирующая КЧХ)

На спектрональных цветных пленках объекты изображены в условных цветах, так как спектрональные аэрофотоснимки не передают действительных цветов природы, но сильно подчеркивают цветовым контрастом различие в окраске сфотографированных объектов. Так, хвойные породы, менее яркие, интенсивнее действуют на панхроматический слой и фиксируются в основном им, на негативе имеют пурпурный цвет. Лиственные породы изображаются на негативе сине-зеленым цветом, так как при экспонировании сильнее воздействуют на инфрахроматический слой. Таким образом, объекты природы, отражающие ИК лучи, действуют на инфрахроматический слой и создают на негативе сине-зеленое изображение; объекты, отражающие лучи видимой зоны спектра, больше воздействуют на панхроматический слой и создают на негативе пурпурное изображение; объекты, отражающие лучи обеих зон спектра, действуют на тот и другой слой и могут дать зеленовато-серое изображение.

Для изготовления аэрофотоснимков (отпечатков) применяют черно-белую, спектрональную двухслойную и цветную трехслойную бумагу.

### 3.1.2 Методология проведения аэрофотосъемки чрезвычайных ситуаций

Аэрофотосъемка ЧС состоит из подготовительных, летно-съёмочных, полевых фотолабораторных и полевых фотограмметрических работ. В подготовительный период одним из важнейших процессов является расчет элементов аэрофотосъемки. Для этого требуются заданные значения масштаба фотографирования и фокусного расстояния АФА, формат аэрофотоснимка, заданные проценты продольного и поперечного перекрытий, размеры съёмочного участка. По этим исходным данным определяют: высоту и базис фотографирования; интервал между экспозициями, число аэрофотоснимков в маршруте и на съёмочный участок; время, необходимое для аэрофотосъемки всего участка.

Перед началом летно-съёмочных работ проверяют и готовят к работе оборудование, материалы и полетные карты, проводят тренировку экипажей и составляют график полетов, а затем приступают к аэрофотосъемке. Набрав заданную высоту и выйдя на маршрут, аэрофотосъёмщик-оператор определяет угол сноса и путевую скорость самолета (если она не определяется автоматически). С учетом величины угла сноса самолет разворачивают против ветра на угол упреждения. Значение путевой скорости самолета или другого носителя необходимо для вычисления интервала времени между экспозициями. Угол сноса и путевую скорость самолета определяют при помощи оптических визиров в прямом и обратном направлениях по маршруту. После этого приступают к фотографированию местности: включив аэрофотосъёмочную аппаратуру, следят за ее работой и за прокладыванием аэрофотосъёмочных маршрутов в соответствии с проектом.

Самолетовождение при аэрофотосъемке осуществляют инструментально-визуальным методом, т. е. маршруты прокладывают по приборам и контролируют по земным ориентирам. В безориентирной местности прокладку съёмочных маршрутов и заходы на них производят инструментальным методом, особенность которого заключается в прокладке маршрутов только по расчетным данным, на основании показаний навигационных и пилотажных приборов.

Фотолабораторные работы состоят из негативного и позитивного процессов.

Негативный процесс включает проявление, фиксирование, промывку экспонированной аэропленки на специальных приборах. Горизонтальные, вертикальные, ручные и автоматические приборы сконструированы так, чтобы обеспечить равномерное и правильное по времени проявление пленки. Наиболее часто употребляют проявительные приборы с перематывающим пленку устройством. Состоят они из двух вращающихся катушек, расположенных на одной общей станине. Пленку равномерно перематывают с одной катушки на другую вручную или с помощью электромотора, в это время она проявляется в проявляющем растворе. После сушки дают предварительную оценку фотографического качества аэрофильма: если оно удовлетворяет требованиям, аэрофильм передают в фотограмметрическую группу, где негативы регистрируют и нумеруют. Затем аэрофильм поступает в фотолабораторию для изготовления позитивных отпечатков.

Позитивный процесс заключается в получении контактных аэрофотоснимков путем печатания на специальных станках (копировальных приборах) фотоизображения с негативов на светочувствительную фотобумагу или позитивную фотопленку. Контактные отпечатки должны быть достаточно контрастными и иметь полную проработку деталей в светах и тенях фотоизображений; границы между контурами отдельных участков должны быть четкими. Для получения таких аэрофотоснимков необходимо учитывать степень контрастности негативов при подборе фотобумаги, соблюдать нужную экспозицию и правильно выполнять проявление.

Полевые фотограмметрические работы включают следующие процессы: нумерацию аэрофильмов, статограмм и высотограмм; контроль качества аэрофотосъемки по всем показателям в соответствии с техническими требованиями; составление накидных монтажей; выявление необходимых исправлений и доделок; изготовление репродукции накидных монтажей; оценку качества съемки по законченным участкам; составление паспортов; подготовку, оформление и сдачу готовой продукции.

Нумерацию и регистрацию аэронегативов выполняют сразу после высушивания аэрофильмов. Каждый аэронегатив нумеруют с эмульсионной стороны в левом верхнем углу обратным (зеркальным) письмом. Кроме порядковых номеров аэрофотоснимков подписывают дату и номенклатуру района аэрофотосъемки. Все аэронегативы регистрируют в журнале и направляют в фотолaborаторию для изготовления контактной печати.

Накидным монтажом называют соединение контактных отпечатков по их общим контурам. Накидной монтаж выполняют на деревянных щитах в границах съемочных трапеций государственной разграфки. Предварительно аэрофотоснимки раскладывают по маршрутам. Монтаж аэрофотоснимков начинают с верхнего маршрута справа налево или слева направо, чтобы были видны номера аэрофотоснимков, которые последовательно накладывают один на другой, монтируют по контурам ситуации местности в местах перекрытий и закрепляют кнопками. Каждый следующий маршрут увязывают с предыдущим по перекрытиям. Полученный рабочий накидной монтаж позволяет установить границы заснятой территории, проверить, техническое и фотографическое качество съемочных работ. Дав предварительную оценку качества аэрофотоснимков, устанавливают места, подлежащие повторной аэрофотосъемке, если перекрытия между аэрофотоснимками составляют меньше заданной величины или имеются фотографические дефекты.

После окончания летно-съемочных работ выполняют чистовой накидной монтаж, на котором размечают рамки трапеции международной разграфки, пишут названия населенных пунктов и рек, а также номенклатуру трапеции. С накидного монтажа изготавливают репродукции. Масштаб репродукции должен быть в 3–4 раза мельче масштаба аэрофотосъемки. Репродукции накидного монтажа используют в дальнейшем при обследовании ЧС. По ним можно предварительно ознакомиться с районом работ, установить наличие ЧС, определить площадь ЧС, подобрать аэрофотоснимки для полевых работ.



Оптические свойства природных объектов имеют значительную изменчивость в разных зонах спектра. Поэтому для повышения достоверности дешифрирования материалов фотографирования проводят съемку одновременно в нескольких достаточно узких спектральных интервалах. Фотографирование при многозональной съемке (рис. 3.10) выполняют одной многообъективной или комплектом синхронизированных однотипных фотокамер с различными комбинациями черно-белых фотопленок и светофильтров, дающих несколько зональных изображений территории ЧС в разных спектральных интервалах.



**Рис. 3.10 – Пример фотосъемки при аэромониторинге**

Для совмещения зональных черно-белых изображений, полученных многозональной фотокамерой, применяют специальные проекторы, которые позволяют оптическим путем совмещать проекции трех-четырёх изображений, пропущенных через цветные фильтры (рис. 3.11). В результате на экране получается совмещенное изображение, окрашенное в натуральные или условные цвета; это изображение может быть использовано для визуального дешифрирования, зарегистрировано фотокамерой на фотопленке или записано на магнитной ленте с помощью сканирующего телевизионного устройства и магнитофона.

При синтезе цветных фотоизображений можно одновременно использовать 2 – 4 полученные в разных спектральных диапазонах фотографии, каждая из которых проектируется в отдельном оптическом канале на общий для всех каналов экран при увеличении линейных размеров изображения в 5 раз. Разные цветовые сочетания обеспечиваются с помощью специальных светофильтров (синего, зеленого и красного), имеющих в каждом оптическом канале. Выбор необходимых соотношений яркости при синтезе цветных изображений обеспечивается индивидуальной регулировкой силы света канальных проекционных ламп и введением нейтральных светофильтров в любой из каналов.



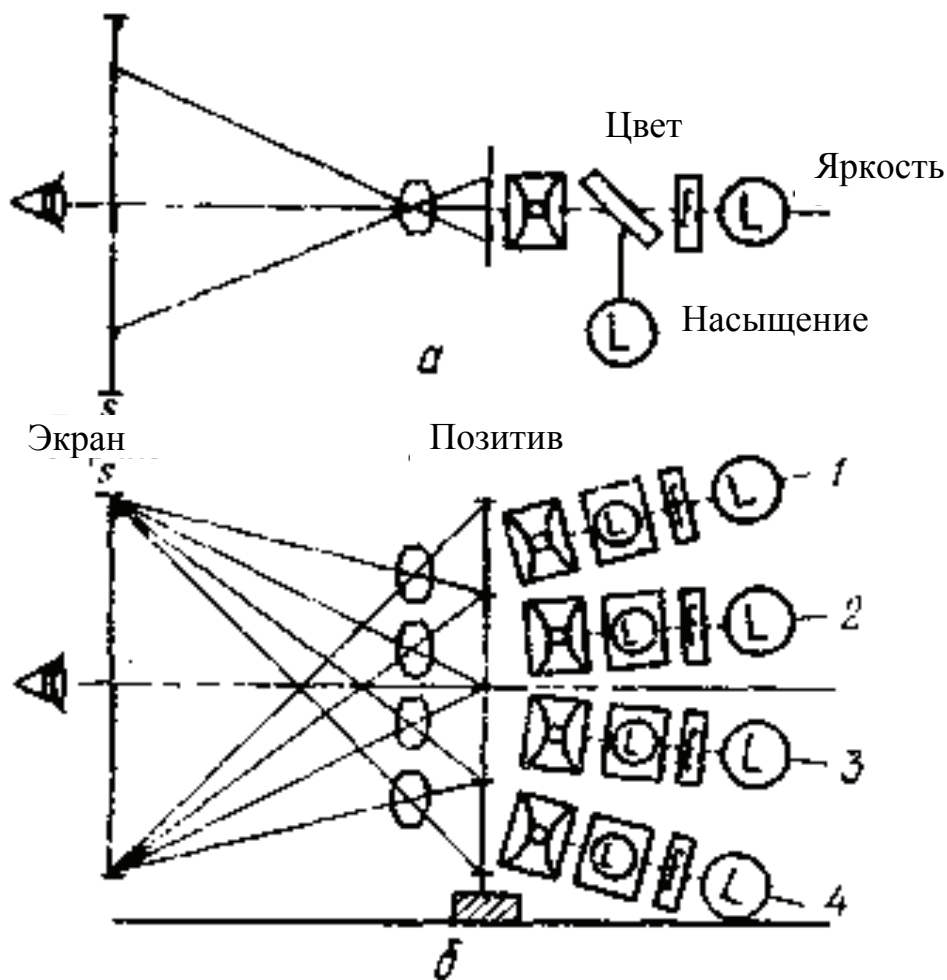


Рис. 3.11 – Схема получения синтезированного цветного изображения (а – вид сверху; б – вид с боку; 1 – красный; 2 – зеленый; 3 – синий; 4 – инфракрасный каналы; *P* – диапозитивы; *L* – лампы, освещающие диапозитивы, и внутренней подсветки; *F* – фильтры; *C* – конденсорные линзы; *S* – аддитивное цветное изображение на экране)

При многозональном фотографировании получают изображения с большей разрешающей способностью, чем при съемке на трехслойные цветные или спектрзональные фотопленки, при одновременной более высокой контрастности между объектами. Применение многозональной съемки в лесном хозяйстве весьма перспективно (рис. 3.12).

Тщательный подбор зон и светофильтров позволяет зафиксировать даже небольшую разность в изменении отражательной способности древесных пород и других объектов лесного фонда и увеличить контраст конечного изображения. Синтезированные изображения дают более высокие результаты при дифференциации породного состава, чем цветные спектрзональные изображения.



Рис. 3.12 – Пример применения многозональной съемки

### 3.2. Организация аэромониторинга чрезвычайных ситуаций с использованием нефотографических средств

Для съемки земной поверхности с летательных аппаратов разработаны нефотографические средства: оптико-механические сканеры, видиконовые ТВ камеры, тепловизоры или ИК-радиометры, радиолокационные системы, микроволновые радиометры. Оптико-механические сканеры и ТВ кадровые камеры работают в видимом и ближнем ИК-диапазонах, тепловизоры и ИК-радиометры в ИК тепловом диапазоне, а радиолокационные системы и микроволновые радиометры – в радиодиапазоне. Все они, кроме радиолокационных систем, являются пассивными средствами дистанционного зондирования, регистрирующими излучение Земли. Радиолокационные средства – активные, так как сами посылают сигналы и регистрируют их отражение от земной поверхности. Оптико-механические сканеры и видиконовые ТВ камеры применяют при ТВ съемках.

*Оптико-механические сканеры.* Конструктивно они состоят из оптической системы, фотоэлектронных преобразователей, устройств приема, обработки и выдачи информации. Оптические системы в комплексе с фотоэлектронными преобразователями предназначены для формирования ТВ сигнала, несущего информацию от объекта съемки сканирующего элемента. Сканирование местности осуществляется с помощью вращающегося клинообразного зеркала или призмы: в одном направлении за счет движения самолета (спутника) вперед, а в другом (перпендикулярном линии полета) – за счет вращения или колебания призмы (зеркала). Колебательное перемещение зеркала в сочетании с движением самолета (спутника) обеспечивает непрерывный последовательный



ЭВМ, подвергнуты машинному анализу и выданы в виде черно-белых или цветных фотоснимков, тематических карт, таблиц, характеризующих отснятую территорию. Черно-белые изображения, полученные в одной зоне, или синтезированные цветные, полученные с помощью оптико-механических сканеров или ТВ камер, по своим изобразительным и дешифровочным свойствам близки к фотографическим изображениям.

Преимущества съемки методом оптико-механического сканирования следующие: приемники излучения обладают высокой чувствительностью и позволяют выполнять съемку в узких (несколько десятков нанометров) спектральных интервалах; в цифровых данных, характеризующих заснятую территорию, отсутствуют «шумы», которые неминуемо появляются при фотосъемке и фотолабораторной обработке съемочных материалов.

Недостатком современных сканирующих систем является их несколько меньшая в сравнении с фотографией пространственная разрешающая способность (единицы метров для самолетных и десятки метров для спутниковых систем). В настоящее время ведутся разработки в целях улучшения этого показателя, поэтому применение оптико-механических сканеров для изучения и оценки состояния лесов, особенно там, где требуется оперативная информация, следует считать перспективным и эффективным.

*ТВ кадровые камеры.* В качестве съемочных систем применяют ТВ камеры со специальной передающей ЭЛТ – видиконом. Съемку выполняют в режиме непосредственной передачи изображений на наземные приемные станции, если летательный аппарат находится в зоне их приема радиусом несколько тысяч километров и в режиме запоминания; во втором случае осуществляется магнитная запись видеосигнала. В последующем записанная информация передается по радиоканалам. Переданные электрические сигналы преобразуются в цифровую форму или в изображение на ТВ экране, с которого выполняется фотографирование на пленку.

Телевизионные съемки выполняют в видимом и ближнем ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Бывают однозональные и многозональные ТВ съемочные системы. В последнем случае на борту летательного аппарата устанавливают несколько ТВ камер или одну камеру с несколькими передающими ЭЛТ (отдельно для каждой спектральной зоны). Разрешающая способность ТВ снимков приближается к таковой на снимках, полученных оптико-механическими сканерами.

Видиконные ТВ камеры обеспечивают получение изображений поверхности Земли в реальном или близком к реальному масштабе времени.

*ИК тепловая съемка.* В обобщенном виде структурная схема ИК-системы, как и в оптико-механических сканерах, содержит оптическую систему и устройства приема, обработки и выдачи информации. Оптическая система предназначена для восприятия ИК-излучения, предварительной ее обработки (фильтрации) и фокусирования на чувствительных элементах приемного устройства. В ее состав входят подвижные и неподвижные оптические элементы: фокусирующая оптика, фильтры, сканирующие и модулирующие устройства, которые осуществляют восприятие излучения, его оптическую и простран-

венную фильтрацию и модуляцию. Оптические системы могут быть одно- и многоканальными. В многоканальных системах каналы обычно отличаются фильтрующими свойствами. Приемное устройство преобразует ИК-излучения, прошедшие оптическую и пространственную фильтрации и модуляцию, в электрические сигналы. Оно состоит из приемников теплового излучения с предварительными усилителями сигналов, опорных источников излучения и устройств охлаждения приемников.

Устройства обработки информации в зависимости от задач включают усилители, фильтры, пороговые устройства, различные нелинейные элементы, а также специализированные аналоговые или цифровые вычислители и ЦВМ, которые могут выполнять роль селекторов, распознающих устройств и дешифровочных автоматов. В некоторых ИК-системах устройства обработки информации подразделяют на бортовые, устанавливаемые на спутнике (самолете), и наземные.

Устройства выдачи информации состоят из индикаторных, печатающих, фоторегистрирующих, записывающих и запоминающих приборов. В зависимости от состава устройств информация на выходе ИК-систем может быть представлена в виде ИК изображений, на мониторе ТВ типа непрерывных сигналов, табличной, цифровой и текстовой информации. Она может выдаваться для непосредственного наблюдения или записываться на фотомагнитные и другие носители (рис. 3.14). Тепловое излучение в узком пространственном угле зрения поступает на зеркальную грань равномерно вращающейся призмы 7. Оптическая система 9, 10 фокусирует излучение в плоскости приемника 5. Электрический сигнал с выхода приемника, пропорциональный воспринятому потоку, усиливается и подается на модулирующий электрод ЭЛТ 3. Точечное световое пятно на экране ЭЛТ с помощью объектива 2, призмы 4 и двух вращающихся объективов 5 проецируется на плоскость фотопленки 6. Поскольку вращающиеся объективы смонтированы на одной оси со сканирующей призмой, воспринимающее и записывающее сканирование осуществляется синхронно. За один оборот записываются две строки изображения. Длина строки на местности (ширина полосы захвата) равна двойной высоте съемки. В настоящее время можно получать стереопару тепловых снимков за счет поочередного сканирования в двух плоскостях под углом 300.

Зафиксированные с ЭЛТ на фотопленке ИК тепловые изображения по своим характеристикам близки к изображениям, получаемым при аэрофотосъемке. Они относительно легко поддаются дешифровке. Оптические плотности показывают различия в величине теплового излучения. На негативах объектам с повышенной температурой соответствует наибольшая оптическая плотность, на позитивах, наоборот, они имеют меньшую плотность. Пороговая чувствительность современной ИК тепловой аппаратуры составляет 0,5 – 1 °С, что обеспечивает регистрацию даже относительно небольших температурных контрастов. Геометрическое разрешение деталей на местности не превышает 0,001 высоты полета носителя. В связи с этим по данным тепловой съемки из космоса можно выделять объекты большой величины – от сотен метров и более, а при съемке с самолетов и вертолетов – единиц и десятков метров.



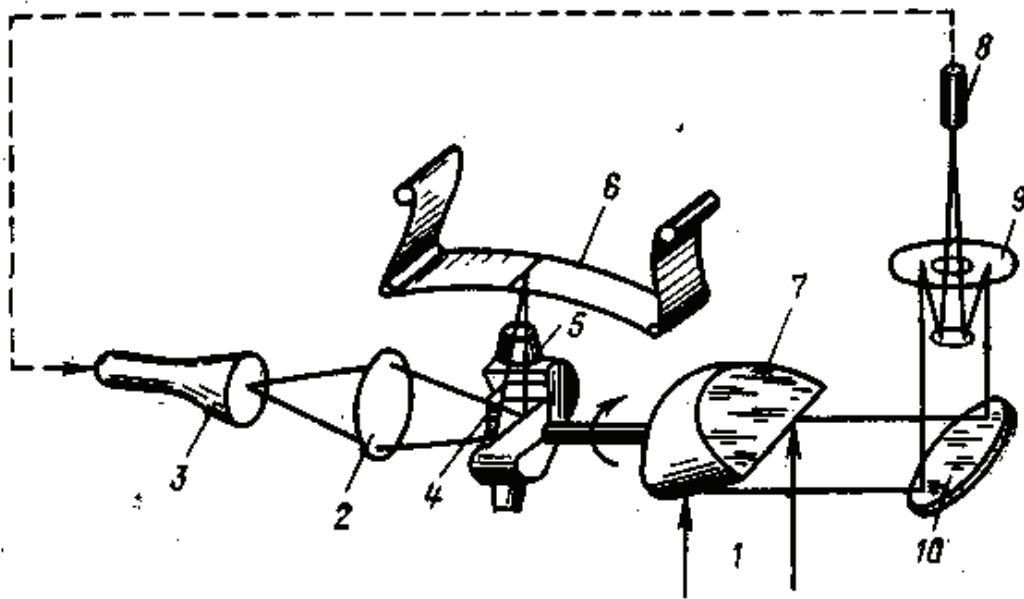


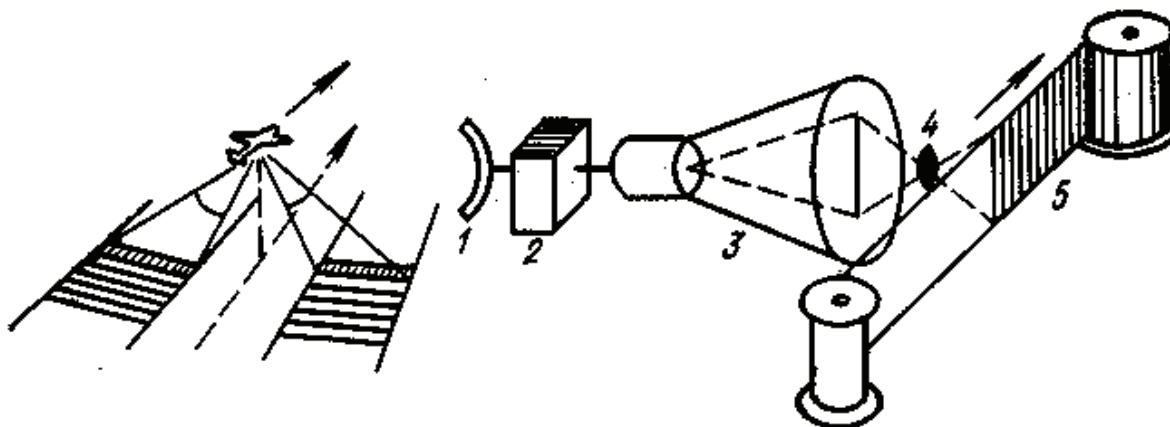
Рис. 3.14 – Схема ИК тепловизора (1 – угол зрения; 2 – объектив; 3 – ЭЛТ; 4 – призма; 5 – два вращающихся объектива; 6 – фотопленка; 7 – призма; 8 – приемник; 9, 10 – оптическая система)

При изучении природных ресурсов Земли ИК-системы позволяют: устанавливать влагосодержание почв и степень заболоченности местности; обнаружить лесные пожары и наводить противопожарные ракеты; определять вид и характер облачного покрова, границы снеготаяния, места и степень загрязнения воды и воздуха; выявлять участки лесной и сельскохозяйственной растительности, поврежденной болезнями, вредителями, промышленными эмиссиями; получать тепловые карты Земли; осуществлять тематическое картографирование местности и изучать ночную жизнь животных; исследовать оптические свойства атмосферы, а также решать ряд других задач МЧС.

*Радиолокационная съемка.* Это активное средство зондирования основано на использовании отражения зондирующих сигналов, излучаемых передатчиком РЛС от земной поверхности. Сигналы в виде коротких импульсов высокой частоты излучаются в пределах узкого в горизонтальной плоскости и широкого в вертикальной плоскости луча, создаваемого антенной РЛС, достигают разных объектов на местности. От них часть отраженной электромагнитной энергии возвращается к РЛС. Отраженные радиосигналы регистрируются приемником и устройством преобразования сигнала, что вызывает свечение ЭЛТ соответственно интенсивности каждого отраженного сигнала. Возникающее на экране ЭЛТ изображение регистрируется на фотопленке, которая протягивается перед экраном со скоростью пропорциональной скорости полета самолета.

Радиолокационная съемка ведется в диапазоне 0,3 – 100 см (100 ГГц – 300 МГц) в полосе местности на некотором расстоянии от самолета, что достигается применением задержки начала развертки на экране ЭЛТ индикаторного блока РЛС (рис. 3.15). Интенсивность отраженного от поверхности сигнала в зависимости от параметров РЛС (длины волны, мощности, поляризации сигнала, характеристики антенны) определяется рассеивающими и поглощающими

свойствами растительного и почвенного покровов. Отраженный сигнал – это случайный процесс, зависящий от физических и биометрических характеристик растительности и почвы, а также от топографических особенностей местности.



**Рис. 3.15** – Схема радиолокационной съемки (1 – антенна; 2 – приемник-передатчик; 3 – ЭЛТ; 4, 5 – фоторегистрирующее устройство)

В настоящее время для исследования природных ресурсов Земли используют самолетные РЛС бокового обзора, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн. Примером таких РЛС может служить станция «Торос», устанавливаемая на самолете Ан-24 и работающая на длине волны 2,5 см. Поляризация излучаемого и принимаемого сигналов – горизонтальная. Данные радиолокационной съемки фиксируются на пленке шириной 15 см, что соответствует полосе захвата на местности около 13,5 км при высоте полета 4,5 км. Масштаб съемки в этом случае 1:90000; размер элемента разрешения на местности 20x50 м в середине полосы захвата.

Использование РЛС позволяет проводить съемки в любое время суток и в любую погоду, а также зондировать поверхностные слои почвы с проникновением на некоторую глубину. Недостатки радиолокационных съемок – более низкая разрешающая способность, мелкий масштаб изображения, дисторсия изображения, наличие значительных затененных районов в горных условиях. Правда, в настоящее время разрабатывают РЛС с синтетической апертурой, имеющие лучшее разрешение.

Основные дешифровочные признаки радиолокационных снимков – тон, текстура рисунка изображения, радиолокационная тень. На снимках очень хорошо подчеркивается рельеф местности (как при низком положении Солнца), причем впечатление выпуклости рельефа усиливается, а изображение некоторых отрицательных его форм, попадающих в зоны радиолокационной тени, пропадает. Геометрия радиолокационных снимков не такая, как у аэрофотоснимков, так как на них искажается форма объектов, возвышающихся над поверхностью Земли.

Материалы радиолокационной съемки могут найти применение при решении таких задач, как изучение и картографирование лесов в районах, где из-

за погодных условий съемка другими средствами дистанционного зондирования затруднена и исследование почвенного покрова.

*Микроволновая съемка.* Основана на возможности измерения с помощью радиометров, установленных на самолетах или на КЛА, поляризации и интенсивности собственного радиотеплового излучения земной поверхности в микроволновом (МВ) диапазоне  $\lambda = 0,1 - 30$  см. Интенсивность излучения в МВ диапазоне значительно ниже, чем в ИК, поэтому съемочные материалы имеют более низкую разрешающую способность. В то же время микроволновые съемки позволяют проводить наблюдения сквозь облачный покров.

При микроволновой съемке используют радиометр с направленной антенной, приемником (для селекции и усиления) и детектором. Разрешающая способность съемки на местности зависит от высоты носителя, например, спутниковые радиометры имеют разрешение до 1 км.

Микроволновая съемка менее чувствительна к изменению метеорологических условий, смене дня и ночи по сравнению с ИК тепловой съемкой. Имеются приемники МВ теплового излучения с пороговой чувствительностью 0,10, которые позволяют регистрировать достаточно подробную структуру радиотепловых волн земной поверхности непосредственно с летательных аппаратов и получать изображение на экране ЭЛТ. Экспериментальные данные свидетельствуют, что по естественным МВ тепловым контрастам отчетливо выделяются пески, глины, торфяники и некоторые другие показатели, характеризующие подстилающую поверхность. По данным микроволновых съемок определяют содержание водяного пара на фоне поверхности океана, составляют мгновенную карту распределения влагосодержания. На основе их были определены кромка паковых льдов Антарктиды, влажность почвы с градацией 5 – 6% и зоны недавно выпавших осадков с градациями 4 мм, граница снегового покрова, дифференцированы крупные территории на горные области, полупустынные и пустынные, занятые лесами и др.

### **3.3. Аэромониторинг природных экосистем**

На средства аэромониторинга при охране природных экосистем, возлагается обеспечение обнаружения пожаров, оценка параметров возникающих пожаров (разведка пожаров) и координация действиями службами пожаротушения.

Основными методами обнаружения пожаров в природных экосистемах являются: визуальное обнаружение по дыму в дневные часы (рис. 3.16) и по пламени ночью; инструментальное обнаружение, основанное на регистрации излучаемой пожаром энергии. Подавляющее большинство пожаров в настоящее время определяется визуальным методом, в основе которого лежат три основных фактора: размер дымовой колонки, прозрачность атмосферы и степень контраста между дымом и фоном, на котором он виден наблюдателю. Ограниченные возможности визуального обнаружения тлеющих пожаров (скрытых очагов горения), а также подземных пожаров с незначительным количеством



дыма обуславливает необходимость использования инструментальных методов.



**Рис. 3.16 – Визуальное обнаружение пожара в природной экосистеме по дыму**

Использование инфракрасной техники (ИК-аппаратуры) для инструментального обнаружения пожаров основано на регистрации различий в температуре участков земной поверхности. Высокая чувствительность такой аппаратуры, возможность термического картографирования территории позволяют обнаруживать мелкие очаги на значительном расстоянии при условии нахождения их в пределах прямой видимости. Экранирование теплового излучения древесным пологом, наличие нагретых тел и резких контрастов в температуре различных участков поверхности существенно ограничивают эффективность данного метода.

Обнаружение пожаров на обслуживаемой авиацией территории лесного фонда осуществляется путем: воздушного патрулирования лесов (авиапатрулирования) – рис. 3.17; организованного наблюдения за лесом с сети стационарных наземных пунктов (мачт, вышек); наземного патрулирования наиболее пожароопасных лесных массивов; неорганизованного наблюдения за лесом местным населением, туристами (общественностью) и т. д.

Авиапатрулирование включает регулярное выполнение полетов над охраняемой территорией лесного фонда по установленным маршрутам с целью обнаружения лесных пожаров. Основные достоинства этого способа: экономичность, обусловленная большим радиусом обзора с патрульного борта, высокой скоростью его перемещения по территории, а соответственно и большими размерами осматриваемой каждым патрулем территории; гибкость, т. е. возможность полного охвата всей территории наблюдением независимо от рельефа местности и условий видимости; возможность детальной разведки пожара и совмещение ее с обслуживанием лесных пожаров.



**Рис. 3.17 – Воздушное патрулирование леса**

К недостаткам авиационного способа относятся: периодический характер наблюдения за лесными массивами; существенная зависимость от погодных условий; необходимость в высококвалифицированных специалистах (пилотах, летчиках-наблюдателях).

По своевременности обнаружения пожаров авиапатрулирование в силу периодичности облетов не может превзойти непрерывного наблюдения за лесными массивами со стационарных наземных пунктов (мачт, вышек), а соответственно и полностью заменить последние при высоких требованиях к оперативности обнаружения. Наличие перечисленных преимуществ по сравнению с наземными способами обнаружения позволяет рассматривать авиапатрулирование как важнейший компонент системы мониторинга лесных пожаров, позволяющий существенно расширить ее возможности. Состав и структура такой системы формируется в соответствии с требованиями к своевременности обнаружения лесных пожаров и существующими в каждом районе организациями на различные виды ресурсов.

В районах авиационной охраны авиапатрулирование является основным и, как правило, единственным способом обнаружения лесных пожаров. Отсутствие в этих районах сети стационарных пунктов наземного наблюдения, их труднодоступность и удаленность от населенных пунктов и путей транспорта обуславливают определяющую роль авиапатрулирования в деле обнаружения пожаров на их территории.

В районах наземной охраны с авиапатрулированием обнаружение пожаров осуществляется совместными усилиями авиационных и наземных средств. Эти районы представляют пересечение зон действия наблюдательных пунктов (мачт, вышек), воздушных и наземных патрулей. Своевременность обнаружения лесных пожаров определяется здесь минимальной длительностью их рас-

пространения от возникновения до обнаружения одним из перечисленных способов (элементов системы охраны леса от пожаров).

В зависимости от степени охвата территории различают два вида патрулирования: общее и выборочное. Общее патрулирование осуществляется по стабильным маршрутам, обеспечивающим осмотр всей территории лесного фонда в границах каждого структурного подразделения авиалесоохраны. Выборочное патрулирование проводится по разовым маршрутам, приуроченным к местам наиболее вероятного возникновения пожаров (путям прохождения гроз; частям территории, не захваченных осадками и т. д.).

Существует две разновидности авиапатрулирования: без активных сил и средств тушения (пассивное); с активными силами и средствами тушения (активное). Первая из них наиболее широкое распространение получила в хозяйственно освоенных районах с высокой плотностью населения и развитой дорожно-транспортной сетью, где своевременная ликвидация пожаров возможна силами и средствами наземной охраны.

Патрулирование с активными силами и средствами тушения осуществляется по двум технологическим схемам: с совмещенными патрульными и транспортными операциями (патрульно-транспортной) и с дифференцированными патрульными и транспортными операциями (с дежурным вертолетом).

При реализации патрульно-транспортной схемы обнаружение и оперативное обслуживание пожаров осуществляется одним и тем же воздушным судном, выполняющим облет патрульного маршрута, осмотр возникающих и действующих пожаров, высадку к ним имеющихся на борту групп. В случае обнаружения пожара при отсутствии на борту парашютистов и десантников-пожарных или их недостаточной численности для ликвидации пожара воздушное судно направляется к месту базирования или ближайшему пункту дислокации пожарных команд и только после их высадки к пожару продолжает облет патрульного маршрута.

Патрульная схема с дежурным вертолетом реализуется при совместной работе воздушных судов, выполняющих различные функции. Патрульные суда осуществляют периодические облеты охраняемой территории по установленным маршрутам, осмотр возникающих и действующих пожаров, высадку к ним имеющихся на борту авиапожарных групп. При их отсутствии или недостаточной численности для успешной ликвидации пожара патрульное судно вызывает дежурный вертолет и продолжает облет маршрута.

При реализации схемы пассивного патрулирования воздушные суда осуществляют периодические облеты охраняемой территории по установленным маршрутам, осмотр возникающих и действующих пожаров, передачу сообщений о них наземной лесной охране, оповещение которой осуществляется при помощи радиосвязи или путем сбрасывания вымпелов в пункты приема донесений.

Авиапатрулирование лесов начинается с наступлением пожароопасного сезона. До начала регулярных полетов проводится контрольно-проверочный облет территории каждого структурного подразделения авиалесоохраны с целью определения готовности ее к авиаобслуживанию и ознакомления с усло-

виями полетов, проверки выполнения работающими в лесу предприятиями правил пожарной безопасности.

Периодичность и время выполнения патрульных полетов в течение пожароопасного сезона регулируется в соответствии со степенью пожарной опасности в лесу по условиям погоды и складывающейся пожарной обстановкой. Действующими регламентациями работы лесопожарных служб МЧС предусматриваются следующие режимы авиапатрулирования: при отсутствии пожарной опасности (I класс) патрулирование не проводится; при низкой пожарной опасности (II класс) до начала фактического этапа горючести патрулирование проводится через 1 – 2 дня, с наступлением горючести – 1 раз в день; при средней пожарной опасности (III класс) до начала фактического периода горючести проводится однократное патрулирование, с наступлением горючести – двухразовое патрулирование; при высокой пожарной опасности (IV класс) до начала фактического периода горючести проводится двухразовое, с наступлением горючести – трехразовое патрулирование; при чрезвычайной пожарной опасности (V класс) независимо от наличия фактической горючести производится трехразовое патрулирование лесов.

Кратность авиапатрулирования повышается при скорости ветра более 8 м/с и в дни с массовым посещением лесов населением. Кратность патрулирования снижается при выпадении слабых осадков (менее 3 мм), не снижающих класс пожарной опасности в лесу по условиям погоды.

Общее авиапатрулирование осуществляется по маршрутам, установленным в каждом структурном подразделении МЧС применительно к различным режимам их работы: одно-, двух- и трехкратное патрулирование соответственно в условиях низкой, средней и высокой пожарной опасности. Маршруты прокладываются в виде замкнутых ломаных линий, с которых обеспечивается полный просмотр обслуживаемой территории в условиях средней видимости при их минимальной протяженности. В качестве основных ограничений при прокладке маршрутов общего патрулирования учитываются требования безопасности полета, прохождения их через наиболее пожароопасные участки территории и ориентиры, хорошо опознаваемые в полете. Предельная протяженность патрульного маршрута ограничивается действующими нормативами по площадным нагрузкам на летательные аппараты при выполнении авиалесоохранных работ. Расстояние между линиями маршрута допускается не более 60 км, а от маршрута до границы обслуживаемой авиаотделением территории – не более 30 км.

Полеты по патрульным маршрутам выполняются на малых и средних высотах, на крейсерской скорости, установленной для транспортных полетов на воздушных судах данного типа. При нормальной видимости полет выполняется на высоте 600 – 800 м. При хорошей видимости высота полета увеличивается до 1000 – 2000 м, а в условиях плохой видимости уменьшается до безопасной высоты, установленной для данного района.

Во время полета по маршруту ведется постоянное наблюдение за состоянием лесов и наличием дыма. При появлении в зоне обзора дымовой колонки (дымовой точки) восстанавливается детальная ориентировка и осуществляется

сход с маршрута для ее осмотра. Место пожара определяется путем привязки его к ближайшему ориентиру или пеленгации с двух или трех ориентиров. Точность определения места пожара считается хорошей, если ошибка не превышает 0,5 км, и удовлетворительной, если она находится в пределах 1 км.

По внешним признакам (форме пожара, цвету дыма, размерам пламени) устанавливается вид пожара и определяется его площадь. Площадь пожара измеряется глазомерно или полетом по нанесенному на патрульную карту контуру пожара. Границы пожара наносятся на карту по ориентирам, опознанным при осмотре. Контур пожара наносится на патрульную карту, если его площадь в масштабе этой карты составляет не менее 0,5 см. Допустимая погрешность определения площади пожара составляет 30%.

Для выявления вида пожара используют следующие признаки: низовой – форма пожара вытянута, с извилистыми границами, огонь виден местами, цвет дыма беловатый; верховой – форма пожара сильно вытянута, видны вспыхивающие кроны, огонь хорошо заметен, цвет дыма темный; почвенный (подземный) или торфяной – границы плохо заметны, дым поднимается со всей площади пожара, огонь не виден.

После определения площади и вида пожара при необходимости составляется схема места пожара. Для этого с патрульной карты переносятся, сохраняя ориентировку по странам света, границы квартала, в котором возник пожар, и смежных с ним кварталов, а также топографию местности. Затем наносятся (красным цветом) границы пожара или его место и стрелкой указывается направление движения фронтальной кромки. На схему наносятся основные ориентиры – реки (с названиями и направлением течения), дороги (с указанием населенных пунктов, к которым они ведут), естественные преграды. Указывается направление ветра, пути подхода к пожару и расстояния до основных ориентиров.

После составления схемы производится осмотр пожара с высоты 100 м для вертолета и 200 м для самолета, дается описание лесорастительных условий, определяется интенсивность пожара и наличие или отсутствие на нем людей. Для определения интенсивности пожара используются следующие признаки: сильная интенсивность – пламя заметно с высоты 200 м по всему фронту огня; при средней интенсивности – пламя заметно с высоты 200 м лишь на отдельных участках фронтальной части пожара; малая интенсивность – огонь с высоты 200 м не заметен.

В процессе осмотра пожара определяется тактика и техника тушения, потребность в силах и средствах пожаротушения с учетом динамики пожара до прибытия рабочих. Вся информация о пожаре с борта самолета сообщается по радио авиаотделению для передачи пункту диспетчерского управления МЧС и лесхозу. При наличии радиосвязи сообщение о пожаре передается по радио, а при отсутствии радиосвязи – путем сбрасывания донесения. После передачи сообщения о пожаре самолет возвращается на патрульный маршрут и продолжает его облет.

За каждым обнаруженным лесным пожаром устанавливается наблюдение с воздуха до полной его ликвидации. Оно осуществляется в процессе авиапат-

рулирования, а в случае необходимости для этого назначаются специальные полеты. Осмотры действующих пожаров производятся по запросу руководителей их тушения. При отсутствии связи с ними осмотр действующих пожаров производится ежедневно. Облеты действующих пожаров производятся также после выпадения осадков независимо от класса пожарной опасности в лесу по условиям погоды. Особое внимание уделяется при этом организации окарауливания пожаров и дотушивания имеющихся очагов огня.

Характеристики процесса обнаружения лесных пожаров. Основная характеристика процесса обнаружения лесного пожара – длительность его распространения с момента возникновения до выявления. В силу случайного распределения времени возникновения пожара в течение суток длительность его распространения до обнаружения также случайная величина, полной характеристикой которой является функция распределения вероятностей.

Основными параметрами авиапатрулирования, определяющими длительность распространения пожара до его обнаружения, служат кратность осмотра территории (число облетов в день) и расписание патрульных полетов.

Введем обозначения:  $L$  – протяженность патрульного маршрута, км;  $V$  – путевая скорость патрульного летательного аппарата, км/ч;  $\xi$  – проекция географических координат пожара на траекторию патрульного маршрута;  $\eta$  – момент возникновения пожара;  $S_j$  – начало  $j$ -го облета;  $\{S_j\}_{j=1}^n$  – расписание патрульных полетов;  $n$  – кратность авиапатрулирования.

Вектор  $(\xi, \eta)$  определяет место и время возникновения пожара;  $\xi$  и  $\eta$  – независимые случайные величины. Пусть время обслуживания пожара равно нулю, а появление патрульного судна в точке  $\xi$  маршрута совпало с началом распространения пожара. Время появления летательного аппарата в этой точке при  $j$ -м вылете  $U_j(\xi)$  определяется в этом случае следующим образом:

$$U_j(\xi) = S_j + \xi/V, \quad (3.2)$$

Рассмотрим на плоскости область  $C$  – пространство значений векторной случайной величины  $(\xi, \eta)$ . Оно будет равно:

$$\{(\xi, \eta) / \xi \in [\emptyset, L], \eta \in [\emptyset, 24]\}, \quad (3.3)$$

Обозначим через

$$D_j(Z) = \{(\xi, \eta) / \xi \in [\emptyset, L], S_j + \xi/V - Z \leq \eta \leq \tau_j + \xi/V\}, \quad (3.4)$$

здесь  $(\xi, \eta) \in D_j(Z)$  означает, что пожар будет обнаружен за время, не большее  $Z$ , после возникновения при  $j$ -м вылете того же дня.

Выражение  $q_j(Z) = P\{(\xi, \eta) \in D_j(Z)\}$  означает вероятность обнаружения пожара за время, не большее  $Z$ , при  $j$ -м вылете.

Пусть  $D(Z) = \bigcup_{j=1}^m D_j(Z)$ ;  $Q(Z) = P\{(\xi, \eta) \in D(Z)\}$  – вероятность обнаружения пожара после его возникновения за время, не большее  $Z$ . Тогда при постоянном расписании патрульных полетов и стабильном распределении времени возникновения пожара в течение суток величина  $Q(Z)$  может быть представлена в виде:

$$Q(Z) = \sum_{j=1}^m \int_0^L \int_{S_j + \xi/V - Z}^{S_j + \xi/V} f(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (3.5)$$

где  $f(\xi, \eta)$  – совместная плотность распределения координат пожара на маршруте и времени его возникновения в течение суток. В силу независимости случайных величин  $\xi$  и  $\eta$  совместная плотность распределения  $f(\xi, \eta)$  может быть представлена в виде:

$$f(\xi, \eta) = f(\xi)f(\eta); \quad (3.6)$$

При равномерном распределении координаты пожара на маршруте ( $f(\xi) = L^{-1}$ ) и нормальном распределении времени его возникновения в течение суток:

$$f(\eta) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-\frac{(\eta - a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.7)$$

выражение для  $Q(Z)$  принимает вид

$$Q(Z) = \sum_{j=1}^{mL-1} \int_0^L d\xi \int_{S_j + \xi/V - Z}^{S_j + \xi/V} (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[\frac{(\eta - a)^2}{2\sigma^2}\right] d\eta, \quad (3.8)$$

где  $a$  – математическое ожидание (среднее значение) времени возникновения пожара в течение суток;  $\sigma$  – стандартное (среднеквадратическое) отклонение времени возникновения пожара.

Для практики наибольший интерес представляет расписание полетов, обеспечивающее максимум своевременно обнаруженных пожаров при каждом значении кратности авиапатрулирования. В зависимости от выполняемых авиацией функций и условий борьбы с огнем в качестве критериев оптимальности расписания используются минимум математического ожидания длительности распространения пожара до обнаружения или максимум вероятности его обнаружения в течение заданного промежутка времени после возникновения.

Оптимальное расписание полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара существенным образом зависит от допус-



тимой длительности его распространения до обнаружения, т.е. величины  $Z$ . Вероятность обнаружения пожара в течение 1 ч после его возникновения при длительности светлого времени суток 10 – 12 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 2$ ) изменяется от 0 при вылете рано утром или поздно вечером до 0,2 при вылете на патрулирование в 14 ч. С увеличением продолжительности светлого времени суток максимальное значение вероятности своевременного обнаружения пожара падает от 0,16 при долготе дня 14 – 16 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 2,5$ ) до 0,13 при долготе дня 20 – 22 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 3$ ). Оптимальное время вылета остается при этом постоянным, равным 14 ч.

С увеличением допустимой длительности распространения пожара растет вероятность его своевременного обнаружения и происходит смещение оптимального времени вылета вправо по временной оси. При допустимом времени распространения пожара  $Z = 2$  ч вероятность своевременного обнаружения достигает 0,38 при долготе дня 0 – 12 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 2$ ), 0,31 при долготе дня 14 – 16 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 2,5$ ) и 0,26 при долготе дня 20-22 ч ( $a = 14$ ;  $\sigma = 3$ ).

Увеличение периодичности облетов территории ведет к монотонному снижению средней длительности распространения пожара до обнаружения и росту вероятности его своевременного обнаружения. Максимум вероятности своевременного обнаружения достигается при назначении патрульных вылетов в период наибольшей интенсивности возникновения лесных пожаров. Расписание полетов, оптимальное по критерию минимума математического ожидания длительности распространения пожара до обнаружения, смещено на более поздние сроки по сравнению с расписанием, оптимальным по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара.

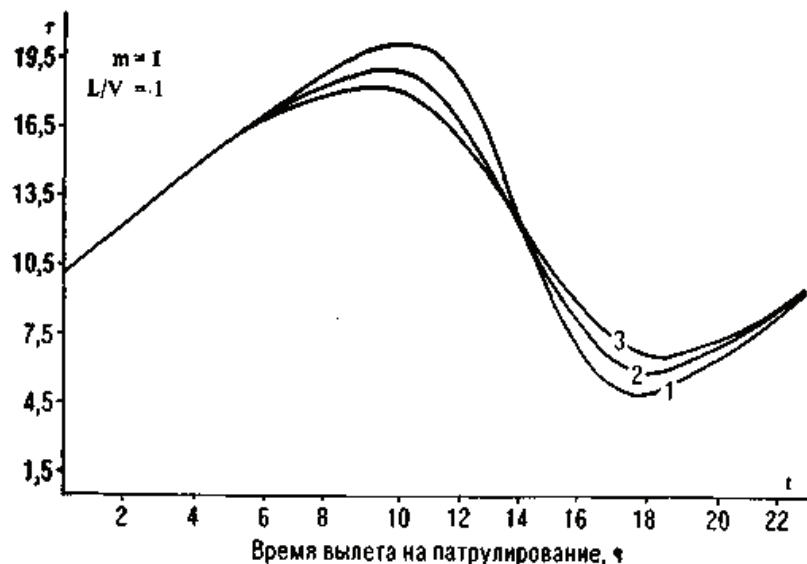


Рис. 3.18. – Зависимость средней длительности распространения пожара до обнаружения ( $\tau$ ) от времени вылета на патрулирование ( $t$ ): 1 –  $\sigma = 2$ ; 2 –  $\sigma = 2,5$ ; 3 –  $\sigma = 3$

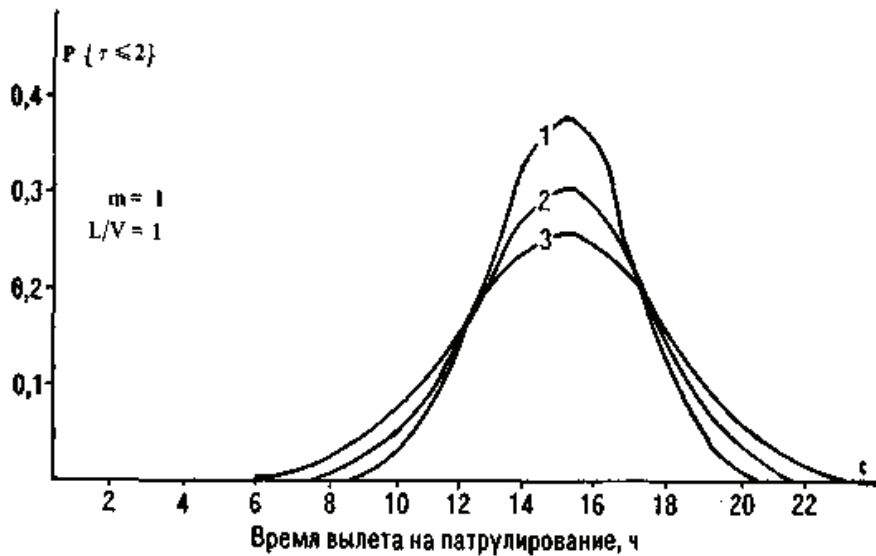


Рис. 3.19. – Зависимость вероятности своевременного ( $\tau \leq 2$ ) обнаружения пожара от времени вылета на авиапатрулирование: 1 –  $\sigma = 2,0$ ; 2 –  $\sigma = 2,5$ ; 3 –  $\sigma = 3,0$

С увеличением долготы дня расширяется интервал времени между вылетами и несколько снижается своевременность обнаружения пожаров при одной и той же кратности авиапатрулирования. Средняя длительность распространения пожара до обнаружения обратно пропорциональна кратности авиапатрулирования и с достаточной для практики точностью может быть найдена из соотношения

$$\bar{\tau}_m = (1.04)^{m-1} \bar{\tau}_1 / m, \quad 1 \leq m \leq 5, \quad (3.9)$$

где  $\bar{\tau}_1$  – средняя длительность распространения пожара до обнаружения при однократном авиапатрулировании (табл. 3.1);  $\bar{\tau}_m$  – средняя длительность распространения пожара до обнаружения при  $m$ -разовом авиапатрулировании.

С увеличением кратности авиапатрулирования вероятность своевременного обнаружения пожара асимптотически приближается к единице. Зависимость вероятности своевременного обнаружения пожара от кратности авиапатрулирования имеет вид

$$Q_m(Z) = 1 - \prod_{j=1}^m P_j(Z), \quad 1 \leq m \leq 5, \quad (3.10)$$

где  $P_j(Z)$  – вероятность своевременного обнаружения пожара при  $j$ -м вылете;  $Q_m(Z)$  – вероятность своевременного обнаружения пожара при  $m$ -разовом патрулировании.

С достаточной для практики точностью вероятность своевременного обнаружения пожара при произвольной кратности патрулирования может быть найдена из соотношения

$$Q_m(Z) = (1.04)^{m-1} [1 - (1 - Q_1(Z))^m], \quad (3.11)$$

где  $Q_1(Z)$  – вероятность своевременного обнаружения пожара при однократном авиапатрулировании.

Характер полученных зависимостей свидетельствует о постепенном снижении относительного эффекта от наращивания кратности авиапатрулирования как в отношении средней длительности распространения пожара до обнаружения, так и вероятности его своевременного обнаружения (табл. 3.2, 3.3).

Увеличение протяженности патрульных маршрутов приводит к некоторому (до 5% при  $L/V = 3$  ч) повышению средней длительности распространения пожара до его обнаружения при тех же кратностях патрулирования и соответствующему снижению своевременности обнаружения. Оптимальные расписания должны рассчитываться применительно к конкретным условиям работы структурных подразделений МЧС.

**Таблица 3.1 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию минимума математического ожидания (среднего значения) длительности распространения пожара до обнаружения ( $L/V \leq 1$ )**

Кратность патрулирования $m$	Оптимальное время вылетов, ч					Среднее значение длительности распространения обнаружения
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ( $a = 14; \sigma = 2$ )						
1	17,3	–	–	–	–	4,50
2	14,6	18,2	–	–	–	2,35
3	13,4	15,5	18,5	–	–	1,60
4	12,5	14,3	16,1	18,5	–	1,25
5	11,9	13,4	14,6	16,1	18,5	1,05
Долгота дня 14 – 16 ч ( $a = 14; \sigma = 2,5$ )						
1	17,6	–	–	–	–	5,35
2	14,6	18,8	–	–	–	2,85
3	13,1	15,8	19,7	–	–	2,00
4	12,5	14,6	16,7	20,0	–	1,50
5	11,6	13,4	15,2	17,0	20,0	1,25
Долгота дня 20 – 22 ч ( $a = 14; \sigma = 3$ )						
1	18,2	–	–	–	–	6,10
2	14,6	19,7	–	–	–	3,30
3	12,8	16,1	20,6	–	–	2,30
4	11,9	14,6	17,3	21,2	–	1,80
5	11,3	13,4	15,5	17,9	21,5	1,45

Силами наземной охраны обнаруживается около 18% пожаров, возникающих на обслуживаемой авиацией территории лесного фонда. В районах на-

земных сил и средств тушения на ее долю приходится около 26% обнаруженных пожаров, а авиационных – около 2% пожаров.

Явное преобладание авиационного способа обнаружения лесных пожаров обусловлено сравнительно низкой степенью охвата территории лесного фонда наблюдением с вышек (мачт, пунктов) и отсутствием на них регулярного дежурства. Стационарная сеть наблюдательных пунктов организована, как правило, только в районах наземной охраны и охватывает не более 30% площади этих районов.

**Таблица 3.2 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожара при  $Z = 1$  ч ( $L/V \leq 1$ )**

Кратность патрулирования $t$	Оптимальное время вылетов, ч					$Q(Z)$
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ( $a = 14; \sigma = 2$ )						
1	14,0	–	–	–	–	0,20
2	13,2	14,6	–	–	–	0,37
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,53
4	12,5	13,7	14,6	15,8	–	0,65
5	12,2	13,1	14,0	14,9	15,8	0,75
Долгота дня 14 – 16 ч ( $a = 14; \sigma = 2,5$ )						
1	14,0	–	–	–	–	0,16
2	13,4	14,6	–	–	–	0,31
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,44
4	12,2	13,4	14,6	15,8	–	0,55
5	11,9	13,1	14,0	14,9	16,1	0,65
Долгота дня 20 – 22 ч ( $a = 14; \sigma = 3$ )						
1	14,0	–	–	–	–	0,13
2	13,4	14,6	–	–	–	0,26
3	12,8	14,0	15,2	–	–	0,38
4	12,2	13,4	14,6	15,8	–	0,48
5	11,6	12,8	14,0	15,2	16,4	0,57

Наземное патрулирование преобладает в зонах отдыха населения, местах лесозаготовительных работ и строительства различных объектов и трасс, а также в изолированных лесных массивах (полезащитных полосах, ленточных борках). Степень охвата лесного фонда наземным патрулированием ограничивается плотностью дорожно-транспортной сети и сравнительно низкой производительностью патрулей, обусловленной малым радиусом обзора и невысокой скоростью их передвижения.

Местным населением, экипажами транспортных средств, добровольными дружинами (общественностью) обнаруживается 1 – 2% лесных пожаров, относящихся преимущественно к районам наземной охраны.

**Таблица 3.3 – Оптимальные расписания патрульных полетов по критерию максимума вероятности своевременного обнаружения пожаров при  $Z = 2$  ч ( $L/V \leq 1$ )**

Кратность патрулирования $t$	Оптимальное время вылетов, ч					$Q(Z)$
	1	2	3	4	5	
Долгота дня 10 – 12 ч ( $a = 14; \sigma = 2$ )						
1	14,6	–	–	–	–	0,38
2	13,7	15,8	–	–	–	0,67
3	12,5	14,6	16,7	–	–	0,84
4	11,9	13,7	15,5	17,3	–	0,93
5	11,0	12,8	14,6	16,4	18,2	0,98
Долгота дня 14 – 16 ч ( $a = 14; \sigma = 2,5$ )						
1	14,6	–	–	–	–	0,31
2	13,7	15,8	–	–	–	0,57
3	12,5	14,6	–	–	–	0,76
4	11,6	13,7	–	–	–	0,87
5	11,0	12,8	–	–	–	0,93
Долгота дня 20 – 22 ч ( $a = 14; \sigma = 3$ )						
1	14,6	–	–	–	–	0,26
2	13,7	15,8	–	–	–	0,49
3	12,5	14,6	16,7	–	–	0,67
4	11,6	13,7	15,8	17,9	–	0,80
5	10,7	12,8	14,6	16,4	–	0,88

Фактические результаты функционирования системы обнаружения лесных пожаров и ее основных компонентов характеризуются эмпирическими распределениями площади пожаров в момент обнаружения и длительности их распространения (табл. 3.4).

Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет в районах, относящихся к авиационной охране, около 0,6 га. На площади до 0,5 га здесь обнаруживается около 78% лесных пожаров.

Распределение площади пожаров в момент обнаружения, относящихся к районам наземной охраны, характеризует эффективность совместной работы авиационных и наземных средств охраны лесов. Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет в этих районах около 0,4 га. На площади до 0,5 га здесь фиксируют около 87% лесных пожаров.

Распределение площади пожаров в момент их выявления, относящееся ко всей обслуживаемой авиацией территории лесного фонда, характеризует эффективность всей системы охраны. Средняя площадь пожара в момент обнаружения составляет здесь около 0,5 га (см. табл. 3.4).

Распределение длительности распространения пожаров до обнаружения авиацией практически совпадает с таковым в районах авиационной охраны, где участие «заемных» средств незначительно (менее 2% обнаруженных пожаров).

Среднее значение длительности распространения пожара до обнаружения авиацией составляет около 1,5 ч. Авиация в течение 1 ч обнаруживает около 60% возникших пожаров, а за 2 ч – около 80%.

**Таблица 3.4 – Распределение площади лесных пожаров в момент обнаружения**

Зона охраны	Пожары, %, обнаруженные на площади, га				
	до 0,05	до 0,1	до 0,5	до 1,0	до 10,0
Авиационных сил и средств тушения	21	42	78	90,5	99,4
Наземных сил и средств тушения	43	61	87	94,4	99,6
Обслуживаемая авиацией территория	34	54	84	92,8	99,5

Распределение длительности распространения пожаров до обнаружения наземными средствами характеризует эффективность функционирования последних в пределах районов наземной охраны с авиапатрулированием. Показатели своевременности обнаружения пожаров этими средствами значительно ниже, чем авиацией, даже в пределах районов наземной охраны.

Совместное функционирование авиационных и наземных средств обеспечивает более высокие показатели своевременности обнаружения пожаров в районах наземной охраны с авиапатрулированием, чем в районах авиационной охраны. В течение 1 – 2 ч после возникновения лесных пожаров здесь обнаруживается их соответственно около 70 и 90%. Средняя длительность распространения пожара до обнаружения авиацией или наземными средствами составляет около 1,3 ч.

Приведенное эмпирическое распределение длительности распространения пожаров до обнаружения авиацией близко к теоретическому распределению при 3-, 4-разовом авиапатрулировании. Фактическая кратность авиапатрулирования в периоды горимости лесов не превышает 2 – 3 вылетов в день. Имеющееся несоответствие между эмпирическим и теоретическим распределением обусловлено наличием систематических погрешностей в определении площадей пожаров (из-за отсутствия контроля) и оценке длительности распространения огня из-за игнорирования суточной динамики интенсивности горения.

Некоторое повышение своевременности обнаружения пожаров авиацией происходит за счет полетов по обслуживанию действующих пожаров, не относящихся к числу патрульных, но увеличивающих периодичность осмотра хотя бы части территории каждого структурного подразделения авиаохраны.

Необходимые условия повышения эффективности функционирования системы обнаружения лесных пожаров: повышение кратности авиапатрулирования и повсеместный переход на оптимальные расписания полетов; повышение степени охвата территории лесного фонда сетью наблюдательных вышек, мачт, пунктов и организация регулярных дежурств на них. Наземные патрули в

силу приуроченности их к существующей транспортной сети, незначительного радиуса обзора и относительно низкой скорости передвижения могут рассматриваться как дополнение к сети наблюдательных пунктов.

Повышение степени охвата территории сетью наблюдательных пунктов связано со строительством достаточно большого числа вышек (около 50 шт./млн. га) и привлечением к дежурству на них соответствующего количества пожарных-наблюдателей. Дефицит трудовых ресурсов ограничивает темпы повышения степени охвата наблюдением с вышек даже районов наземной охраны, не говоря уже о районах авиационных сил и средств тушения пожаров. Определенные перспективы открывает применение промышленных телевизионных систем, состоящих из нескольких камер, передающих изображение на видеоконтрольное устройство в пункт диспетчерского управления. Отработка таких систем, их выпуск в необходимом количестве связаны со значительными затратами времени и средств.

На современном этапе наиболее реальными путями резкого повышения своевременности обнаружения лесных пожаров является увеличение кратности авиапатрулирования активно охраняемой территории лесного фонда и повышения степени охвата районов наземной охраны регулярным наблюдением с вышек.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Агарков В.Ф., Бирюков А.С., Григорян О.Р. и др.* Возможности малых ИСЗ для решения некоторых экологических задач // Космос и экология: концепции и технические решения: Материалы науч.-техн. семинара, Туапсе. – 1990. – С. 8 – 11.
2. *Аксенов В.В., Волков А.М., Хапин Ю.Б. и др.* Обеспечение дистанционных исследований Земли радиометрическими вредствами СВЧ-диапазона в 1990 – 2000 г.г. // Тр. НПО „Планета”. – 1992. – Вып. 41. – С. 24 – 34.
3. *Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. – 1992. – № 2. – С. 3 – 14.
4. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем – М.: Наука, 1984. – 320 с.
5. *Виноградов Б.В., Кондратьев К.Я.* Космические методы земледования – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 190 с.
6. *Волков А.М., Васюхина Т.М.* Состояние и перспективы развития космических систем для изучения природных ресурсов Земли и гидрометеорологии – М.: Гидрометеиздат, 1988. – 40 с.
7. *Волков А.М., Грищенко В.Д., Куревлева Т.Г. и др.* Принципы построения космической системы нового поколения для ледовых и гидрометеорологических наблюдений // Исследование Земли из космоса. – 1995. – № 1. – С. 63 – 73.
8. *Волков А.М., Пахомов Л.А., Пичугин А.П., Фейгин В.М., Хапин Ю.Б.* Космическая экология: проблемы создания оперативных космических систем дистанционного зондирования Земли из космоса. Часть 1. Космические средства гидрометеорологического назначения // Инженерная экология. – 1996. – № 5. – С. 46 – 79.
9. *Волков А.М., Пахомов Л.А., Пичугин А.П., Фейгин В.М., Хапин Ю.Б.* Космическая экология: проблемы создания оперативных космических систем дистанционного зондирования Земли из космоса. Часть 1. Космические средства гидрометеорологического назначения // Инженерная экология. – 1996. – № 6. – С. 100 – 121.
10. *Герман М.А., Говердовский В.Ф.* Системы сбора и обработки космической информации, используемые в США – Л.: ЛГМИ, 1988 – 69 с.
11. *Гиряев М.Д., Гусев Н.Н.* Применение дистанционных методов при лесоустройстве и инвентаризации лесов – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 196 с.
12. ГОСТ 8.009-84. „ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений”
13. *Григорьев А.А., Липатов В.Б.* Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса – Л.: Гидротехиздат, 1978. – 36 с.
14. *Григорьев Ал.А., Кондратьев К.Я.* Спутниковый мониторинг природных и антропогенных катастроф // Исследование Земли из космоса. – 1996. – № 3. – С. 68 – 78.

15. *Данюлис Е.П., Журин В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И.* Дистанционное зондирование в елсном хозяйстве – М.: Агропромиздат, 1989. – 222 с.
16. *Дмитриев И.Д., Мухаханов Е.С., Сухих В.И.* Лесная аэрофосъемка и авиация – М.: Лесн. Хоз-во, 1981. – 343 с.
17. *Жалібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В.* Безпека життєдіяльності – К.: Каравела, 2004. – 328 с.
18. *Захаров В.М., Костко О.К., Торговичев В.А., Чаянова Э.А.* Лазерные методы исследования загрязнения атмосферы – Обнинск: Информю центр ВНИГМИ–МЦД, 1976. – 34 с.
19. *Исаев А.С., Сухих В.И., Калашников Е.Н. и др.* Аэрокосмических мониторинг лесов – М.: Наука, 1991. – 239 с.
20. *Качинский А.Б., Агаркова Н.В.* Исследование тенденций и характера изменений ЧС в Украине // Проблемы упр. и информатики. – 2002. – № 5. – С. 127 – 136
21. *Киенко Ю.П.* Введение в космическое природоведение – М.: Геоиздат, 1994. – 212 с.
22. Класифікатор надзвичайних ситуацій в Україні: Затверджений Міністром з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи 24 грудня 1998 р.
23. *Климов С.И., Григорян О.Р.* Сверхмалые электромагнитночистые спутники для экологического мониторинга // Инженерная экология. – 1996. – № 1. – С. 112 –125.
24. *Кондратьев К.Я.* Перспективы спутникового мониторинга малых газовых компонентов атмосферы и аэрозоля // Исследование Земли из космоса. – 1995. – № 5. – С. 111 – 116.
25. *Краснов А.Б.* Применение военной авиации в ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Военная мысль. – 2004. – № 6. – С. 28 – 33.
26. *Куприянов В.В., Прокачев В.Г.* Спутниковая информация и изучение вод суши – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 144 с.
27. *Лесникова Г.В., Маховер З.М.* Авиационная и спутниковая климатология – М.: Гидрометеиздат, 1985. – 156 с.
28. *Максименко О.* „Золотой петушок” для МЧС // Наука и жизнь. – 2003. – № 11. – С. 78 –81.
29. *Николаев А.Н., Фридман Ш.Д.* Дистанционный мониторинг загрязнения атмосферы и выбросов – М.: Гидрометеиздат, 1991. – 140 с.
30. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешности результатов измерения – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.
31. Положення про класифікацію надзвичайних ситуацій. Постанова КМУ, № 1099. – Київ, 1998. – 21 с.
32. *Ревзон А.Л.* Космическая фотосъемка в транспортном строительстве – М.: Транспорт, 1993. – 272 с.
33. *Рийвес-Тарту Л.Я.* Дистанционное зондирование атмосферы с борта орбитального комплекса „Салют-7”–„Космос-1688”–„Союз-Т14” – Таллин: АН ЭССР, 1989. – 164 с.

34. *Рыжих Е.П., Веселов В.М.* Сбор, накопление и обработка гидрометеорологической информации – М.: Гидрометеоиздат, 1988 – 128 с.
35. *Савиных В.П.* Визуально-инструментальные исследования Земли с пилотируемого космического комплекса – М.: Недра, 1991. – 109 с.
36. *Савиных В.П., Викторов А.С., Киенко Ю.П. и др.* Комплексное аэро-космическое зондирование при создании и эксплуатации геотехнических систем // Исследование Земли из космоса. – 1995. – № 6. – С. 67 – 81.
37. *Садов А.В.* Аэрокосмические методы в инженерной геодинамике – М.: недра, 1988. – 207 с.
38. *Тулинов Г.Ф., Мельников В.Е., Жидкова М.Б. и др.* Космический лидар „Алиса” для орбитальной станции „Мир” // Инженерная экология. – 1996. – № 5. – С. 80 – 91.
39. *Чадин А.* Бури, ураганы, смерчи // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2003. – № 8/9. – С. 58 – 62
40. *Чадин А.* Наводнения // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2003. – № 8/9. – С. 55 – 58
41. *Шавейко И.* Землетрясения // Основы безопасности жизнедеятельности. – 2003. – № 8/9. – С. 63 – 65
42. *Шарков Е.А.* Аэрокосмические исследования тропических циклонов // Исследование Земли из космоса. – 1997. – № 6. – С. 87 – 111.
43. *Шоботов В.М.* Цивільна оборона. – Київ: „Центр навчальної літератури”, 2004. – 439 с.

Монография «Аэрокосмический мониторинг» объединила современные научные и практические достижения в области анализа опасных факторов чрезвычайных ситуаций с использованием средств авиационного и космического базирования.

В монографии изложены общие требования к построению систем дистанционного наблюдения в условиях чрезвычайных ситуаций. Приведены методики получения и обработки информационных потоков средствами аэрокосмического мониторинга. Обобщена информация о современных системах и средствах аэрокосмического мониторинга. Приведены требования к организации систем мониторинга и управления силами оперативного реагирования на возникновение аварий и катастроф.

Издание предназначено для специалистов в области организации дистанционного наблюдения, курсантов, студентов, слушателей высших учебных заведений III и IV уровней аккредитации и сотрудников органов управления МЧС Украины.

**Абрамов Юрий Алексеевич**  
**Тютюник Вадим Владимирович**  
**Шевченко Роман Иванович**

## **АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ**

Монография

Подписано к печати 07.11.2005. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Ус. печат. лист 27,58.  
Обл.-изд. лист. 23,44. Тираж 100 экз.

Напечатано СПДФЛ Штрассер О.Г.  
г. Харьков, ул. Мироносицкая, 1