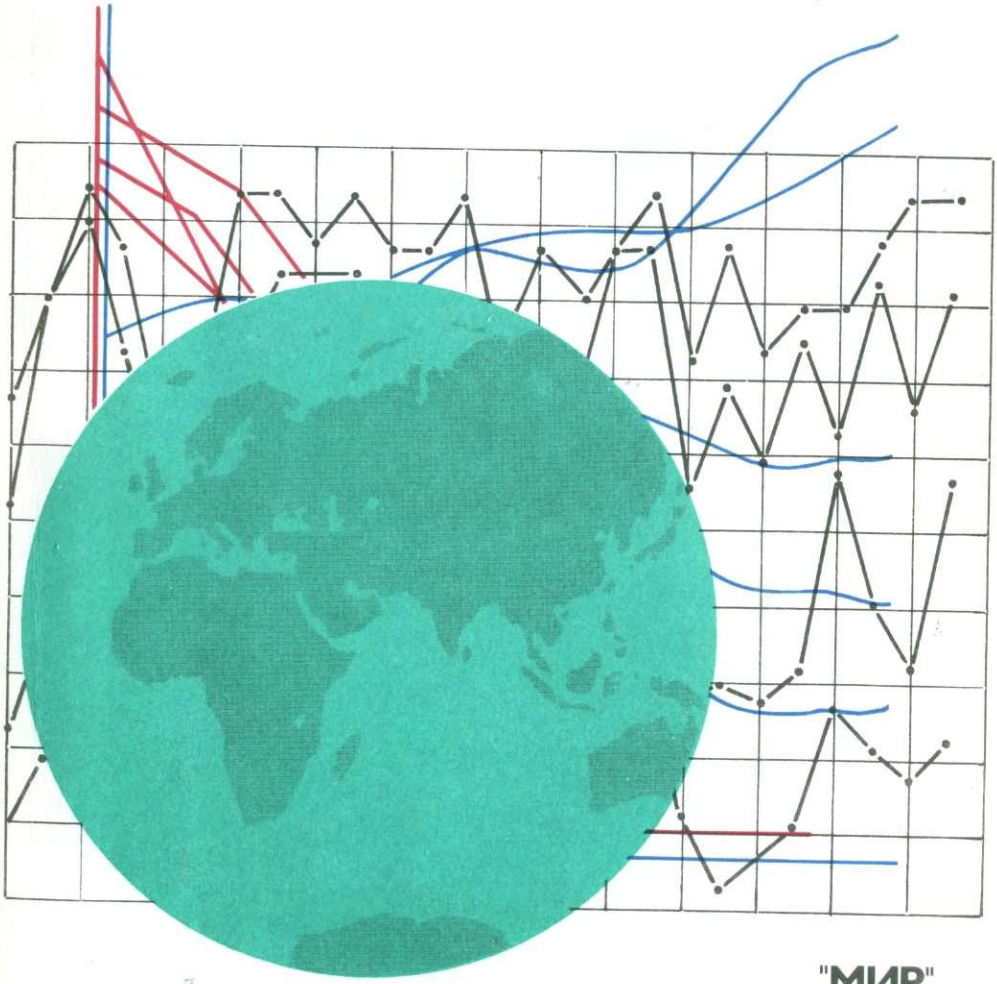
Д. МИШЕВ

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА



"МИР"


ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИР

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
Централна лаборатория за космически изследвания

Димитър Мишев

ДИСТАНЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЗЕМЯТА ОТ КОСМОСА

София . 1981
Издателство на Българската Академия на науките

Д. Мишев

Дистанционные исследования Земли из космоса

Перевод с болгарского
канд. техн. наук В. И. Тарнопольского
под редакцией канд. техн. наук Я. Л. Зимана

4651

Москва «Мир» 1985

УДК 629.78

Мишев Д.

Дистанционные исследования Земли из космоса: Пер. с болг. — М.: Мир, 1985. — 232 с., ил.

В книге известного болгарского ученого на основе оригинальных научных исследований и аппаратурных разработок, выполненных в основном в Центральной лаборатории космических исследований Болгарской академии наук, детально рассмотрены научно-методические, физико-технические и математические аспекты современного дистанционного зондирования, в том числе вопросы полигонных исследований. Читатель знакомится также с аппаратурой, разработанной в Болгарии в конце семидесятых годов для работ на спутниках-автоматах, пилотируемых орбитальных станциях, на самолетах и аэрокосмических полигонах.

Для научных работников и инженеров, специализирующихся в области космических исследований природных ресурсов Земли.

Редакция литературы по новой технике

$$М\ \frac{1903000000—091}{041(01)—85}\ 107—85,\ ч.\ 1$$

© Димитър Николов Мишев, 1981

© Перевод на русский язык с дополнениями и исправлениями, «Мир», 1985

Предисловие редактора перевода

Разработка методов и технических средств исследований Земли из космоса, автоматизированной обработки полученных данных является одной из важнейших проблем практической космонавтики. Уже сегодня аэрокосмические исследования природных ресурсов Земли и окружающей среды приобрели большое значение в решении задач, стоящих перед науками о Земле и соответствующими отраслями народного хозяйства.

Широкое внедрение этих исследований в практику во многих странах сопровождается интенсивными научными изысканиями, разработкой соответствующей аппаратуры и экспериментами, проводимыми со спутников, самолетов и непосредственно на Земле. Такие работы осуществляются и в рамках программы «Интеркосмос» во всех социалистических странах.

Весьма существенный вклад в становление и развитие проблемы исследований Земли аэрокосмическими средствами вносят ученые и специалисты Народной Республики Болгарии. Проводимые в НРБ работы базируются на широком комплексе различных экспериментальных приборов, созданных болгарскими специалистами. К ним относятся специализированные приборы для полигонных исследований, в том числе семейство полевых спектрометров ИСОХ; спектрометрические системы «Спектр-15», разработанные для полета первого болгарского космонавта Г. Иванова и широко использованные на орбитальных станциях «Салют-6» и «Салют-7» международными и советскими экипажами; комплекс, разработанный в рамках проекта «Болгария-1300-II» и включающий многоканальную спектрометрическую систему СМП-32 и три СВЧ-радиометра. Разработка указанных технических средств, эксперименты и исследования, выполненные на их базе, осуществлены в основном сотрудниками Центральной лаборатории космических исследований Болгарской академии наук под руководством известного ученого в области дистанционного зондирования проф. Димитра Мишева.

В Советском Союзе за последние годы появилось немало публикаций по различным аспектам проблемы аэрокосмических исследований Земли. Это, как правило, статьи в различных журналах и тематических сборниках, выпущенных Институтом космических исследований Академии наук СССР, географическим Факультетом Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Государственным научно-исследовательским цент-

ром изучения природных ресурсов Госкомгидромета СССР и другими организациями. Широкий поток статей и интерес к данной проблеме обусловили выпуск с 1980 г. специального периодического научного журнала «Исследование Земли из космоса».

В то же время на русском языке издано еще совершенно недостаточно фундаментальных публикаций, обобщающих результаты проведенных исследований и экспериментов по рассматриваемой проблеме, излагающих вопросы создания и использования съемочной и обрабатывающей аппаратуры, методы обработки и интерпретации данных дистанционного аэрокосмического зондирования Земли. В связи с этим, безусловно, оправдан выпуск перевода на русский язык монографии Д. Мишева, тем более что многие исследования и эксперименты, нашедшие в ней отражение, проведены совместно болгарскими и советскими специалистами.

В предлагаемом советскому читателю труде проф. Д. Мишева на основе проведенных автором и под его научным руководством оригинальных теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены многие физико-технические, математические и методические вопросы аэрокосмического дистанционного зондирования Земли. Автор удачно сочетает изложение основ дистанционного зондирования, носящее в некоторых случаях справочно-энциклопедический характер, с подробным рассмотрением ряда вопросов, мало обсуждаемых в специальной печати. Так, многим советским специалистам по дистанционным методам изучения Земли, по нашему мнению, будут интересны гл. 6 и 7, касающиеся работ на полигонах и ряда специфичных применений аэрокосмических съемок, а также гл. 4 и 5, в которых весьма детально рассмотрены характеристики, особенности и вопросы представления многоградационных изображений, композиции и декомпозиции цветных и черно-белых изображений, а также изложены основы создания адаптивных систем. Кроме того, в монографии впервые дается систематизированный обзор основных характеристик измерительной и съемочной аппаратуры, разработанной в НРБ в конце 70-х гг., и приводятся сведения о проведенных с этой аппаратурой экспериментах. Такое построение монографии, научная новизна многих представленных в ней вопросов и изложение болгарского опыта проведения конкретных натурных экспериментов делают книгу весьма полезной ученым и специалистам, работающим в области исследований Земли из космоса.

В заключение считаю своим долгом поблагодарить Д. Мишева и Р. Кынчеву за помощь, оказанную нам с В. И. Тарнопольским при подготовке русского текста этой книги.

Я. Л. Зиман

Предисловие к русскому изданию

Настоящая книга является вторым изданием монографии «Дистанционные исследования Земли из космоса», опубликованной издательством Болгарской академии наук в 1981 г.

Автор с большим удовлетворением и глубокой признательностью встретил предложение директора Института космических исследований Академии наук СССР академика Р. З. Сагдеева о переводе этой книги на русский язык и издании ее в Советском Союзе. Такое решение является еще одним подтверждением успешно развивающегося сотрудничества болгарских и советских ученых. Именно в рамках этого самого тесного и дружественного сотрудничества в НРБ были начаты и продолжаются работы в области дистанционных аэрокосмических исследований Земли.

За короткий период болгарскими учеными и специалистами совместно с их советскими коллегами выполнен широкий комплекс научных исследований, приборных разработок и экспериментов, положенный в основу представляемой советскому читателю монографии. В круг совместных работ болгарских и советских специалистов вошли многие спутниковые, самолетные и наземные исследования, разработка и использование на борту орбитальных станций «Салют-6» и «Салют-7» систем «Спектр-15» и «Спектр-15М», создание в рамках проекта «Болгария-1300-II» и выведение на борту спутника «Метеор — Природа» на орбиту сложного комплекса научной аппаратуры для исследования Земли в оптическом и микроволновом диапазонах электромагнитных волн. Особо следует подчеркнуть совместные работы ученых и специалистов Центральной лаборатории космических исследований Болгарской академии наук (ЦЛКИ БАН) и Института космических исследований Академии наук СССР (ИКИ АН СССР).

Успеху всех этих работ, как и изданию в СССР настоящей монографии, во многом способствовала наша многолетняя дружба с советскими коллегами — учеными с мировой известностью и признанием.

При подготовке второго (русского) издания монография была переработана и дополнена. Дополнения коснулись главным образом результатов исследований и экспериментов, полученных после опубликования книги в Болгарии.

Существенную редакционную доработку рукописи, повысившую стройность изложения материала книги, провели Я. Л. Зиман и В. И. Тарнопольский. Совместно с ними автором написан разд. 3.1.3, в котором пред-

ставлена созданная советскими специалистами и свыше трех лет успешно проработавшая на ИСЗ «Метеор» многоспектральная сканирующая система «Фрагмент». По просьбе автора Я. Л. Зиманом и В. И. Тарнопольским дополнена гл. 3 и написан разд. 3.3, в котором на основе выполненных в ИКИ АН СССР работ изложены вопросы метрологического обеспечения измерений, проводимых с помощью видеоспектрофотометрической аппаратуры.

В заключение хочу сердечно поблагодарить акад. Р. З. Сагдеева, Я. Л. Зимана, В. И. Тарнопольского и Р. Кынчеву, чьим усилиям и высококвалифицированному труду обязано появление этой книги на русском языке.

Димитр Мишев

Предисловие

В Народной Республике Болгария с 1973 г. проводятся активные исследования в области дистанционных аэрокосмических методов изучения Земли. В этих исследованиях принимают участие ряд институтов Болгарской академии наук (БАН) в первую очередь Центральная лаборатория космических исследований (ЦЛКИ), а также другие организации Болгарской академии наук, Министерства металлургии и минеральных ресурсов, Национального аграрного промышленного союза, Главного управления геодезии, картографии и кадастра, Софийского университета и др.

В ЦЛКИ БАН указанные исследования были начаты и проводятся под руководством и при непосредственном участии чл.-корр. БАН, проф., д-ра Кирилла Серафимова. Интенсивное развитие этих работ было стимулировано подписанным в 1975 г. Соглашением между Правительствами НРБ и СССР о научно-техническом сотрудничестве по разработке и использованию аэрокосмических методов дистанционного зондирования Земли, а также созданием в рамках программы «Интеркосмос» Рабочей группы социалистических стран по дистанционному зондированию Земли с помощью аэрокосмических средств. Эти мероприятия привели к интенсификации и расширению в НРБ соответствующей научно-исследовательской и проектно-конструкторской деятельности, подключению к указанным работам широкого круга организаций.

Во многих институтах БАН и других ведомствах дистанционный анализ аэрокосмической информации о Земле был внедрен как метод, позволяющий решать различные научные и научно-прикладные задачи в области структурной геологии, геоморфологии, геотектоники, сейсмотектоники, геотермии, металлогенного районирования и прогнозирования, почвоведения, сельского хозяйства, гидрологии и океанологии, контроля загрязнения окружающей среды и др. Только за 1977—1981 гг. проведены четыре крупные самолетные и наземные экспедиции, ряд синхронных со спутниковыми самолетных, судовых и наземных полигонных измерений и исследований.

В НРБ активно развиваются как методы и устройства получения спутниковых, аэро- и наземных полигонных данных о Земле, так и методы устройства обработки и интерпретации получаемых данных и, в частности, многоспектральных самолетных и спутниковых изображений земной поверхности. В ЦЛКИ БАН разработана серия устройств, приборов и систем

для получения данных об отраженной и собственной радиации различных природных образований и явлений, о ряде физических параметров исследуемых объектов. К ним необходимо отнести серию приборов для измерения спектральных отражательных характеристик природных образований, которые нашли широкое применение не только в Болгарии, но также и в других социалистических странах в рамках программы «Интеркосмос»; сюда входят наземный комплекс для полигонных исследований и измерений, система визуализации и интерпретации многоспектральных аэро- и спутниковых данных и изображений, система программируемого сбора данных СМП-32 и многие другие.

Болгарскими учеными проведены серьезные и углубленные научные исследования, получены существенные результаты в области способов обработки, интерпретации и применения многоспектральных спутниковых и самолетных данных, включая вопросы учета влияния атмосферы на спутниковые данные и формирования интерпретационных классов, выполнены синхронные со спутниковыми аэро- и наземные полигонные исследования и измерения и многие другие.

Предлагаемая монография является первой попыткой обобщить проведенные исследования в области дистанционных аэрокосмических методов и отражает только основные моменты развития в Болгарии дистанционных методов и полученные прежде всего в ЦЛКИ БАН научные и практические результаты.

Считаю своим приятным долгом отметить, что бóльшая часть полученных и приведенных в монографии результатов является плодом совместных усилий в этой области с моим другом, большим ученым и неутомимым исследователем ст. науч. сотр. Тони Яневым. Хочу подчеркнуть вклад в развитие этих методов проф. К. Серафимова, а также отметить вклад сотрудников и ученых проблемной группы «Дистанционные методы» ЦЛКИ БАН Х. Спиридонова, А. Крумова, А. Стоименова, С. Ковачева, Б. Пеева, Д. Петкова, Т. Назырского, П. Петрова, В. Петровой, Д. Димитрова, Б. Ценова, Н. Пеловой, К. Бакаловой, Р. Кынчевой и всех других. Сердечно благодарю чл.-корр. К. Мишева, проф. д-ра И. Недялкова, ст. науч. сотр. С. Чапкынова, А. Хаджиянакиева, проф. М. Йолевского, инж. Б. Крыстева, д-ра Н. Георгиева за полезные дискуссии и советы. Благодарность Т. Васильевой, М. Бончеву и Е. Кларку за эффективную техническую помощь.

Многим обязан А. Мишевой за критические замечания и полезные рекомендации при первом просмотре монографии.

Трудно в ограниченном объеме представленной читателю монографии отразить все полученные до сих пор в НРБ научные результаты дистанционных аэро- и космических исследований Земли. Автор с благодарностью примет все рекомендации, связанные с дальнейшим развитием данного труда.

Январь 1979 г.
София

Глава 1.

ВВЕДЕНИЕ В ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ

1.1. Физические основы дистанционного изучения Земли

Решение задач дистанционного исследования поверхности Земли и атмосферы основывается на измерении из космоса различных количественных характеристик поля электромагнитного излучения. К ним, как правило, относятся поле солнечной радиации, трансформированной атмосферой и отраженной от поверхности Земли, или собственного теплового излучения системы земная поверхность — атмосфера.

Необходимо подчеркнуть, что непосредственно измеряемые характеристики поля излучения, такие, как яркость или интенсивность, являются функциями независимых переменных двух видов:

— контролируемых параметров, характеризующих условия эксперимента (длины волны регистрируемого излучения, направления визирования, зенитного и азимутального угла Солнца во время проведения эксперимента и др.);

— параметров, зависящих от распределения основных оптико-физических характеристик атмосферы и земной поверхности.

Вторая группа параметров обусловливает возможность использования данных радиационных измерений для получения информации о составе атмосферы, а также о свойствах исследуемых природных образований на земной поверхности.

Известно, что исследования из космоса объектов на земной поверхности обычно проводят в «окнах прозрачности» земной атмосферы: в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях, нескольких сравнительно узких участках тепловой инфракрасной области, в СВЧ-диапазоне от миллиметровых до дециметровых волн. Рассмотрим вкратце особенности использования различных областей спектра.

Видимая и ближняя ИК-области. Преимуществом использования этих довольно широких и лучше всего освоенных и используемых областей является возможность получения в принципе наибольшего количества информации о различных земных образованиях. К основным недостаткам измерений в этих областях относятся сильная зависимость результатов от различных помех (гидрометеоров, атмосферной дымки и др.) и возможность их проведения только при освещении земной поверхности Солнцем (в некоторых случаях в качестве источников света используются специально разработанные лазерные системы).

Тепловая инфракрасная область. При измерениях в этой области преимуществом является зависимость результатов от изменения температуры природных образований и возможность работы ночью. К недостаткам можно отнести меньшую чувствительность результатов к изменениям физико-химических характеристик природных образований; поглощение излучения гидрометеорами и аэрозольными частицами и влияние освещения Солнцем.

СВЧ-диапазон. Преимущества работы в этом диапазоне обусловлены возможностью контроля значительных толщ земной поверхности и льда; большой чувствительностью результатов измерений к геометрическим характеристикам поверхностей (шероховатости и др.), к содержанию влаги в почве; помехоустойчивостью по отношению к гидрометеорам. К существенным недостаткам можно отнести потенциально меньшее количество информации по сравнению с видимой и инфракрасной областями, меньшую разрешающую способность съемочных систем (за исключением систем с синтезированной апертурой); меньшую чувствительность к химическим и температурным контрастам.

Все сказанное свидетельствует, что измерение отраженной или собственной радиации земной поверхности и атмосферы одновременно в нескольких спектральных диапазонах, т.е. использование многоспектрального метода исследования, потенциально позволяет извлечь из получаемых данных весьма разнообразную информацию о наблюдаемых объектах и явлениях.

Все природные образования отражают солнечную радиацию определенным, характерным только для них и их состояния образом.

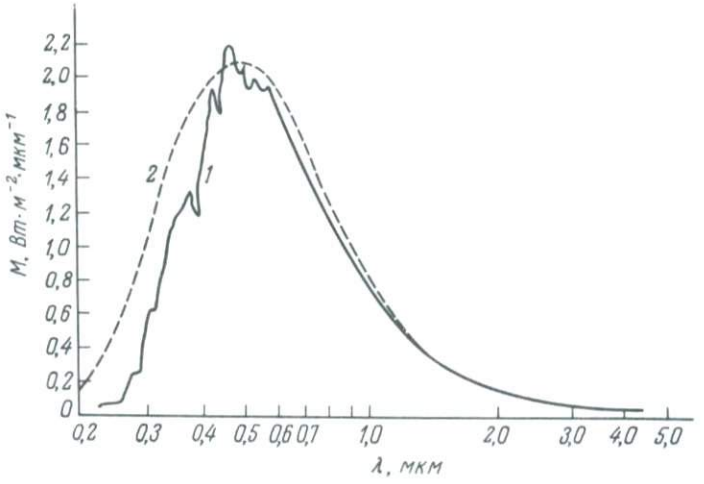


Рис. 1.1. Спектральное распределение нормальной плотности прямой солнечной радиации на верхней границе атмосферы (*1*) и абсолютно черного тела (*2*) с температурой 6000 К.

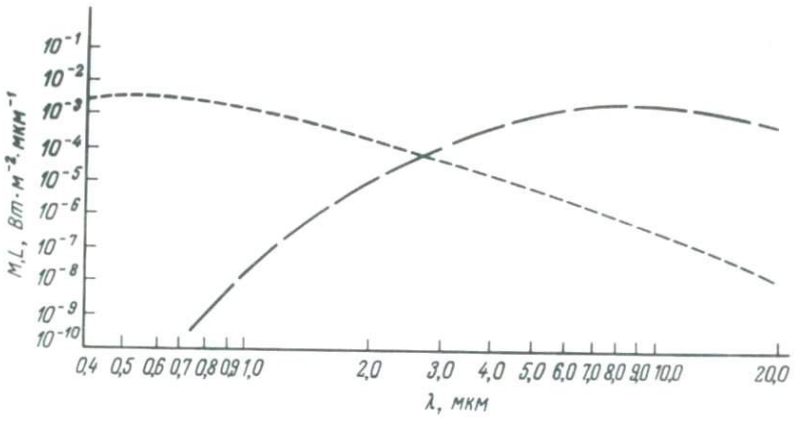


Рис. 1.2. Распределение нормальной плотности излучения Луны. ---- отраженная радиация; ———— собственная радиация.

На рис. 1.1 представлены спектральное распределение нормальной плотности потока прямого солнечного излучения на верхней границе атмосферы и спектральная характеристика абсолютно черного тела с температурой 6000 К [28] [1]. Для сравнения на рис. 1.2 показано распределение нормальной плотности излучения Луны [116, 130], а на рис. 1.3 — спектральная яркость некоторых наблюдаемых днем природных образований [130].

Коротковолновая часть излучения Солнца (приблизительно до 300 нм) рассеивается или поглощается в самых верхних слоях атмосферы, а радиоволны длиной свыше 20—30 м экранируются ионосферой. Поэтому для дистанционных методов практический интерес представляет область 300 нм — 20 м. В этой области солнечная радиация распределена очень неравномерно: почти 95% всей излучаемой Солнцем энергии сосредоточено в диапазоне 300—2400 нм, т.е. в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях. Около 99% солнечной радиации заключено в диапазоне 150—4000 нм. Максимум солнечной энергии (энергетического спектра) находится вблизи длины волны 500 нм. Энергия солнечного излучения в радиодиапазоне составляет около 10^{-12} от энергии в видимом диапазоне.

При рассмотрении прохождения солнечной радиации к поверхности Земли необходимо учитывать ряд процессов, а именно: поглощение, рассеяние, рефракцию и суммирование собственного излучения атмосферы с солнечным излучением. Заметим, что поток энергии в видимом и инфракрасном диапазонах на верхней границе атмосферы составляет около

[1] Согласно [23], если предположить, что Солнце излучает энергию как абсолютно черное тело, то его эффективная температура составляет 5770 К.

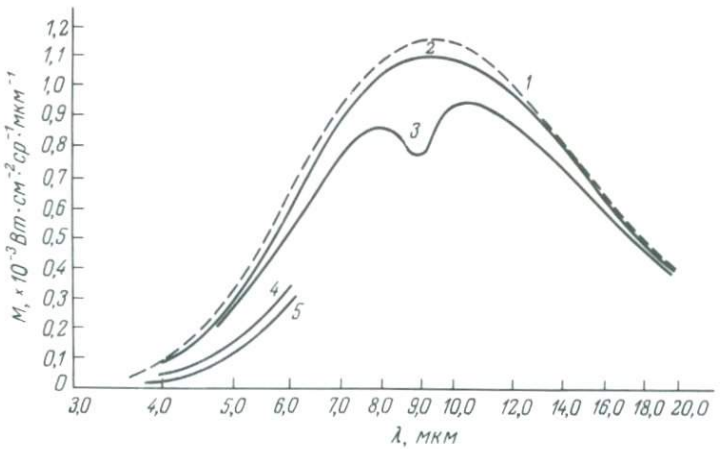


Рис. 1.3. Спектральная яркость некоторых природных образований. *1* — абсолютно черное тело при 308 К; *2* — почва при 305 К; *3* — песок; *4* — снег; *5* — трава.

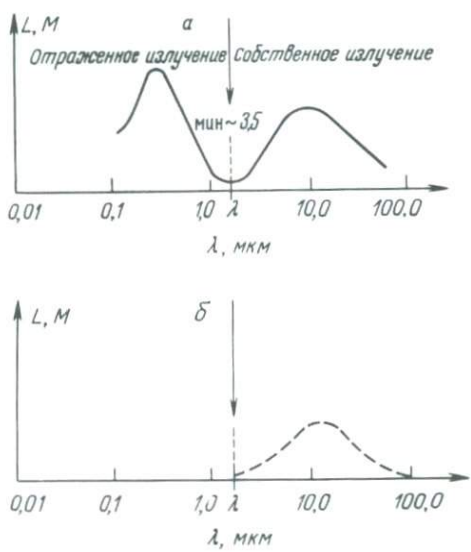


Рис. 1.4. Отраженное и собственное излучения поверхности Земли днем (*а*) и ночью (*б*).

140 мВт · см$^{-2}$, а поверхности Земли достигает поток величиной около 70 мВт · см$^{-2}$, причем доля отраженной в тепловой области энергии составляет 6,5 мВт · см$^{-2}$.

Яркость почти всех природных образований и явлений в области до 3,0 мкм определяется свойством этих образований отражать и рассеивать

электромагнитную радиацию. Кроме того, все природные образования и явления обладают собственным тепловым излучением. Однако поскольку их температура сравнительно невысока, то максимумы спектрального распределения плотности их радиации регистрируются в более длинноволновой области спектра. В диапазоне 3,0—80,0 мкм сосредоточено около 99% теплового излучения земной поверхности.

Из сказанного следует, что спектр излучения поверхности Земли имеет днем два максимума — один на длине волны около 0,5 мкм, обусловленный отраженной солнечной радиацией (рис. 1.4,*а*), и второй — на длине волны около 9,0—10,0 мкм, обусловленный собственным тепловым излучением (рис. 1.4,*а*). Между этими двумя максимумами находится сильно выраженный минимум вблизи 3,5 мкм. На длинах волн, меньших $\lambda_{гр} = 3{,}5$ мкм, собственное излучение природных образований пренебрежимо мало по сравнению с отраженной солнечной радиацией, а на длинах волн выше $\lambda_{гр}$ интенсивность собственного излучения природных образований больше отраженной солнечной радиации (рис. 1.4,*а*). Ночью спектр излучения земной поверхности изменяется; сохраняется только максимум в области собственного излучения, а в области отражения максимум исчезает (рис. 1.4,*б*). Длину волны $\lambda_{гр} = 3{,}5$ мкм принято считать границей двух спектральных областей отраженного и собственного излучений.

Исследования показывают, что яркость различных природных образований в области собственного излучения зависит намного сильнее от их состояния, структуры, физико-химических параметров и т.д., чем в области отраженного излучения.

1.2. Анализ процессов получения данных дистанционными методами

Изображения, получаемые при дистанционных исследованиях, являются основным источником информации, которая интерпретируется в различных целях оператором или системой оператор — ЭВМ. Эти изображения, полученные обычно в нескольких спектральных диапазонах, должны быть однозначно связаны с исследуемыми природными образованиями. Это значит, что должны быть сведены к приемлемому минимуму все возможные искажения, для появления которых существуют условия в сложном процессе получения данных на борту космического летательного аппарата (КА) и их доставки на Землю.

Строго говоря, каждое изображение Земли, полученное на борту КА, отличается от оригинала. Отличается прежде всего потому, что реальные объекты трехмерны, тогда как изображения на фотобумаге или экране двумерны. Реальные объекты обычно излучают и отражают в широкой спектральной области, тогда как изображение получается, как правило, в определенном, сравнительно узком спектральном интервале. Объект и изображение всегда связаны коэффициентом масштабного изменения. Реальные объекты отличаются огромным динамическим диапазоном яркости и контраста, а полученные изображения имеют ограниченный динамический диапазон.

Проанализируем получение информации о различных природных образованиях с помощью установленной на борту КА телевизионной камеры (рис. 1.5) [1]. Предположим, что после обработки сигналов, соответствующих анализируемому изображению, и коррекции всех геометрических, радиометрических и градационных искажений изображение визуализируется на телевизионном экране или фотобумаге. Можно также получить изображение фотографированием с экрана [2].

При анализе примем, что независимо от коэффициента масштабного из-

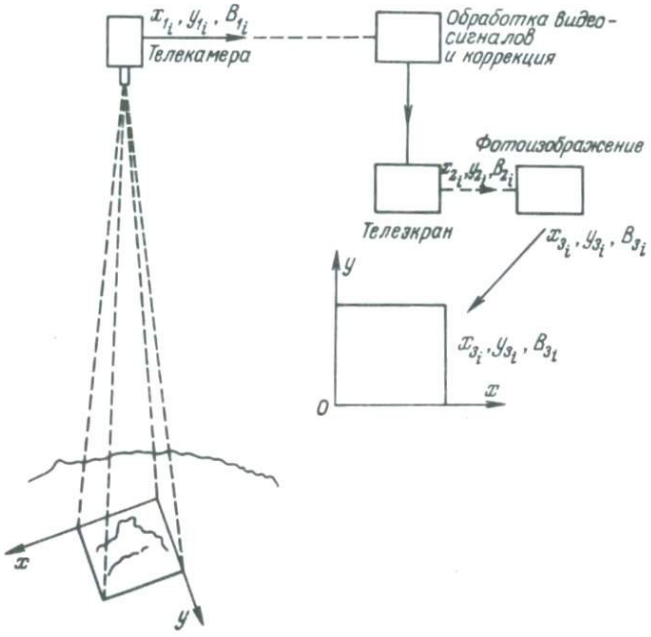


Рис. 1.5. Получение данных о различных природных образованиях с помощью телевизионной камеры, установленной на борту КА.

[1] Большинство вопросов, рассматриваемых в этом случае, относятся также и к другим методам получения изображения.

[2] Необходимо иметь в виду, что поскольку световые характеристики оптико-электронного преобразования на борту космического летательного аппарата, а также весь фотографический процесс нелинейны, то и отображение поля яркости природного образования на изображении связано с определенными искажениями, которые всегда должны учитываться при анализе и интерпретации.

менения должно выполняться условие геометрического подобия [1]. Для нас важно, чтобы существовало геометрическое подобие между изображениями на светочувствительном слое телевизионной передающей трубки и на фотобумаге (рис. 1.6), т.е.

$$\mathbf{r}/\mathbf{r}_0 = \text{const} \quad \text{при} \quad k_{\text{м}} = \text{var}. \tag{1.1}$$

Координаты x_{1i} и y_{1i} изображения на фоточувствительном слое передающей трубки находятся в функциональной связи с координатами x_{2i} и y_{2i} изображения на телевизионном экране:

$$f_{x_{2i}} x_{1i} = x_{2i}, f_{y_{2i}} y_{1i} = y_{2i}, \tag{1.2}$$

где

$$f_{x_{2i}} = f_{x^2}(x_{1i}, y_{1i}), f_{y_{2i}} = f_{y^2}(x_{1i}, y_{1i}). \tag{1.3}$$

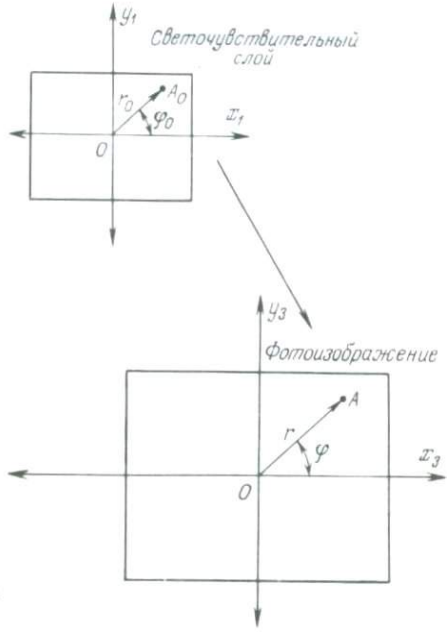


Рис. 1.6. Геометрическое подобие двух изображений.

[1] Любая точка A_0 изображения на светочувствительном слое телевизионной передающей трубки характеризуется радиус-вектором r_0 (рис. 1.6). Если соответствующую точку A_0 обозначить на полученном фотоизображении через A, а ее радиус-вектор — через r, то, для того, чтобы существовало геометрическое подобие между обоими изображениями, необходимо выполнение условия

$$\mathbf{r}/\mathbf{r}_0 = |\mathbf{r}/\mathbf{r}_0| \exp[j(\varphi_0 - \varphi)] = \text{const} = k. \tag{1.1a}$$

Для всех встречаемых в практике случаев постоянная $k \gg 1$.

4651

Из основных свойств реально существующих изображений (гл. 4) следует, что f_{x_2} и f_{y_2} непрерывны, дифференцируемы и однозначны и имеют непрерывные и дифференцируемые частные производные.

Рассмотрим систему светочувствительный слой передающей трубки — телевизионный экран, считая, что изображения на них существуют в двух пространственных областях, ограниченных замкнутыми поверхностями S_1 и S_2. Изображения будут нелинейно-подобными, если для произвольной точки A_1 на поверхности S_1 с координатами x_1 и y_1 можно найти на второй поверхности S_2 такую точку A_2 с координатами x_2 и y_2, чтобы координаты были связаны зависимостью (1.2), где f_{x_2} и f_{y_2} — функции нелинейного геометрического преобразования, определяемые из (1.3).

Точка A_1 с координатами x_1 и y_1 и точка A_2 с координатами x_2 и y_2, принадлежащие соответственно областям S_1 и S_2 и координаты которых связаны зависимостью (1.2), являются нелинейно подобными.

Часть линий, проходящих в каждом изображении S_1 и S_2 через нелинейно подобные точки, называются нелинейно подобными.

Если для поверхностей S_1 и S_2 функции имеют вид

$$f_{x2} = c_x = \text{const}, f_{y2} = c_y = \text{const}, \tag{1.4}$$

то изображения на поверхностях S_1 и S_2 — геометрически подобны.

Если

$$f_{x2} = f_{y2} = c = \text{const}, \tag{1.5}$$

то изображения на поверхностях S_1 и S_2 — геометрически подобны.

Проанализируем систему телевизионное изображение — фотоизображение. Для этой системы

$$x_3 = f_{x_3} x_2, y_3 = f_{y_3} y_2, \tag{1.6}$$

где f_{x_3} и f_{y_3} — функции нелинейного геометрического преобразования

$$f_{x_3} = f_{x_3}(x_2, y_2), f_{y_3} = f_{y_3}(x_2, y_2) \text{ или} \tag{1.7}$$

$$x_3 = f_{x_3} \cdot f_{x_2} \cdot x_1, y_3 = f_{y_3} \cdot f_{y_2} \cdot y_1 \text{ и} \tag{1.8}$$

$$\begin{aligned} f_{x_3} &= f_{x_3}[f_{x_2}(x_1, y_1), f_{y_2}(x_1, y_1)], \\ f_{y_3} &= f_{y_3}[f_{x_2}(x_1, y_1), f_{y_2}(x_1, y_1)]. \end{aligned} \tag{1.9}$$

Изображение, существующее на фотобумаге или воспринимаемое оператором непосредственно с телевизионного экрана, должно быть геометрически подобно существующему на светочувствительном слое трубки, т.е. их координаты должны быть связаны зависимостями

$$x_3 = k_м \cdot x_1, y_3 = k_м \cdot y_1, \tag{1.10}$$

где $k_м$ — коэффициент масштабного изменения изображения.

После замещения x_3 и y_3 равными им из (1.8)

$$f_{x_3} f_{x_2} x_1 = k_м x_1, f_{y_3} f_{y_2} y_1 = k_м y_1 \text{ или} \tag{1.11}$$

$$f_{x_3} f_{x_2} = f_{y_3} f_{y_2} = \text{const} = k_м.$$

Из последнего выражения следует, что только при выполнении условия (1.12) масштабное изменение изображения не будет оказывать влияния на геометрическое подобие передаваемого и принимаемого изображения.

После подстановки (1.3) и (1.7) в (1.11) получаем

$$f_{x_3}[f_{x_2}(x_1, y_1)x_1, f_{y_2}(x_1, y_1)y_1] = k_м/f_{x_2}(x_1, y_1), \qquad (1.13)$$
$$f_{y_3}[f_{x_2}(x_1, y_1)x_1, f_{y_2}(x_1, y_1)] = k_м/f_{y_2}(x_1, y_1).$$

Связь между функциями f_{x_3} и f_{y_3}, с одной стороны, и f_{x_2} и f_{y_2} — с другой, имеет существенное значение. Если известен закон изменения x_1 и y_1 во времени, т.е. $x_1 = x_1(t)$ и $y_1 = y_1(t)$ (закон, по которому последовательно передается информация об элементах изображения), то из условия синхронности и синфазности можно определить $x_3 = x_3(t)$ и $y_3 = y_3(t)$. Отсюда определяются законы изменения независимых переменных x_2 и y_2 во времени таким образом, чтобы сохранилось геометрическое подобие между передаваемым и принимаемым или воспроизводимым изображением.

Сделанные выводы надо иметь в виду также и при коррекции геометрических искажений изображений, полученных определенным способом с помощью известных устройств. Особо усложняется коррекция геометрических искажений, если аппарат, с помощью которого получены изображения, имеет компенсацию смаза изображения. Примером такого аппарата является многоспектральная камера МКФ-6М, в которой предусмотрено дополнительное регулируемое движение камеры в зависимости от высоты полета и скорости движения КЛА.

1.3. Орбиты космических аппаратов, используемых для исследования Земли

Вследствие нецентральности гравитационного поля Земли плоскость орбиты космических летательных аппаратов не остается постоянной в пространстве, а поворачивается вокруг земной оси, причем точки пересечения орбиты с плоскостью экватора (называемые узлами) смещаются вдоль экватора. Это смещение Δ, называемое процессией, направлено с востока на запад при наклонениях $0 < \alpha < \pi/2$ и с запада на восток при $\pi/2 < \alpha < \pi$ и зависит от величины наклонения и высоты круговой орбиты КА в соответствии с выражением [141]

$$\Delta = -2\pi\varepsilon \cos \alpha / G_2(R_{З_{ср}} + H)^2, \qquad (1.14)$$

где $\varepsilon = 2{,}634 \cdot 10^{10}$ км^5/с^2 — постоянная, учитывающая прежде всего сплющенность Земли, вызывающую прецессию орбит ИСЗ; $G_2 = 3{,}98603 \cdot 10^5$ км^3/с^2 — гравитационная постоянная Земли, включая атмосферу; $R_{З_{ср}} = 6{,}371 \cdot 10^3$ км — средний радиус Земли; H — высота полета КА.

Видно, что $\Delta = 0$ при $\alpha = \pi/2$ и увеличивается до своего максимального значения

$$\Delta_{макс} = -2\pi\varepsilon / G_2(R_{З_{ср}} + H)^2 \qquad (1.15)$$

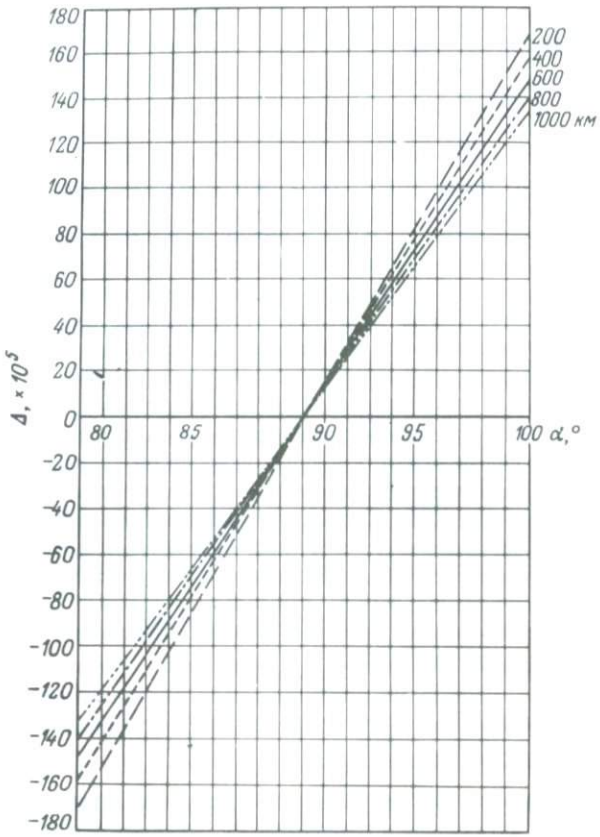


Рис. 1.7. Зависимость смещения Δ от наклона орбиты α.

при изменении α от $\pi/2$ до π или при уменьшении от $\pi/2$ до 0. На рис. 1.7 показана зависимость смещения Δ от наклона орбиты α для различных ее высот.

С учетом годового движения Земли вокруг Солнца можно достичь равенства по величине и знаку скорости смещения узлов орбиты и средней скорости перемещения относительно Солнца, если выбрать для заданной высоты орбиты H соответствующий ей наклон $\pi/2 < \alpha < \pi$. Такая орбита называется солнечно-синхронной, а ее наклонение и высота должны удовлетворять следующему условию:

$$\Delta = -2\pi T / T_{\text{кд}} \tag{1.16}$$

где T — время полного оборота Земли вокруг Солнца, т.е. тропический год; $T_{\text{кд}}$ — период обращения КА. На рис. 1.8 показана зависимость $\alpha = f(H)$. Солнечно-синхронная орбита является также геосинхронной, ес-

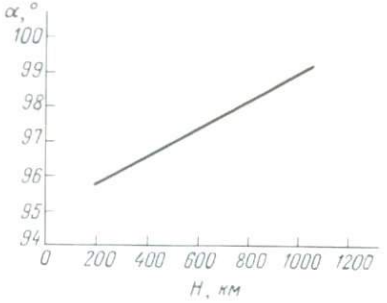


Рис. 1.8. Связь между наклоном орбиты и ее высотой.

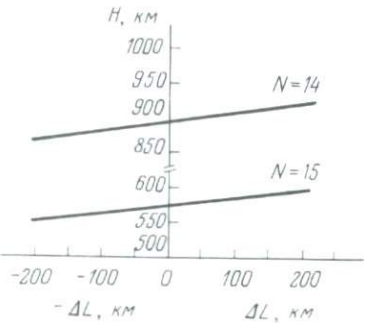


Рис. 1.9. Зависимость высоты квазигеосинхронной орбиты от суточного смещения ΔL при $N = 14$ и 15.

ли выполняется равенство

$$T_{кд} / T_{дн} = 1/N, \tag{1.17}$$

где N — целое число; $T_{дн}$ — средняя длительность одних суток.

При квазигеостационарной орбите можно обеспечить смещение наблюдаемой полосы на земной поверхности в западном или восточном направлении, если в равенстве

$$NT_{кд} = T_{дн}[1 + (\Delta L / 2\pi R_3)] \tag{1.18}$$

суточное смещение полосы на поверхности Земли вдоль экватора ΔL будет принимать положительное (западное смещение) или отрицательное (восточное смещение) значение. На рис. 1.9 показана зависимость высоты квазигеосинхронной орбиты H от суточного смещения ΔL при $N = 14$ и 15.

Для дистанционного исследования Земли орбиту КА необходимо выбирать таким образом, чтобы она удовлетворяла ряду условий. Важнейшими из них являются: 1) обеспечение одинаковой разрешающей способности и размеров участков исследуемых географических областей; 2) достижение практически глобального обзора земной поверхности; 3) обеспечение слабых изменений освещенности Солнцем по трассе полета КА; 4) обзор всей земной поверхности изображениями за возможно минимальное время.

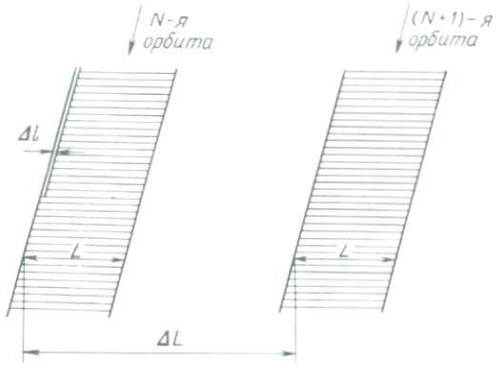


Рис. 1.10. Зоны обзора при круговой солнечно-синхронной квазигеосинхронной орбите.

Проанализируем эти условия последовательно [54]. Для выполнения первого необходимо выбрать круговую орбиту. В этом случае, если пренебречь отклонениями формы геоида от идеальной сферы, высоту КА над поверхностью Земли можно считать практически постоянной. Второе условие можно выполнить при квазиполярной орбите КА, т.е. орбите, плоскость которой составляет с плоскостью экватора угол, близкий к $\pi/2$. Обеспечение минимальных различий в освещенности Солнцем по трассе КА возможно только при солнечно-синхронной орбите аппарата. При такой орбите положение Солнца по отношению к плоскости орбиты с течением времени изменяется слабо, что обусловлено лишь сравнительно небольшими сезонными колебаниями и влиянием отклонения формы Земли от идеальной. В результате воздействия этих факторов проекция центра Солнца на поверхности Земли может отклоняться от среднего положения по отношению к узлам солнечно-синхронной орбиты на углы $< 5°$ по долготе и на $< 23{,}5°$ по широте. Важнейшей особенностью этой орбиты является то, что при прохождении КА над произвольной точкой Земли местное солнечное время всегда одно и то же и его конкретное значение зависит только от времени вывода КА на орбиту. Последнее условие можно выполнить только при солнечно-синхронной орбите, при которой суточное смещение трассы КА на поверхности Земли равно ширине зоны обзора аппаратуры, установленной на борту (разумеется, с учетом перекрытия изображений двух соседних орбит). Такая орбита называется квазигеосинхронной, так как суточное смещение сравнительно мало.

Итак, из проделанных рассуждений следует, что для дистанционного исследования Земли оптимальной является круговая солнечно-синхронная квазигеосинхронная орбита.

На рис. 1.10 представлены зоны обзора земной поверхности бортовой аппаратурой при высоте орбиты H (км). Через Δl обозначен наименьший элемент поверхности Земли, который можно идентифицировать на полу-

ченном изображении, т.е. это линейная разрешающая способность. ΔL — расстояние между зонами обзора с двух соседних орбит КА. Оно определяется из выражения

$$\Delta L = v_{\text{экв}} T_{\text{кд}} \cos \beta_{\text{ш}}, \tag{1.19}$$

где $v_{\text{экв}}$ — линейная скорость произвольной точки, лежащей на экваторе; $\beta_{\text{ш}}$ — угловая широта. На экваторе

$$\Delta L_{\text{экв}} = v_{\text{экв}} T_{\text{кд}}. \tag{1.20}$$

Видно, что $T_{\text{кд}}$ определяет расстояние между двумя соседними полосами и частично время полного обзора поверхности Земли. При круговой орбите $T_{\text{кд}}$ зависит от ее высоты, причем при изменении H в диапазоне $200 < H < 1000$ (км) изменяется в пределах 85—100 мин. Очевидно, что при геостационарной орбите космического летательного аппарата $T_{\text{кд}} = 24$ ч.

При одной и той же аппаратуре на борту с увеличением высоты H увеличивается ширина зоны обзора и ухудшается разрешающая способность, т.е. Δl увеличивается. Отсюда следует, что при заранее заданной аппаратуре и необходимой разрешающей спобности Δl полученных изображений период полного обзора поверхности Земли определяется параметрами движения космического летательного аппарата. При этом естественно, что для данного вида аппаратуры отношение $L/\Delta l$ является постоянным. На рис. 1.11 представлена зависимость от разрешающей способности времени полного обзора поверхности Земли установленной на борту телевизионной камерой с видиконом диаметром около 50 мм. Видно, что при $\Delta l = 1000$ м

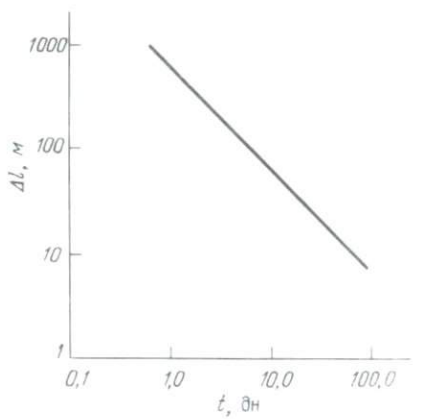


Рис. 1.11. Зависимость от разрешающей способности времени полного обзора поверхности Земли установленной на борту КА телевизионной камерой с видиконом диаметром около 50 мм.

полный обзор можно получить менее чем за сутки, тогда как при $\Delta l = 10$ м необходимо более 3 мес.

В будущем для дистанционных исследований Земли все чаще будут использоваться геостационарные орбиты. С борта КА, находящегося на геостационарной орбите, Земля видна под углом 17,3°. Так как такой спутник практически неподвижен по отношению к земной поверхности, то для приема информации будут использоваться наземные станции с фиксированным положением антенн. С помощью приборов, выведенных на такие орбиты, можно контролировать почти половину поверхности Земли. С помощью трех геостационарных спутников, смещенных по отношению друг к другу на 120° вдоль экватора, можно достичь глобального обзора земной поверхности и создать непрерывно действующую систему для исследования Земли.

Одновременно с созданием глобальной системы для дистанционных исследований Земли в некоторых случаях будут использоваться КА на низких орбитах с различными углами наклона α. Чаще всего такие орбиты будут использоваться в случаях, когда необходимо достичь большей разрешающей способности.

ОТРАЖЕННАЯ И СОБСТВЕННАЯ РАДИАЦИЯ

2.1. Спектральные характеристики отражения природных образований

Известно, что спектральные характеристики отражения природных объектов непостоянны и зависят как от условий освещенности, так и от состояния самих объектов (влажности, типа почвы, типа основания, структуры поверхности, вида растительности и многих других факторов [40, 122]), т.е. количественная мера отражения описывается функцией

$$r = r(\lambda, t, m, \theta, \varphi, z_0, \varphi_0, \ldots), \tag{2.1}$$

где λ — длина волны, на которой производится измерение; m — влажность; θ и φ — координаты датчика; z_0, φ_0 — координаты Солнца; t — температура природного образования и т.д.

Особое значение имеет структура поверхности исследуемого природного образования, определяющая распределение отраженной поверхностью радиации. Условно можно указать четыре типа поверхностей [135] (рис. 2.1).

Ортотропные поверхности, отражающие падающий на них поток диффузно, или равномерно, во всех направлениях. В видимой области ортотропными поверхностями являются пески, рыхлый снег. В СВЧ—области (например, при получении изображений с помощью РЛС бокового обзора) диффузно отражают большие каменные осыпи.

Зеркальные поверхности, отражающие падающий на них поток преимущественно в плоскости падающего луча и под углом, равным углу падения. В видимой области к таким поверхностям можно отнести чистый лед, сухие каменные поверхности, обнаженный скальный грунт. В радиодиапазоне зеркальное отражение характерно для глинистых почв, водных поверхностей. Необходимо иметь в виду, что по способу отражения падающей радиации эти поверхности отличаются от идеально отражающих.

Антизеркальные [1] *поверхности*, отражающие максимально в направлении к источнику излучения. Такое отражение типично для сельскохозяйственных культур, лугов и другой растительности.

Комбинированные поверхности, обладающие двумя максимумами отражения — зеркальным и антизеркальным. Таким способом отражают рисовые поля, покрытые росой луга и т.д.

---

[1] Понятие «антизеркальные поверхности» очень удачно введено К. Я. Кондратьевым и П. И. Федченко в [52] и дальше будет использоваться во всем изложении. — *Прим. ред.*

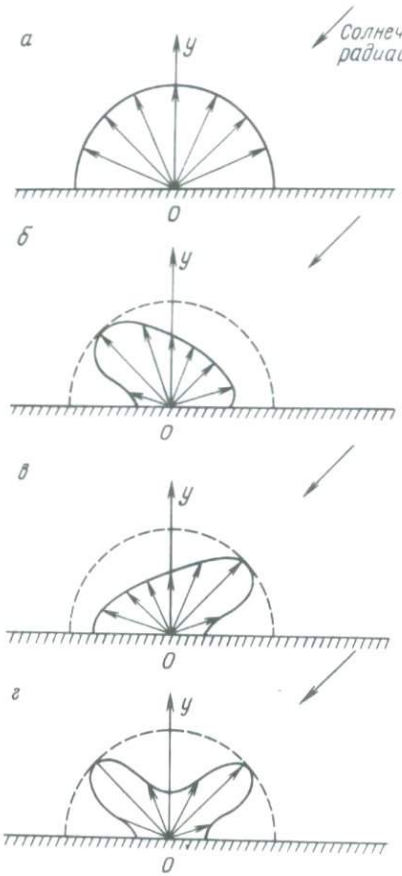


Рис. 2.1. Вид индикатрис различных типов поверхностей.

а — ортотропная; *б* — зеркальная; *в* — антизеркальная; *г* — комбинированная.

Индикатриса отражения. Величина

$$\eta(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \frac{L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)}{L_{0\Sigma}(\lambda)}, \qquad (2.2)$$

где z_0 и φ_0 — координаты Солнца; θ, φ — координаты датчика; $L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)$ — яркость природного образования; $L_{0\Sigma}(\lambda)$ — полная яркость ортотропной поверхности, называется индикатрисой отражения и определяет относительное угловое распределение яркости.

Каждая из четырех типов отражающих поверхностей характеризуется своей индикатрисой отражения. Ортотропная поверхность имеет индикатрису, описываемую полусферой. Индикатрисы других типов отражающих поверхностей можно аппроксимировать комбинацией полусферы и части эллипсоида [53]. Обычно большая полуось эллипсоида обозначается через

a, лежащая в горизонтальной плоскости — через c, а лежащая в вертикальной плоскости — через b. Согласно [53], для большинства индикатрис реальных природных образований полуоси b и c равны друг другу, а отношение полуосей a и b заключено, как правило, в интервале 5—1.

Различие в типах индикатрис отражения обусловлено различной шероховатостью отражающих поверхностей, степень которой зависит от длины волны падающей радиации. Согласно критерию Рэлея, поверхность может считаться гладкой, если

$$h \leqslant \frac{\lambda}{16 \cos \theta}, \tag{2.3}$$

где h — высота шероховатости; θ — угол падения радиации. Широко применяется также критерий К. С. Шифрина [137], который предлагает характеризовать степень шероховатости следующим образом:

$$\eta = 2h \cos \theta / \lambda, \tag{2.4}$$

где η — коэффициент шероховатости; θ — угол падения радиации; h — высота шероховатостей.

Спектральный коэффициент отражения (*СКО*). Величина спектральной яркости L (radiance) природного образования, т.е. поток, излучаемый в данном направлении в единичном телесном угле с единицы площади проекции источника в этом направлении, зависит от плотности потока падающей радиации $E_0(\lambda)$ и собственных свойств отражения данного образования:

$$L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = f[E_0(\lambda, z_0, \varphi_0)]. \tag{2.5}$$

Для раскрытия функциональной зависимости (2.5) введем *спектральный коэффициент отражения* (*СКО*) $r(\lambda_i, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)$ при данных условиях «освещения» природного образования, в определенном направлении (θ, φ) и данном интервале длин волн λ, $\lambda + \Delta\lambda$, определяемый выражением [44, 52, 53]

$$r(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \frac{L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)}{L_0(\lambda, z_0, \varphi_0)}, \tag{2.6}$$

где $L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)$ — спектральная яркость в данном направлении (θ, φ) на данной длине волны λ; $L_0(\lambda, z_0, \varphi_0)$ — спектральная яркость ортотропной, полностью отражающей поверхности, находящейся в тех же условиях облучения. В случае ортотропной, диффузно отражающей поверхности имеем

$$L(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = L_0(\lambda, z_0, \varphi_0) r(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = \\ = 1/\pi \, E(\lambda, z_0, \varphi_0) r(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi). \tag{2.7}$$

СКО является фотометрической функцией, характеризующей структуру отраженной (рассеянной) элементами поверхности исследуемого природно-

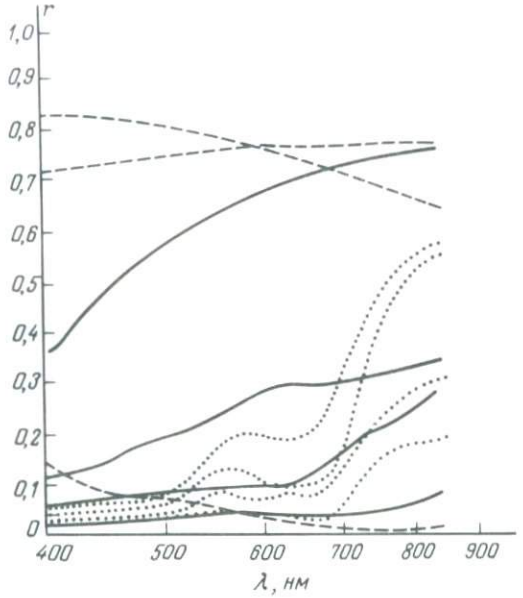


Рис. 2.2. Спектральные характеристики отражения некоторых типичных природных образований.

——— класс почв; ----- класс водных поверхностей;····· класс растительности.

го образования радиации как в зависимости от длины волны, так и от условий освещения и измерения. СКО природных образований является функцией ряда переменных, зависящих от физико-химических и биологических свойств объектов, степени влажности, фенологического состояния, проективного покрытия и т.д. Часто говорят, что СКО представляет собой многофакторную фотометрическую функцию. Эта многофакторность определяет высокую дешифровочную информативность СКО. Последний можно определить как теоретически (на основе заранеее выбранной модели, описывающей механизм отражения радиации природным образованием (см. ниже)), так и экспериментально.

Зависимость $r(\lambda, z_0, \varphi_0, \theta, \varphi)$ часто строится как функция длины волны λ при параметрах θ, φ и выбранных z_0, φ_0. Полученные характеристики называются *спектральными характеристиками отражения*. Так как спектральные характеристики отражения должны быть сопоставимыми при измерении на земле, с аэростата, вертолета, самолета и спутника, то чаще всего они строятся для $\theta = 0$, $\varphi = \varphi_0 = 0$ как функция λ при параметре z_0.

На рис. 2.2 представлены спектральные характеристики отражения некоторых природных образований [58], впервые полученные известным советским ученым Криновым. На рис. 2.3 показаны спектральные характеристики отражения одного и того же природного образования (естественной

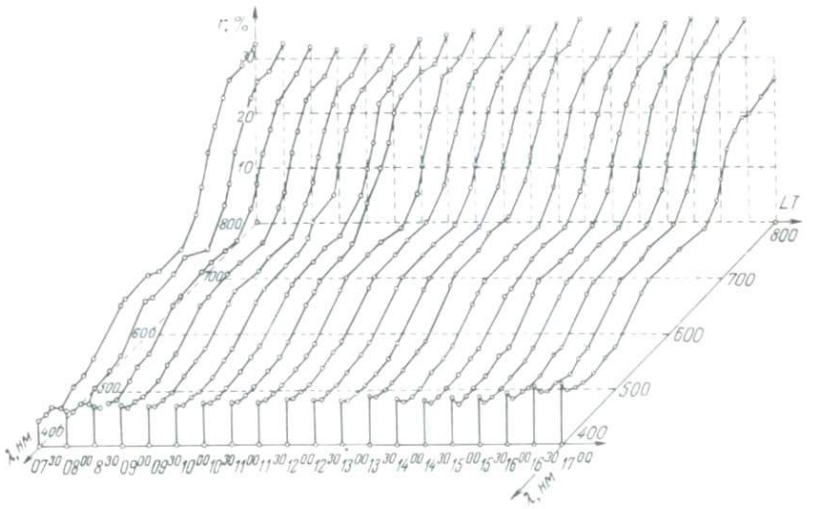


Рис. 2.3. Спектральные характеристики отражения одного и того же природного образования при различных зенитных углах Солнца.

луговой растительности), полученные при различных зенитных углах Солнца $Z_{\odot}$.

Интегральный спектральный коэффициент отражения $r(\theta, \varphi)$, определяемый отношением

$$r(\theta, \varphi) = \int_0^{\infty} L(\lambda, \theta, \varphi)\, d\lambda \Big/ \int_0^{\infty} L_0(\lambda)\, d\lambda, \qquad (2.8)$$

иногда также используется для описания характеристик отражения природных объектов. Хотя в выражении (2.8) пределами интегрирования являются 0 и ∞, на самом деле интегрирование проводится в пределах $\lambda_{\text{мин}} \div \lambda_{\text{макс}}$, чаще всего ими являются пределы видимого диапазона.

Спектральное альбедо (*коэффициент спектрального альбедо*) $\rho(\lambda, Z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)$ определяется как отношение потока, отраженного исследуемым природным образованием $\Phi_{\text{отр}}(\lambda)$, к потоку света, падающему на исследуемое образование $\Phi_{\text{п}}(\lambda)$, т.е.

$$\rho(\lambda, Z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi) = \Phi_{\text{отр}}(\lambda, Z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)/\Phi_{\text{п}}(\lambda, Z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi) \qquad (2.9)$$

в выбранном спектральном интервале λ, $\lambda + \Delta\lambda$.

Величина спектрального альбедо зависит от координат Солнца z_0, φ_0 и поэтому его принято обозначать как функцию параметров λ, $Z_{\odot}$, φ_0 и 2π. Последний указывает на то, что измеряется (регистрируется) падающий и отраженный поток во всей полусфере.

Интегральное альбедо ρ описывается выражением

$$\rho = \int_0^\infty \Phi_{\text{отр}}(\lambda)\, d\lambda \Big/ \int_0^\infty \Phi_{\text{п}}(\lambda)\, d\lambda. \tag{2.10}$$

Определяя $\Phi_{\text{отр}}$ из выражения (2.9) и подставляя в (2.10), получаем

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)\Phi_{\text{п}}(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)\, d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\text{п}}(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)\, d\lambda}. \tag{2.11}$$

Часто для определения ρ используется следующее выражение [49]:

$$\rho = \frac{\int_0^\infty \rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)(\Phi_{\text{п}_m} + \Phi_{\text{рас}_m})\, d\lambda}{(\Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{рас}})_m}, \tag{2.12}$$

где $(\Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{рас}})_m$ — поток суммарной радиации (прямой солнечной $\Phi_{\text{п}}$ и рассеянной $\Phi_{\text{рас}}$), падающей на горизонтальную поверхность, при массе атмосферы m; $\Phi_{\text{п}_m} + \Phi_{\text{рас}_m}$ — монохроматический поток суммарной радиации, падающий на горизонтальную поверхность, при массе атмосферы m. Видно, что в выражении (2.12) положение Солнца учитывается в неявном виде посредством массы атмосферы.

На практике выражение (2.12) для интегрального альбедо ρ используется в виде

$$\rho(\Delta\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1 = \lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_2 = \lambda_{\text{макс}}} \rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)(\Phi_{\text{п}_m} + \Phi_{\text{рас}_m})\, d\lambda}{(\Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{рас}})_m}, \tag{2.13}$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{\text{макс}} - \lambda_{\text{мин}}$.

На рис. 2.4 показана зависимость интегрального альбедо ρ водной поверхности от высоты Солнца h_0 в видимом диапазоне.

Связь между СКО и спектральным альбедо. В наиболее общем случае между спектральным коэффициентом отражения $r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$ и спектральным альбедо $\rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)$ существует зависимость [49, 53]

$$\rho(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta\, d\varphi d\theta. \tag{2.14}$$

В случае ортотропной поверхности

$$r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) = r_{\text{орт}}(\lambda), \tag{2.15}$$

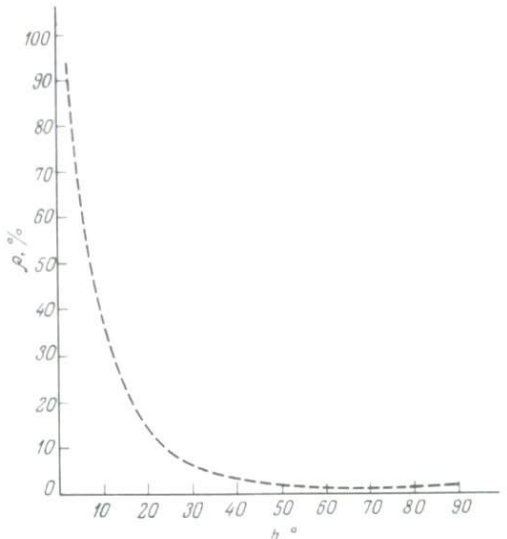


Рис. 2.4. Зависимость интегрального альбедо водной поверхности от высоты Солнца.

а из выражения (2.14) следует

$$\rho(\lambda) = r_{\text{орт}}(\lambda). \tag{2.16}$$

В выражении (2.16) спектральный коэффициент отражения $r_{\text{орт}}(\lambda)$ ортотропной отражающей поверхности зависит от длины волны; эту зависимость приходится учитывать при измерениях.

Особенности индикатрис отражения природных образований. Известно, что любая индикатриса определяется при данном угле $Z_{\odot}$ и, за исключением диффузно отражающих поверхностей, с изменением $Z_{\odot}$ вид индикатрисы изменяется. Более того, одно и то же природное образование или смешанный класс имеют различный тип индикатрис отражения. Так, например, на рис. 2.5 представлены индикатрисы отражения стерни ячменя, согласно [52, 107], при зенитных углах Солнца 30, 45, 54 и 66°. Видно, что при $Z_{\odot} < 30°$ индикатриса отражения очень близка к индикатрисе ортотропной поверхности. С увеличением зенитного угла более 50° индикатриса отражения постепенно трансформируется в индикатрису «антизеркально отражающей поверхности». На рис. 2.6 показана зависимость индикатрисы отражения при выбранном угле регистрации θ и плавном изменении зенитного угла $Z_{\odot}$. Исследована «антизеркальная» часть индикатрисы отражения. На рис. 2.7 представлены индикатрисы отражения ячменя, находящегося в стадии выколашивания [52], при различных зенитных углах Солнца $Z_{\odot} = 24$, 37, 47, 61, 70 и 80°. Видно, что индикатриса отражения все более вытягивается по мере увеличения зенитного угла $Z_{\odot}$. При $Z_{\odot} > 45°$ инди-

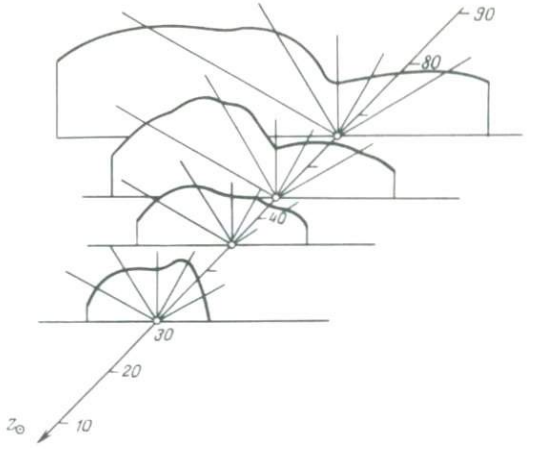


Рис. 2.5. Индикатрисы отражения стерни ячменя при различных зенитных углах Солнца.

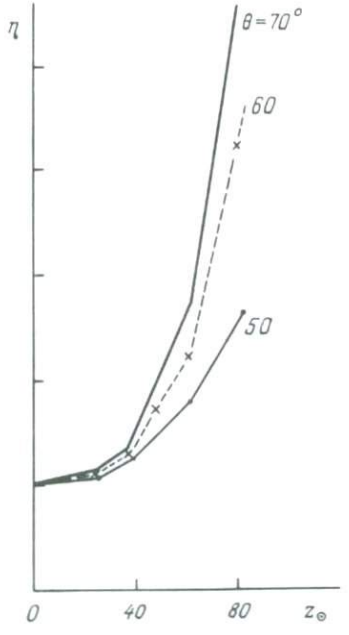


Рис. 2.6. Зависимость индикатрисы отражения от зенитного угла при различных значениях угла регистрации (наблюдения) θ.

катриса имеет два ясно выраженных максимума в зеркальном и антизеркальном направлениях: при $Z_\odot < 45°$ максимум, соответствующий зеркальному отражению, выражен очень слабо и практически исчезает с

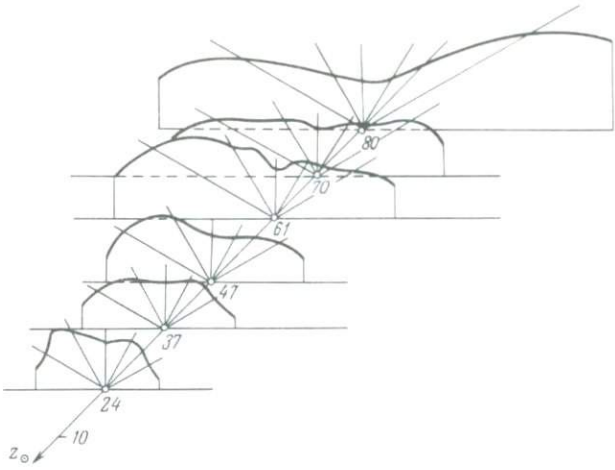


Рис. 2.7. Индикатрисы отражения ячменя, находящегося в стадии выколашивания, при различных зенитных углах Солнца $Z_\odot$.

уменьшением $Z_\odot$, уменьшая этим вытянутость индикатрисы в антизеркальном направлении. При $Z_\odot < 25°$ форма индикатрисы отражения близка к сферической, т.е. поверхность является практически ортотропной. Особое значение имеет тот факт [52], что, обладая сильно отличающимися СКО, зеленые и пожелтевшие стебли ячменя имеют практически одинаковые индикатрисы отражения. Это указывает на влияние чисто структурных параметров растения.

Основной вывод, который можно сделать из сказанного выше: при $Z_\odot < 15°$ индикатрисы отражения природных образований очень близки к индикатрисам ортотропных отражающих поверхностей [1)]. Этот факт позволяет выбрать угол поля зрения спектрометрической системы в наземных исследовательских комплексах для квазисинхронных измерений [59, 72].

Связь между СКО, спектральным альбедо и индикатрисой отражения. Легко можно доказать [72, 166], что спектральный коэффициент отражения $r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$, спектральное альбедо $\rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$ и индикатриса отражения $\eta(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$ данного природного образования связаны зависимостью

$$r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) = \eta(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)\rho(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi). \qquad (2.17)$$

Если сопоставить выражение (2.17) с выражением (2.16), выведенным для ортотропно отражающей поверхности, можно записать

$$\eta_{орт}(\lambda) = 1 = \text{const}. \qquad (2.18)$$

[1)] Это видно также на рис. 2.8.

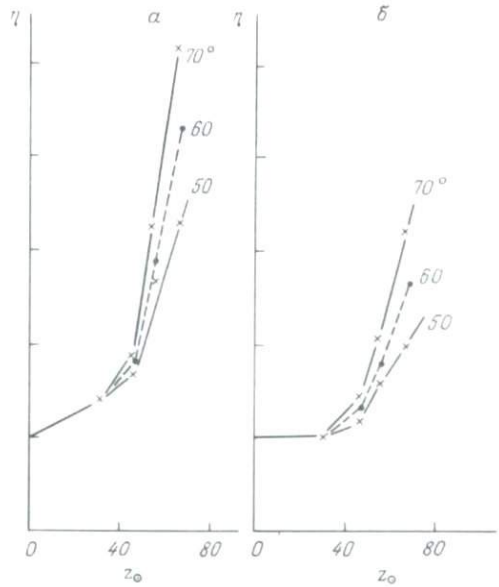


Рис. 2.8. Зависимость СКО от зенитного угла Солнца $Z_\odot$.
а — ячмень — зеркальный конец индикатрисы; *б* — стерня ячменя — зеркальный конец индикатрисы.

Показанная выше зависимость (2.17) имеет особое значение при исследовании смешанных классов природных образований, т.е. когда в исследуемый элемент (пиксель) попадают два типа (класса) природных образований с различными коэффициентами отражения $r_j(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$, подобными или различными индикатрисами отражения $\eta_j(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$ и спектральным альбедо $\rho_j(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, 2\pi)$ и с различными (известными) долями S_1 и S_2 площади в исследуемом пикселе. Эта зависимость позволяет вывести выражение для индикатрисы отражения смешанного класса [72].

2.1.1. Особенности отражения радиации от поверхности почв

Известно, что на отражение радиации от поверхности почв оказывает влияние ряд факторов. Это будет подробно рассмотрено в гл. 6. Здесь отметим только некоторые особенности отражения и прежде всего его зависимость от шероховатости поверхности. Так на рис. 2.9,*а* показана зависимость от среднего размера частиц доли падающей радиации, отраженной от поверхности каолинита на двух длинах волн 700 и 1000 нм, а на рис. 2.9,*б* — та же зависимость для бентонита на длине волны 1000 нм.

Известно много работ, в которых рассматривается влияние размера частиц почвенного покрова. В работе [152] показано, что для резко различаю-

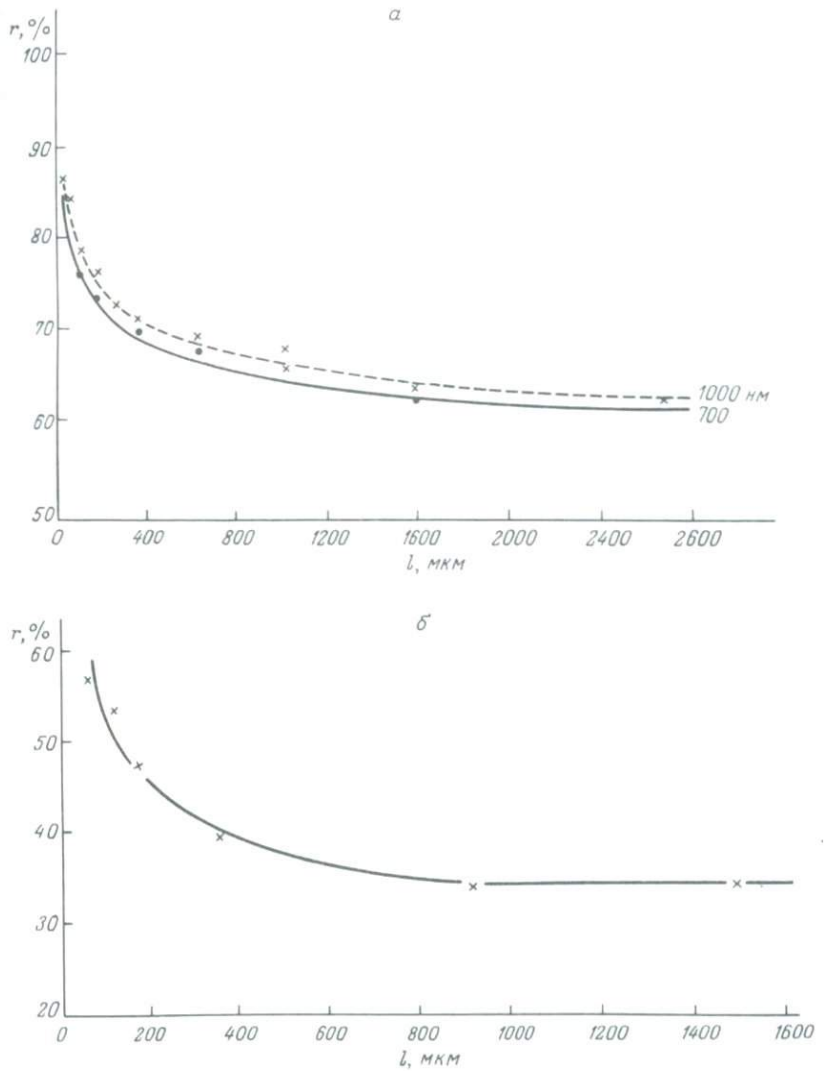


Рис. 2.9. Зависимость от среднего размера частиц интенсивности радиации, отраженной от поверхностей каолинита (*а*) и бентонита (*б*).

щихся минералов в случае пяти различных по размерам фракций спектральный коэффициент отражения увеличивается с уменьшением размера фракций. Авторы работы считают, что при диффузном отражении радиации в видимом диапазоне отраженный поток имеет две составляющие — внеш-

нюю и внутреннюю. Они предполагают, что внешняя составляющая (непосредственно отраженная от поверхности объекта) представляет собой незначительную часть отраженной световой радиации (здесь исключаются вещества, обладающие сильным селективным поглощением). В работе [149] показано, что с увеличением шероховатости поверхности почвы уменьшается количество отраженной радиации. К этому же выводу приходят в работе [40], указывая, что такое увеличение яркости с уменьшением размера частиц наблюдается до размеров частиц, меньших 0,025 мм. Сделана попытка объяснить уменьшение отражательной способности с увеличением размера частиц двумя факторами:

— неодинаковым строением частиц (агрегатов);

— неодинаковым взаимным расположением частиц (агрегатов) на отражающей поверхности.

Так как при размельчении почвы она становится все более светлой, то считается [14], что основной причиной является характер взаимного расположения частиц. В работе [109] исследована зависимость отражательной способности почв, находящихся в естественном состоянии, от степени их обработки и показано, что на их отражающие свойства оказывает влияние не только размер составных частей, но и их состояние.

Общим недостатком упомянутых выше работ является то, что исследования проводились в лабораторных или близких к лабораторным условиях. Подробнее к этому вопросу вернемся в гл. 6, в которой рассмотрим спектральные характеристики отражения находящихся в естественном состоянии почв, полученные в полевых условиях.

2.1.2. Зависимость яркости водоемов от зенитного угла Солнца

Известно, что дистанционные методы занимают значительное место в исследованиях водных поверхностей. В частности, существенный интерес представляет исследование цветовых полей в океанах, морях, водоемах.

Заметим, что при проведении таких исследований из космоса необходимо учитывать следующую специфику:

— Солнце (источник радиации) и приемник отраженной радиации находятся за пределами атмосферы, а рассеяние и поглощение излучения молекулами и аэрозолями происходит в атмосфере. При этом влияние молекулярной составляющей атмосферы стабильно, однако состав и концентрация аэрозолей, от которых сильно зависит спектральная прозрачность атмосферы и интенсивность рассеяния вверх, изменяются как в пространстве, так и во времени;

— граница раздела двух сред с различными коэффициентами преломления действует как зеркало;

— поверхность больших водоемов практически никогда не будет гладкой, а является результатом сложных движений различных по длине волн, зависящих от скорости ветра и многих других факторов.

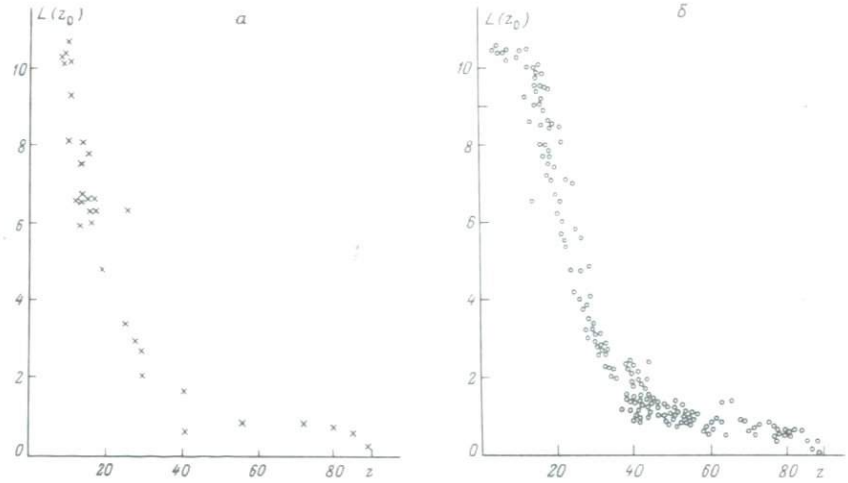


Рис. 2.10. Зависимость $L(z_0)$, измеренная для больших водных площадей с борта орбитальных станций «Салют-4» (*а*) и «Салют-6» (*б*).

Таким образом, при дистанционном исследовании водоемов в видимом диапазоне электромагнитного спектра измеряется суммарная радиация, отраженная водоемом и атмосферой, т.е. яркость водоема при измерении в надир ($\theta = 0$)

$$L(\lambda) = [r_1(\lambda) + r_2(\lambda)]\{S(\lambda) \exp[-\tau(\lambda) \sec z_0] \cos z_0 + F_{\text{п}}[\lambda, \tau(\lambda), z_0]\} \exp[-\tau(\lambda)] + F_{\text{отр}}[\lambda, \tau(\lambda), z_0], \quad (2.19)$$

где $S(\lambda)$ — спектральная солнечная постоянная вне атмосферы; $\exp[-\tau(\lambda) \sec z_0]$ — ослабление излучения Солнца по пути до поверхности воды; $\tau(\lambda)$ — оптическая толща атмосферы; $F_{\text{п}}[\lambda, \tau(\lambda), z_0]$ — излучение, рассеянное атмосферой в нижнюю полусферу; $F_{\text{отр}}[\lambda, \tau(\lambda), z_0]$ — рассеянное излучение столба атмосферы в зените; $r_1(\lambda)$ — СКО рассеянного в воде излучения; $r_2(\lambda)$ — коэффициент отражения водной поверхности.

От поверхности воды зеркально отражается как Солнце, так и небосвод. Вклад отраженного излучения небосвода меньше всего в направлении, близком к надиру [21]. В случае спокойной водной поверхности вклад отраженного солнечного излучения наибольший в окрестности зеркальной точки [21, 48].

Особое значение имеет выяснение возможных искажений, вызванных зеркальным отражением Солнца, в близких к надиру направлениях, в которых наиболее часто производятся измерения. В этом отношении интересны результаты экспериментов, проведенных на борту орбитальных станций «Салют-4» и «Салют-6» и касающихся измерений зависимости яркости больших водных поверхностей от зенитного угла Солнца в безоблачную

погоду [21]. При этом каждое измерение производилось в интервале зенитных углов $9° \leqslant z_0 \leqslant 90°$. Наблюдалась сильная зависимость спектральной яркости от зенитного угла Солнца, которая во всех используемых для измерения спектральных интервалах оказалась практически одной и той же. Значения яркости $L_\lambda(z_0)$ определены с точностью не хуже $\pm 0{,}5°$ для каждого z_0. На рис.2.10,*а* представлена зависимость $L(z_0)$, полученная на борту «Салют-4», а на рис. 2.10,*б* — на борту «Салют-6». Кривые нормированы к $z_0 = 50°$ и длине волны 2,15 мкм. Видно, что при $80° \leqslant z_0 \leqslant 90°$ яркость водных поверхностей в среднем нарастает медленно, что связано с уменьшением атмосферной экстинкции. В интервале $45° \leqslant z_0 \leqslant 80°$ яркость практически не зависит от z_0 и остается постоянной. При $z_0 \leqslant 40°(45°)$ наблюдается резкое нарастание яркости в результате зеркального отражения.

2.1.3. Модель отражения радиации поверхностью природных образований

Как было показано, яркость реальных природных образований на земной поверхности изменяется в зависимости от зенитного угла Солнца, причем в большинстве случаев наблюдаются максимумы спектрального альбедо или спектрального коэффициента отражения, расположенные по обе стороны зенита [110, 137].

Рассмотрим модель этого явления, основанную полностью на микроструктуре отражающей поверхности при заданном постоянном коэффициенте отражения [209]. Модель содержит следующие ограничения: а) частотное распределение углов отражающей поверхности в плоскости XOY изотропно, непрерывно и симметрично относительно нуля; б) любая вторично облученная поверхность считается абсолютно черным телом, т.е. пренебрегаем многократным отражением; в) отражающие микроповерхности ортотропны; г) вклад любой затененной площади пренебрежимо мал по сравнению с общей затененной площадью; д) макроотражающая поверхность содержит только плавные переходы в структуре (при одном и том же значении коэффициента $r(\lambda)$).

С целью упрощения выводов, не нарушая их общности, принята система координат, содержащая в плоскости YOZ падающую солнечную радиацию. В таком случае микроотражающие поверхности ориентированы случайным образом по отношению плоскости YOZ. Этот факт количественно характеризуется случайным значением угла между нормалью $n—n$ (рис. 2.11) к микроотражающим поверхностям и направлением падения солнечной радиации. Кроме того, все выкладки делаются для фиксированной длины волны λ.

Согласно рис. 2.12, энергетическая светимость M отражающей поверхности OA, имея в виду ограничительное условие *в*, выражается зависимостью

$$M_\lambda = r_\lambda (d\Phi_\lambda / ds) = r_\lambda I_\lambda \cos\varphi \sin(\beta + \alpha), \qquad (2.20)$$

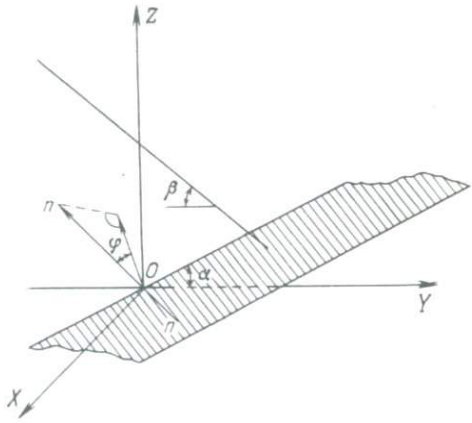


Рис. 2.11. Микроотражающая поверхность.

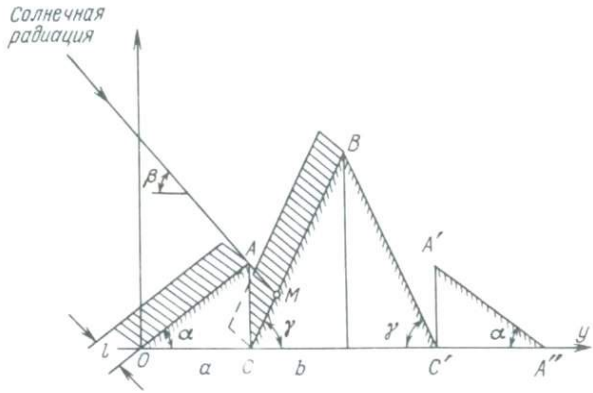


Рис. 2.12. Совокупность микроотражающих поверхностей.

где $d\Phi_\lambda$ — поток солнечной радиации через площадь ds; φ — угол между нормалью n—n и плоскостью YOZ; $I_\lambda = d\Phi_\lambda / ds$ — освещенность единицы поверхности, перпендикулярной направлению падающей радиации. Случайная ориентация микроотражающей поверхности по отношению направления потока $d\Phi_\lambda$ определяется значениями углов α и β.

В общем случае из-за пространственного распределения микроотражающие поверхности будут частично затеняться. Согласно ограничительному условию *б*, отражающие микроповерхности, обозначенные на рис. 2.12 как BC', $A'A''$ и CM, будут рассматриваться как абсолютно черное тело (при указанном на рисунке направлении падающей солнечной радиации). Для описания этого допущения введем единичную функцию δ на плоскости XOY

$$\delta = \delta(x, y, \alpha, \beta, \varphi) = \begin{cases} 0 \text{ для затененной поверхности,} \\ 1 \text{ для непосредственно облучаемой поверхности.} \end{cases} \tag{2.21}$$

В таком случае поток отраженной макроповерхностью радиации описывается интегралом

$$\Phi(\beta) = \int\limits_{S\delta(x, y, \alpha, \beta, \varphi)} r_\lambda I_\lambda f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \sin(\alpha + \beta)\, dxdy =$$

$$= \int\limits_{x_1(\beta)}^{x_2(\beta)} \int\limits_{y_1(x, \beta)}^{y_2(x, \beta)} r_\lambda I_\lambda f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \sin(\alpha + \beta)\, dxdy, \tag{2.22}$$

где $f(\alpha, \varphi) = f[\alpha(x, y), \varphi(x, y)]$ — двумерная функция частотного распределения α и φ; $x_1(\beta)$, $x_2(\beta)$, $y_1(x, \beta)$ и $y_2(x, \beta)$ — пределы интегралов, определенные площадью интегрирования.

Подынтегральная функция в выражении (2.22) в соответствии с ограничительным условием *а* непрерывна, дифференцируема по β и ее первая производная по β также непрерывна. Ограничительные условия *г* и *д* дают основание допустить, что на практике функции x_1, x_2, y_1 и y_2 также непрерывны и дифференцируемы. Следовательно, производную от $\Phi(\beta)$ можно определить по правилу дифференцирования под знаком интеграла

$$\frac{\partial\Phi(\beta)}{\partial\beta} = \frac{dx_2(\beta)}{d\beta} F[x_2(\beta), \beta] - \frac{dx_1(\beta)}{d\beta} F[x_1(\beta), \beta] + \int\limits_{x_1(\beta)}^{x_2(\beta)} \frac{\partial F}{\partial\beta}\, dx, \tag{2.23}$$

где

$$F = r_\lambda I_\lambda \int\limits_{y_1(x, \beta)}^{y_2(x, \beta)} f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \sin(\alpha + \beta)\, dy, \tag{2.24}$$

а производную от $F(\beta)$ — выражением

$$\frac{\partial F}{\partial\beta} = r_\lambda I_\lambda \left\{ \frac{dy_2(x, \beta)}{d\beta} W[x, y_2(x, \beta)] - \right.$$

$$\left. - \frac{dy_1(x, \beta)}{d\beta} W[x, y_1(x, \beta)] + \int\limits_{y_1}^{y_2} f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \cos(\alpha + \beta)\, dy \right\}, \tag{2.25}$$

где

$$W[x, y_1(x, \beta)] = f[\alpha(x, y_1), \varphi(x, y_1)] \cos\varphi \sin(\alpha + \beta) \text{ для } y = y_1(x, \beta), \tag{2.26}$$

$$W[x, y_2(x, \beta)] = f[\alpha(x, y_2), \varphi(x, y_2)] \cos\varphi \sin(\alpha + \beta) \text{ для } y = y_2(x, \beta). \tag{2.27}$$

При $\beta = \pi/2$ в соответствии с ограничительным условием a имеем

$$\frac{dy_2}{d\beta} = \frac{dy_1}{d\beta} = \frac{dx_2}{d\beta} = \frac{dx_1}{d\beta} = 0, \tag{2.28}$$

$$\int_{y_1}^{y_2} f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \cos(\alpha + \beta)\, dy = -\int_{y_1}^{y_2} f(\alpha, \varphi) \cos\varphi \sin\alpha\, dy = 0, \tag{2.29}$$

так как $\sin\alpha = -\sin(-\alpha)$, и тогда

$$\left.\frac{\partial\Phi(\beta)}{\partial\beta}\right|_{\beta = \pi/2} = 0. \tag{2.30}$$

В общем случае, когда $f(\alpha, \varphi)$ и $\delta(x, y, \alpha, \beta, \varphi)$ — произвольные функции по отношению $\sin(\alpha + \beta)$ (хотя они и симметричны относительно $\alpha = 0$), равенство нулю производной $\partial\Phi(\beta)/\partial\beta$ возможно также и при $\beta \neq \pi/2$, так как тогда не обязательно существование уравнения (2.28). Когда существуют такие экстремумы, они симметричны относительно $\beta = \pi/2$ из-за ограничительного условия a [1].

Из уравнений (2.23) и (2.28) следует, что чем сильнее выражен эффект затенения, т.е. чем больше участие $\delta = 0$ в интегрируемой площади, тем больше вероятность существования экстремумов при $\beta \neq \pi/2$. Действительно, если допустить, что затенения нет, то это означает, что $f(\alpha) = 0$ для любого $\alpha \neq 0$ и $f(\alpha) = 1$ для $\alpha = 0$. Но в таком случае система (2.28) существует для любого β, а выражение (2.29) принимает нулевое значение только при $\beta = \pi/2$ из-за симметрии функции $f(\alpha, \varphi)$ согласно ограничению a. Следовательно, существует только один экстремум при $\beta = \pi/2$, который является максимумом.

Из сказанного следует, что наблюдаемые максимумы $\Phi(\beta)$ при углах $\beta \neq \pi/2$ можно объяснить существованием «пористости», т.е. эффектом затенения в структуре макроотражающей поверхности [209]. Такова большая часть структуры земной поверхности; во всяком случае, полученные выводы хорошо соответствуют случаю макрогомогенных природных образований, например почв, густой стебельной растительности и т.д., для которых можно считать, что ограничительные условия a—∂ существуют с достаточной точностью. Заметим также, что условие изотропности не является жестким ограничением. Даже если оно не выполняется, равенство $\partial\Phi(\beta)/\partial\beta$ нулю возможно при различных значениях β, но существование экстремума не обязательно при $\beta = \pi/2$.

Проиллюстрируем изложенное несколькими частными случаями:

1. Макроотражающая поверхность состоит из двух отражающих поверхностей с положительным наклоном (рис. 2.12) и двух поверхностей с симметричным, но отрицательным наклоном. Для отражающих поверхно-

[1] Из-за того же ограничительного условия следует, что яркость рассматриваемой отражающей макроповерхности пропорциональна потоку $\Phi(\beta)$ с коэффициентом пропорциональности $1/\pi$.

стей $OAED$ и $BCGH$, согласно (2.22), получаем ($\varphi = 0°$)

$$\Phi(\beta) = r_\lambda I_\lambda l \sin(\alpha + \beta)\left\{\frac{a}{\cos\alpha} + \left[\left(b\,\mathrm{tg}\,\gamma - \frac{a\,\mathrm{tg}\,\alpha\,\mathrm{tg}\,\gamma}{\mathrm{tg}\,\beta + \mathrm{tg}\,\gamma}\right)^2 + \left(\alpha - \frac{a\,\mathrm{tg}\,\alpha}{\mathrm{tg}\,\beta + \mathrm{tg}\,\gamma}\right)^2\right]^{1/2}\right\}. \quad (2.31)$$

Тогда при $\beta = \pi/2$ и произвольных $0 < \alpha < \pi/2$, $0 < \gamma < \pi/2$

$$\frac{\partial \Phi(\alpha, \gamma)}{\partial \beta} = -\sin\alpha\left(\frac{a}{\cos\alpha} + \frac{b}{\cos\gamma}\right) + \frac{a\sin\alpha}{\cos\gamma} \neq 0. \quad (2.32)$$

Однако, если прибавить также отражающие поверхности BC' и $A'A''$, при $\beta = \pi/2$ имеем

$$\left[\frac{\partial \Phi(\beta)}{\partial \beta}\right]_\Sigma = 0, \quad (2.33)$$

так как из (2.32) следует

$$\frac{\partial \Phi(\alpha, \gamma)}{\partial \beta} = -\frac{\partial \Phi(-\alpha, -\gamma)}{\partial \beta}, \quad (2.34)$$

что подтверждает (2.29).

2. $BC = BC' = 0$, $\alpha > \pi/3$. Тогда

$$\Phi = r_\lambda I_\lambda [f(\alpha, \beta) + \sin(\alpha + \beta)] = \mathrm{f}(\alpha, \beta) = \begin{cases} 0 \text{ при } \beta < \alpha, \\ \sin(\beta - \alpha) \text{ при } \beta > \alpha. \end{cases} \quad (2.35)$$

При $\alpha + \beta = \pi/2$, $\Phi' = r_\lambda I_\lambda$; при $\beta = \pi/2$, $\Phi'' = 2r_\lambda I_\lambda \cos\alpha < \Phi'$; следовательно, при $\alpha + \beta = \pi/2$ существует максимум при $\beta \neq \pi/2$.

2.1.4. Яркость природных образований, обусловленная отраженной радиацией

Знание характеристик радиации, отраженной различными природными образованиями, в том числе ее спектрального распределения, имеет существенное значение не только при интерпретации аэрокосмических изображений и данных, но и при разработке устройств измерения и получения данных об этой радиации. Для проведения соответствующих расчетов необходимо знать:

— солнечную радиацию на земной поверхности при различных оптических толщинах атмосферы и длинах волн (рис. 2.13 [45, 163], табл. 2.1 и 2.2);

— пропускание рэлеевской (рис. 2.14,*а*) и замутненной (рис. 2.14,*б*) атмосферы [145];

— спектральные характеристики используемых измерительных устройств.

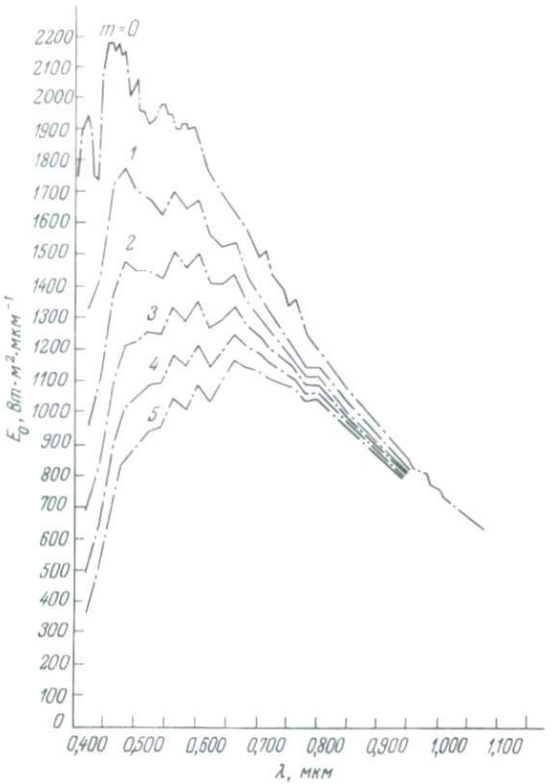


Рис. 2.13. Солнечная радиация E_0 на земной поверхности для различных оптических толщин атмосферы m и длин волн λ.

На рис. 2.15 представлена двумерная модель, которую можно использовать для расчета интенсивности радиации, достигающей измерительных устройств, установленных на борту спутника или самолета-лаборатории [168]. Яркость, измеряемая на борту спутника или самолета, обусловливается двумя составляющими: яркостью L_S поверхности Земли, отражающей солнечную радиацию, и яркостью атмосферы, рассеивающей солнечную радиацию в направлении к измерителю. Полная измеряемая яркость представляет собой сумму

$$L_\Sigma = L_s + L_A. \tag{2.36}$$

В определенном спектральном интервале $\Delta\lambda = \lambda_{макс} - \lambda_{мин}$ плотность потока солнечной радиации, достигшей земной поверхности, описывается

Таблица 2.1

λ, мкм	E_0, Вт · м$^{-2}$ × × мкм$^{-1}$	λ, мкм	E_0, Вт · м$^{-2}$ × × мкм$^{-1}$	λ, мкм	E_0, Вт · м$^{-2}$ × × мкм$^{-1}$
0,400—0,405	1742	0,550—0,555	1948	0,800—0,810	1190
0,405—0,410	1896	0,555—0,560	1916	0,810—0,820	1158
0,410—0,415	1920	0,560—0,565	1904	0,820—0,830	1145
0,415—0,420	1934	0,565—0,570	1900	0,830—0,840	1101
0,420—0,425	1894	0,570—0,575	1914	0,840—0,850	1071
0,425—0,430	1760	0,575—0,580	1914	0,850—0,860	1051
0,430—0,435	1740	0,580—0,585	1904	0,860—0,870	1021
0,435—0,440	1880	0,585—0,590	1904	0,870—0,880	1008
0,440—0,445	2080	0,590—0,595	1896	0,880—0,890	993
0,445—0,450	2140	0,595—0,600	1870	0,890—0,900	963
0,450—0,455	2178	0,600—0,610	1802	0,900—0,910	927
0,455—0,460	2178	0,610—0,620	1764	0,910—0,920	914
0,460—0,465	2145	0,620—0,630	1732	0,920—0,930	899
0,465—0,470	2150	0,630—0,640	1690	0,930—0,940	877
0,470—0,475	2140	0,640—0,650	1661	0,940—0,950	855
0,475—0,480	2160	0,650—0,660	1638	0,950—0,960	825
0,480—0,485	2094	0,660—0,670	1625	0,960—0,970	815
0,485—0,490	2000	0,670—0,680	1581	0,970—0,980	809
0,490—0,495	2040	0,680—0,690	1539	0,980—0,990	768
0,495—0,500	2060	0,690—0,700	1495	0,990—1,000	754
0,500—0,505	1960	0,700—0,710	1504	1,000—1,010	730
0,505—0,510	1960	0,710—0,720	1441	1,010—1,020	715
0,510—0,515	1930	0,720—0,730	1420	1,020—1,030	702
0,515—0,520	1920	0,730—0,740	1390	1,030—1,040	687
0,520—0,525	1930	0,740—0,750	1347	1,040—1,050	673
0,525—0,530	1950	0,750—0,760	1359	1,050—1,060	660
0,530—0,535	1970	0,760—0,770	1298	1,060—1,070	646
0,535—0,540	1980	0,770—0,780	1253	1,070—1,080	633
0,540—0,545	1980	0,780—0,790	1238	1,080—1,090	619
0,545—0,550	1950	0,790—0,800	1208	1,090—1,100	605

выражением

$$E_h = \sin h \int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} E_0(\lambda) P_h(\lambda, H)\, d\lambda, \tag{2.37}$$

где $E_0(\lambda)$ — спектральная плотность потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы при нормальном падении лучей; $P_h(\lambda, H)$ — коэффициент пропускания атмосферы на длине волны для высоты Солнца h.

Таблица 2.2.

λ, мкм	*m*				
	1	2	3	4	5
0,40—0,42	1332,225	962,550	697,500	505,6875	366,1875
0,42—0,44	1429,875	1095,075	840,4875	645,1875	495,225
0,44—0,46	1715,850	1374,075	1102,050	882,3375	707,9625
0,46—0,48	1778,625	1475,2125	1224,1125	1018,350	843,975
0,48—0,50	1701,900	1450,800	1234,575	1053,225	896,2875
0,50—0,52	1674,000	1450,800	1255,500	1088,100	941,625
0,52—0,54	1632,150	1429,875	1252,0125	1095,075	959,0625
0,54—0,56	1708,875	1513,575	1339,200	1185,750	1049,7375
0,56—0,58	1653,075	1464,750	1297,350	1150,875	1018,350
0,58—0,60	1677,4875	1506,600	1353,150	1217,1375	1091,5875
0,60—0,62	1558,9125	1408,950	1272,9375	1150,875	1039,275
0,62—0,64	1527,525	1408,950	1297,350	1196,2125	1102,050
0,64—0,66	1544,9625	1440,3375	1342,6875	1252,0125	1168,3125
0,66—0,68	1436,850	1356,6375	1283,400	1213,650	1147,3875
0,68—0,70	1381,050	1314,7875	1255,500	1196,2125	1140,4125
0,70—0,72	1321,7625	1265,9625	1210,1625	1161,3175	1112,5125
0,72—0,74	1265,9625	1220,625	1178,775	1136,925	1098,5625
0,74—0,76	1206,675	1175,2875	1143,900	1112,5125	1081,125
0,76—0,78	1147,3875	1119,4875	1091,5875	1063,6875	1035,7875
0,78—0,80	1147,3875	1119,4875	1095,075	1070,0625	1046,250
0,80—0,85	1029,510	1009,980	990,450	972,315	954,180
0,85—0,90	924,885	910,035	896,985	883,035	870,480
0,90—0,95	818,865	809,100	799,335	789,570	779,805
0,95—1,00	764,460	757,485	750,510	743,535	736,560
1,00—1,5	459,513	457,6995	455,886	454,0725	452,759

Плотность потока радиации, отраженной земной поверхностью, определяется спектральным коэффициентом отражения $r(\lambda)$, являющимся в свою очередь функцией зенитного угла Солнца, длины волны, вещества и текстуры поверхности. Для ортотропной поверхности отражение не зависит от угла падения радиации. При больших значениях угла h отражение природных образований приближается к диффузному. Поэтому можно принять, что спектральный коэффициент отражения $r(\lambda)$ зависит только от длины волны. При таком допущении отношение потока радиации, отраженной в направлении к спутнику или самолету-лаборатории, к полной радиации, отраженной в верхнюю полусферу, равно $1/\pi$. Если измеритель радиации, установленный на борту спутника или самолета-лаборатории, направлен в надир, то яркость земной поверхности, обусловленная отраженной ею радиацией, составляет

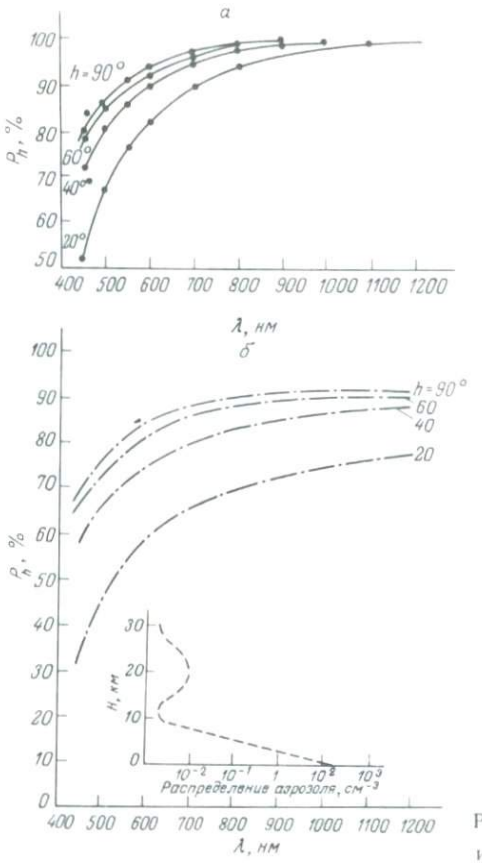


Рис. 2.14. Пропускание рэлеевской (*а*) и замутненной атмосферы (*б*).

$$L_S = \frac{1}{\pi} \sin h \int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} E(\lambda) P_h(\lambda, H) P_{\lambda_l}(H) r(\lambda) R(\lambda)\, d\lambda,\ \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}, \quad (2.38)$$

где $P_{\lambda_l}(H)$ — коэффициент передачи атмосферой солнечной радиации, отраженной от земной поверхности в зенит к направленному в надир измерителю; $R(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности соответствующего измерительного канала, включающего: фильтр, преобразователь, объектив и т.д. Яркость отраженной атмосферой радиации L определяется выражением

$$L_A = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} E(\lambda) r'_h(\lambda) R(\lambda)\, d\lambda,\ \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}, \quad (2.39)$$

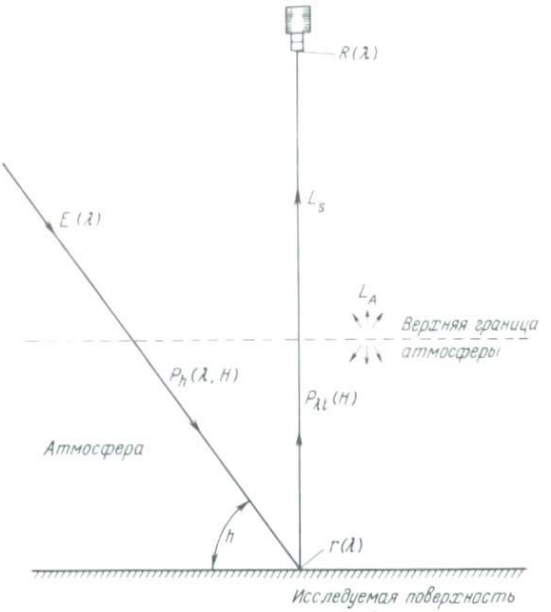


Рис. 2.15. Двумерная модель.

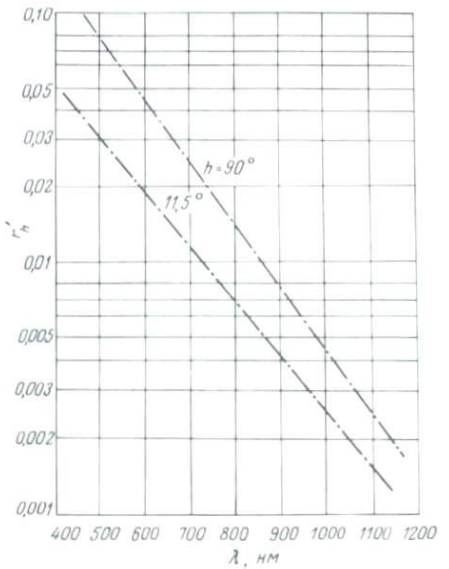


Рис. 2.16. Зависимость отражения атмосферы от длины волны.

где $r'_h(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения атмосферы, зависящий от высоты Солнца (рис. 2.16) [156].

Итак, полная измеряемая яркость определяется выражением

$$L = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_{\text{мин}}}^{\lambda_{\text{макс}}} E(\lambda) R(\lambda) [P_h(\lambda, H) P_{\lambda_l}(H) r(\lambda) \sin h + r'_h(\lambda)] \, d\lambda, \qquad (2.40)$$

являющимся основной математической моделью для вычисления ожидаемой яркости в каждом спектральном интервале при измерении с борта спутника или самолета-лаборатории.

2.2. Спектральные характеристики излучения природных образований

Все природные образования и явления, являющиеся объектом дистанционного исследования, находятся в условиях, позволяющих регистрировать также их собственное тепловое излучение. Поскольку их температура сравнительно невысока, максимумы спектрального распределения плотности их радиации регистрируются в длинноволновой области спектра.

Собственное излучение различных объектов определяется как излучение тела, находящегося в термодинамическом равновесии при температуре T. При рассмотрении теплового излучения твердого тела используется понятие абсолютно черного тела. Это тело, полностью поглощающее падающее на него излучение произвольной длины волны. Спектральное распределение излучения абсолютно черного тела $M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)$ определяется законом Планка

$$M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[\exp \frac{ch}{\lambda k T} - 1 \right]^{-1}, \qquad (2,41)$$

где $M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)$ — спектральная плотность потока, излучаемого поверхностью тела, в Вт $\cdot$ м$^{-2}$ $\cdot$ мкм$^{-1}$; $h = 6{,}6256 \cdot 10^{-34}$ Вт $\cdot$ с — постоянная Планка; T — абсолютная температура, К; c — скорость света $= 2{,}9979925 \cdot 10^{10}$ м $\cdot$ с$^{-1}$; $k = 1{,}38054 \cdot 10^{-23}$ Вт $\cdot$ с $\cdot$ К$^{-1}$ — постоянная Больцмана.

На рис. 2.17 показана зависимость плотности потока, излучаемого поверхностью абсолютно черного тела, от температуры. Видно, что плотность этого потока быстро нарастает с увеличением T.

Из (2.41) после интегрирования по λ получаем закон Стефана — Больцмана

$$M_{\text{АЧТ}} = \int_0^{\infty} M_{\text{АЧТ}}(\lambda) \, d\lambda = \frac{2\pi k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \qquad (2.42)$$

где $\sigma = 5{,}6697 \cdot 10^{-12}$ Вт $\cdot$ см$^{-2}$ $\cdot$ K^{-4} — постоянная Стефана — Больцмана.

После дифференцирования выражения (2.41) получается закон смещения

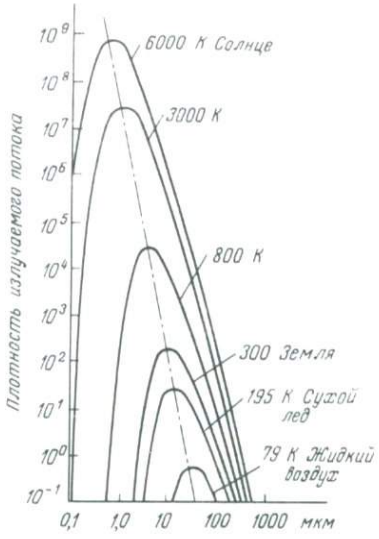


Рис. 2.17. Зависимость плотности потока, излучаемого поверхностью абсолютно черного тела, от температуры.

максимума излучения абсолютно черного тела, известный как закон Вина

$$\lambda_{\text{макс}} T = a = 2897{,}8 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \tag{2.43}$$

Из выражения (2.43) следует, что с увеличением температуры T положение максимума излучения смещается влево.

Используется также другая форма закона Вина для определения значения максимума спектральной плотности $M_{\text{АЧТ}}$ в зависимости от температуры

$$M_{\text{АЧТ}_{\lambda_{\text{макс}}}} = bT^5, \tag{2.44}$$

где $b = 1{,}2862 \cdot 10^{-15}$ Вт $\cdot$ см$^{-2} \cdot$ мкм$^{-1} \cdot$ К$^{-5}$.

Спектральный коэффициент плотности излучения $\varepsilon(\lambda)$. Известно, что при одной и той же термодинамической температуре T плотность $M(\lambda, T)$ потока, излучаемого поверхностью различных тел, всегда меньше плотности $M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)$ потока, излучаемого абсолютно черным телом. Спектральный коэффициент плотности излучения $\varepsilon(\lambda)$ определяется из выражения [57]

$$\varepsilon(\lambda) = M(\lambda, T)/M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T), \tag{2.45}$$

где $M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)$ определяется из формулы (2.41)

$$M(\lambda, T) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\lambda_i, \theta, \varphi) \cos\varphi \sin\varphi \, d\varphi d\theta, \tag{2.46}$$

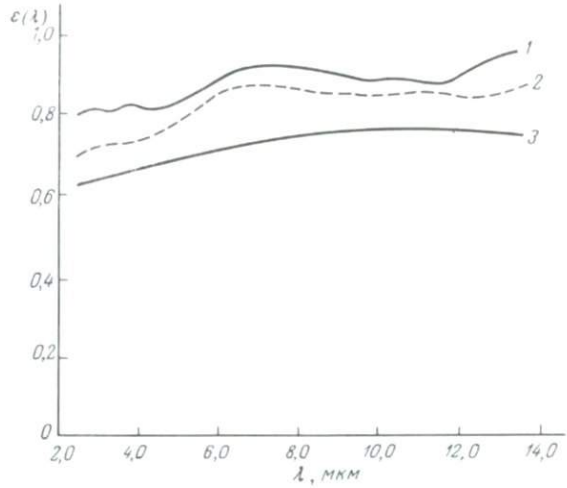


Рис. 2.18. Зависимость $\varepsilon(\lambda)$ для различных природных образований: глины (*1*), песчаника (*2*) и глинистого известняка (*3*).

а для абсолютно черного тела, являющегося идеальным излучателем ламбертового типа,

$$M_{\text{АЧТ}}(\lambda, T) = \pi L_{\text{АЧТ}}(\lambda). \tag{2.47}$$

Тогда

$$\varepsilon(\lambda) = \pi L_{\text{АЧТ}}(\lambda)/M_{\text{АЧТ}}(\lambda). \tag{2.48}$$

Значение $\varepsilon(\lambda)$ зависит прежде всего от физических и химических свойств природного образования, от состояния его поверхности, влажности и т.д. и изменяется с изменением температуры образования. Для большинства природных образований значение $\varepsilon(\lambda)$ близко к единице [57]. На рис. 2.18 представлена зависимость $\varepsilon(\lambda)$ для трех различных природных образований: глины, песчаника, глинистого известняка [57].

Частичный интегральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\Delta\lambda}$ иногда используется вместо спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda)$. Коэффициент $\varepsilon(\lambda)$ определяется из выражения [82, 130]

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \int\limits_{\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i} \varepsilon(\lambda) M(\lambda)\, d\lambda \Big/ \int\limits_{\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i} M(\lambda)\, d\lambda. \tag{2.49}$$

Интегральный коэффициент излучения. Для описания свойств излучения нечерных тел часто используется полный интегральный коэффициент излучения [130]

$$\varepsilon = \int_0^\infty \varepsilon(\lambda) M(\lambda)\, d\lambda \Big/ \int_0^\infty M(\lambda)\, d\lambda = (1/\sigma T^4) \int_0^\infty \varepsilon(\lambda)) M(\lambda)\, d\lambda. \qquad (2.50)$$

В зависимости от изменения полного интегрального коэффициента излучения ε источники (природные образования) подразделяются на три типа:

абсолютно черные тела — полные излучатели, для которых

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon = 1; \qquad (2.51)$$

серые тела

$$\varepsilon < 1; \qquad (2.52)$$

селективные излучатели, для которых

$$\varepsilon(\lambda) = f(\lambda). \qquad (2.53)$$

Для удобства анализа селективные излучатели в ограниченном спектральном интервале можно рассматривать как серые.

2.2.1. Отражение, пропускание и поглощение радиации природными образованиями

Часть радиации, падающей на данное природное образование, отражается, часть поглощается и часть пропускается. При этом, очевидно, имеет место равенство

$$\rho(\lambda, T) + \alpha(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1, \qquad (2.54)$$

где $\rho(\lambda, T)$, $\alpha(\lambda, T)$ и $\tau(\lambda, T)$ — коэффициенты отражения, поглощения и пропускания соответственно.

По определению абсолютно черного тела имеем

$$\alpha_{\text{АЧТ}} = 1. \qquad (2.55)$$

Из закона Кирхгофа следует, что при заданной температуре тела T спектральный коэффициент плотности излучения тела равен его коэффициенту поглощения, т.е.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T). \qquad (2.56)$$

Для непрозрачных природных образований $\tau(\lambda, T) = 0$ и тогда

$$\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T). \qquad (2.57)$$

На рис. 2.19 представлена зависимость коэффициента поглощения воды $\alpha(\lambda, T)$ от длины волны λ.

Выражение (2.57) очень часто используется для определения спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ исследуемого природного образования при известном (измеренном) коэффициенте отражения $\rho(\lambda, T)$. Как правило, коэффициент отражения $\rho(\lambda, T)$ измерить легче, чем коэффициент излучения.

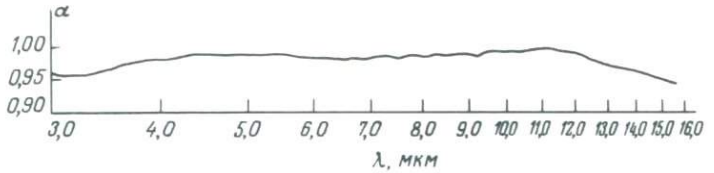


Рис. 2.19. Зависимость коэффициента поглощения воды $\alpha(\lambda)$ от длины волны λ в диапазоне 3,0 — 16,0 мкм (при $\theta = 0$).

2.2.2. Радиояркостная температура $T_я$

В радиодиапазоне выполняется условие $hf \ll kT$, и очень хорошим приближением к формуле Планка (2.41) является формула Рэлея — Джинса, связывающая спектральную яркость абсолютно черного тела $B_{АЧТ}$ с длиной волны λ и термодинамической температурой T:

$$B_{АЧТ} = 2kT/\lambda^2. \tag{2.58}$$

Это выражение имеет место при равновесном тепловом излучении, поэтому термодинамическая температура тела T является также температурой равновесного излучения. Так как тепловое излучение возникает вследствие хаотического движения заряженных частиц, оно имеет флюктуационный характер, а излучаемая мощность является некоторой случайной функцией времени.

Для средних значений, используя закон Кирхгофа для нечерного тела, получаем [57]

$$T_я = \alpha(\lambda, T)T, \tag{2.59}$$

где $T_я$ — радиояркостная температура; $\alpha(\lambda, T)$ — коэффициент поглощения.

Для $T_я$ чаще всего дается следующее определение [57]: $T_я$ — это температура абсолютно черного тела, излучающего с единицы площади на рассматриваемых длинах волн такое же количество энергии, как и наблюдаемое тело.

Поскольку в случае термодинамического равновесия [только в этом случае справедливы приведенные в работе [57] рассуждения при выведении формулы (2.59)] коэффициент поглощения $\alpha(\lambda, T)$ равен коэффициенту излучения $\varepsilon(\lambda, T)$, то окончательно получаем

$$T_я = \varepsilon(\lambda, T)T. \tag{2.60}$$

Радиояркостная температура связана с реальной температурой через $\varepsilon(\lambda, T)$ и параметры отражения. Так как $T_я$ изменяется от точки к точке, иногда она обозначается через $T_я(r^*, \theta, \varphi)$, где r^* — расстояние до исследуемого природного образования.

2.2.3. Диаграмма собственного излучения реальных поверхностей

Принимается, что направленность собственного радиотеплового излучения гладких поверхностей выражается формулой:

$$\varkappa = \varkappa_0 \cos\theta, \tag{2.61}$$

где $\varkappa \leqslant 1$ — коэффициент, связывающий яркостную температуру $T_я$ данного тела с его температурой T (согласно закону Кирхгофа, см. [57]); $\varkappa_0$ — значение $\varkappa$ при $\theta = 0$; θ — угол наблюдения (измерения) радиотеплового излучения. Полярная диаграмма излучательной способности представляет собой сферу с точкой касания на исследуемой поверхности (рис. 2.20).

Для большой части земных поверхностей имеет место равенство

$$\varkappa = 1 - 0{,}25\gamma_0(1 - 0{,}5 \sec\theta), \tag{2.62}$$

где γ_0 — коэффициент рассеяния в направлении, перпендикулярном поверхности.

Диаграмма на рис. 2.20,*а* относится к гладкой поверхности, а на рис. 2.20,*б* — к шероховатой. Логичен вопрос: в чем различие двух поверхностей? Чаще всего в радиодиапазоне это различие характеризует критерий Рэлея: поверхность гладкая, если высоты неровностей поверхности удовлетворяют условию

$$h_{макс} \leqslant \frac{\lambda}{16\cos\theta}. \tag{2.63}$$

Различные типы земной поверхности по характеру собственного излучения занимают промежуточное положение между гладкими поверхностями (спокойная вода) и идеально рассеивающими (неровная почва, растительность).

Ниже собственное излучение будет рассмотрено подробнее. Здесь отметим, что при прочих равных условиях можно сравнивать изображения, по-

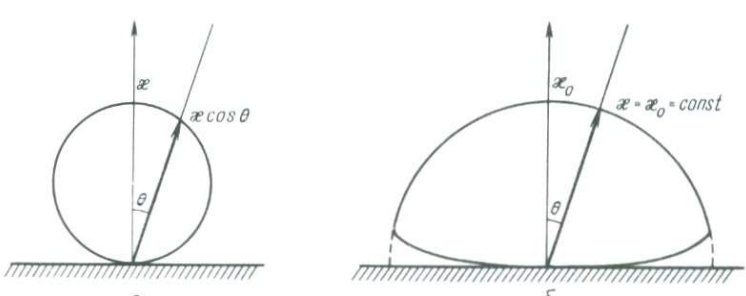


Рис. 2.20. Полярная диаграмма собственного радиотеплового излучения гладких (*а*) и шероховатых (*б*) поверхностей.

лученные при регистрации отраженного радиолокационного сигнала и собственного радиоизлучения данного природного образования, так, как сравниваются позитив и негатив. Природные образования, которые слабо отражают радиоволны и не обнаруживаются при радиолокации, создают сильное радиотепловое излучение, и наоборот. В отличие от отраженного радиолокационного сигнала радиотепловой не зависит от небольших отклонений углов θ и α. В пределах всей полусферы (за исключением очень малых углов) этот сигнал практически постоянен для шероховатых поверхностей суши и плавно изменяется для зеркальных (гладких водных) поверхностей (рис. 2.20).

2.2.4. Модели радиотеплового излучения природных образований

Как правило, для описания радиотеплового излучения можно использовать все разработанные модели отражения электромагнитной радиации земной поверхностью [108]. В случае гладкой, ровной поверхности радиояркостная температура определяется из выражения

$$T_{я} = \varepsilon(\lambda, T)T = T(1 - |R|)^2, \tag{2.64}$$

где T — термодинамическая температура среды; $\varepsilon(\lambda, T) \leqslant 1$ — коэффициент излучения; R — коэффициент отражения, описываемый формулой

$$R(0) = \frac{\sqrt{\dot{\varepsilon}_2} - 1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}_2} + 1}. \tag{2.65}$$

Видно, что по результатам измерения значений радиояркостной температуры $T_{я}$ можно определить термодинамическую температуру T, коэффициент отражения $R(0)$, а после этого — диэлектрическую постоянную $\dot{\varepsilon}_2$, связанную с коэффициентом отражения выражением

$$\dot{\varepsilon}_2 = \left[\frac{1 + R(0)}{1 - R(0)}\right]^2. \tag{2.66}$$

С увеличением шероховатости увеличивается излучательная способность $\varepsilon(\theta)$ (θ — угол визирования), что обусловливает нарастание радиояркостной температуры и ослабление степени поляризации теплового радиоизлучения земными образованиями.

Радиотепловое излучение водной поверхности. Важнейшими особенностями водной поверхности как источника радиотеплового излучения являются:

— относительно низкая излучательная способность при сильно выраженной асимметрии горизонтальных и вертикальных поляризационных компонент;

— зависимость излучательной способности от температуры, солености, загрязненности поверхностного слоя и т.д.;

— зависимость излучательной способности от степени волнения и образования пены.

При исследовании (измерении) через весь слой атмосферы сверху вниз радиояркостную температуру плоской (гладкой) водной поверхности можно определить из следующего приближенного выражения [108]:

$$T_{\text{я}} = T\varepsilon(\lambda, T)\exp(-\tau) + T_{\text{с.а}}[1 - \exp(-\tau)] + \\ + T_{\text{с.а}}\exp(-\tau)[1 - \exp(-\tau)][1 - \varepsilon(\lambda, T)] = A + B + C, \qquad (2.67)$$

где T — температура поверхности; $T_{\text{с.а}}$ — усредненная температура слоя атмосферы (небосвода); $\varepsilon(\lambda, T)$ — коэффициент излучения воды; τ — оптическая толща слоя атмосферы; A — первая компонента — излучение собственно водной поверхности; B — радиояркостная температура небосвода, измеренная тем же радиометром, направленным под тем же углом снизу вверх; C — радиояркостная температура отраженного морем излучения неба.

Из (2.67) следует, что чувствительность $T_{\text{я}}$ к изменению коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ сильно зависит от влияния атмосферы. В длинноволновой части сантиметрового диапазона атмосфера практически прозрачна, т.е. $\tau \to 0$, и из (2.67) следует выражение (2.64).

Излучательную способность ровной водной поверхности можно определить коэффициентом Френеля (в наиболее общем виде)

$$R_{\text{г}}\exp(j\Phi_{\text{г}}) = \frac{\dot{E}_{\text{отр}}}{\dot{E}_{\text{п}}} = \frac{\cos\theta_{\text{п}} - \sqrt{\dot{m}^2 - \sin^2\theta_{\text{п}}}}{\cos\theta_{\text{п}} + \sqrt{\dot{m}^2 - \sin^2\theta_{\text{п}}}}, \qquad (2.68)$$

$$R_{\text{в}}\exp(j\Phi_{\text{в}}) = \frac{\dot{E}_{\text{отр}}}{\dot{E}_{\text{п}}} = \frac{-\dot{m}\cos\theta_{\text{п}} + \sqrt{\dot{m}^2 - \sin^2\theta_{\text{п}}}}{\dot{m}\cos\theta_{\text{п}} + \sqrt{\dot{m}^2 - \sin^2\theta_{\text{п}}}}, \qquad (2.69)$$

где $R_{\text{г}}\exp(j\Phi_{\text{г}})$ — коэффициент отражения при горизонтальной поляризации, причем $\exp(j\Phi_{\text{г}})$ — дефазирование между $\dot{E}_{\text{отр}}$ и $\dot{E}_{\text{п}}$; $R_{\text{в}}\exp(j\Phi_{\text{в}})$ — коэффициент отражения при вертикальной поляризации, причем $\exp(j\Phi_{\text{в}})$ — дефазирование между $\dot{E}_{\text{отр}}$ и $\dot{E}_{\text{п}}$; $\dot{E}_{\text{п}}$ — нисходящее электрическое поле с горизонтальной или вертикальной поляризацией; $\dot{E}_{\text{отр}}$ — отраженное электрическое поле с горизонтальной или вертикальной поляризацией; m — коэффициент отражения между двумя средами (воздухом и землей). Он описывается выражением

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\mu\left(\varepsilon - j\dfrac{\sigma}{\omega}\right)}{\mu_0\varepsilon_0}}, \qquad (2.70)$$

где σ — проводимость; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; ω — круговая частота.

В радиодиапазоне суша, вода и другие природные образования являются диэлектриками, а коэффициенты Френеля действительны (так как ε также действительно). Тогда коэффициент излучения среды с плоской границей для двух поляризаций будет определяться следующим образом:

$$\rho_{\text{г}} = 1 - R_{\text{г}}^2, \qquad (2.71)$$

$$\rho_{в} = 1 - R_{в}^{2}. \tag{2.72}$$

Из (2.68) и (2.69) видно, что только при $\theta_{п} = 0$ имеет место равенство

$$R_{г}(\theta_{i} = 0) = R_{в}(\theta_{i} = 0). \tag{2.73}$$

Кроме того, из (2.68) и (2.69) следует, что угловые зависимости поляризационных составляющих $\rho_{г}$ и $\rho_{в}$ отличаются знаком своего наклона.

Как было показано ранее, спектральный коэффициент плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ зависит и от угла наблюдения θ. На рис. 2.21 показано изменение $\varepsilon(\lambda, T)$ спокойной морской поверхности с изменением угла наблюдения θ при длинах волн 0,8; 2,0 и 10,0 см [19].

Представляет интерес экспериментальная зависимость от T радиояркостной температуры $T_{я}$ морской воды в диапазоне длин волн 0,5 — 10 см (рис. 2.22). Видно, что зависимость очень сильно выражена на длинах волн 0,2 — 2,0 см и сравнительно слабее — на длинах волн свыше 3,0 см. Эти зависимости получены при $\theta = 30°$.

Радиотепловое излучение слоистой среды. Особое значение имеют излучательные свойства слоистых (однородных) сред с плоскими границами (рис. 2.23)

$$R = \frac{R_{2_1} + R_{3_2} \exp\left(-2jk\delta\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2\theta}\right)}{1 + R_{2_1}R_{3_2} \exp\left(-2jk\delta\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2\theta}\right)}, \tag{2.74}$$

где R_{2_1} и R_{3_2} — коэффициенты Френеля отражения от границы сред 1—2 и

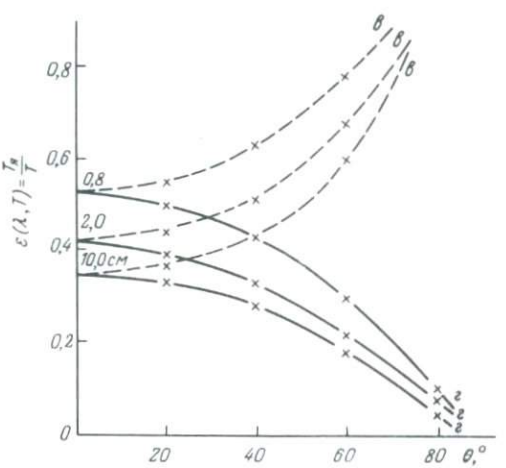


Рис. 2.21. Зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$ спокойной морской поверхности от угла наблюдения θ при $\lambda = 0{,}8$; 2,0 и 10,0 см (*в* — вертикальная поляризация; *г* — горизонтальная поляризация).

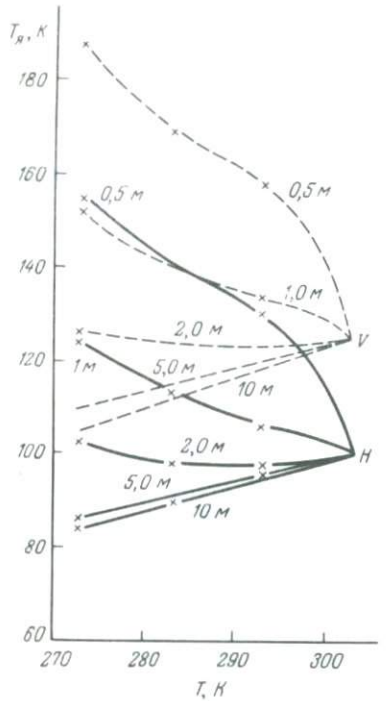


Рис. 2.22. Экспериментальная зависимость от T радиояркостной температуры $T_я$ морской воды в диапазоне длин волн 0,5 — 10 см.

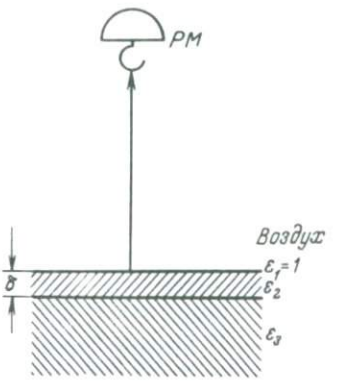


Рис. 2.23. Схема приема сигналов от слоистой (однородной) среды с плоскими границами.

2—3; δ — толщина промежуточного слоя; ε_2 — диэлектрическая проницаемость промежуточного слоя.

Иногда для удобства вводится специальный коэффициент излучения [19]

$$T_я / T = 1 - |R|^2 = A. \qquad (2.75)$$

Из (2.74) и (2.75) видно, что спектральный коэффициент излучения двухслоистой среды гармонически зависит от толщины полупрозрачного слоя δ. При δ = const коэффициент излучения A является гармонической функцией угла δ. Из (2.74) также следует, что с увеличением оптической толщи полупрозрачного слоя амплитуда колебания A уменьшается, причем это уменьшение обусловлено увеличенным поглощением энергии суммарного потока во второй среде [1)].

Представляют интерес следующие три случая:

1. Относительно радиопрозрачный промежуточный слой (слабое поглощение), который оказывает согласующее воздействие на излучение основ-

[1)] При этом суммарный поток отражен от границ 2—1 и 2—3.

ной (подстилающей) среды (ε_3); это означает, что в определенных условиях электромагнитные колебания среды с ε_3, отраженные от границ 3—2 и 2—1, суммируются в противофазе, из чего следует увеличение излучения среды 3 (ε_3) в среду 1 (ε_1).

2. Радиопрозрачный промежуточный слой, который оказывает рассогласующее (затеняющее) воздействие на способность излучения среды 3 (ε_3), т.е. здесь наблюдается явление, обратное вышеуказанному: в данных условиях наблюдается увеличение суммарной мощности потоков излучения среды 3 (ε_3), отраженных от двух границ 3—2 и 2—1, по сравнению с мощностью потока, отраженного от одной границы раздела 3—1. В результате уменьшается интенсивность результирующего радиотеплового сигнала.

В обоих случаях промежуточный слой 2 влияет также на поляризацию излучения среды 3, усиливая поляризацию излучения из среды 3 в среду 2 или деполяризуя его.

3. Радиотепловое излучение двухслойных сред сопровождается сильным поглощением в промежуточном слое 2. При этом радиояркостная температура суммарного излучения $T_я$ имеет две составляющие — одну, обусловленную средой 3 (основным образованием), и вторую, обусловленную собственным радиоизлучением среды 2. С увеличением затухания в среде 2 перераспределяется влияние двух сред, т.е. уменьшается вклад радиоизлучения среды 3 и увеличивается вклад среды 2. Естественно, что при очень большом затухании в среде 2 радиотепловое излучение среды 3 (основного образования) будет полностью экранировано.

Особый интерес представляет излучение слоистой среды (рис. 2.23), которая образуется при загрязнении водной поверхности нефтью (нефтепродуктами) или при образовании на ее поверхности ледяного покрова. Излучательная способность таких сред зависит от толщины промежуточного слоя (в соответствии с законом колебаний), а это позволяет определить толщину промежуточного слоя по данным измерения. Если промежуточный слой имеет толщину от долей до нескольких миллиметров, то он оказывает просветляющее действие в коротковолновой области СВЧ-диапазона, причем с увеличением толщины слоя и уменьшением длины волны, на которой измеряется радиотепловое излучение, этот эффект усиливается. Если промежуточный слой имеет небольшую толщину, он не изменяет излучательную способность спокойной водной поверхности, но в результате уменьшенного поверхностного натяжения ослабляются высокочастотные составляющие пространственного спектра волн и уменьшается излучательная способность водной поверхности. Таким образом, сравнительно тонкие промежуточные слои создают отрицательный температурный контраст, т.е. уменьшается яркостная температура.

Для ледяного покрова сделанные выше выводы справедливы, если ледяной покров удовлетворяет условию гладкости Рэлея.[выражение (2.3)] поверхностей 3—2 и 2—1. При этом образование льда еще сильнее изменяет характер излучения водной поверхности. Зависимость радиояркостной температуры $T_я$ от толщины льда (выраженной в долях длины волны λ) представляет осциллирующую функцию; при условии, что антенна направлена в

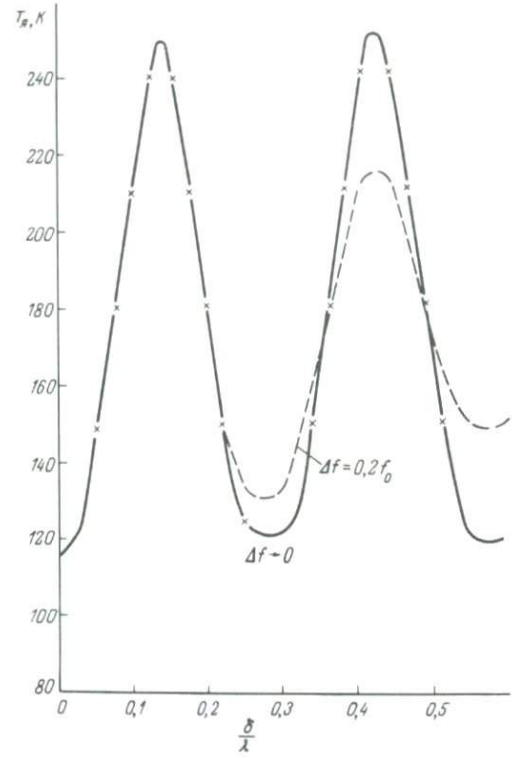


Рис. 2.24. Зависимость радиояркостной температуры $T_я$ льда на поверхности воды от толщины льда в случае узкополосного приема.

надир ($\theta = 0$), она показана на рис. 2.24. Этот осциллирующий характер сохраняется примерно до $\delta/\lambda = 350$, после чего начинается уменьшение осцилляций и увеличивается среднее значение $T_я$. При $\delta/\lambda > 1800$ радиояркостная температура практически не изменяется, так как тепловое излучение нижней среды полностью затухает и тепловой поток обусловливается только верхней средой (рис. 2.25). Если используется широкополосный приемник, то второй максимум кривой на рис. 2.24 и амплитуда колебаний быстро уменьшаются и при $\delta/\lambda > 5$ осцилляции практически исчезают, а радиометр регистрирует среднее значение температуры, которое монотонно возрастает с увеличением толщины льда. Такой случай широкополосного приема, обозначенный штриховой линией на рис. 2.25, обеспечивается приемником с полосой $\Delta f = 0{,}2 f_0$. Чем больше Δf, тем быстрее затухают колебания $T_я$ [19].

На рис. 2.26 представлена зависимость радиояркостной температуры $T_я$ от толщины ледяного покрова на водной поверхности в пределах 0—20 см. При толщине льда выше 4 см радиотепловое излучение основного образования практически полностью экранируется.

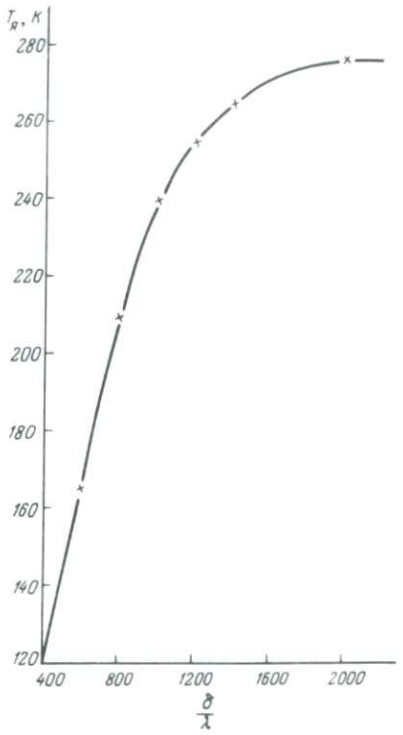


Рис. 2.25. Зависимость радиояркостной температуры системы вода — лед от толщины льда в случае узкополосного приема.

Радиотепловое излучение природных образований на суше. Значение спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ земных образований (почв, растительности, снежного покрова и др.) изменяется в СВЧ-диапазоне электромагнитного спектра в пределах 0,20 — 0,99.

Радиотепловое излучение суши формируется на значительно больших глубинах, чем в случае водной поверхности. Радиояркостная температура $T_я$ суши зависит от соотношения глубин ее сезонного и суточного прогрева и глубины проникновения электромагнитных волн. Экспериментальные измерения показывают [19, 108], что глубина прогрева изменяется в пределах от нескольких сантиметров (суточная волна) до одного метра (сезонная волна). Поэтому в сантиметровом диапазоне вариации радиояркостной температуры $\Delta T_я$ отражают в основном суточные изменения, в дециметровом — сезонные [108].

Радиояркостная температура $T_я$ почвы зависит от влажности $m(\%)$, собственной температуры T, длины волны λ_i, угла наблюдения (измерения) θ, вида поляризации (г или в), шероховатости, наличия растительности.

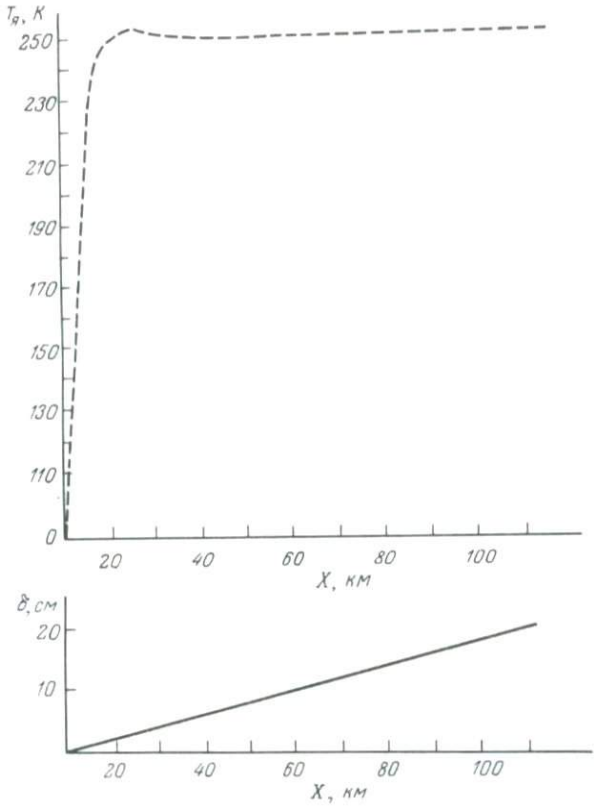


Рис. 2.26. Зависимость радиояркостной температуры $T_я$ ледяного покрова на поверхности воды от толщины льда δ.

Очень сильно влияет на радиояркостную температуру влажность почвы $m(\%)$. Интересно отметить, что значение спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ почвы практически определяется лишь поверхностной влажностью и не зависит от характера ее изменения по глубине. В сантиметровом и дециметровом диапазонах основное влияние на формирование потока радиотеплового излучения оказывает влажность слоя почвы толщиной $0{,}2\lambda$. Разность радиояркостной температуры сухой и влажной почвы достигает 100 К. С увеличением длины волны влияние влажности увеличивается, причем, естественно, увеличивается также эффективная глубина слоя, формирующего излучение. Так, при изменении влажности в пределах 5—35% радиояркостная температура на длине волны $\lambda = 21$ см изменяется на 70 К, тогда как на длине волны $\lambda = 2{,}8$ см изменение составляет лишь 40 К (рис. 2.27).

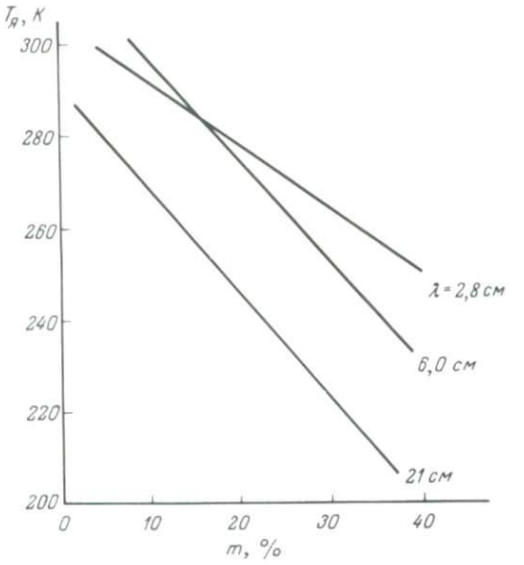


Рис. 2.27. Зависимость от длины волны радиояркостной температуры $T_я$ слоя почвы толщиной 25 мм.

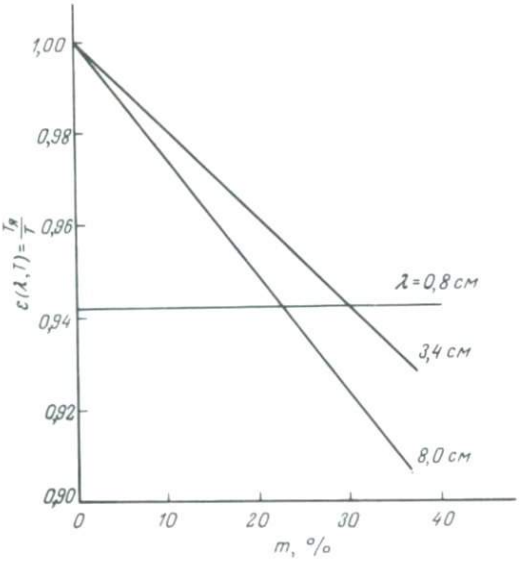


Рис. 2.28. Зависимость спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ почвы от влажности m.

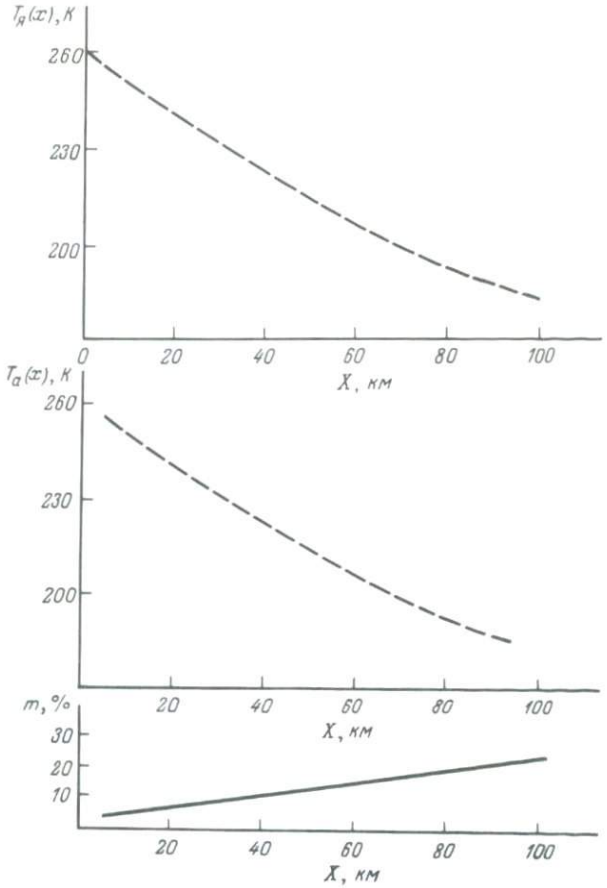


Рис. 2.29. Зависимость $T_я$ и $T_а$ при линейном изменении влажности почвы в пределах 3 — 24%.

На рис. 2.28 представлена зависимость от влажности m спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ почвы на различных длинах волн по данным полета радиометрического комплекса на борту спутника «Космос-243» [13]. Видно, что на длине волны $\lambda = 0{,}8$ см спектральный коэффициент $\varepsilon(\lambda, T)$ практически не зависит от влажности $m(\%)$.

На рис. 2.29 показаны радиояркостные $T_я$ и антенные $T_а$ температуры, зафиксированные при линейном изменении влажности почвы в пределах 3—24% на расстоянии 100 км в поле зрения системы $\simeq$ 10 км.

Растительный покров обладает свойствами, близкими к свойствам шероховатой, диффузно отражающей поверхности. Такой характер теплового излучения имеют леса, кустарники, сельскохозяйственные культуры, высо-

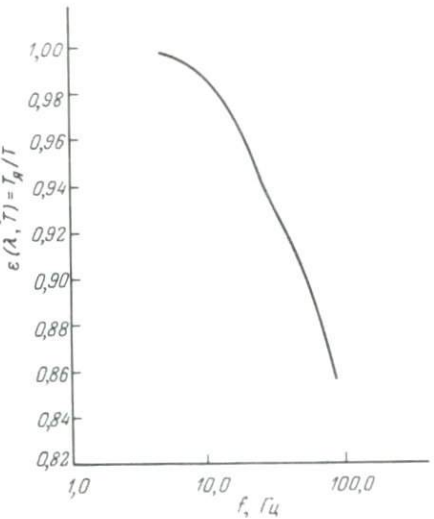


Рис. 2.30. Зависимость радиояркостной температуры $T_я$ различных образований от угла θ на длинах волн 0,8 и 3,0 см.

кие травы. Согласно [108], спектральный коэффициент плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ можно аппроксимировать выражением

$$\varepsilon(\lambda, T) \approx 1 - 0{,}4\gamma_0, \tag{2.76}$$

где γ_0 — коэффициент рассеяния в направлении, перпендикулярном поверхности, при нормальном падении радиации. В работе [200] показано, что экспериментально определенные значения этого коэффициента для травы изменяются в пределах 20—10 дБ в зависимости от высоты травы, сезонных особенностей и длины волны. Зависимость спектрального коэффициента плотности излучения растительности от частоты показана на рис. 2.30.

При интерпретации данных о радиотепловом излучении различных природных объектов нужно иметь в виду, что растительность маскирует зависимость радиояркостной температуры от влажности почвы. Значения радиояркостных температур высокой растительности близки к значениям ее термодинамической температуры, практически не зависят от угла измерения θ и почти одинаковы при вертикальной и горизонтальной поляризации (рис. 2.31).

2.3. Аддитивность и ее применение при анализе многоспектральной информации

Предположим, что элементы земной поверхности разделены на n классов на основе информации, полученной об их спектральных характеристиках отражения. При этом каждому классу соответствует определенный признак $r(\lambda)$. Признаки $r(\lambda)$ определены для однородных участков поверхности, выбранных в соответствии с некоторым критерием и находящихся в идеальном состоянии.

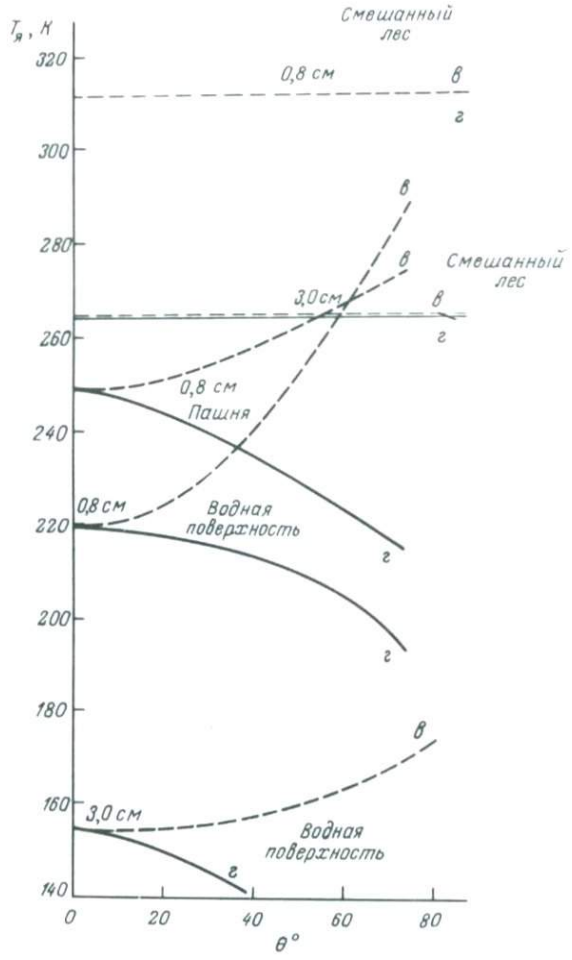


Рис. 2.31. Зависимость спектрального коэффициента плотности излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ растительности от частоты.

Вследствие свойства аддитивности отраженной объектами радиации для $L(\lambda)$ произвольного участка поверхности можно записать

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} c_i L_i(\lambda). \tag{2.77}$$

После деления на L_0 имеем

$$r(\lambda) = c_1 r_1(\lambda) + c_2 r_2(\lambda) + \ldots + c_n r_n(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} c_i r_i(\lambda), \tag{2.78}$$

где c_i — часть идентифицируемого участка, приходящаяся элементам i-го класса.

Если предположить, что совокупностью представителей выбранного класса исчерпывается многообразие элементов на различных участках, подлежащих идентификации, то

$$\sum_{i=1}^{n} c_i = 1, \qquad 0 \leq c_i \leq 1. \tag{2.79}$$

Чаще всего $r_i(\lambda)$ задается в табличном виде и тогда

$$r_i(\lambda_j), \qquad j = 1, 2, \ldots, m, \tag{2.80}$$

причем (2.78) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$r = cR, \tag{2.78а}$$

где $r = r(\lambda_1), r(\lambda_2), \ldots, r(\lambda_m)$; $c = c_1, c_2, \ldots, c_n$; $R = \{r_i(\lambda_j)\}$.

Для этой задачи существует также второй подход. Предположим, что необходимо распознать или классифицировать n различных природных образований, используя комбинированные измерения с большой разрешаю-

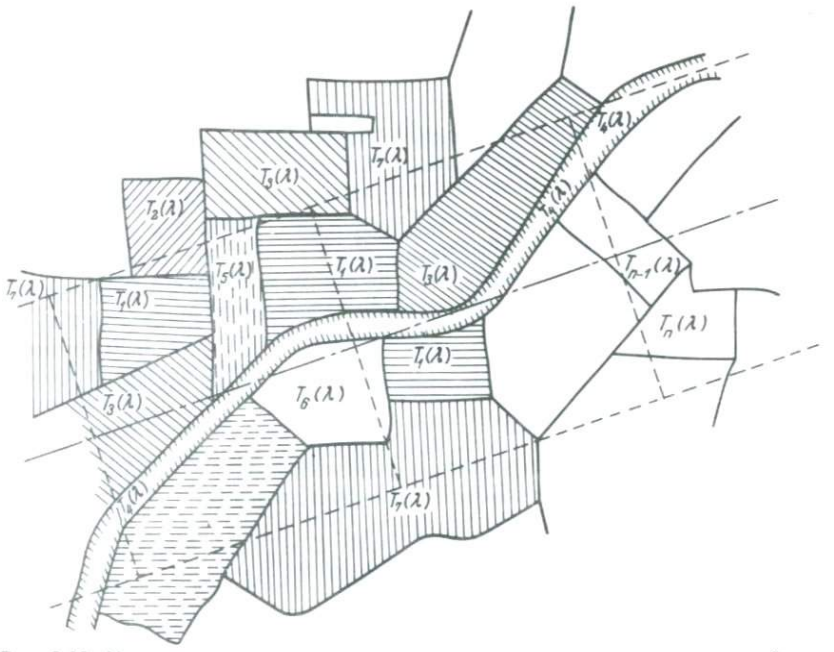


Рис. 2.32. Использование аддитивности при анализе многоспектральных изображений.

щей способностью в одном спектральном интервале $\lambda_{мин} - \lambda_{макс}$ и с малой разрешающей способностью — в другом (рис. 2.32). Допустим, что в СВЧ-диапазоне получаются данные с малой разрешающей способностью только на одной длине волны $\lambda_{СВЧ}$. Очевидно, что в каждый СВЧ-пиксель входят образования $O_1, O_2, \ldots, O_n$, которые хорошо идентифицируются на основе информации, полученной в оптическом диапазоне, и известна их доля в площади каждого пикселя (разумеется, не обязательно присутствие всех природных образований в каждом пикселе).

Для радиояркостной температуры каждого пикселя на длине волны $\lambda_{СВЧ}$ можно записать

$$\begin{aligned} T_a(\lambda_{СВЧ}) &= c_{1a}T_1(\lambda_{СВЧ}) + c_{2a}T_2(\lambda_{СВЧ}) + \ldots + c_{na}T_n(\lambda_{СВЧ}), \\ T_b(\lambda_{СВЧ}) &= c_{1b}T_1(\lambda_{СВЧ}) + c_{2b}T_2(\lambda_{СВЧ}) + \ldots + c_{nb}T_n(\lambda_{СВЧ}), \\ &\vdots \\ T_n(\lambda_{СВЧ}) &= c_{1n}T_1(\lambda_{СВЧ}) + c_{2n}T_2(\lambda_{СВЧ}) + \ldots + c_{nn}T_n(\lambda_{СВЧ}). \end{aligned} \tag{2.81}$$

После решения системы получаются значения $T_1(\lambda_{СВЧ})$, $T_2(\lambda_{СВЧ})$, т.е. получается информация о радиояркостных температурах n природных образований, причем с разрешающей способностью, существенно превышающей разрешающую способность применяемого радиометра.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Пусть радиометр работает в сантиметровом диапазоне, а диаграмма направленности антенной системы имеет телесный угол θ и образует коническую поверхность, которая при пересечении с земной поверхностью образует круг диаметром D_0 площадью S_0. Антенная система не сканирует и направлена в надир. След диаграммы направленности антенной системы на земной поверхности в результате движения космического аппарата представляет собой полосу шириной D_0. Измеряемая радиометром антенная температура является суммой яркостных температур n классов земной поверхности, попавших в момент измерения в диаграмму направленности антенны, каждый из которых характеризуется определенной яркостной температурой $T^{я}_{k_n}$:

$$T''_{a_\Sigma} = \frac{1}{S_0}\int_{S_1} T^{я}_{k_1}\,dS + \frac{1}{S_0}\int_{S_2} T^{я}_{k_2}\,dS + \ldots + \frac{1}{S_0}\int_{S_n} T^{я}_{k_n}\,dS, \quad \sum_1^n S_i = S_0, \tag{2.82}$$

где $T^{я}_{k_1}, T^{я}_{k_2}, \ldots, T^{я}_{k_n}$ — радиояркостные температуры различных классов образований; $S_1, S_2, \ldots, S_n$ — площади с радиояркостными температурами соответственно $T^{я}_{k_1}, T^{я}_{k_2}, \ldots, T^{я}_{k_n}$, которые в момент измерения попадают в диаграмму направленного действия антенны; T''_{a_Σ} — антенная температура. Учитывая распределение яркостной температуры в пространстве вне диаграммы направленности и часть ее, принимаемую посредством боковых лепестков диаграммы направленности, антенная температура антенны с учетом рассеяния будет определяться следующим образом:

$$T_{a_\Sigma} = \beta T^{я}_{ф} + (1 - \beta)\left[\frac{S_1}{S_0}T^{я}_{k_1} + \frac{S_2}{S_0}T^{я}_{k_2} + \ldots + \frac{S_n}{S_0}T^{я}_{k_n}\right], \tag{2.83}$$

где β — коэффициент рассеяния антенны. После учета потерь в элементах антенной системы, температура антенны будет связана с радиояркостной температурой объектов $T^{\text{я}}_{k_n}$ и фона $T^{\text{я}}_{\text{ф}}$ выражением

$$T_{a_{\text{у}}} = \eta_{\text{ант}}\left[\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}} + (1-\beta)\left(\frac{S_1}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_2}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_n}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}\right)\right] + \\ + (1-\eta_{\text{ант}})T_0, \quad (2.84)$$

где $\eta_{\text{ант}}$ — к.п.д. антенной системы; T_0 — кинетическая антенная температура. Если использовать результаты n измерений антенной температуры при движении космического аппарата над объектами n классов с их соответствующими n радиояркостными температурами, можно составить систему

$$T_{\text{ант}_{\text{у}_1}} = \eta_{\text{ант}}\left[\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}} + (1-\beta)\left(\frac{S_{11}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{12}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{1n}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}\right)\right] + \\ + (1-\eta_{\text{ант}})T_0,$$

$$T_{\text{ант}_{\text{у}_2}} = \eta_{\text{ант}}\left[\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}} + (1-\beta)\left(\frac{S_{21}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{22}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{2n}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}\right)\right] + \\ + (1-\eta_{\text{ант}})T_0, \quad (2.85)$$

$$\vdots$$

$$T_{\text{ант}_{\text{у}_n}} = \eta_{\text{ант}}\left[\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}} + (1-\beta)\left(\frac{S_{n1}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{n2}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{nn}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}\right)\right] + \\ (1-\eta_{\text{ант}})T_0, \quad \sum_{i=1}^{n} S_{i_n} = S_0.$$

После преобразования получаем

$$\frac{T_{\text{ант}_{\text{у}_1}} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} = \frac{S_{12}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{22}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{1n}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n},$$

$$\frac{T_{\text{ант}_{\text{у}_2}} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} = \frac{S_{21}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{22}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{2n}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}, \quad (2.86)$$

$$\vdots$$

$$\frac{T_{\text{ант}_{\text{у}_n}} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T^{\text{я}}_{\text{ф}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} = \frac{S_{n1}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_1} + \frac{S_{n2}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_2} + \ldots + \frac{S_{nn}}{S_0}T^{\text{я}}_{k_n}.$$

Отсюда

$$D = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & & & \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{vmatrix}, \tag{2.87}$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} S_0 \dfrac{T_{\text{ант}\nu_1} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T_{\text{ф}}^{\text{я}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} & S_{12}S_{13}\dots S_{1n} \\ S_0 \dfrac{T_{\text{ант}\nu_2} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T_{\text{ф}}^{\text{я}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} & S_{22}S_{23}\dots S_{2n} \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ S_0 \dfrac{T_{\text{ант}\nu_n} - (1-\eta_{\text{ант}})T_0 - \eta_{\text{ант}}\beta T_{\text{ф}}^{\text{я}}}{\eta_{\text{ант}}(1-\beta)} & S_{n2}S_{n3}\dots S_{nn} \end{vmatrix}. \tag{2.88}$$

Радиояркостные температуры различных природных образований определяются из выражений

$$T_{k_1}^{\text{я}} = D_1/D,\ T_{k_2}^{\text{я}} = D_2/D,\ \dots,\ T_{k_n}^{\text{я}} = D_n/D. \tag{2.89}$$

2.4. Тепловая инерция

Геостационарные спутники Земли дают возможность измерять суточную динамику радиации земной поверхности в заданной точке. Температурные изменения, измеренные дистационным способом, позволяют определить тепловую инерцию объекта и тем самым «заглянуть» под его поверхность на десятки сантиметров.

Понятие тепловой инерции почвы в упрощенном виде является характеристикой изменения температуры во времени, за которое изменяется поток энергии на поверхности. Иначе говоря, это мера скорости передачи тепла поверхности, являющейся границей раздела двух различных сред [1].

Малая тепловая инерция приводит к большим изменениям температуры поверхности и практически мгновенной температурной реакции на солнечный поток.

В дистанционных методах тепловая инерция не измеряется, ее можно вычислить, зная поглощенную часть солнечной радиации и излученную тепловую радиацию. Связь между этими двумя параметрами дана в работе [150] и зависит от тепловой инерции. По предварительным сведениям [215] тепловая инерция, как объемное свойство, позволяет судить о подповерхностных свойствах образований на глубине порядка 10 см. В табл. 2.3 приведены некоторые типичные значения тепловой инерции различных материалов, измеренные в лабораторных условиях [215].

[1] Это соответствует разнице, ощущаемой при соприкосновении с деревом и металлом, находящимися при одной и той же температуре. Металл кажется холоднее, так как его коэффициент тепловой инерции, обусловливающий температуру поверхности, больше.

Таблица 2.3

Материал	Тепловая инерция, $Вт \cdot м^{-2}К^{-1} \cdot с^{0.5}$	Материал	Тепловая инерция, $Вт \cdot м^{-2}К^{-1} \cdot с^{0.5}$
Воздух	56	Песчаник	2260
Дерево	380	Известняк	1880
Сухой песок	628	Гранит	2170
Стекло	1213	Кварц	3097
Вода	1578	Доломит	3140
Мокрый песок	1040—2100	Алюминий	23000
Глинистая почва	1758	Медь	37000

Для излучения тепловой инерции природных объектов можно использовать интервалы 550—700 или 500—1000 нм в области отраженных излучений и интервал 10,5—12,5 мкм в тепловой области.

В отличие от низколетающих спутников использование геостационарных ИСЗ обеспечивает повторяемость получаемых данных, например через полчаса. При этом можно осуществлять длительное наблюдение земной поверхности, что исключительно полезно также для определения энергетического баланса. Действительно, если непрерывно измерять поток радиации, отраженный Землей в видимой области, и поток, излученный в тепловом диапазоне, то в первом приближении ход их величин получится подобным показанному на рис. 2.33. Температура почвы будет подвержена большим или меньшим амплитудным и фазовым изменениям τ' под воздействием солнечной радиации в зависимости от типа почвы. Сухая почва будет иметь большие изменения температуры поверхности по сравнению с мокрой. Ее реакция на изменение радиации Солнца будет быстрее. Факторы, определяющие значение суточного изменения, различны. Альбедо, или точнее абсорбционная способность, является важным параметром. Почва, обладающая высокой отражательной способностью, будет иметь меньшее изменение температуры поверхности. В этом отношении данные, полученные в видимом диапазоне, очень полезны для определения альбедо. Атмосферная радиация, конвекционный перенос тепла к воздуху, шероховатость поверхности почвы и топография являются факторами, которыми нельзя пренебречь.

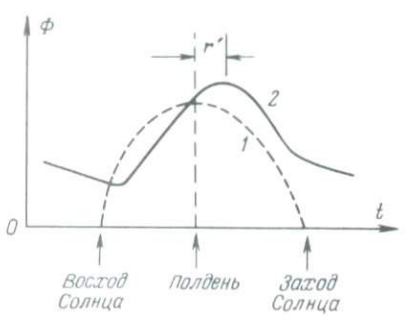


Рис. 2.33. Поток Ф радиации, отраженный Землей в видимом диапазоне (теория) (*1*) и излученный в тепловом диапазоне (*2*).

МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЯ ОТРАЖЕННОЙ И СОБСТВЕННОЙ РАДИАЦИИ

3.1. Измерение спектральных характеристик отражения

Для измерения спектральных характеристик отражения (СХО) различных природных образований используются спектрометры — яркомеры различных конструкций, определяющие значения $L(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$ и $L_0(\lambda)$; по этим значениям в зависимости от конструкции прибора вычисляется или непосредственно отсчитывается $r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)$.

Эталонные поверхности. Для измерения значений радиации $L_0(\lambda)$ используется эталонная поверхность, представляющая собой экран с ортотропной отражающей поверхностью и заранее известной спектральной отражательной характеристикой в исследуемом спектральном диапазоне $\lambda_{макс} - \lambda_{мин}$. Выбор эталонного экрана имеет существенное значение, поскольку от его качества в большой степени зависит точность измерения СКО.

С учетом свойств эталонной поверхности выражение для СКО принимает вид

$$r(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) = \frac{L(\lambda, Z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)}{L_0(\lambda, Z_\odot, \varphi_0)} k\varkappa(\lambda, Z_\odot, \varphi_0), \qquad (3.1)$$

где k — коэффициент, учитывающий изменение чувствительности прибора в ходе измерения, изменение шкалы измерения и т.д.; $\varkappa$ — коэффициент, учитывающий спектральные свойства индикатрисы реальной эталонной поверхности.

В качестве эталонных поверхностей обычно используются экраны, покрытые окисью магния или сульфатом бария, гипс, баритовая бумага, молочное или матовое стекло и т.д. Наиболее близким по своим оптическим свойствам к идеальной ортотропной поверхности является покрытие из MgO, нанесенное на пластину из светлого материала посредством сжигания чистого Mg. Однако сложная технология, плохие механические свойства и т.п. обусловили применение такого типа экранов только в лабораторных условиях [146, 201]. Сравнительно широкое применение находит баритовая бумага, которая обладает хорошей ортотропностью, почти равномерной спектральной отражательной характеристикой и достаточно высоким спектральным коэффициентом отражения [55], но требует осторожного обращения в полевых условиях, так как ее параметры сильно меняются под воздействием Солнца. В последнее время широкое применение находят молочные стекла МС-13 (работающие на пропускание) и МС-14 (работающие

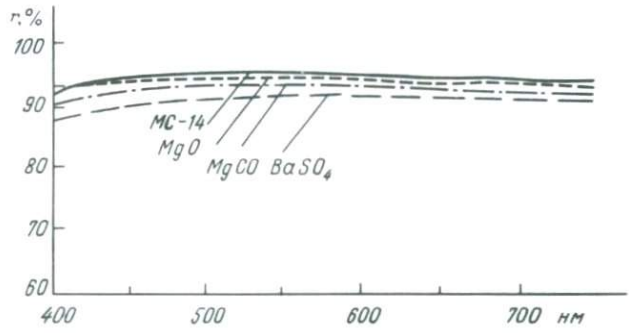


Рис. 3.1. Спектральные отражательные характеристики чаще всего используемых эталонных поверхностей.

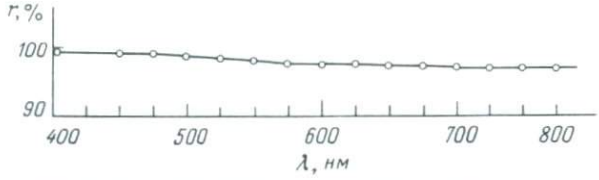


Рис. 3.2. Спектральная отражательная характеристика эталонного экрана ИСОХ-020-Э.

на отражение). Они имеют хорошую ортотропность, механическую прочность, стабильность, почти постоянный коэффициент отражения (пропускания), легко чистятся [24, 25, 26]. На рис. 3.1 представлены спектральные характеристики чаще всего используемых эталонных поверхностей.

В 1976 г. в ЦЛКЙ БАН был разработан эталонный экран с ортотропной отражающей поверхностью [69, 70]. Его спектральная отражательная характеристика (рис. 3.2) очень близка к характеристике идеального экрана, а индикатриса отражения незначительно отличается от индикатрисы ортотропной отражающей поверхности.

Формирование интерпретационного класса. Важным условием при измерении спектральных отражательных характеристик является оптимальный линейный размер $l_{опт}$ элемента разрешения (пиксель) [144, 213]. Нижняя граница, т.е. минимальная длина $l_{мин}$ интервала, в котором можно искать $l_{опт}$, определяется техническими характеристиками устройств измерения спектральных отражательных характеристик. Верхняя граница, т.е. максимальная длина $l_{макс}$, определяется задачами интерпретации и возможностями обработки информации.

Известно, что устройства измерения спектральных отражательных характеристик интегрируют отраженную радиацию в пределах одного пикселя S_{pix}. В общем случае изменение размера пикселя S_{pix} приводит к измене-

нию значения интеграла

$$k \int_{S_{\text{pix}}} L ds = E_{\text{pix}}. \tag{3.2}$$

Если исследуемый участок земной поверхности покрыт однородными в спектральном отношении образованиями (т.е. образованиями одного и того же спектрального класса), то при изменении S_{pix} E_{pix} = const, точнее, в реальном случае E_{pix} будет переменной с небольшой дисперсией (рис. 3.3). Это значит, что в зависимости от размера l спектральный коэффициент отражения будет изменяться относительно некоторого среднего значения с небольшими отклонениями, образуя плато.

Зависимость $E_{\text{pix}}(l)$ может иметь больше чем одно плато, и это будет означать, что с интерпретационной точки зрения на исследуемом участке земной поверхности находятся объекты, принадлежащие нескольким спектральным классам.

Очевидно, что $l_{\text{мин}}$ должно соответствовать началу плато, выбранному в соответствии с некоторым критерием, например исходя из доверительного интервала, соответствующего отдельному пикселю. Оптимальный размер $l_{\text{опт}}$ определяется неравенством

$$l_{\text{опт}} \geqslant l_{\text{мин}}, \tag{3.3}$$

где знак «>» соответствует наличию дополнительных условий, например интегрированию спектрального коэффициента отражения в пределах нескольких пикселей с целью уменьшения количества обрабатываемых данных, причем, естественно,

$$l_{\text{опт}} \leqslant l_{\text{кр}}, \tag{3.4}$$

где $l_{\text{кр}}$ — верхняя граница l, соответствующая концу плато, если такое было зарегистрировано в ходе измерения. При наличии более чем одного плато интепретатор выбирает, в котором из них определить размер пикселя.

Природные образования, являющиеся объектом многоспектрального анализа, представляют собой статистические объекты, т.е. их спектральные характеристики, принадлежащие одному и тому же классу объектов, различаются между собой в пределах, ограниченных дисперсией, специфической для данного класса и отличной от нуля. То же самое относится и к плато, которое является по существу выражением существования устойчивой среднеарифметической характеристики (математического ожидания) в пределах данного класса. Поэтому стационарная высота плато является также статистической величиной и необходимо определять не только ее значение, но и доверительный интервал. Попадание в этот доверительный интервал является необходимым условием для того, чтобы сделать вывод о достижении $l_{\text{мин}}$. Чтобы избежать опасности случайного попадания, необходимо $l_{\text{мин}}$ определять как линейный размер пикселя, для которого хотя бы несколько раз (во всех каналах) значение $r(\lambda)$ больше значения, соответствующего $l_{\text{мин}}$ (рис. 3.3).

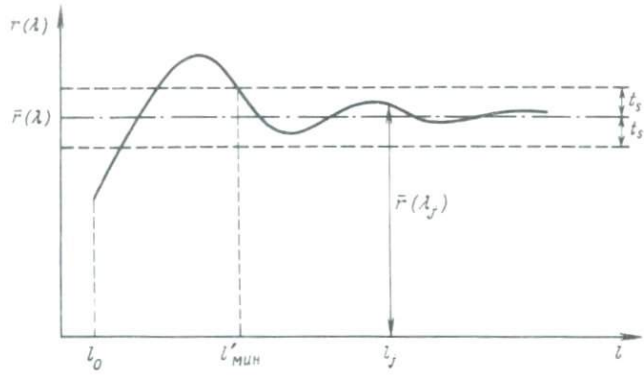


Рис. 3.3. Изменение спектрального коэффициента отражения в зависимости от линейного размера пикселя.

Увеличения размера l для попадания в плато можно достичь двумя способами [213]:

— вторичной обработкой изображения исследуемого участка земной поверхности с объединением соседних пикселей;

— увеличением высоты, с которой измеряются спектральные отражательные характеристики, либо увеличением угла поля зрения измерительного устройства.

Первый способ легко использовать для предварительного определения $l_{\text{мин}}$ на основе уже полученных изображений или данных полигонных измерений; второй способ удобен для определения $l_{\text{мин}}$ в ходе эксперимента, но его недостатком является потеря информации об отдельных пикселях (и соответственно о дисперсии исследуемого класса), так как с увеличением высоты или поля зрения происходит интегрирование потока отраженной радиации по большей поверхности. Из-за этого доверительный интервал плато определяется труднее и с меньшей уверенностью.

Виды параметров плато. Согласно центральной предельной теореме математической статистики, когда исследуемый участок земной поверхности занят одним классом, амплитуда $\bar{r}_\lambda$ плато асимптотически стремится к математическому ожиданию μ_λ (рис. 3.3).

Для конечного числа пикселей n_{ja} амплитуда определяется следующим образом:

$$\bar{r}_{j\lambda} = \sum_{i=1}^{n_{j\lambda}} \frac{r_{ij\lambda}}{n_{j\lambda}}, \tag{3.5}$$

где λ — индекс соответствующего канала; $n_{ij\lambda}$ — показание в этом канале для j-го значения l.

Если класс имеет нормальное распределение [51, 157], то доверительный интервал μ_λ описывается выражением

$$\mu_{\lambda_j} = \bar{r}_{j\lambda} \pm t_{j\lambda} \frac{S_{j\lambda}}{\sqrt{n_{j\lambda}}}, \tag{3.6}$$

где $\lambda = 1, 2, \ldots, N$ — число каналов; $S_{j\lambda}$ — оценка дисперсии класса, причем

$$S_{j\lambda} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_{j\lambda}} \frac{(r_{ij\lambda} - \bar{r}_{j\lambda})^2}{n_{j\lambda}}}; \tag{3.7}$$

$t_{i\lambda}$ — коэффициент Стьюдента (из таблицы Стьюдента для заданных $n_{j\lambda}$ и уровня значимости α).

3.1.1. Многоканальные полевые спектрометры ИСОХ

На рис. 3.4 представлен полевой спектрометр ИСОХ-010, разработанный в 1975 г. в ЦЛКИ БАН [47, 146]. Он представляет собой 11-канальный прибор, работающий на длинах волн 413, 443, 482, 513, 543, 596, 652, 710, 749 и 795 нм. Используются полосовые интерференционные фильтры с шириной полосы пропускания около 12 нм и коэффициентом пропускания 28—35%. Угол поля зрения оптической системы составляет 15°. Масса спектрометра вместе с батареями питания не превышает 1,6 кг. ИСОХ-010 нашел широкое применение в проводимых в 1975 и 1976 гг. наземных исследованиях на территории НРБ в рамках национальной программы и программы «Интеркосмос».

В 1976 г. была закончена разработка следующей модификации полевого спектрометра ИСОХ-020 для видимой и ближней инфракрасной области спектра (рис. 3.5) [47]. Он представляет собой 20-канальный спектрометр, работающий на длинах волн 404, 416, 426, 440, 467, 484, 503, 548, 557, 599, 619, 662, 690, 702, 715, 727, 741, 777 и 809 нм. В приборе используются интерференционные фильтры диаметром 10 мм, шириной полосы пропускания 10—12 нм и коэффициентом пропускания 20—38%. Оптическая система имеет угол поля зрения 13°. Чувствительность спектрометра можно регулировать плавно и ступенчато в весьма широких пределах. Ступенчатое регулирование чувствительности производится посредством введения нейтральных фильтров диаметром 10 мм и оптической плотностью в пределах $D = 0 \div 3$. Масса спектрометра вместе с питанием не превышает 1,5 кг. ИСОХ-020 использовался не только в НРБ, но также во всех социалистических странах по программе «Интеркосмос». Совместно со специалистами Республики Куба была разработана модификация многоканального спектрометра ИСОХ-020, которая широко используется на Кубе для решения научных и научно-методических задач [169].

В 1976 г. на основе ИСОХ-020 был разработан 20-канальный спектрометр ИСОХ-022, позволяющий измерять отраженную радиацию при раз-

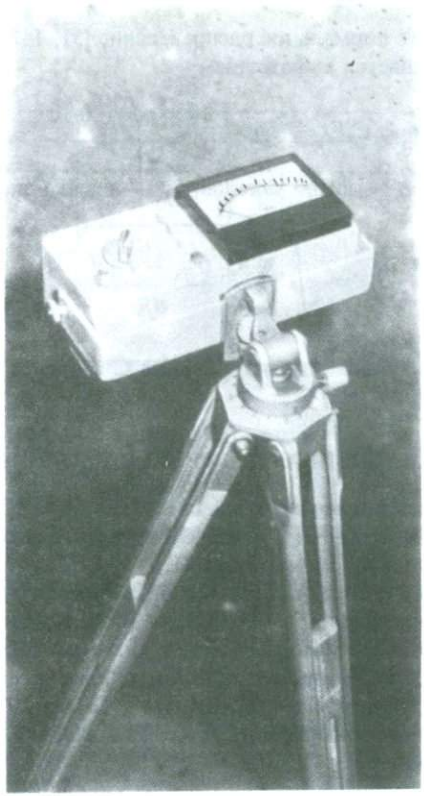


Рис. 3.4. Полевой спектрометр ИСОХ-010.

личной поляризации (рис. 3.6). В 1977 г. этот прибор был использован в крупном синхронном эксперименте на Черном море, проведенном советскими специалистами на научно-исследовательском судне «Михаил Ломоносов».

3.1.2. Многоканальные спектрометрические системы «Спектр-15»

В связи с научно-исследовательской программой полета международного экипажа в составе Н. Рукавишникова и Г. Иванова по программе «Интеркосмос» болгарскими учеными и специалистами была создана многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15» [71, 75, 86, 171]. Эта си-

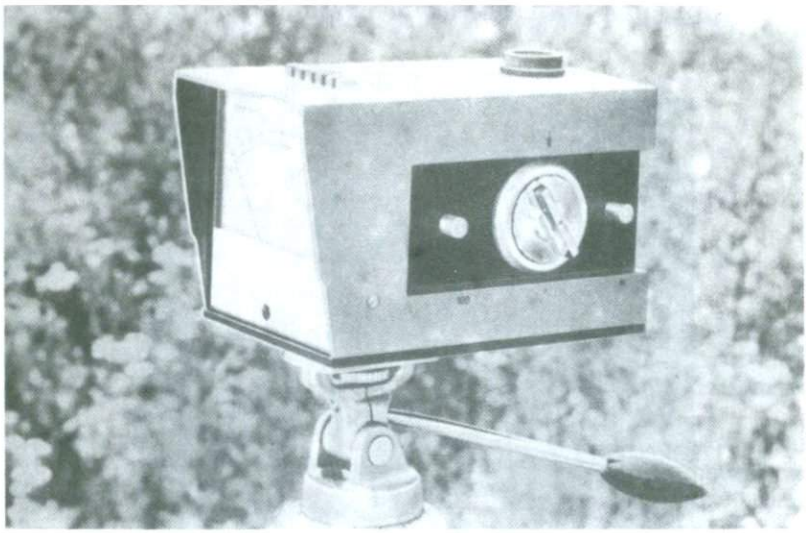


Рис. 3.5. Полевой спектрометр ИСОХ-020.

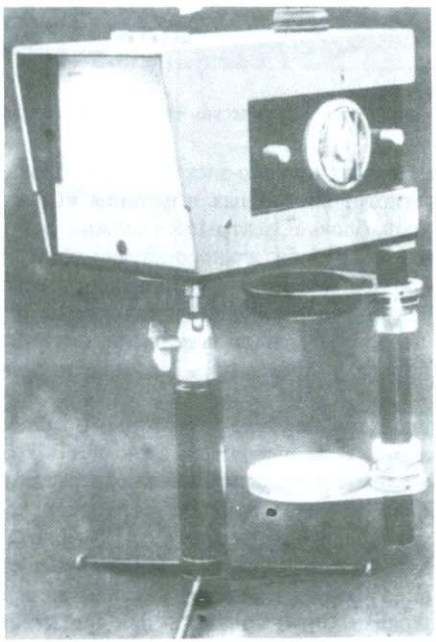


Рис. 3.6. Спектрометр ИСОХ-022 для измерения спектральных отражательных и поляризационных характеристик.



Рис. 3.7. Многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15».

стема (рис. 3.7) состоит из оптико-электронного блока «Спектр-15К» и блока управления, регистрации данных и питания «Спектр-15КР».

Оптико-электронный блок «Спектр-15К» можно либо укрепить на иллюминаторе пилотируемого орбитального научно-исследовательского комплекса «Союз — Салют» посредством специального устройства, либо использовать для измерений «с рук». При установке на иллюминаторе крепежное устройство позволяет менять положение оптической оси «Спектр-15К» в плоскости полета в пределах $\pm 10°$ относительно направления в надир.

Структурная блок-схема оптико-электронного блока «Спектр-15К» представлена на рис. 3.8. Входная оптика включает в себя объектив с фокусным расстоянием 300 мм и относительным отверстием 1:4 и щель, формирующую поле зрения. Диспергирующее устройство представляет собой дифракционную решетку с объективом и коллиматором. Оптико-электронным преобразователем является линейная дискретная структура из оптотранзисторов, работающих в режиме накопления зарядов. Электрические сигналы с оптотранзисторов подаются для дальнейшей обработки последовательно во времени с использованием электронного сканирования. Скорость сканирования спектра зависит от скорости носителя.

Система «Спектр-15» имеет 15 измерительных каналов в диапазоне 450—850 нм. На рис. 3.9 показано расположение спектральных интервалов

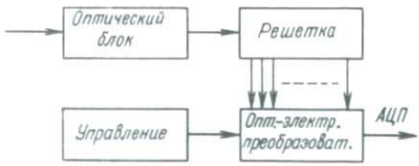


Рис. 3.8. Структурная схема оптико-электронного блока «Спектр-15 К».

чувствительности каналов, а в табл. 3.1 приведены основные съемочные параметры системы, включая значения спектральной плотности энергетической яркости при $\lambda_{макс}$, соответствующие максимальным выходным кодам.

Со средней высоты орбиты научно-исследовательского комплекса «Союз — Салют» линейные размеры пикселя составляют приблизительно 300 × 300 м. Однако за счет регистрации со скоростью около 70 спектр/с, в результате вторичной обработки можно достичь разрешающей способности в направлении полета около 70 м.

Обобщенная структурная схема блока «Спектр-15КР» представлена на рис. 3.10. Преобразование данных в цифровой вид осуществляется 8-

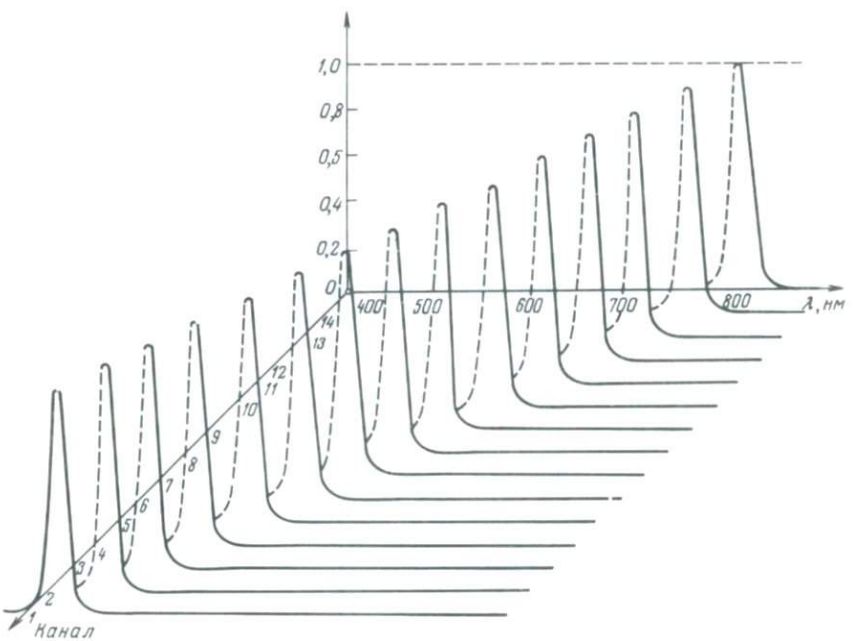


Рис. 3.9. Спектральные характеристики чувствительности системы «Спектр-15» (нормированные кривые).

Таблица 3.1. Съемочные параметры системы «Спектр-15»

Номера канала	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	$\lambda_{макс}$, нм	Вт · м$^{-2}$ · ср$^{-1}$ · мкм$^{-1}$ (для максимального выходного кода 255)
1	15,5	437	748,58
2	18,0	464	865,29
3	19,0	485	716,59
4	19,0	512	490,14
5	20,5	542	272,61
6	20,5	573	497,56
7	22,0	598	249,82
8	21,0	626	280,50
9	20,0	655	421,85
10	25,0	685	381,79
11	19,5	711	168,30
12	21,0	739	138,06
13	18,0	765	281,38
14	19,0	799	276,60
15	22,0	830	527,53

битовым аналого-цифровым преобразователем. Регистрация данных производится на магнитной кассете с точностью выше 0,5% и скоростью 8 Кбит/с. Длительность записи на одной кассете (одна дорожка) составляет около 7 мин, что позволяет исследовать участок длиной 3000 км. На той же кассете можно записывать речевой комментарий космонавта-оператора, что особенно полезно при последующей обработке данных. Специальный блок контролирует работу всей системы, причем наиболее существенные ее состояния контролируются световой индикацией.

Модернизированная многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15М» является дальнейшим усовершенствованием системы

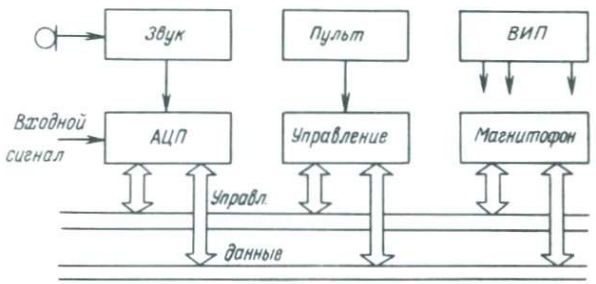


Рис. 3.10. Структурная схема блока управления, регистрации данных и питания «Спектр-15 КР».

Таблица 3.2. Съемочные параметры системы «Спектр-15М»

Номер канала	$\Delta\lambda_{0,5}$, нм	$\lambda_{макс}$, нм	$Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1} \cdot мкм^{-1}$ (для максимального выходного кода 255)
1	18,0	448	242,74
2	17,0	473	103,33
3	18,0	503	87,05
4	19,0	525	71,42
5	18,0	554	69,86
6	21,0	578	57,14
7	21,0	605	52,67
8	21,0	634	44,39
9	22,0	663	49,21
10	26,0	686	60,68
11	25,0	720	59,84
12	23,0	751	53,87
13	26,0	781	53,08
14	25,0	817	110,34
15	18,0	832	108,87

«Спектр-15», проработавшей более двух лет на борту орбитального пилотируемого научно-исследовательского комплекса «Союз — Салют» и использованной при выполнении научно-исследовательских программ международных экипажей с участием космонавтов Венгрии, Вьетнама, Кубы и Монголии [82].

В модернизированной системе сохранено число каналов (15) со средней шириной спектрального интервала чувствительности около 20 нм. Система имеет бóльшую чувствительность (табл. 3.2) по сравнению со «Спектром-15», что расширило возможности ее практического использования. С учетом предложений космонавтов, работавших с аппаратурой «Спектр-15», внесены изменения в схему индикации режимов работы. Система «Спектр-15М» имеет новое устройство крепления к иллюминатору, которое кроме фиксированных положений «надир», «+10°» и «−10°» в направлении полета, имеет также свободу движения по осям крена и тангажа.

На борту орбитального пилотируемого научно-исследовательского комплекса «Союз — Салют» система «Спектр-15М» может работать как самостоятельно, так и вместе со специализированными фотокамерами (например, МКФ-6М), причем в последнем случае значительно облегчается интерпретация полученных данных.

Самолетный вариант многоканальной спектрометрической системы «Спектр-15МС» был разработан в связи с реализацией космической программы «Болгария-1300». Эта система предназначена для установки на самолетных лабораториях типа АН-30 и АН-14 и использовалась как в само-

стоятельных, так и квазисинхронных экспериментах вместе с орбитальными станциями или космическими кораблями и наземными измерительными комплексами в 1981—1982 гг.

3.1.3. Многозональная сканирующая система «Фрагмент»

Многозональные сканирующие системы являются одним из основных современных средств получения данных о двумерном распределении отраженной и собственной радиации различных природных образований [2]. Теоретически такие системы можно создать для работы в любом спектральном диапазоне.

Многозональная сканирующая система (МСС) «Фрагмент» разработана советскими учеными и специалистами [4, 37] и установлена на борту ИСЗ спутника «Метеор», выведенного в космос 18 июня 1980 г. на близкую к круговой солнечно-синхронную орбиту с высотой 650 км. Орбита, наклон плоскости которой к экватору составляет 98°, позволяет наблюдать одни и те же участки земной поверхности с периодичностью до 15 сут примерно в одно и тоже местное время [100].

Система «Фрагмент» обеспечивает сканирование земной поверхности поперек трассы полета в полосе 85 км одновременно в восьми зонах видимой и ближней ИК-области спектра [3, 4], преобразование принятого излучения в электрический сигнал, а затем в цифровую форму, сопровождение основного сигнала служебной информацией о состоянии подсистем, режимах их работы, введение сигналов синхронизации и формирование телеметрического кадра. Управление режимами съемки осуществляется по командной радиолинии [18].

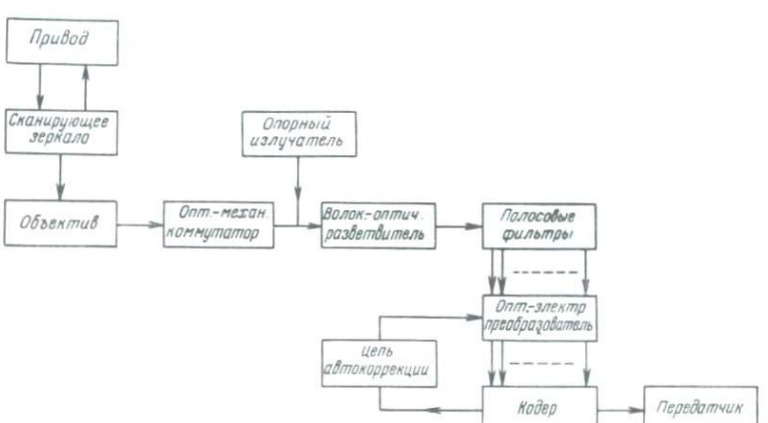


Рис. 3.11. Структурная схема МСС «Фрагмент».

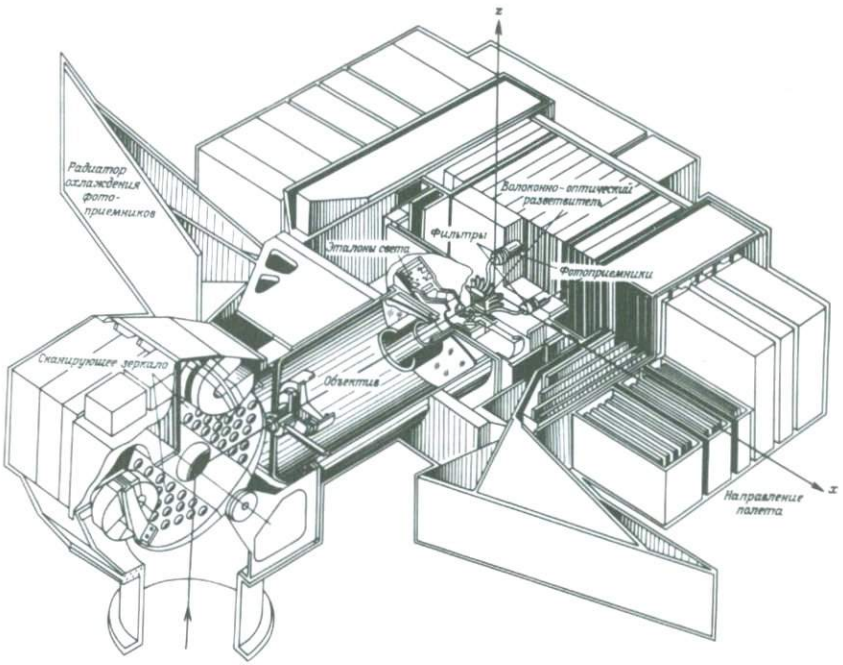


Рис. 3.12. Общий вид МСС «Фрагмент».

Структурная схема и общий вид МСС «Фрагмент» представлены на рис. 3.11, 3.12, основные технические характеристики и съемочные параметры — в табл. 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3. Основные технические характеристики МСС «Фрагмент»

Характеристики	Значение параметра
Рабочий спектральный диапазон, мкм	0,4 — 2,4
Число рабочих спектральных интервалов чувствительности	8
Темп съемки, км^2/с	590
Полная информативность, бит/с	$5{,}6 \cdot 10^6$
Общее число измерительных каналов	35
Частота сканирования, Гц	13,02
Площадь входного зрачка, см^2	358
Фокусное расстояние, см	100
Масса, кг	280
Потребляемая мощность, Вт	220
Габаритные размеры, мм	1660 × 1440 × 730

Таблица 3.4. Съемочные характеристики многоспектральной сканирующей системы «Фрагмент»

Характеристики	Рабочие спектральные интервалы, мкм							
	0,4—0,71	0,5—0,6	0,6—0,7	0,7—0,8	0,8—1,1	1,2—1,3	1,5—1,8	2,1—2,4
Угол обзора, град	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Ширина полосы обзора, км (H = 630 км)	85	85	85	85	85	85	85	85
Угловой размер мгновенного поля зрения, рад · 10^{-3}	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,39	0,39	0,78
Линейный размер мгновенного поля зрения в надире, м (H = 630 км)	80	80	80	80	80	240	240	480
Информативность общая, бит/с · 10^6	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,32	0,32	0,16
Информативность видео, бит/с · 10^6	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,21	0,21	0,10

Преобразование измеряемых величин спектральных яркостей земной поверхности в эквивалентные числовые значения реализуется МСС «Фрагмент» с помощью последовательных операций: оптическим линейным масштабным преобразователем (приемной оптической системой); пространственно-временным оптическим преобразователем (сканирующим элементом и анализирующей диафрагмой); оптическим селектором (волоконно-оптическим разветвителем и полосовыми фильтрами); фотоэлекрическим линейным масштабным преобразователем (приемником излучения и усилителем постоянного тока); аналого-цифровым преобразователем (АЦП) [5].

Приемная оптическая система реализована в виде объектива Кассегрена с кольцевым входным зрачком диаметром 0,24 м и фокусным расстоянием 1 м. В объектив введено устройство термокомпенсации, устраняющее расфокусировку в диапазоне температур $-40° — +20°$ С.

Пространственно-временной оптический преобразователь трансформирует распределение освещенности $E(\lambda, x', y')$ в координатном пространстве изображений объектов во временные изменения потока излучения $\Phi(t)$ на входах измерительных каналов. Функции этого звена в системе выполняет сканирующее устройство и анализирующие (полевые) диафрагмы, при этом сканирующее устройство перемещает поле зрения системы, являющееся изображением анализирующей диафрагмы, относительно пространства объектов. В системе «Фрагмент» используется прямострочная траектория сканирования, складывающаяся из движения ИСЗ и перемещения мгновенного поля зрения, производимого сканирующим устройством (рис. 3.13). Эта траектория характеризуется постоянством скорости перемещения мгновенного поля зрения на рабочем участке скана t_1 и постоянным азимутальным углом плоскости сканирования.

Мгновенное поле зрения МСС «Фрагмент» образовано матрицей, состоящей из восьми столбцов (по числу спектральных интервалов чувствительности), каждый из которых содержит 1—6 анализирующих диафрагм (рис. 3.14), соотношение размеров которых компенсирует существенное различие яркости земной поверхности, измеряемой в выделяемых спектральных интервалах. При таком мгновенном поле зрения видеосигналы каждого спектрального интервала, соответствующие одной и той же точке исследуемой поверхности, сдвинуты во времени относительно друг друга, что учитывается при обработке получаемых данных.

Основной функцией оптического селектора является выделение из сформированного приемным оптическим трактом потока излучения требуемых спектральных интервалов и перенос его к приемникам излучения соответствующих измерительных каналов. Для этого использованы полосовые спектральные фильтры и волоконно-оптический разветвитель, входные торцы световодов которого образуют матрицу анализирующих диафрагм. Разветвитель представляет собой жесткую пространственную конструкцию, организованную таким образом, что при общей минимизации длин световодов с целью сокращения светопотерь длины световодов, стыкуемых с определенными спектральными полосовыми фильтрами и приемниками, распределены в порядке, соответствующем распределению величин яркости

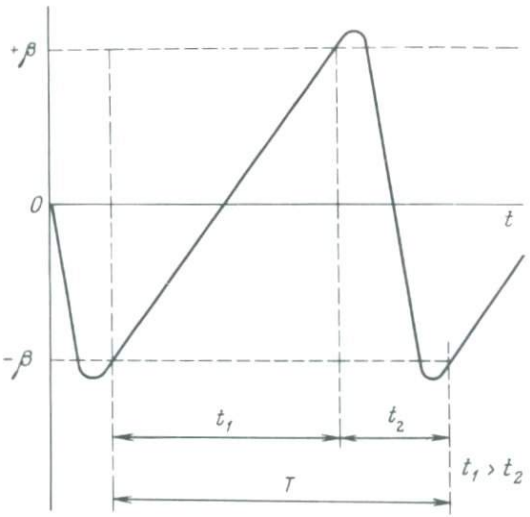


Рис. 3.13. Диаграмма углового перемещения визирного луча МСС «Фрагмент».

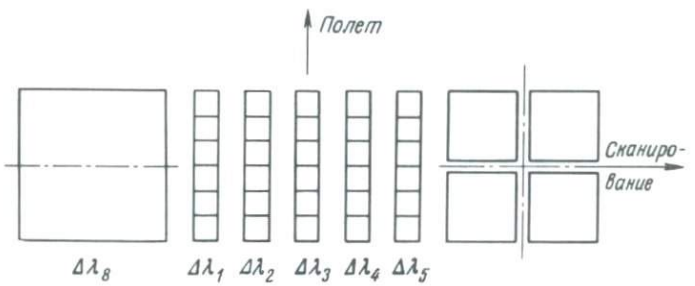


Рис. 3.14. Форма мгновенного поля зрения МСС «Фрагмент».

диска Солнца в спектральных интервалах чувствительности системы. Такая конструктивная мера позволяет улучшить энергетическое выравнивание сигналов в измерительных каналах.

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

Достижение допустимой величины случайной погрешности измерений, являющейся одним из заданных съемочных параметров системы «Фраг-

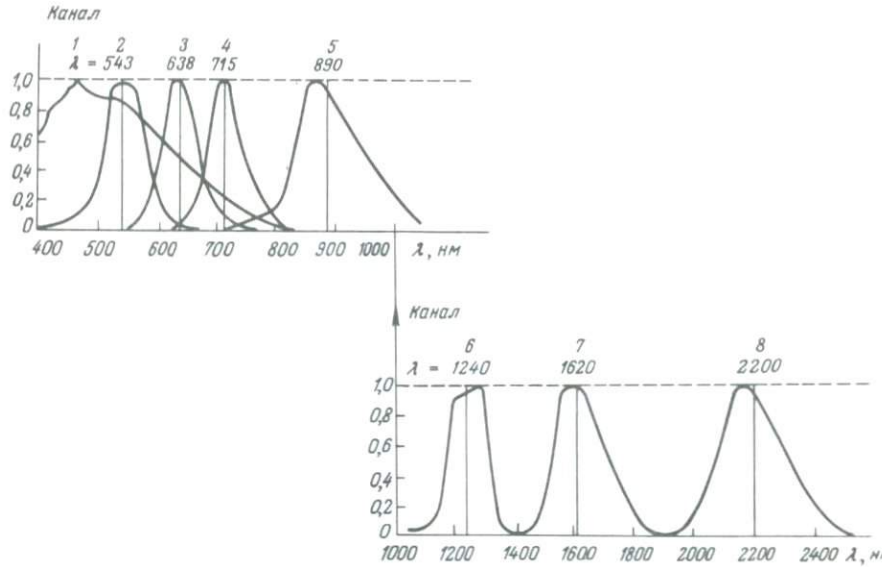


Рис. 3.15. Относительные спектральные характеристики чувствительности МСС «Фрагмент», осредненные для $\Delta\lambda_1$ — $\Delta\lambda_5$ по шести, а для $\Delta\lambda_6$ и $\Delta\lambda_7$ по двум измерительным каналам.

мент», осуществляется реализацией метрологических характеристик ее звеньев, обеспечивающих необходимое соотношение сигнала и шумов в измерительном видеотракте. С этой целью во время обратного хода измерительного устройства оптико-механический коммутатор прекращает прохождение излучения с исследуемого участка и замещает его излучением опорных источников света. Полученные за этот период сигналы используются для автокоррекции вносимых дрейфом нулевого уровня и изменением крутизны преобразования аппаратурных мультипликативных и аддитивных погрешностей.

МСС «Фрагмент» метрологически аттестована [6] как измеритель спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) земной поверхности в диапазоне длин волн 0,4—2,5 мкм с основными характеристиками, приведенными в табл. 3.5 и на рис. 3.15. По цифровым кодам проводимых МСС «Фрагмент» измерений могут быть определены с точностью до 5% значения абсолютной СПЭЯ соответствующих участков наблюдаемой с ИСЗ земной поверхности на эффективных длинах волн, лежащих внутри восьми спектральных интервалов чувствительности.

При подготовке МСС «Фрагмент» к полету была также проведена фотограмметрическая калибровка [37], позволяющая определить ее геометрические характеристики, точное знание которых требуется при обработке получаемой видеоинформации и ее географической координатной привязке.

Таблица 3.5. Осредненные аттестационные характеристики МСС «Фрагмент»

Характеристики		Спектральные интервалы							
		$\Delta\lambda_1$	$\Delta\lambda_2$	$\Delta\lambda_3$	$\Delta\lambda_4$	$\Delta\lambda_5$	$\Delta\lambda_6$	$\Delta\lambda_7$	$\Delta\lambda_8$
Полуширина спектральных интервалов чувствительности, мкм		0,397—0,627	0,508—0,586	0,601—0,679	0,688—0,743	0,824—0,923	1,166—1,305	1,516—1,698	2,080—2,304
Случайная среднеквадратичная аппаратурная погрешность в полном динамическом диапазоне (%)		0,8	1,0	1,5	1,8	2,8	2,1	1,9	2,4
Среднеквадратичная (%)		3,5	3,5	3,2	3,0	2,9	3,2	3,2	3,5
Неисключенная истематическая (%) Погрешность градуировки		1,0	1,0	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9	1,1
Эффективная длина волны (мкм)		0,544	0,544	0,638	0,715	0,890	1,240	1,620	2,200
Коэффициент перехода от значений выходного кода к измеряемой величине СПЭЯ, $Вт \cdot ср^{-1} \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1}$	I	$1{,}33 \cdot 10^{-1}$	$2{,}49 \cdot 10^{-1}$	$2{,}01 \cdot 10^{-1}$	$1{,}67 \cdot 10^{-1}$	$1{,}36 \cdot 10^{-1}$	—	—	—
	II	$5{,}04 \cdot 10^{-1}$	$8{,}59 \cdot 10^{-1}$	$6{,}71 \cdot 10^{-1}$	$3{,}98 \cdot 10^{-1}$	$3{,}98 \cdot 10^{-1}$	$4{,}90 \cdot 10^{-1}$	3,16	1,27
	III	1,63	2,36	2,30	1,65	1,49	—	—	—
Максимальное значение измеряемой СПЭЯ, $Вт \cdot ср^{-1} \cdot м^{-2} - мкм^{-1}$	I	16,9	31,6	25,5	21,2	17,3	—	—	
	II	64,0	109,1	86,2	70,1	50,5	62,2	40,1	16,1
	III	207,0	299,7	292,1	209,6	189,2	—	—	—

Режим усиления

Примечание: Приведенные характеристики осреднены для $\Delta\lambda_1$ — $\Delta\lambda_5$ по шести, а для $\Delta\lambda_6$ и $\Delta\lambda_7$ по двум измерительным каналам.

Прием и обработка видеоинформации с МСС «Фрагмент». Для обработки этой видеоинформации используется дисплейный комплекс, включающий аппаратуру КТС-1М, изготовленную в ГДР, и аппаратуру обработки изображений фирмы «Оптроникс».

Указанный комплекс включает: мини-процессоры СМ-4 и LSI-2; устройства ввода-вывода изображения на фотоноситель; накопитель на магнитных лентах; накопитель на машинных дисках; дисплейные системы; устройство полутоновой и алфавитно-цифровой печати; телетайп; устройство вывода на фотобумагу.

В обеспечение обработки видеоинформации с МСС «Фрагмент» специалистами ИКИ АН СССР разработаны специализированные операционные системы, предназначенные для организации процессов цифровой обработки многозональной видеоинформации и выполнения этих процессов на комплексах «Оптроникс» и КТС-1. Эти системы позволяют решать в интерактивном режиме широкий круг задач по служебной обработке и коррекции видеоинформации, ее координатной привязке и преобразованию в заданные картографические проекции и масштабы, статистической оценке характеристик информации в разных каналах, проведению яркостных и цветовых преобразований, обеспечивающих получение качественных изображений и их разностороннюю интерпретацию.

Созданные системы математического обеспечения обеспечивают решение на указанной аппаратуре следующих этапов обработки видеоинформации с МСС «Фрагмент»:

— быстрый просмотр цифровых видеозаписей на цветном полутоновом дисплее;

— воспроизведение цифровых видеозаписей на черно-белом фотоносителе в масштабе 1:1600000;

— перезапись информации на магнитную ленту в структуре ЕС ЭВМ;

— обработку данных по программам статистического анализа и интерпретации;

— обработку данных по программам геометрических преобразований.

Далее путем фотографической обработки изготавливаются черно-белые негативы масштаба 1:500000 и с помощью многокамерного синтезирующего проектора МСП-4 цветные изображения масштаба 1:320000. Черно-белые негативы масштаба 1:500000 и контрольные отпечатки с них используются для тиражирования и распространения. На рис. 3.16 (см. цветную вклейку) в качестве примера приведено полученное МСС «Фрагмент» и синтезированное в условных цветах изображение междуречья Дона и Хопра (территория СССР).

На изображении выделяются три типа полей [142]: поля, занятые непропашными культурами — озимыми и яровыми (серо-голубого цвета), пропашными культурами — подсолнечником и кукурузой (оранжевого цвета), и вспаханные поля (темно-синего цвета). Соотношение этих групп культур, а также чистых и занятых паров позволяет получить представление о типах севооборотов в пределах конкретных хозяйств — колхозов и совхозов, административно-хозяйственные границы которых уверенно дешифруются на изображении по нарезке полей.

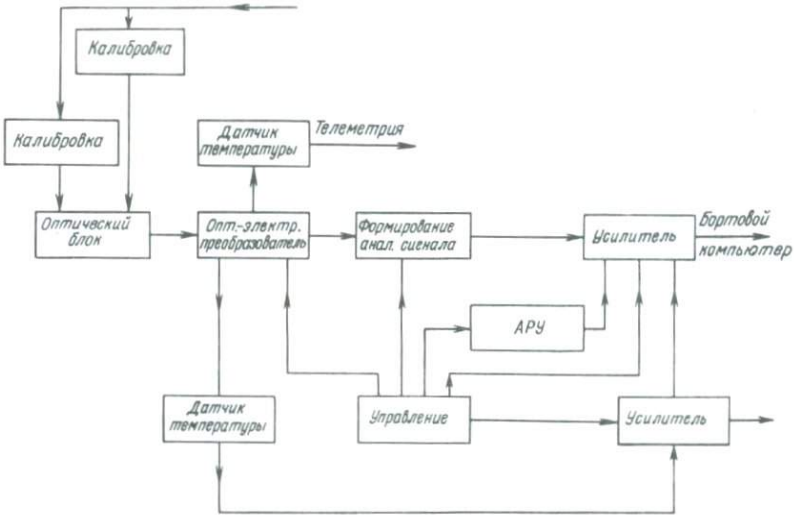


Рис. 3.17. Структурная схема многоканальной спектрометрической системы СМП-32.

3.1.4. Многоканальная спектрометрическая система СМП-32

В 1981 г. на борту спутника «Метеор — Природа» был выведен на орбиту комплекс научной аппаратуры, разработанный по проекту «Болгария-1300-П». Этот комплекс предназначен для решения научных и научно-прикладных задач в области дистанционных исследований Земли из космоса. В его состав включена многоканальная спектрометрическая система СМП-32, предназначенная для исследования отраженной различными природными образованиями радиации в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра [60, 74, 97, 181].

Структурная схема системы СМП-32 представлена на рис. 3.17, а ее основные технические характеристики в табл. 3.6.

Оптическая система СМП-32 состоит из входного объектива с фокусным расстоянием 300 мм и относительным отверстием 1:4, плоских зеркал, оптической щели, коллиматора, дифракционной голографической решетки, фокусирующего объектива и оптико-электронного преобразователя. Кроме того, предусмотрены два опорных излучателя, световой поток которых вводится в основной измерительный тракт посредством специального сферического зеркала с центральным отверстием [60]. Голографическая решетка, работающая на пропускание, имеет разрешающую способность 650 линий/мм и дифракционную эффективность выше 85%; в полученном спектре практически отсутствует другой порядок, кроме первого. В качестве

Таблица 3.6. Основные технические характеристики многоканальной спектрометрической системы «СМП-32»

Характеристики	Значение параметра
Спектральный диапазон, нм	457—888
Средняя ширина интервалов чувствительности, нм	8
Число каналов	32
Размеры мгновенного поля зрения (размеры пикселя), м	280 × 280
Спектральная разрешающая способность, нм	14
Максимальная регистрируемая яркость:	λ = 480 нм — 1800 Вт · м$^{-2}$ · ср$^{-1}$ · мкм$^{-1}$
	λ = 636 нм — 290 Вт · м$^{-2}$ · ср$^{-1}$ · мкм$^{-1}$
	λ = 882 нм — 1000 Вт · м$^{-2}$ · ср$^{-1}$ · мкм$^{-1}$
Скорость сканирования, спектр/с	25
Информационный поток, Кбит/с	5,6
Размеры, мм	270 × 230 × 100
Масса, кг	6

оптико-электронного преобразователя используется фотодиодная линейная структура из 256 элементов с встроенным регистром управления, которая работает в режиме накопления зарядов. Для достижения необходимой чувствительности и динамического диапазона отдельные элементы этой структуры объединены в 32 канала по 8 элементов в каждом.

На рис. 3.18 показаны характеристики относительной спектральной чувствительности оптико-электронного преобразователя; спектральной дифракционной эффективности решетки (обладающей максимальной дифракционной эффективностью на длине волны 660 нм); спектрального коэффициента преобразования всей системы [60]. В связи с большой неравномерностью спектрального коэффициента преобразования в системе обеспечивается переменный коэффициент усиления во время сканирования по спектру, при этом в первых и в последних четырех каналах этот коэффициент имеет одно значение, в 5—8 и 25—28 каналах — другое и во всех остальных каналах 9—24 — третье (рис. 3.19).

В системе СМП-32 (рис. 3.17) используется автоматическая компенсация ошибки в момент измерения, которая представляет собой компенсацию температурного дрейфа темнового тока в диапазоне 0—40 °С. С этой целью проводится прямое безынерционное измерение температуры кристалла оптико-электронного преобразователя и формируется электрический сигнал, который подается к выходному усилителю для компенсации изменения нулевого уровня, вызванного температурным дрейфом. Таким образом, температурно-зависимой обратной связью охватывается весь тракт преобразования, и систематическая ошибка сигнала устанавливается ниже наиболее низкого уровня квантования.

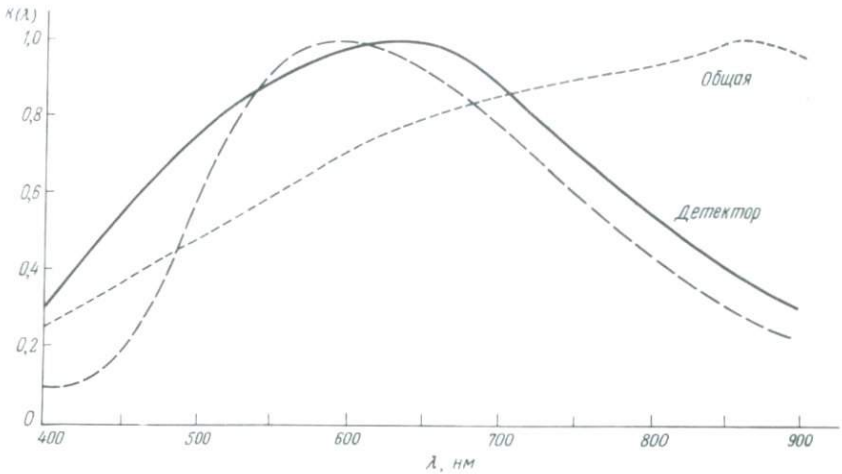


Рис. 3.18. Спектральные характеристики оптико-электронного тракта системы СМП-32.

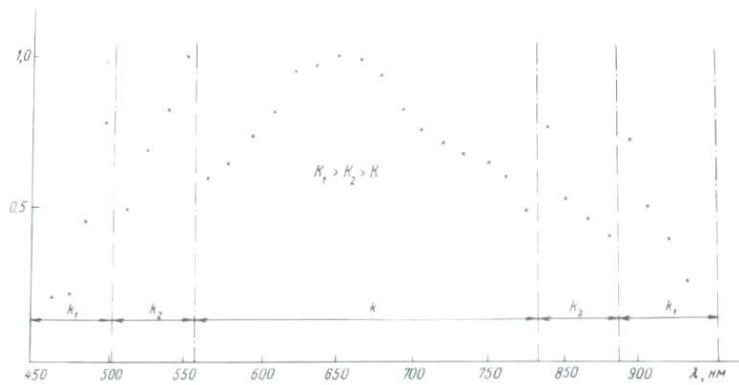


Рис. 3.19. Относительная чувствительность отдельных каналов системы СМП-32.

Опорные излучатели — рабочий и эталонный, стабилизированные по току с большой точностью, — используются для проверки сохранности наземной абсолютной калибровки системы.

Значительная часть управления системой СМП-32 осуществляется микропроцессорной системой бортового вычислительного комплекса (разд. 3.2). Это существенно упрощает схему управления, повышает надежность работы, уменьшает потребляемую мощность, уменьшает размеры и массу.

3.1.5. Спектрометрический комплекс МКС

Многоканальный спектрометрический комплекс МКС, содержащий два спектрометра (видимого и инфракрасного диапазона), разработан для измерения цвета океана и оптической толщины атмосферы, являющейся одним из важнейших параметров при определении переноса радиации в системе атмосфера — океан.

Для измерения оптической толщины атмосферы выбран интервал 750—830 нм в ближней инфракрасной области спектра, причем измерения проводятся на двух длинах волн в окнах прозрачности 758 и 794 нм, на трех длинах волн в полосе поглощения O_2 — 750,6, 763,0 и 766,4 нм и на одной длине волны в полосе поглощения водяного пара 822,8 нм.

В соответствии с описанной в работах [10, 11] методикой интерпретации получаемых данных по результатам измерения радиации в окнах прозрачности и области поглощения O_2 возможно определение полной оптической (или аэрозольной) толщины атмосферы и аэрозольного профиля

Таблица 3.7. Основные технические характеристики комплекса МКС

Характеристики	Значение параметра
Отношение сигнал/шум на уровне 1%	100
Скорость измерения, спектр/с	18
Калибровка во время полета, с	Каждые 135
Время калибровки (включая темновой ток), с	4
Регистрация	На магнитной ленте
Время регистрации, мин	32

Таблица 3.8. Съемочные параметры комплекса МКС

Параметр	Видимый диапазон	Инфракрасный диапазон
Положение максимумов спектральных интервалов чувствительности, нм	415, 449, 483 570, 621, 675	758,0, 760,0 753,0, 766,4 794,8, 822,8
Ширина спектральных интервалов чувствительности (на уровне 0,5), нм	11,3—11,8	1,4—1,5
Линейность характеристики свет/сигнал, %	1	1
Максимальная определяемая плотность яркости, мкВт · см$^{-2}$ · ср$^{-1}$ · нм$^{-1}$	20	120
Мгновенный угол поля зрения, рад · 10^{-3}	14 × 20	1,6 × 20

(посредством решения обратной задачи). По данным измерения радиации в полосе поглощения водяного пара можно получить данные о влажности атмосферы и ее корреляции с размером частиц, находящихся над океаном. На основе результатов интерпретации данных об атмосфере, получаемых в ближней ИК-области, возможна коррекция данных о цвете воды, измеряемых в видимом диапазоне [214].

Основные технические параметры и характеристики комплекса МКС приведены в табл. 3.7 и 3.8.

Комплекс МКС можно применять не только для спутниковых измерений, но также для самолетных и полигонных исследований.

3.1.6. Программируемый многоканальный спектрометр

В последнее десятилетие в области дистанционных исследований Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра исключительно широкое применение нашли спектрометры с различным, заранее определенным числом и шириной спектральных интервалов чувствительности. Однако с самого начала было ясно, что для различных направлений дистанционных исследований земной поверхности и определения влияния атмосферы необходимы различные число, расположение и ширина интервалов электромагнитного спектра, обеспечивающие оптимальное распознавание исследуемых природных образований.

На данном этапе развития исследований вполне возможно определение необходимых сочетаний спектральных интервалов. С этой целью, т.е. прежде всего для решения научно-методических задач дистанционного исследования Земли, разработана программируемая многоканальная спектрометрическая система видимого и ближнего ИК-диапазона спектра. Это гибкая система, которая дает возможность выбирать число, ширину и положение каждого интервала чувствительности в рабочем спектральном диапазоне [88, 178].

На рис. 3.20 представлены три возможных режима работы такой системы, а именно:

а) реализуется максимальное число интервалов (N) и постоянная ширина каждого интервала ($\Delta\lambda$), что соответствует максимальной спектральной разрешающей способности в используемом диапазоне;

б) реализуется ограниченное число интервалов $M'(M' < N)$ с заданной шириной $\Delta\lambda$;

в) реализуется ограниченное число интервалов $M''(M'' < N)$ с различной шириной $\Delta\lambda' \geqslant \Delta\lambda$.

В случаях *б* и *в* число интервалов, их расположение в спектральном диапазоне и ширина определяются конкретной поставленной задачей.

На рис. 3.21 показана структурная схема системы. Спектральная разрешающая способность системы определяется числом элементов в линейной структуре (M), а размер исследуемого пикселя — параметрами оптической системы, допустимым смазом (при заданном отношении скорость/высота) и временем накопления $\tau \approx T_{\text{ск}}/N$, где $T_{\text{ск}}$ — время сканирования линейной

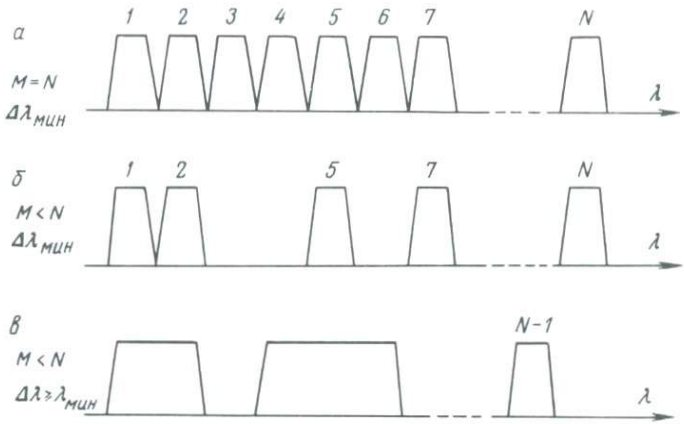


Рис. 3.20. Основные режимы работы программируемой многоканальной спектрометрической системы.

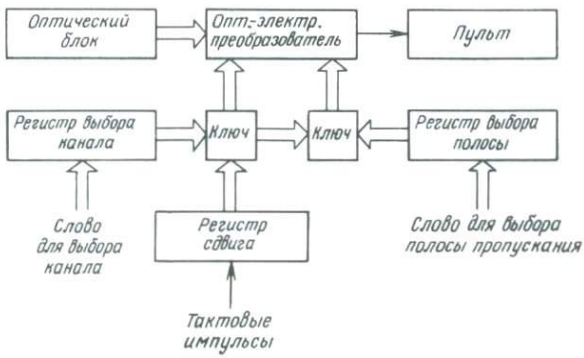


Рис. 3.21. Структурная схема программируемой многоканальной спектрометрической системы.

структуры. Существующая элементная база позволяет получать ширину каждого интервала ($\Delta\lambda$) порядка нескольких нанометров. Отдельные интервалы выбираются с помощью схем переключения, управляемых регистром сдвига, а ширина — посредством матрицы из схем переключения, которыми подключаются столько соседних элементов линейной структуры, сколько представляет собой желаемая ширина формируемого интервала. Преимуществом этой системы является возможность легкого и практически мгновенного изменения программы работы (N, M' и M''), а также времени накопления и времени сканирования.

3.2. Измерение спектральных характеристик излучения

Изучение характеристик собственного излучения природных образований, как было показано в гл. 1 и 2, позволяет получить разнообразную информацию об их параметрах. Ниже будут рассмотрены основные методы таких измерений на примере комплексного эксперимента по изучению собственного радиотеплового излучения природных образований в сантиметровом и миллиметровом диапазонах, проведенного в рамках проекта «Болгария-1300-П».

Целью исследования распределения радиотеплового излучения по земной поверхности в этом проекте являлось решение следующих научных и научно-прикладных задач [97]:

1. Определение основных геофизических параметров выбранных участков земной поверхности, в том числе:

— физической температуры суши и акватории;

— влажности почвы;

— зон осадков, районов дрейфующих льдов и границ участков, покрытых льдом и т.д.

2. Улучшение разрешающей способности измерений в СВЧ-диапазоне посредством совместной обработки данных радиометрических систем и спектрометрических данных и многоспектральных изображений в видимом диапазоне.

3. Исследование возможности радиометрической привязки подспутниковой траектории с помощью фиксации резких радиотепловых переходов на земной поверхности, связанных с известными объектами.

В соответствии с вышеуказанными задачами были созданы специализированные радиометрические системы РМ-1 и РМ-2 [1)].

Радиометрическая система РМ-1 работает на длине волны 4 см (f = 7,5 ГГц) и предназначена для получения данных о геофизических параметрах поверхности Земли и водных бассейнов при пренебрежимо малом влиянии атмосферы и облачности на регистрируемые на борту спутника данные [96, 97, 181]. С целью пространственно-временно́го совмещения радиометрических, спектрометрических и сканерных данных, а также с целью проведения дополнительной радиометрической привязки подспутниковой траектории радиометрическая система РМ-1 ориентирована в надир [97].

На рис. 3.22 показана структурная схема радиометрической системы РМ-1. Система построена по модуляционному принципу на основе супергетеродинного высокочувствительного СВЧ-приемника. Это обеспечивает необходимые устойчивость и надежность. Кроме того, такие радиометры отличаются высокой чувствительностью, что позволяет точно измерять радиотепловое излучение исследуемых природных образований.

[1)] Система РМ-1 создана болгарскими, а РМ-2 — советскими специалистами. Обе системы входят в комплекс научной аппаратуры, разработанный в рамках проекта «Болгария-1300-П», и установлены на борту ИСЗ «Метеор — Природа».

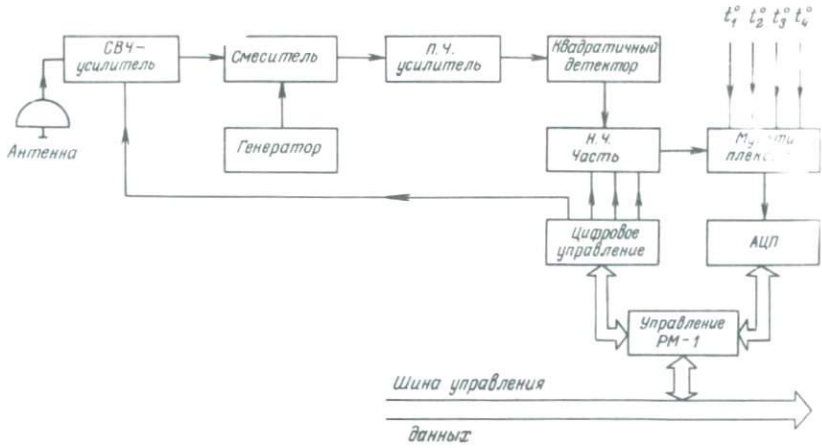


Рис. 3.22. Структурная схема радиометрической системы РМ-1.

Радиометрическая система РМ-1, как часть комплекса научной аппаратуры, работает в режиме «непосредственной передачи» — спутник находится в зоне радиовидимости центра приема (длительность сеанса равна 15 мин), а также в режиме «запоминания информации» и последующей ее выдачи.

В первом режиме бортовой электронно-вычислительный комплекс выдает команду включения питания системы и формирует импульсы, определяющие начало и конец калибровки, а затем измерений принимаемого радиотеплового излучения. С блока аналого-цифрового преобразования выходные данные в цифровом виде поступают в бортовой электронно-вычислительный комплекс для предварительной обработки, форматирования и передачи к радиопередатчику для выдачи в реальном масштабе времени.

Во втором режиме по команде микропроцессорной системы включается питание РМ-1, производится калибровка и начинается измерение. Получаемые цифровые данные после предварительной обработки и формирования записываются на цифровом магнитофоне. При работе системы РМ-1 вместе с многозональной спектрометрической системой СМП-32 и радиометрической системой РМ-2 возможна запись на одном цифровом магнитофоне длительностью 8 мин; при работе только систем РМ-1 и РМ-2 время записи достигает 90 мин. Записанные данные передаются при вхождении спутника в зону радиовидимости.

Цикл «калибровка» радиометрической системы имеет продолжительность 30 с, а цикл «измерение» — 90 с. При включении питания производится первая калибровка по команде с бортового электронно-вычислительного комплекса, после чего периодически повторяется цикл

«измерение» — «калибровка» автономно от блока цифрового управления РС-1.

При измерении принятый антенной радиотепловой сигнал проходит через СВЧ антенный переключатель, работающий в этом случае в режиме пропускания, суммируется с сигналом эталонного генератора, после чего поступает в модулятор. Последний модулирует поступающий СВЧ-сигнал по амплитуде с частотой около 1000 Гц. Модулированный сигнал подается к смесителю и после этого к усилителю промежуточной частоты. После усиления по промежуточной частоте сигнал квадратически детектируется и поступает на вход низкочастотного блока. Там сигнал синхронно фильтруется, усиливается, детектируется и подается на фильтр с переменной постоянной времени: 0,3; 0,6; 0,9; 1,8 с, которая задается бортовым электронно-вычислительным комплексом. Использование этого фильтра позволяет изменять чувствительность радиометрической системы в зависимости от исследуемых природных образований (рис. 3.23).

Сигнал с выхода радиометрической системы мультиплексируется с сигналами четырех электронных измерителей температуры ($t_1^0 \div t_4^0$), преобразуется в цифровую форму 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем и подается к бортовому электронно-вычислительному комплексу. В цикле «калибровка» антенный переключатель выключен (или, точнее, работает в режиме отражения) и сигнал с антенны для измерения не поступает. Цикл состоит из двух подциклов по 15 с. Во время первого подцикла генератор шума продолжает работать и сигнал с него подается на вход модулятора, куда поступает также сигнал шума, пропорциональный физической

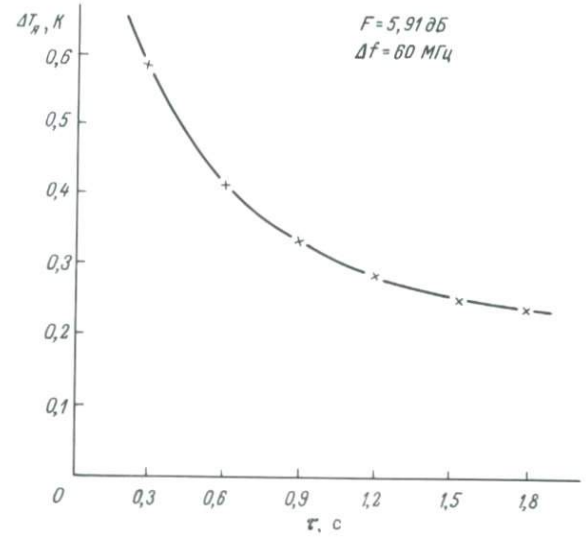


Рис. 3.23. Зависимость чувствительности системы РМ-1 от постоянной времени.

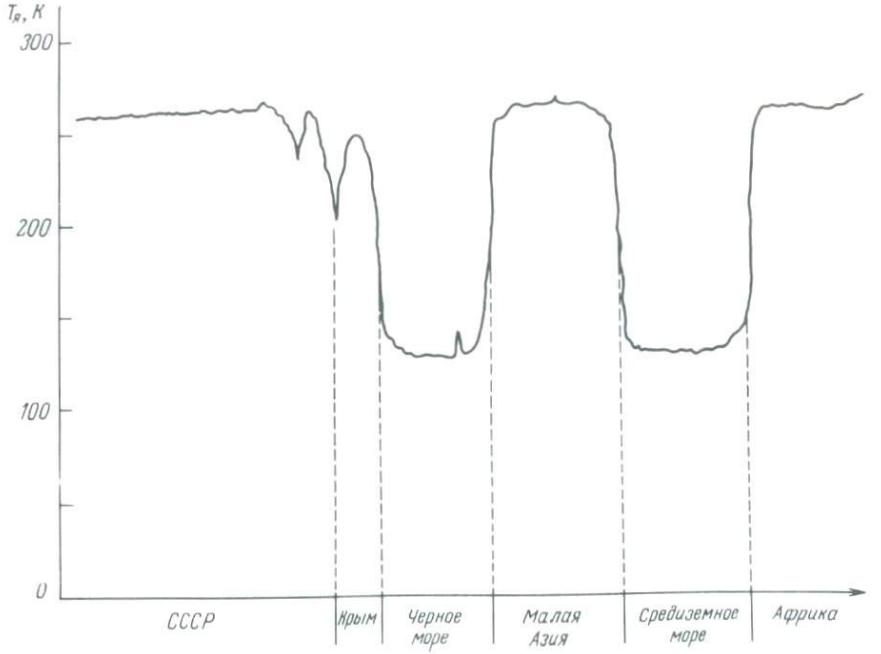


Рис. 3.24. Изменение радиояркостной температуры поверхности Земли (данные системы РМ-1; виток № 917).

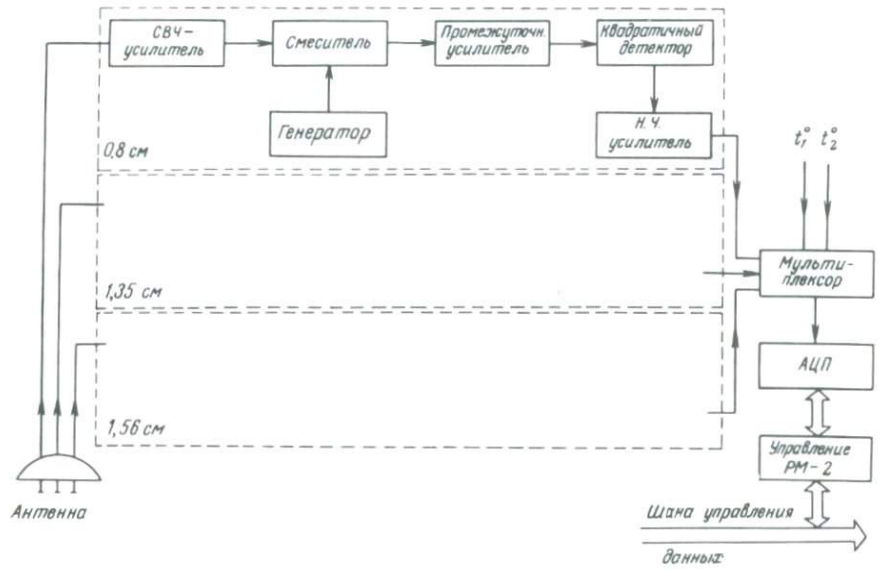


Рис. 3.25. Структурная схема радиометрической системы РМ-2.

температуре антенного переключателя. Измеряется суммарный сигнал. Во время второго подцикла генератор шума выключается и на вход модулятора поступает только сигнал шума, пропорциональный физической температуре переключателя. Сигналы, измеряемые радиометрической системой во время обоих подциклов, потом используются при обработке данных.

Радиометрическая система РМ-1 имеет следующие технические параметры [96, 105, 117]:

— рабочая длина волны, см	4
— флюктуационная чувствительность, К	0,3
— динамический диапазон, К	70—350
— выходы: цифровой, бит	10
аналоговый, В	0—5
— диаметр зеркально-параболической антенны, мм	780
— ширина диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ,°	3
— рабочий температурный диапазон, °С	0—45
— потребляемая мощность, Вт	12,3
— масса, кг	28,1

На рис. 3.24 представлено изменение радиояркостной температуры, восстановленное по данным, полученным РМ-1. Измерение начинается на территории СССР, потом траектория спутника пересекает Черное море, Турцию, Средиземное море и заканчивается в районе Александрии в Египте.

Радиометрическая система РМ-2 предназначена для измерения радиотеплового излучения системы Земля — атмосфера на длинах волн 0,80; 1,35; 1,55 см [97, 181]. На рис. 3.25 показана ее структурная схема. Радиотепловое излучение принимается параболической антенной, после этого сигналы обрабатываются в трех идентичных каналах.

Сигнал с выхода одного канала радиометрической системы РМ-2 (например, 0,8 см) мультиплексируется с сигналами других двух каналов системы РМ-2 (1,35 и 1,55 см), а также с сигналами двух измерителей температуры t_1^0 и t_2^0, после чего преобразуется в цифровую форму 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем и подается к бортовому электронно-вычислительному комплексу.

Команды цикла «калибровка» имеют период 16 мин, сам цикл «калибровка» длится 1,5 мин и для каждого канала включает независимые калибровки: по высокотемпературному эталону с инверсией фазы модулирующего напряжения (10 с) и две калибровки по тепловой согласованной нагрузке с инверсией фазы (10 с) и без нее (10 с). Сигналы, измеряемые радиометрической системой во время цикла «калибровка», используются при обработке радиометрических данных.

Радиометрическая система РМ-2 имеет следующие основные технические параметры:

— рабочая длина волны, см	0,82, 1,35, 1,55 см
— флюктуационная чувствительность, К	15
— динамический диапазон, К	140—310
— выходы: цифровой, бит	10
аналоговый, В	0—5

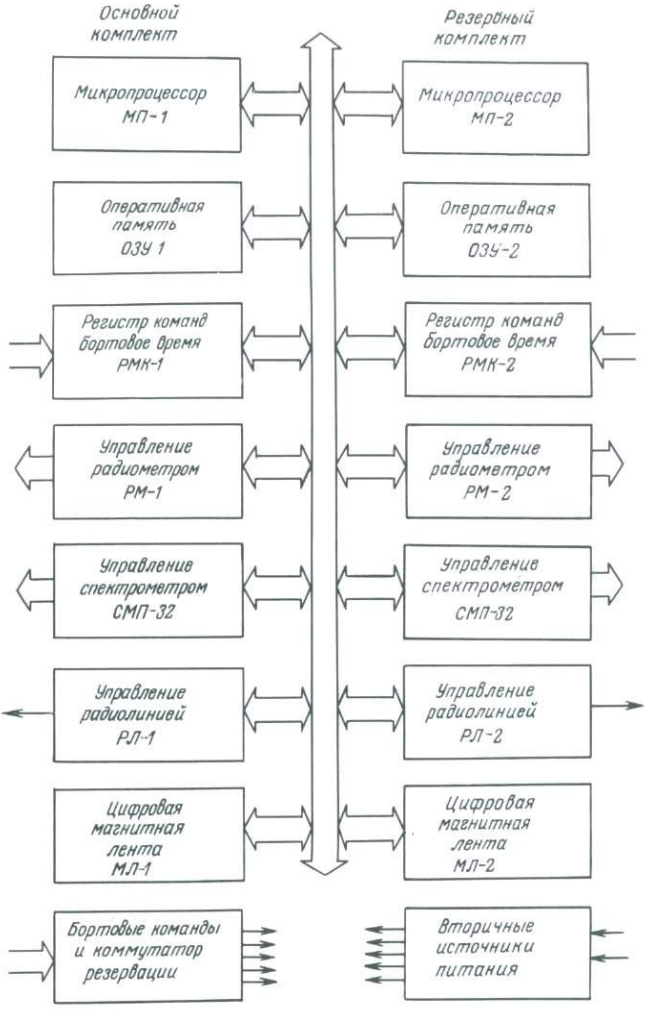


Рис. 3.26. Обобщенная схема бортового вычислительного комплекса.

— диаметр зеркально-параболической антенны, см	82
— ширина диаграммы направленности антенны на уровне 3 дБ,^{0}	5
— рабочий температурный диапазон, °С	0—45
— потребляемая мощность, Вт	20
— максимальная масса, кг	35

Бортовой вычислительный комплекс в проекте «Болгария-1300-П». Описанные в настоящей главе системы СМП-32, РМ-1 и РМ-2 являются со-

ставной частью комплекса научной аппаратуры, разработанного по проекту «Болгария-1300-П». Этот комплекс представляет собой измерительную информационную систему, включающую в себя помимо СМП-32, РМ-1, РМ-2, также бортовой вычислительный комплекс и информационную радиолинию для передачи потока данных на Землю.

Бортовой вычислительный комплекс и его программное обеспечение должны решать несколько основных задач, в том числе [97] управление системами СМП-32, РМ-1, РМ-2, планирование эксперимента, сбор, обработка и запоминание больших массивов данных [105].

Наиболее общая структурная схема бортового вычислительного комплекса представлена на рис. 3.26, на котором показана связь между основными функциональными системами и модулями, осуществляемая посредством стандартного интерфейса.

3.3. Метрологическое обеспечение измерений [1)]

Поскольку современные дистанционные методы исследования Земли в значительной степени опираются на использование количественных методов обработки данных, достоверность результатов исследований оказывается в непосредственной зависимости от измерительных свойств съемочных систем (СС) [121], определяющих возможность объективного сопоставления результатов измерений, получаемых в различных ситуациях разными СС. Очевидно, что необходимым условием такого сопоставления является соответствующее метрологическое обеспечение.

В понятие метрологического обеспечения измерений включают выбор физической единицы представления результатов измерений, передачу выбранной единицы от воспроизводящего ее эталона к измерительной шкале СС, обеспечение необходимой минимизации суммарной погрешности проводимых измерений по отношению к единице выбранной физической величины.

Рассмотрим реализацию подобного метрологического обеспечения СС на примере многозональных съемочных систем оптического диапазона. Используемые в дистанционных исследованиях Земли многозональные съемочные системы оптического диапазона по принципу действия являются радиометрами-яркомерами, так как их мгновенные поля зрения при измерениях полностью перекрываются исследуемой поверхностью. Если принять во внимание ничтожный размер телесного угла, под которым входные зрачки СС радиометров-яркомеров видны с поверхности Земли, то очевидно, что в качестве радиометрической величины, количественно определяющей исследуемое с помощью таких СС излучение, нужно взять плотность лучистого потока на поверхности, отнесенную к величине спектрального интервала и телесного угла, т.е. спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ). И хотя на практике величины разрешения по поверхности, телесному углу и по спектру конечны, существо вопроса от этого не

[1)] © Издательство «Мир».

меняется: СС измеряет среднее значение СПЭЯ, при этом чем выше разрешение, тем меньше погрешность, связанная с конечностью перечисленных величин [1].

Учитывая существенную важность вопроса о выборе физической единицы представления результатов измерений, рассмотрим этот вопрос детально.

Действительно, связь между измеряемой величиной и выходным сигналом любого j-го измерительного канала СС определяется соотношением

$$S_j = \frac{g_j}{B} = \frac{\int_0^\infty B(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda}{B}, \tag{3.8}$$

где S_j — величина, характеризующая чувствительность j-го измерительного канала; $S_j(\lambda)$ — абсолютная спектральная чувствительность j-го канала; g_j — выходная реакция j-го канала; $B(\lambda)$ — спектральная яркость исследуемой поверхности; B — измеряемая величина яркости.

Величина B в принципе может характеризоваться различными способами. Обычно при градуировке радиометров-яркомеров в качестве величины B используются полная интегральная яркость некоторого эталонного источника излучения, интегральная яркость этого источника в пределах интервала ($\Delta\lambda$) спектральной чувствительности градуируемого канала СС или эффективная для данного канала яркость [111]. Поэтому соотношение (3.8) может быть заменено одним из следующих выражений:

$$S_{\text{и}} = \frac{\int_0^\infty b_{\text{эт}}(\lambda) S(\lambda)\, d\lambda}{\int_0^\infty b_{\text{эт}}(\lambda)\, d\lambda}, \tag{3.9}$$

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{\int_0^\infty b_{\text{эт}}(\lambda) S(\lambda)\, d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} b_{\text{эт}}(\lambda)\, d\lambda}, \tag{3.10}$$

[1] Подобный подход справедлив не только для радиометров с узким углом мгновенного поля зрения, но и для кадровых съемочных систем (например, телевизионных и фотографических), которые в этом случае можно рассматривать как совокупность большого числа радиометрических каналов с малым полем зрения, величина которого определяется элементом пространственной дискретизации, осуществляемой при обработке информации.

$$S_m = \frac{\int_0^\infty B_{эт}(\lambda) S(\lambda)\, d\lambda}{\int_0^\infty B_{эт}(\lambda) s(\lambda)\, d\lambda}, \tag{3.11}$$

где $S_и$, $S_{\Delta\lambda}$, S — соответственно интегральная, абсолютная и эффективная чувствительности j-го канала радиометра; $B_{эт}(\lambda)$, $b_{эт}(\lambda)$ — соответственно абсолютная и относительная спектральные характеристики излучателя, по которому градуируется радиометр; $S(\lambda)$, $s(\lambda)$ — абсолютная и относительная спектральная чувствительности радиометра.

Оценим эффективность использования выражений (3.9)—(3.11) при градуировке СС. Заметим, что при дистанционном исследовании земной поверхности и выявлении особенностей исследуемых объектов необходимо, как правило, иметь возможность судить о спектральном составе восходящей над ними радиации. Однако так как выходной сигнал j-го канала радиометра пропорционален интегралу произведения двух функций, то

$$g_j \sim \int_0^\infty B(\lambda) s(\lambda)\, d\lambda, \tag{3.12}$$

и по его величине невозможно однозначно судить о спектральном составе регистрируемого излучения. Отсюда следует, что использование интегральной чувствительности при определении яркости исследуемого объекта возможно только в случае, если исследуемый объект и используемый при градуировке излучатель обладают одинаковым распределением энергии по спектру.

В случае исследования земной поверхности спектральный состав регистрируемого излучения, как правило, неизвестен, поэтому интегральную чувствительность $S_и$ нельзя использовать при градуировке аппаратуры, поскольку она в значительной степени определяется спектром используемого излучателя.

Так как СС для исследования земной поверхности имеют сравнительно узкие спектральные каналы, более оправданной следует считать градуировку аппаратуры по ее абсолютной чувствительности, что позволяет в какой-то степени нормировать результаты измерений. Однако в этом случае остаются погрешность нормирования, связанная с невозможностью точного определения эффективной ширины спектральных каналов, а также погрешность, вызванная несовпадением спектральных характеристик излучателя, используемого при градуировке. и измеряемого источника в пределах спектральной зоны чувствительности градуируемого канала.

Градуировка аппаратуры по эффективной чувствительности была бы целесообразной при условии сохранения формы характеристик относительной спектральной чувствительности, одинаковой для всех спектральных каналов градуируемой СС. Так как это условие обычно не выполняется, в

случае использования эффективной чувствительности необходимо вводить для каждого спектрального канала некоторый нормирующий коэффициент.

В связи с отмеченными особенностями различных определений чувствительности в работе [17] предложено при градуировке СС определять ее чувствительность к спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в соответствии с выражением

$$S_{\text{СПЭЯ}} = \frac{g}{B_{\text{эт}}(\lambda_x)} = \frac{\int_0^\infty B_{\text{эт}}(\lambda) S(\lambda)\, d\lambda}{B_{\text{эт}}(\lambda_x)}, \tag{3.13}$$

где $S_{\text{СПЭЯ}}$ — определяемая чувствительность; $B_{\text{эт}}(\lambda_x)$ — СПЭЯ на длине волны λ_x источника, используемого при градуировке; λ_x — некоторая длина волны в пределах области спектральной чувствительности градуируемого прибора. При таком подходе нормирование результатов измерения происходит автоматически в процессе градуировки. Градуировка приборов по их чувствительности к СПЭЯ позволяет по результатам, полученным с их помощью, непосредственно определять СПЭЯ исследуемого объекта в соответствии с выражением

$$B(\lambda_x) = g / S_{\text{СПЭЯ}}, \tag{3.14}$$

где $B(\lambda_x)$ — СПЭЯ излучения исследуемого объекта на длине волны λ_x.

Однако и в этом случае остается погрешность нормирования, возникающая из-за различий в спектральных составах эталонного и измеряемого излучения.

Отметим, что величина этой погрешности существенно зависит от выбора длины волны λ_x, на которой проводится градуировка. Очевидно, что в качестве λ_x следует выбрать такую длину волны, на которой отношение СПЭЯ эталонного и измеряемого источников равно отношению эффективных яркостей этих же источников. В случае если это равенство выполняется, ошибка нормирования будет сведена к нулю. Соответствующая этому условию длина волны обычно называется эффективной [112] и задается соотношением

$$\frac{B_{\text{эт}}(\lambda_e)}{B(\lambda_e)} = \frac{\int_0^\infty B_{\text{эт}}(\lambda) s(\lambda)\, d\lambda}{\int_0^\infty B(\lambda) s(\lambda)\, d\lambda}, \tag{3.15}$$

Заметим, что в общем случае, когда отсутствует какая-либо априорная информация о спектральном составе регистрируемого излучения, определить λ_e из соотношения (3.15) не представляется возможным. Более того, λ_e будет различной для каждой конкретной спектральной характеристики B_λ.

Предположим, что спектральные характеристики $B_{эт}(\lambda)$ и $B(\lambda)$ аппроксимируются прямыми в пределах зоны спектральной чувствительности градуируемого измерительного канала. Такое предположение правомерно в большинстве случаев, так как излучение объектов земной поверхности обычно имеет довольно плавные спектральные характеристики, а спектральные каналы измерительной аппаратуры сравнительно узки. В этом случае можно считать, что

$$B_{эт}(\lambda) = B^0_{эт} + B^1_{эт}\lambda, \quad B(\lambda) = B^0 + B^1\lambda, \tag{3.16}$$

где $B^0_{эт}$, $B^1_{эт}$, B^0, B^1 — некоторые постоянные коэффициенты.

Соотношение (3.15) в этом случае перепишется в виде

$$\frac{B^0_{эт} + B^1_{эт}\lambda_e}{B^0 + B^1\lambda_e} = \frac{\int_0^\infty (B^0_{эт} + B^1_{эт}\lambda)s(\lambda)\,d\lambda}{\int_0^\infty (B^0 + B^1\lambda)s(\lambda)\,d\lambda}. \tag{3.17}$$

Легко показать, что из этого соотношения следует

$$\lambda_e = \frac{\int_0^\infty \lambda s(\lambda)\,d\lambda}{\int_0^\infty s(\lambda)\,d\lambda}, \tag{3.18}$$

что совпадает с выражением для эффективного значения длины волны, введенным в [43, 199] для случая постоянной яркости. Заметим, что в выражение (3.18) не входят коэффициенты $B^0_{эт}$, $B^1_{эт}$, B^0, B^1, т.е. λ_e не зависит от наклона прямых (3.16) и, следовательно, не зависит от спектрального состава эталонного и измеряемого излучения. Таким образом, при определении чувствительности аппаратуры в СПЭЯ на длине волны λ_e ошибка нормирования будет равна нулю для измеряемого излучения с любым спектральным составом. Подчеркнем еще раз, что это справедливо только в том случае, если спектральные характеристики эталонного и измеряемого излучателей можно аппроксимировать прямыми в пределах области чувствительности градуируемого спектрального канала.

Итак, следует признать действительно целесообразной градуировку энергетических шкал бортовой радиометрической аппаратуры в единицах СПЭЯ с отнесением результатов измерений к эффективной для каждого спектрального канала длине волны λ_e, определяемой из соотношения (3.18).

Выбор единицы СПЭЯ в качестве физической единицы представления результатов измерений предопределяет схему градуировки, включающую в

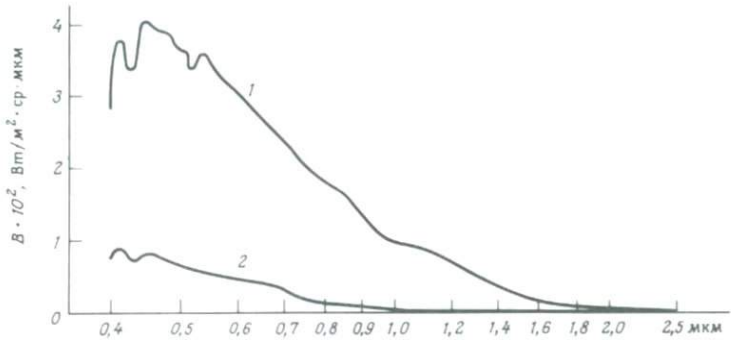


Рис. 3.27. К оценке диапазона яркостей, измеряемых при исследовании земной поверхности с аэрокосмических носителей на высотах более 30 км, зенитном расстоянии Солнца 20° и визировании в надир.

1 — заснеженные поверхности; *2* — водные поверхности.

себя определение относительных спектральных и абсолютных чувствительностей каналов как условие передачи выбранной физической единицы энергетической шкале системы. Исходным требованием к построению такой схемы градуировки является реализация излучателя, обладающего известной СПЭЯ в пределах спектрального и динамического диапазонов работы съемочной системы (рис. 3.27) и удовлетворяющего условию

$$A_{изл} \geqslant D_{вх} + l\Delta\beta_{макс}, \tag{3.19}$$

где $A_{изл}$ — размер излучателя; $D_{вх}$ и $\Delta\beta_{макс}$ — соответственно диаметр входного зрачка и максимальный размер поля зрения съемочной системы; l — расстояние между излучателем и градуируемой СС, что позволяет реализовать метод градуировки СС по протяженному источнику [164].

Излучатель, непосредственно применяемый при градуировке и воспроизводящий при этом некоторую величину СПЭЯ внутри выбранного динамического диапазона, в соответствии с изложенными выше соображениями следует метрологически связать с эталоном, воспроизводящим выбранную физическую величину. Поскольку при этом конечная достоверность результатов измерений оказывается в прямой зависимости от используемых эталонов, точности передачи величины СПЭЯ от эталона к рабочему излучателю, а также построения конкретной схемы градуировки СС, вопрос выбора средств эталонирования и градуировки заслуживает особого внимания.

До недавнего времени при градуировке оптико-электронных систем в основном использовались средства и методы фотометрии, которые базировались на световых и температурных эталонах. Переход к энергетическим величинам осуществлялся путем сложных пересчетов. В частности, по известной цветовой температуре тела, накалу светоизмерительных ламп на-

ходилась его истинная температура, а затем по данным об излучательной способности вольфрама рассчитывалась спектральная яркость лампы. Необходимость такого пересчета, а также неопределенность используемых для расчета данных приводили к существенным ошибкам при градуировке. Некоторые исследователи использовали при градуировке различные модели абсолютно черного тела. Однако низкое качество этих моделей, недостаточный анализ их метрологических характеристик и отсутствие стандартных практических методик измерения также приводили к значительным погрешностям.

Положение существенно улучшилось с момента создания системы специальных эталонов (СЭ) энергетической фотометрии, различающихся как по принципу действия, так и по спектральному диапазону [41].

К одному из таких эталонов относится специальный эталон спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне 0,25—2,5 мкм [31], который был использован в качестве основы при построении схем градуировки многозонального спектрометра СМП-32 и многозональной сканирующей системы «Фрагмент», работающих в пределах указанного спектрального диапазона [1]. Использование этого эталона основывалось на утвержденной поверочной схеме для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости (рис. 3.28). Единица СПЭЯ в этой схеме передается от СЭ рабочему эталону, который выполняется на базе серийной ленточной лампы СИ10-300У или специальной лампы типа «черного тела». От рабочего эталона СПЭЯ единица СПЭЯ передается образцовым средствам измерения на базе ламп СИ10-300У или СИ8-200У. На этапе градуировки съемочных систем должны использоваться образцовые средства измерений. На рис. 3.29 приведены упрощенные схемы двух этапов градуировки.

Сосредоточимся на рассмотрении возможных источников и сравнительных величин ошибок, влияющих на конечный результат измерения. Заметим, что в первую очередь в конечный результат должны войти погрешности, связанные с передачей единицы СПЭЯ от эталонов к образцовым средствам — в зависимости от длины волны они могут достигать нескольких процентов.

К источникам ошибок градуировки можно отнести нестабильность яркости источников излучения, нелинейность и нестабильность компаратора градуировочной установки, невоспроизводимость установки длин волн монохроматора, несогласованность монохроматоров излучателя и компаратора по длинам волн. Однако тщательный монтаж установки, предназначенной для градуировки, предварительный отбор используемых в компараторе фотоприемников и введение различных систем контроля стабильности режимов излучателей позволяют свести эти погрешности к величинам порядка 1%.

Таким образом, точность энергетической градуировки СС в нашем случае определяется в основном погрешностью передачи единицы СПЭЯ от

[1] Системы «Спектр-15» также градуировались по предложенному советскими учеными способу [17], но на базе иного эталона.

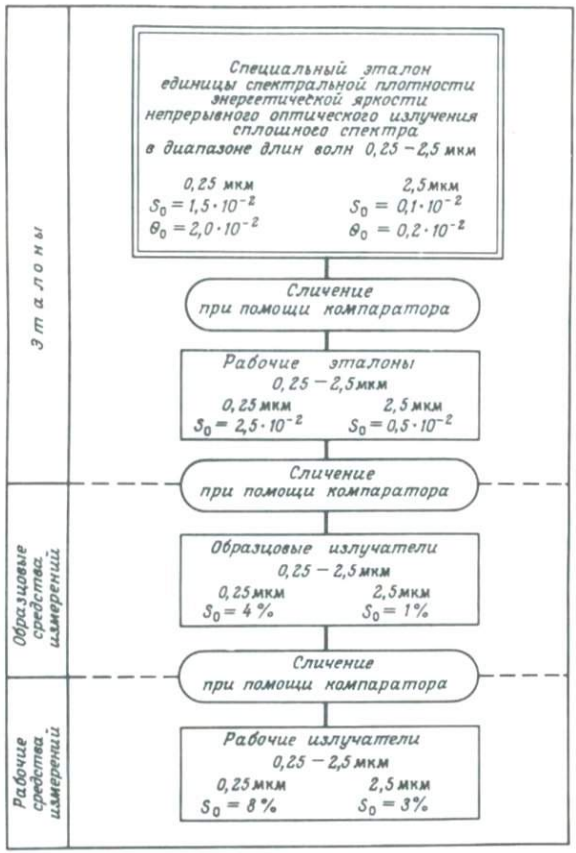


Рис. 3.28. Поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,25 — 2,5 мкм.

θ — неисключенная систематическая погрешность; S — среднеквадратичное отклонение.

эталона к образцовым и рабочим средствам измерений, стандартизованной на уровне нескольких процентов. Это означает, что поскольку для дистанционных исследований Земли необходима совместная обработка данных как минимум от нескольких СС, при построении последних нецелесообразно требовать обеспечения аппаратурной точности каждой отдельной СС в спектральном диапазоне 0,25—2,5 мкм, лучшей, чем 1—3%.

Подчеркнем, что обеспечение среднеквадратичной случайной погрешности измерений на уровне нескольких процентов требует особого построения всего тракта прохождения информации. Действительно, неоднократное преобразование информации в тракте будет вести к ее потерям до тех пор,

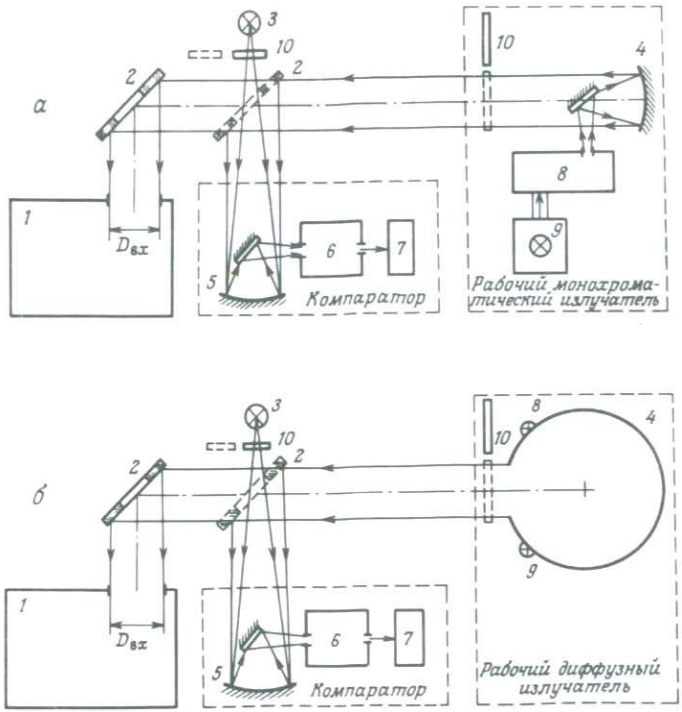


Рис. 3.29. Схема измерения относительной спектральной характеристики (*а*) и абсолютной чувствительности (*б*) съемочных систем.

а: 1 — съемочная система, *2* — отклоняющее плоское зеркало, *3* — образцовое средство измерения (лампа СИ10 — 300У), *4* — коллиматорное зеркало, *5* — оптическая система компаратора, *6, 8* — двойные монохроматоры, *7* — блок фотоприемников компаратора, *9* — галогенная лампа, *10* — заслонки; *б*: *1* — съемочная система, *2* — отклоняющее плоское зеркало, *3* — образцовое средство измерения (лампа СИ10 — 300У), *4* — диффузный осветитель, *5* — оптическая система компаратора, *6* — двойной монохроматор, *7* — блок приемников, *8, 9* — галогенные лампы осветителя, *10* — заслонки.

пока не будет осуществлен, собственно, процесс измерения, т.е. сравнение некоторого промежуточного сигнала с мерой (единицей измерения) и получения именованного числа (кодированного сигнала). Кодированный сигнал, являясь более помехоустойчивым, чем аналоговый сигнал, практически позволяет устранить влияние последующих звеньев информационно-измерительного комплекса на результаты измерений. Следовательно, выполняя процесс измерения как можно ближе к входному звену СС, можно уменьшить потери информации; из этого естественным образом вытекает необходимость включения кодирующего звена в СС (бортовую часть информационно-измерительного комплекса) и использование цифровой радиолинии [3, 4].

Однако используемые в бортовых СС оптического диапазона кодирующие звенья (аналого-цифровые преобразователи, АЦП) преобразуют в именованное число лишь электрический сигнал. В результате нестабильности в предыдущих звеньях оптико-электронного преобразования генерируются погрешности измерений, превосходящие, как правило, определенный нами допустимый уровень в несколько процентов. Отсюда следует необходимость введения специального контроля за стабильностью звеньев аналогового оптико-электронного преобразования в СС и той или иной процедуры коррекции результатов измерений по данным этого контроля.

ИЗОБРАЖЕНИЯ

4.1. Общие сведения

Под изображением будем понимать зафиксированное на каком-либо носителе отображение пространственного распределения собственного или отраженного излучения некоторого сюжета. В дистанционных методах чаще всего используются черно-белые полутоновые изображения, отображающие пространственное распределение излучения, интенсивность которого интегрируется внутри некоторого спектрального интервала шириной $\Delta\lambda$. В качестве примера на рис. 4.1 представлено изображение части территории НРБ, полученное при дистанционной съемке в диапазоне длин волн 800 — 1100 нм. Очевидно, что подобные изображения можно описать лишь одной функцией, отображающей изменения интенсивности излучения в зависимости от параметров x и y, однозначно определяющих положение каждой точки.

В аэрокосмических методах исследования Земли возможный размер изображаемого сюжета определяется видом применяемой аппаратуры, высотой полета космического аппарата и многими другими причинами. Так как изображение имеет ограниченные размеры, можно предположить, что описывающая его функция $B(x, y)$ не обращается в нуль только в ограниченной области, имеющей некоторые стандартные размеры и форму. В данном случае будем предполагать, что функция $B(x, y)$ равна нулю вне квадрата с заданными размерами $0 \leqslant x \leqslant A$ и $0 \leqslant y \leqslant A$.

Значение функции $B(x, y)$, описывающей изображение в некоторой точке, будем называть *яркостью изображения* в этой точке. Так как количество света, поступающего от сюжета к наблюдателю или съемочной системе, является конечным и неотрицательным числом, то, следовательно, каждая функция, представляющая изображение, тоже ограничена и неотрицательна. Естественно предположить, что существует верхняя граница $B_{\text{макс}}$ величины допустимой яркости реального изображения, в каждой точке которого выполняется условие

$$0 \leqslant B(x, y) \leqslant B_{\text{макс}}. \tag{4.1}$$

При интерпретации изображений иногда производятся математические операции, например преобразование Фурье. Чтобы гарантировать проведение подобных операций, необходимо предположить, что функции, описывающие изображения, непрерывны, интегрируемы и т.д.

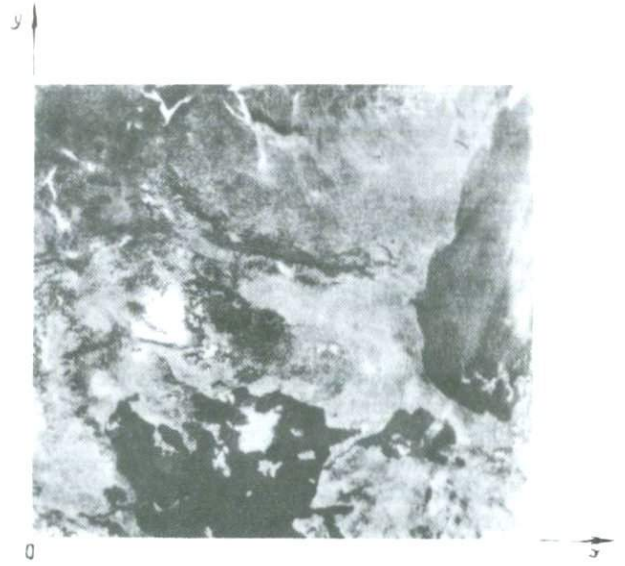


Рис. 4.1. Изображение части территории НРБ, полученное сканирующей аппаратурой в диапазоне длин волн 800 — 1100 нм.

При обработке изображений на цифровой ЭВМ необходимо, чтобы они были представлены в дискретном виде, т.е. в виде матрицы. В самом деле, можно считать, что каждая матрица с действительными, неотрицательными элементами является представлением изображения.

Пусть для каждой пары (i, j), где

$$1 \leqslant i \leqslant n, 1 \leqslant j \leqslant n, \tag{4.2}$$

существует квадрат, определяемый неравенствами

$$i - 1 \leqslant x < i, j - 1 \leqslant y < j. \tag{4.3}$$

Тогда можно считать, что каждой матрице a_{ij} порядка $n \times n$ соответствует изображение, значения яркости которого в квадрате s_{ij} равны постоянной величине a_{ij} для каждой пары (i, j). Построенное таким образом изображение называется *дискретным*. Естественно, что каждое исходное изображение не отличается от дискретного изображения порядка $n \times n$ при достаточно больших значениях n.

При цифровой обработке изображений считается, что функция $B(x, y)$ может принимать только конечное число значений, т.е. сигнал, соответствующий изображению, квантуется. Можно показать, что исходное изображение не отличается от квантованного, если допустить достаточно большое число уровней квантования. Частным случаем квантования является двоичное изображение, в котором функция $B(x, y)$ может принимать только два значения, обозначаемые обычно через нуль и единицу.

Логично предположить, что произвольная функция, которая описывает изображение, интегрируема, поскольку интегрирование физически соответствует измерению общего количества света, излучаемого или отражаемого сюжетом.

Изображения, получаемые при дистанционном исследовании Земли, можно описать функцией вида

$$B(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_x, \omega_y) \exp[j(\omega_x x + \omega_y y)] d\omega_x d\omega_y, \tag{4.4}$$

где ω_x и ω_y — круговые пространственные частоты, связанные с длинами волн λ_x и λ_y и с числами периодов $\nu_x = 2\pi/\omega_x$ на единицу длины по оси x и $\nu_y = 2\pi/\omega_y$ — по оси y следующим образом:

$$\omega_x = 2\pi/\lambda_x = 2\pi\nu_x, \tag{4.5}$$

$$\omega_y = 2\pi/\lambda_y = 2\pi\nu_y, \tag{4.6}$$

а $S(\omega_x, \omega_y)$ — пространственный спектр функции $B(x, y)$, определенный обратным преобразованием Фурье

$$S(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(x, y) \exp[-j(\omega_x x + \omega_y y)] dx dy. \tag{4.7}$$

Выражение для спектра $S(\omega_x, \omega_y)$ показывает вклад в сумму $B(x, y)$ гармонических компонент с пространственными частотами ω_x и ω_y.

4.1.1. Пространство изображения

При интепретации аэрокосмической видеоинформации предпочтительно использовать дискретизированные изображения, представленные в цифровом виде. Степень соответствия дискретизированного изображения исходному можно было бы оценить не только субъективно, если бы был найден критерий достоверности. Это очень трудно, так как выбранный критерий должен учитывать все особенности восприятия изображения глазом человека.

Заранее известно, что квантованное изображение отличается от исходного[1]. Это означает, что оба изображения будут представлены различными точками. Искажение при квантовании (при условии, что системы кван-

[1] Квантование — это округление значений яркости внутри данного интервала изменения яркости до одного и того же значения яркости, названного уровнем квантования. Разность между соседними уровнями называется *шагом квантования*. Уровень квантования всегда выбирается, исходя из определенных соображений. В результате квантования область, занимаемая возможными изображениями в n-мерном пространстве, разделяется на конечное число клеток так, что все точки внутри данной клетки считались бы наблюдателем одним и тем же сообщением.

тования не вносят дополнительных искажений) характеризуется расстояниями между этими точками [61].

Рассмотрим случай в трехмерном пространстве. Пусть точка $B_и$ с координатами $B_{и_x}$, $B_{и_y}$ и $B_{и_z}$ является точкой реального изображения, а B_k — соответственно точка квантованного изображения с координатами B_{k_x}, B_{k_y} и B_{k_z}. Тогда расстояние между точками $B_и$ и B_k определяется выражением

$$R(B_и, B_k) = [(B_{и_x} - B_{k_x})^2 + (B_{и_y} - B_{k_y})^2 + (B_{и_z} - B_{k_z})^2]^{1/2}. \quad (4.8)$$

В самом общем случае N-мерного пространства расстояние находится из формулы

$$R_N(B_и, B_k) = [(B_{и_1} - B_{k_1})^2 + (B_{и_2} - B_{k_2})^2 + \ldots + (B_{и_N} - B_{k_N})^2]^{1/2}. \quad (4.9)$$

Видно, что функция $R_N(B_и, B_k)$ — всегда неотрицательная величина. Только при $B_{и_i} = B_{k_i}$, т.е. при точном совпадении обоих изображений $R_N(B_{и_i}, B_{k_i}) = 0$. Во всех остальных случаях

$$R_N(B_{и_i}, B_{k_i}) > 0. \quad (4.10)$$

Первый член суммы

$$\sum_{i=1}^{N} (B_{и_i}^2 + B_{k_i}^2) \quad (4.9а)$$

соответствует мощности. Второй член суммы

$$2 \sum_{i=1}^{N} B_{и_i} B_{k_i} \quad (4.9б)$$

пропорционален корреляции между исходным и квантованным изображениями. Чем больше корреляция между обоими изображениями, тем меньше $R_N(B_{и_i}, B_{k_i})$.

При интерпретации аэрокосмических изображений и особенно при визуально-инструментальной интерпретации с помощью нейтрального градационного клина всегда можно найти или выбрать такое значение Δ, чтобы при

$$R_N(B_{и_i}, B_{k_i}) \leq \Delta \quad (4.11)$$

квантованное изображение относилось к заранее выбранному или заданному эталону. Это означает, что в пространстве изображения вокруг каждой из M эталонных точек строится сфера с радиусом Δ. Если исследуемое изображение попадает внутрь одной из сфер, оно будет отнесено к соответствующему эталону. Все другие изображения не относятся ни к одному из образов рассматриваемой совокупности.

Опыт показывает, что при квантовании необходимо сохранять существующие в изображении контуры и в результате квантования не должны появляться лишние контуры вследствие появления новых сигналов.

При нормальном квантовании, для сохранения высокого качества изображения, необходимы 64—128 уровней квантования.

4.1.2. Контуры в изображении

Под контуром понимается та часть изображения, в которой яркость быстро изменяется, т.е. велик градиент яркости.

Знание контуров при интерпретации аэрокосмических изображений имеет существенное значение, особенно в приложении к задачам геологии, геоморфологии, тематического картографирования, почвоведения, гидрологии и др.

Чтобы судить о наличии контура, можно использовать два критерия:

$$\left\{\left[\frac{\partial B(x, y)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial B(x, y)}{\partial y}\right]^2\right\}^{1/2} \geqslant \delta \tag{4.12}$$

и

$$|\Delta B(x, y)| = \left|\frac{\partial^2 B(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B(x, y)}{\partial y^2}\right| > \delta. \tag{4.13}$$

Принципиальная разница между обоими критериями большая и при их применении она должна учитываться. Действительно, при достаточно резком переходе яркости от B_i к B_j оба критерия локализуют контур примерно в одном и том же месте. Если яркость изменяется плавно, причем длина перехода Δl намного больше одного элемента, то согласно первому критерию определяется очень широкий контур, равный практически Δl, а согласно второму критерию выделяется только точка перегиба кривой изменения яркости по длине перехода.

Если функцию $B(x, y)$ преобразовать в соответствии с (4.4), то получим

$$\Delta B(x, y) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_x, \omega_y)\exp[j(\omega_x x +\right.$$

$$\left. + \omega_y y)]d\omega_x d\omega_y = -\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_x, \omega_y)(\omega_x^2 +\right.$$

$$\bar{S}(\omega_x, \omega_y) = (\omega_x^2 + \omega_y^2)S(\omega_x, \omega_y). \tag{4.14}$$

Видно, что преобразование $B(x, y)$ по (4.14) эквивалентно ослаблению низких и усилению высоких частот или, точнее, подчеркиванию высоких частот. Спектр преобразованного изображения

$$\bar{S}(\omega_x, \omega_y) = (\omega_x^2 + \omega_y^2)S(\omega_x, \omega_y). \tag{4.15}$$

Практика и многократные эксперименты показывают, что глаз человека выделяет и подчеркивает те участки изображения, для которых $|\Delta B(x, y)|$ существенно отличается от нуля. Поэтому при комплексной интерпретации изображений, определении различных геометрических и других характеристик очень важно подчеркнуть или выделить данные контуры или контур.

Из выражения для спектра преобразованного изображения следует, что для целей выделения контуров легче использовать пространственный фильтр с коэффициентом передачи

$$k(\omega_x, \omega_y) = \omega_x^2 + \omega_y^2. \tag{4.16}$$

В работе [138] предлагается контуром изображения считать геометрическое место точек максимума модуля градиента яркости, т.е.

$$|\operatorname{grad} B(x_i, y_i)| = \max. \tag{4.17}$$

Тогда уравнение контуров изображения с произвольным распределением яркости принимает вид

$$\left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}\right)\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 B}{\partial y^2}\right)\left(\frac{\partial B}{\partial y}\right)^2 + 2\frac{\partial^2 B}{\partial x \partial y}\frac{\partial B}{\partial x}\frac{\partial B}{\partial y} = 0. \tag{4.18}$$

Из (4.18) следует, что элементы яркостных скачков выделяются с максимальной помехоустойчивостью и полученное описание контура не зависит от условий освещенности, а полностью определяется особенностями исходного изображения.

Располагая современными мощными цифровыми средствами обработки, можно использовать следующую трансформацию:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \approx \frac{2B(x, y) - B(x + \Delta x, y) - B(x - \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} + \\ + \frac{2B(x, y) - B(x, y + \Delta y) - B(x, y - \Delta y)}{(\Delta y)^2}, \tag{4.19}$$

где Δx и Δy — шаги дискретизации аргументов X и Y. Чаще всего $\Delta x = \Delta y = a$ и тогда (элемент является квадратом).

$$\overline{B(x, y)} = B(x, y) - \frac{B(x + a, y) + B(x - a, y) + B(x, y + a) + B(x, y - a)}{4}. \tag{4.20}$$

Полученное выражение можно рассматривать как разность между исходным и квантованным изображениями с размерами элемента $\Delta x = \Delta y = a$.

Отметим, что выражению (4.19) соответствует очень удобный способ выделения контуров в изображении при стандартной развертке: необходимо использовать две линии с временем задержки соответственно на один элемент $B(x, y)$ и на одну строку разложения T_z.

4.1.3. Максимальное количество информации в одном изображении

Пусть M — множество изображений, причем всевозможных и на первый взгляд даже бессмысленных. В зависимости от разрешающей способности съемочной системы изображение состоит из определенного числа N

независимых элементов, каждый из которых имеет m различных градаций.

Чтобы ответить на вопрос, каково число M, прежде всего необходимо определить, сколько различных изображений может существовать в случае, если число элементов $N = 1$. Очевидно, что при m градаций это число $M(N = 1) = m$. При $N = 2$ каждой градации первого элемента соответствуют m градаций второго, или $M(N = 2) = m \cdot m = m^2$. В общем случае

$$M(N) = m^N. \tag{4.21}$$

Если $m = 64$ и число элементов $N = 5 \cdot 10^5$, то

$$M(N) = 64^{5 \cdot 10^5}. \tag{4.21а}$$

Это огромное число включает все когда-то существовавшие изображения или те, которые будут существовать в будущем. Сюда включены также изображения, представляющие собой случайные комбинации пятен с различной произвольной яркостью. Вероятность передачи одного из всех изображений определяется выражением

$$p = [M(N)]^{-1}. \tag{4.22}$$

Количество информации в одном изображении описывается формулой

$$J = -\log_2 p = \log_2 M(N) = \log_2 m^N = N\log_2 m, \text{ бит}. \tag{4.23}$$

Для рассматриваемого выше примера

$$J = 5 \cdot 10^5 \log_2 64 = 5 \cdot 10^5 \log_2 2^6 = 3 \cdot 10^6, \text{ бит}. \tag{4.23а}$$

4.1.4. Искажения при электрооптическом анализе изображений

Известно, что как электронные, так и электромеханические сканирующие устройства вносят искажения при электрооптическом преобразовании, главным образом из-за нестабильности скорости развертки. В результате анализируется не входная функция $B(x, y)$, а некоторая иная функция $B^*(x, y) \neq B(x, y)$.

Допустим, что преобразуется оптическое изображение вида

$$B(x, y) = \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} B_{km} \cos(\omega_x x + \omega_y y + \theta_{km}) =$$

$$= \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} A_{km} \exp[j(\omega_x x + \omega_y y)], \tag{4.24}$$

где

$$A_{km} = B_{km} \exp(j\theta_{km}/2). \tag{4.25}$$

Пусть сканирование производится следующим образом:

$$x = \int_0^t v_x(t)dt, \tag{4.26}$$

$$y = \int_0^t v_y(t)dt. \tag{4.27}$$

Допустим также, что скорость сканирования непостоянна и колеблется около значений $v_{0x} = \text{const}$ и $v_{0y} = \text{const}$ соответственно по закону

$$v_x(t) = v_{0x} + \Delta v_x(t), \tag{4.28}$$

$$v_y(t) = v_{0y} + \Delta v_y(t), \tag{4.29}$$

где $\Delta v_x(t)$, $\Delta v_y(t)$ — флюктуации скорости. После подстановки получаем

$$X = \int_0^t [v_{0x} + \Delta v_x(t)]dt = v_{0x}t + \int_0^t \Delta v_x(t)dt, \tag{4.30}$$

$$Y = \int_0^t [v_{0y} + \Delta v_y(t)]dt = v_{0y}t + \int_0^t \Delta v_y(t)dt. \tag{4.31}$$

Отсюда

$$B^*(x, y) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} A_{km} \exp\{j[\omega_x(v_{0x}t + \int_0^t \Delta v_x(t)dt) +$$

$$+ \omega_y(v_{0y}t + \int_0^t \Delta v_y(t)dt)]\} = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} A_{km} \exp[j(\omega_x x +$$

$$+ \omega_y y)] \exp\{j[\omega_x \int_0^t \Delta v_x(t)dt + \omega_y \int_0^t \Delta v_y(t)dt]\} = B(x, y)H. \tag{4.32}$$

Видно, что искажения, обусловленные нестабильностью развертки, выражаются мультипликативной помехой вида

$$H(t) = \exp\{j[\omega_x \int_0^t \Delta v_x(t)dt + \omega_y \int_0^t \Delta v_y(t)dt]\}, \tag{4.33}$$

что вызывает фазовые искажения анализируемого сигнала.

4.1.5. Информационная селекция при получении изображений

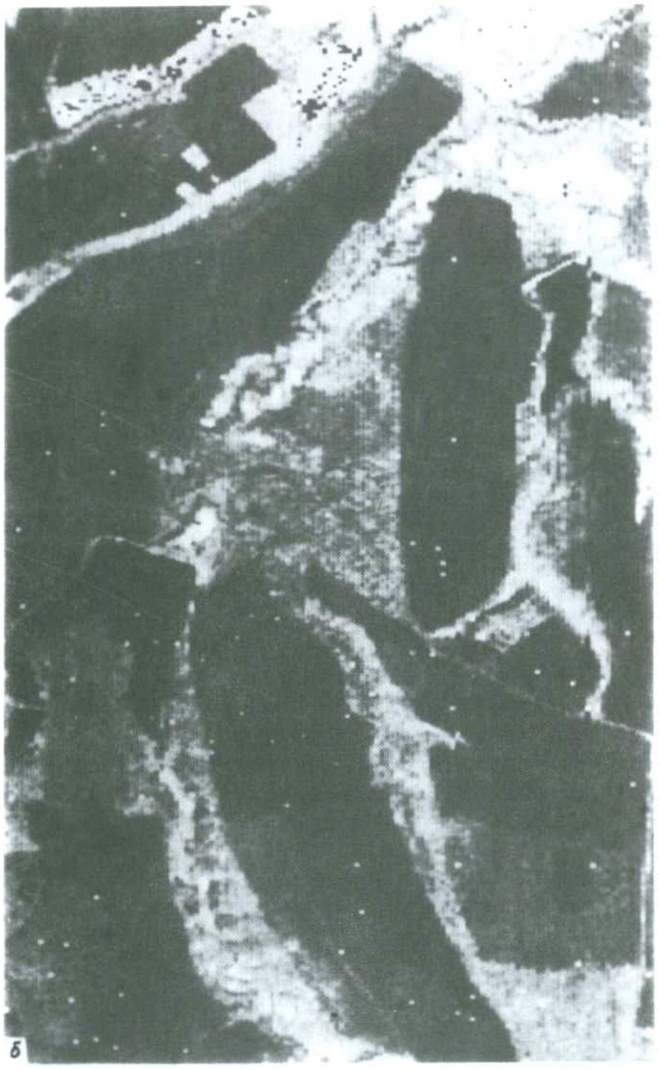
Изображение, полученное при дистанционном исследовании Земли, обладает очень большой информативностью. Один аэроснимок может содержать свыше $64 \cdot 10^6$ бит информации. Как любое реальное изображение,



Рис. 4.2. Изображение части территории НРБ.

а — в видимой области (520 — 560 нм);

снимок обладает большой избыточностью информации. При этом избыточная информация не нужна интерпретатору, которого, как правило, интересуют лишь определенные вопросы образования, структуры и т.д.



б — в ближней инфракрасной области (850 — 1050 нм).

Проблему рационального получения информации можно решить (и в ряде случаев решают) путем селекции информации, например, за счет получения фото-телевизионного и т.д. изображения в том спектральном диапазоне, в котором наблюдаются наилучшие разницы спектральных яркостей или коэффициентов отражения конкретных исследуемых природных обра-

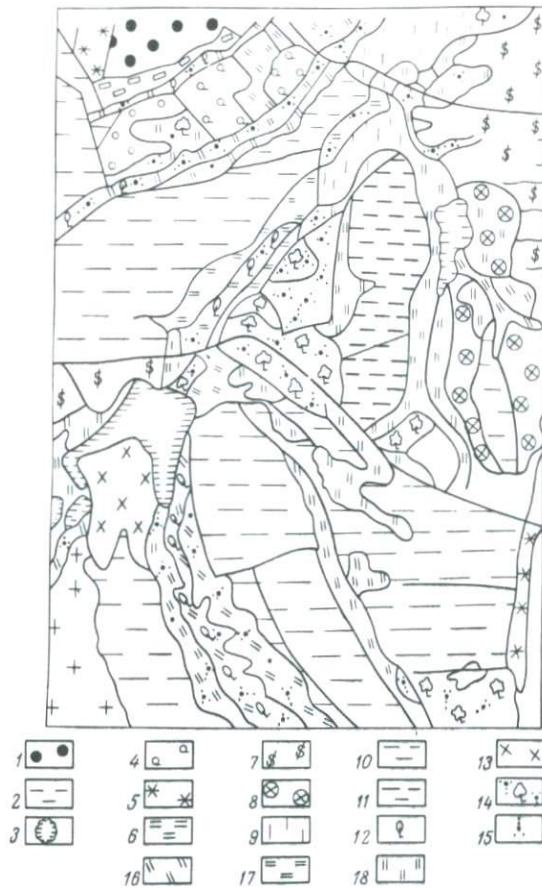


Рис. 4.3. Схема дешифрирования изображения, приведенного на рис. 4.2.

1 — фруктовый сад на олуговелых черноземах-смольницах; *2* — стерня кукурузы на олуговелых лесных почвах, смольницообразных и слабоэродированных; *3* — водохранилище; *4* — распаханный участок коричневых лесных смольницообразных почв; *5* — кукуруза после уборки урожая на олуговелых лесных, смольницообразных, неэродированных и слабоэродированных почвах; *6* — строения; *7* — виноградник на олуговелых коричневых лесных почвах (средне- и сильноэродированных); *8* — луговая растительность на коричнево-подзолистых псевдоподзолистых лесных почвах (средне- и сильноэродированных); *9* — луговая растительность на олуговелых коричневых лесных почвах (сильноэродированных, глинисто-песчаных); *10* — распаханное поле олуговелых коричневых лесных почв (неэродированных и слабоэродированных); *11* — распаханное поле олуговелых черноземов у смольниц (неэродированных и слабоэродированных); *12* — тополя; *13* — поле неубранной кукурузы на олуговелых черноземах, смольницах (неэродированных и слабоэродированных); *14* — молодой дубовый лес; *15* — кустарник; *16* — луговая растительность на олуговелых коричневых лесных почвах (смольницообразных); *17* — луговая растительность на олуговелых коричнево-луговых почвах; *18* — луговая растительность на олуговелых черноземах-смольницах (неэродированных и слабоэродированных).

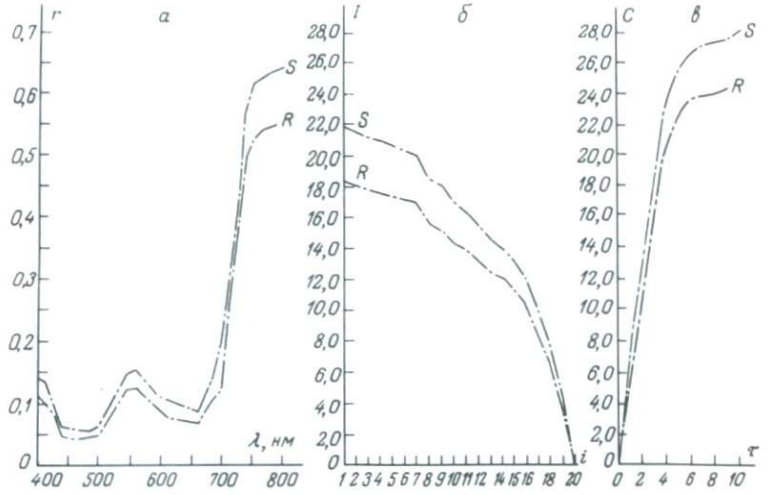


Рис. 4.4. Спектральные отражательные характеристики люцерны (22.X.1977).

а — спектральные отражательные характеристики люцерны на участках *S* и *R*; *б* — характеристики, трансформированные в соответствии с выражением (5.19); *в* — характеристики, трансформированные в соответствии с выражением (5.16).

зований; или применением подходящего вида трансформации, обладающей в определенном смысле фильтрующими свойствами.

На рис. 4.2 представлены два изображения одного и того же объекта, полученные в видимой (520 — 560 нм) и ближней инфракрасной (850 — 1050 нм) областях спектра, а на рис. 4.3 — карта района съемки. Видно, что водохранилище очень хорошо идентифицируется в инфракрасной области и почти не различается в выбранной зоне видимого диапазона. Поэтому при исследовании или картировании чистых водных площадей, бассейнов, рек и т.д. исключительно информативна зона ближнего инфракрасного диапазона.

На рис. 4.4,*а* представлены спектральные отражательные характеристики двух участков, засеянных люцерной, различить которые обычными методами классификации трудно, тем более имея в виду, что каждая характеристика задана своим доверительным интервалом. На рис. 4.4,*б* показаны те же две спектральные характеристики отражения после их трансформации в новом пространстве, в первом случае в соответствии с выражением (5.19), а во втором — в соответствии с (5.16). Видно, что в результате трансформации обе характеристики оказываются существенно отдаленными друг от друга, что делает возможными их классификацию и идентификацию без существенных затруднений.

На рис. 4.5,*а* приведены спектральные отражательные характеристики листьев растения с различным процентным содержанием воды, которые в

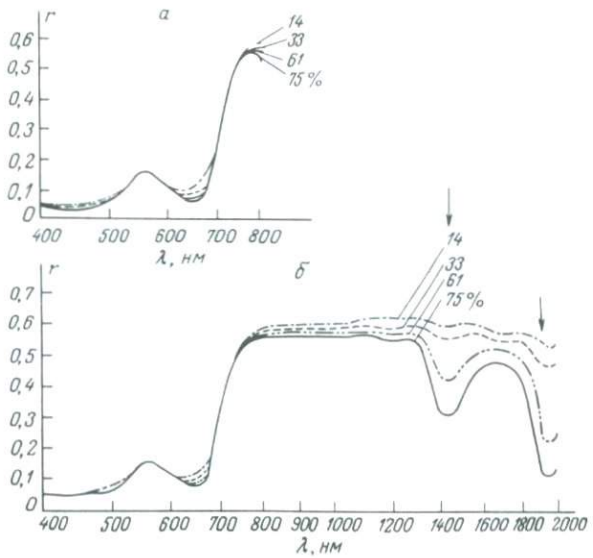


Рис. 4.5. Спектральные отражательные характеристики листьев растения с различной степенью влажности (%).

а — в видимом диапазоне; *б* — в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

диапазоне 400 — 800 нм практически не различаются, особенно при наличии и других образований. Расширение используемого диапазона в инфракрасную область до 2000 нм (рис. 4.5,*б*) позволяет произвести распознавание этих листьев без особых затруднений.

4.1.6. Оценка пространственной разрешающей способности съемочных систем дистанционного исследования Земли по первичным данным

Рассмотрим определение разрешающей способности по первичным данным, полученным при проведении космических съемок фотографической и телевизионной (сканирующей) аппаратурой.

Первичные данные включают негативы, получаемые на борту космических аппаратов при фотографировании Земли, и визуализированные данные, принимаемые на Земле с бортовых телевизионных (сканирующих) систем.

Разрешающая способность на местности L (в м) определяется выражением

$$L = (m \sum_{i=1}^{n} l_i/0{,}8n)10^{-6}, \qquad (4.34)$$

где m — знаменатель численного масштаба изображения; l_i — минимальная ширина продолговатого элемента изображения на снимке (в мкм); 0,8 — коэффициент перехода от одиночного штриха к пространственной решетке; n — число выбранных для измерения элементов изображения. Масштаб изображения определяется как отношение размеров подобных отрезков на снимке и на земной поверхности.

Выбор и измерение ширины наиболее узких протяженных элементов производятся с помощью микроскопа при наибольшем увеличении, что позволяет уверенно определять границы измеряемого объекта.

Выбранные для измерения элементы должны располагаться в различных участках снимков и иметь различную ориентацию. Следует выбирать элементы, у которых отношение длины к ширине составляет величину порядка 10. Ширина каждого элемента измеряется между серединами размытых контуров в предположении, что переход от одного уровня яркости к следующему симметричен относительно средней яркости. Рекомендуется ширину каждого элемента измерять хотя бы три раза в одном и том же месте. На основе всех измерений вычисляется среднее арифметическое значение ширины элемента, которое используется для определения величины L по формуле (4.34).

4.2. Представление многоградационных изображений в булевой алгебре

Градации яркости в изображении можно закодировать с помощью комбинаций элементов, формирующих данную булеву алгебру[1] $\mathscr{N}$, что значительно упрощает синтез многоградационных изображений [172].

Функция, представляющая яркость $B_i(t)$, может принимать значения $B_i \in D$, где D — конечное дискретное множество. Выше было сказано, что любое изображение неотличимо от квантованного, если число уровней достаточно большое.

Наиболее простым случаем такого изображения является черно-белое двуградационное изображение, удовлетворяющее законам двоичной булевой алгебры $\mathscr{B}$. В случае булевой алгебры, порожденной двумя элементами, получаются 2^2 градации яркости изображения, представленного $\mathscr{I}$. В случае алгебры, порожденной тремя элементами x, y и z, разрешен логический синтез 2^3-градационного изображения. В общем случае 2^n-градационное монохроматическое изображение можно реализовать с помощью булевой алгебры, порожденной n элементами.

---

[1] Булевой алгеброй называется множество A с двумя бинарными операциями $\vee$, $\wedge$ и одной унарной операцией $\bar{}$, которые вместе удовлетворяют основным постулатам [65]. То же самое будет подразумеваться в случае $\mathscr{A} = (A, \vee, \wedge, \bar{})$. Введем $\mathscr{A} = \langle \vee, \wedge, \bar{}, x, y \rangle$, где булева алгебра $\mathscr{A}$ представлена операторами и порождающими элементами x, y. Вообще $\mathscr{A}$ можно представить как $(3 + n)$, где n — число порождающих элементов.

При логическом синтезе многоградационных цветных изображений число порождающих элементов увеличивается с увеличением числа цветов, принятых в качестве основных, при равном количестве уровней яркости.

При композиции изображений на экране дисплея дизъюнктивные булевы полиномы покрывают произвольную часть всего экрана, создавая базу для синтезирования произвольного дискретного изображения этими уровнями. В этом случае булевы переменные функционально зависят от времени и синфазны с сигналами развертки изображения f_z и f_n.

Рассмотрим четырехградационное изображение I (рис. 4.6), которое получается в булевой алгебре, порожденной двумя элементами x и y. В этом случае входной алфавит содержит 2^2 элемента, которыми кодируются градации изображения I, и действуют следующие законы:

1) закон увеличения яркости

$$0 \vee x = x, \tag{4.35}$$

$$0 \vee y = y, \tag{4.36}$$

$$x \vee y = 1; \tag{4.37}$$

2) закон уменьшения яркости

$$(x \vee y) \wedge x = x,\ (x \vee y) \wedge y = y,\ x \wedge y = 0. \tag{4.38}$$

Эти законы основываются на основных постулатах в $\mathcal{K}$ и являются логико-алгебраической аналогией аналоговых принципов суммирования сигналов. В результате наложения двух элементов с яркостями x и y получается третий с большей яркостью $x \vee y$, соответствующий в $\mathcal{K}$ единичному элементу «1». Сразу же обратим внимание на одну особенность: в отли-

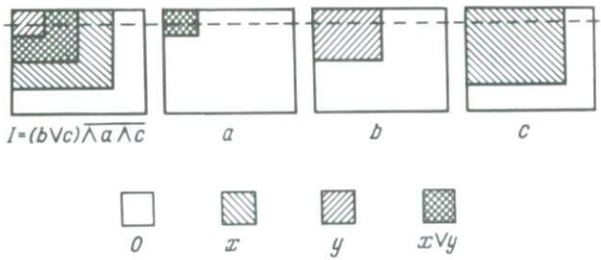


Рис. 4.6. Четырехградационное изображение.

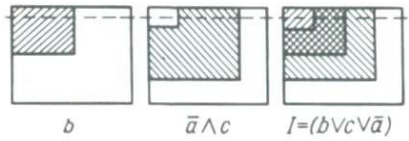


Рис. 4.7. Композиция изображения после трансформации.

чие от аналоговых принципов здесь из-за работы в дискретном ограниченном множестве B при наложении максимально допустимой в $\mathscr{A}$ яркости «1» $= x \vee y$ на любую другую a снова получаем максимум, т.е. $(x \vee y) \vee \vee a =$ «1» $\vee a =$ «1», что необходимо в конечной алгебре.

После применения элементарной минимизации по отношению к I получаем

$$I = (b \vee c) \wedge \overline{\bar{a} \wedge c} = (b \vee c) \wedge (\bar{a} \vee \bar{c}) = (b \wedge (\bar{a} \vee \bar{c})) \vee$$
$$(c \wedge (\bar{a} \vee \bar{c})) = b \wedge \overline{\bar{a} \wedge c} \vee c \wedge \bar{a} = b \vee c \wedge \bar{a}. \qquad (4.39)$$

Очевидно, что все принципы построения изображений остаются в силе, но основываются на постулатах новой алгебры.

На рис. 4.7 дана композиция I после трансформации. Ансамбль сигналов с амплитудой $I_i \in D$, где D — конечное дискретное множество, имеет период, равный одному кадру, а также синхронен и синфазен с частотами развертки f_z и f_n.

На рис. 4.8 показаны сигналы a, b и c как функции времени $t - x_i(t)$ и высоты h в изображении. Аналогичный вид имеют вертикальные по отно-

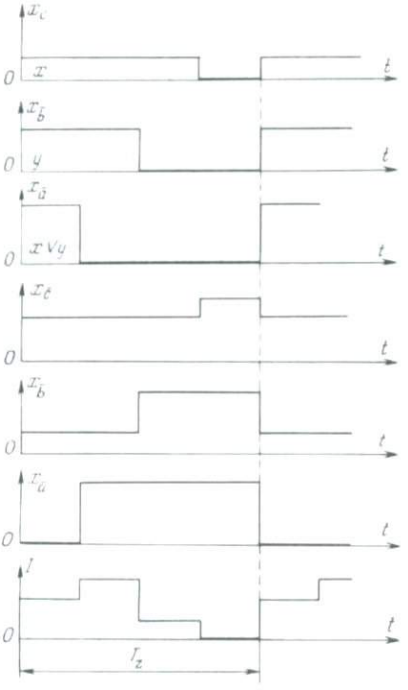


Рис. 4.8. Сигналы, полученные в результате сканирования по горизонтальной оси изображения, приведенного на рис. 4.7.

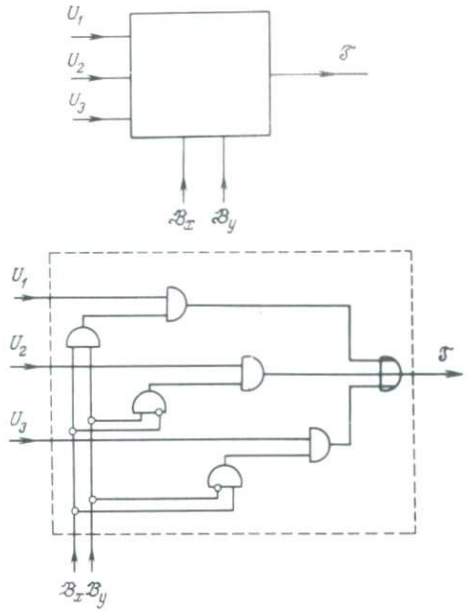


Рис. 4.9. Объединение общего многоуровневого сигнала.

шению развертки составляющие a, b и c — $y_i(t)$. Зависимость x_i и y_i от t дается операционной системой

$$y_i \to \begin{matrix} x_i \\ \downarrow \\ z_i \end{matrix},$$

где z_i представлено a, b и c и обеспечивает покрытие полного экрана изображением I [56].

В конкретном случае a, b и c зависят от вида $z_i = x_i \wedge y_i$. Все это позволяет производить построение отдельных участков изображения I в отдельных булевых подалгебрах $\mathscr{B}_i \subset \mathscr{I}$.

Можно работать преимущественно в подалгебрах $\mathscr{B}_z = \mathscr{B}_x$ и $\mathscr{B}_n = \mathscr{B}_y$ с целью формирования только сигналов вида b и $c \wedge \bar{a}$. Каждая булева подалгебра $\mathscr{I}$ в сущности представляет собой обычную двоичную алгебру саму по себе, которую можно реализовать средствами двухзначной логики. В каждой алгебре можно работать настолько независимо, насколько независим соответствующий участок конструированного изображения. Конструирование $\mathscr{I}$ производится в логическом блоке, дополняющем постулаты $\mathscr{B}_z$ и $\mathscr{B}_n$ до более общих $\mathscr{I}$, который по своей сущности тоже является двухзначной логикой. В этом случае объединение общего многоуровневого сигнала удобнее всего реализовать технически посредством дизъюнкции ($\vee$), осуществленной в соответствии с рис. 4.9.

Логический блок осуществляет соответствия, принятые в $\mathscr{A}$:

$$0 \to 0,\ y \to U_2,$$
$$x \to U_1,\ \text{«1»} = x \vee y \to U_3,$$

где x и y — порождающие элементы $\mathscr{A}$, причем x — порождающий элемент $\mathscr{B}_x = \mathscr{B}_z$ и y — элемент $\mathscr{B}_y = \mathscr{B}_n$. В данном случае $I_i \in \mathscr{A}$ представлено дизъюнктивными каноническими полиномами основных конъюнкций, осуществленных в логическом блоке. Все известные методы минимизации вполне применимы и в этом случае. Таким образом, любое изображение I можно представить как дизъюнктивный канонический полином соответствующей булевой алгебры $\mathscr{A}$. Логический блок в сущности конструирует изображение в пространстве x, y, I из отдельных изображений в x и y по определенному закону.

Подмножество S булевой алгебры $\mathscr{A}$ является булевой подалгеброй тогда и только тогда, когда оно замкнуто относительно $\wedge$, $\vee$ и $\bar{}$: $S \subset T$, $\forall a, b \in S \Rightarrow (a \wedge b \in S,\ \bar{a} \in S,\ \bar{b} \in S)$, тогда булева подалгебра от $\mathscr{A}$ будет $\mathscr{A} = (S, \vee, \wedge, \bar{})$. При соблюдении этих ограничений можно конструировать булевы подалгебры $\mathscr{A}$, $\mathscr{A}_i$ так, чтобы их композиция $\mathscr{A} = \mathring{i}\mathscr{A}_i$, где $\mathring{i}$ — соответствующий закон композиции, была удобна для практической реализации функций в ней. Тогда очевидно, что изображение можно представить как композицию соответствующих функций субизображений в подалгебрах $\mathscr{A}_i$, $I = \mathring{i}I_i$.

При порождающих элементах x, y и z порожденная булева алгебра $\mathscr{A} = \langle \vee, \wedge, \bar{}, x, y, z \rangle$ содержит 2^3-элементарных конъюнкций вида $\tilde{x} \wedge \tilde{y} \wedge \tilde{z}$ соответственно дизъюнкций — $\bar{a}$ и a или $\bar{a}$. Следовательно, в этой алгебре $\mathscr{A}$ можно обеспечить синтезирование изображения с восемью градациями яркости. Здесь удобнее работать с системой из трех булевых подалгебр $\mathscr{B}_x$, $\mathscr{B}_y$ и $\mathscr{B}_z$.

В случае изображения с k градациями яркости выбирается такая булева алгебра $\mathscr{A}$, в которой выполняется условие

$$2^{n-1} < k \leqslant 2^n, \tag{4.40}$$

где n — число порождающих алгебру элементов.

В случае $\mathscr{A}$ алгебры остаются в силе те же зависимости, что и в предыдущих случаях. Таким же образом $\mathscr{A}$ можно представить как композицию двоичных булевых алгебр $\mathscr{A} = \mathscr{B}_1 \vee \mathscr{B}_2 \vee \ldots \vee \mathscr{B}_n$ или в общем виде

$$\mathscr{A} = \bigcirc_{j=1}^{n} \mathscr{M}, \tag{4.41}$$

где $\mathscr{M}$ — булевы подалгебры $\mathscr{A}$, порожденные $m < n$ элементами, а $\bigcirc$ — закон композиции $\wedge$ или $\vee$ вида.

Вообще можно конструировать также булевы алгебры, порожденные бесконечным множеством элементов [62], но в данном случае для представления изображений они неподходящи из-за конечного числа градаций яркости или цветов, различаемых глазом человека.

4.3. Декомпозиция многоградационных изображений посредством субизображений

Когда многоградационное изображение синтезируется электронным способом, необходимо рассмотреть также обратную задачу [173] — разложение полученного электронным путем изображения $I = \bigcirc_{0<i\leqslant m-1} I_i'$ на так называемые субизображения

$$I_i' \in \{I_i' \mid i \in N_0 \wedge 0 \leqslant i \leqslant m-1 \wedge I_i'^{*} \in D\}, \tag{4.42}$$

где N_0 — множество натуральных чисел, включая нуль; m — число градаций в изображении I; $I_i'^{*}$ — градация I_i'; D — конечное дискретное множество градаций изображения I; $\bigcirc$ — закон композиции $\vee$ типа.

$I_i' \subset I$ можно представить как подалгебру изображения I, заданного в трехмерном пространстве многоградационного изображения

$$V = (\{(x, y, I_i') \mid (x, y) \in T \wedge I_i \in D\}, \rho), \tag{4.43}$$

где x и y — геометрические координаты I; T — замкнутая область, характеризующая телевизионный экран; ρ — соответствующая метрика. При этом

$$\Gamma_i = \{(x, y) \mid (x, y) \in T \wedge I_i'^{*} = \text{const}\},$$
$$0 \leqslant i \leqslant m-1,\ i \in N_0,\ m \leqslant 2^n, \tag{4.44}$$

где n — число элементов, порождающих булеву алгебру $\mathcal{M}$, в которой изображение I представлено в виде функции (рис. 4.10); γ_i — проекция соот-

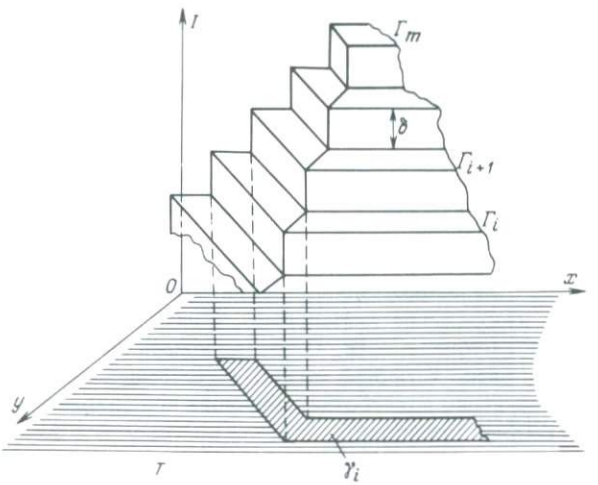


Рис. 4.10. Представление изображения как совокупности изображений.

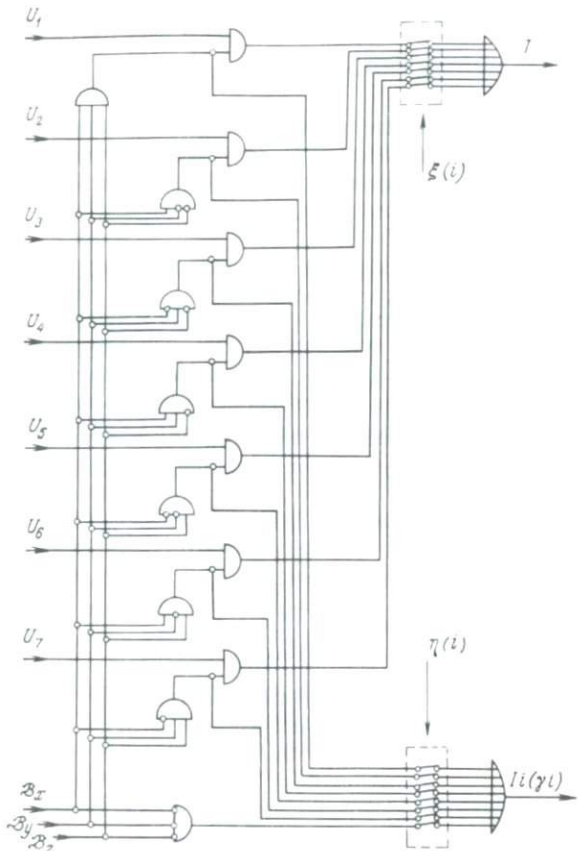


Рис. 4.11. Схема логического блока для случая восьмиградационного изображения с возможностью вывода субизображений.

ветствующей поверхности Γ_i на плоскость xOy, т.е. представление соответствующего субизображения I_i в виде обычного двухградационного черно-белого изображения.

Вообще субизображения можно представлять в двумерных булевых подалгебрах $\mathcal{B}_i \subset \mathcal{A}$, порожденных любой буквой входного алфавита A, описывающего изображение I. Например, в случае четырехградационного изображения I в алгебре $\mathcal{A} = \mathcal{B}_x \circ \mathcal{B}_y$, порожденной x и y, субизображения I_i' (их число равно четырем) можно, естественно, представить как бинарные булевы функции в их соответствующих подалгебрах $\mathcal{B}_i'$, порожденных соответственно

$$x \wedge y,\ \bar{x} \wedge y,\ x \wedge \bar{y},\ \bar{x} \wedge \bar{y}. \tag{4.45}$$

На рис. 4.11 представлен логический блок, дающий возможность вывода субизображений в случае восьмиградационного изображения. Здесь $\xi(i)$ и $\eta(i)$ — функции переключения, определяющие по заданному номеру i соответствующие субизображения или необходимую их комбинацию. Функция $\eta(i)$ реализует соответствующее субизображение I_i' в виде двухградационного изображения, т.е. представляет черно-белую проекцию γ_i на xOy (рис. 4.10). Функция $\xi(i)$ реализует соответствующее субизображение I_i' в виде двухградационного «окрашенного» изображения, т.е. изображения, в котором «1» соответствующей алгебры $\mathscr{E}_i'$ сохранила свое значение таким же, как в многоградационном изображении I. В обоих случаях схемы «или» осуществляют необходимую композицию соответствующих субизображений

$$I'' = I_i' \vee I_{i+1}' \vee \ldots \vee I_k' \vee \ldots \vee I_l' . \tag{4.46}$$

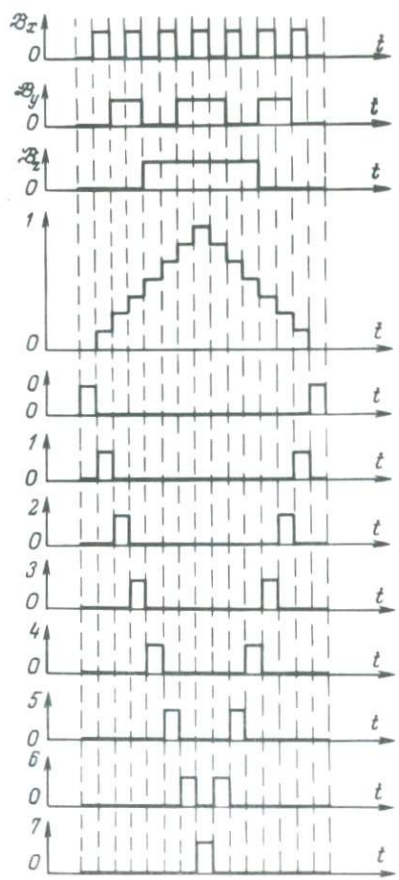


Рис. 4.12. Временная диаграмма.

Композиция иногда важнее самих субизображений; особенно это касается контрастного сравнения отдельных изображений. Композиционное субизображение I_i' можно получить как соответствующую ступень композиции данной подалгебры

$$\mathscr{A}_i' = \langle \wedge, \vee, \bar{}, \tilde{x} \circ \tilde{y} \circ \tilde{z} \rangle \tag{4.47}$$

без ограничений в законе композиции.

На рис. 4.12 показана часть временно́й диаграммы для некоторого случая $\mathscr{I}$, в котором субизображения представляются как двухградационные черно-белые изображения. Когда необходимо осуществить контрастное сравнение между отдельными субизображениями $I^{(k)}$ изображения I, т.е. когда применяется функция переключения $\xi(i)$, временна́я диаграмма совпадает с диаграммой, показанной на рис. 4.12, но уровни $\forall i$ сохраняют свое значение такими же, как в I,

$$\xi(i) \overset{t}{\equiv} \eta(i). \tag{4.48}$$

Причем обе функции переключения тождественны по отношению непрерывного времени системы t.

4.4. Композиция и декомпозиция цветных и черно-белых изображений

Цветовую информацию в рассматриваемом изображении можно представить посредством трансформации общего изображения в многоэлементной булевой алгебре [183, 184].

Пусть I_B — изображение, представленное в булевой алгебре, порожденной элементом x, $\mathscr{A} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x \rangle$, в которой возможно существование изображений с двумя градациями яркости. I_G — бинарное изображение, представленное в булевой алгебре $\mathscr{A}_G = \langle \wedge, \vee, \bar{}, y \rangle$. Новое изображение I_{BG} в алгебре $\mathscr{I}_{BG} = \mathscr{A}_B \vee \mathscr{A}_G = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x, y \rangle$, генерированной порождающими элементами обеих подалгебр, является в сущности четырехградационным, хотя в чисто яркостном отношении градаций три. Если ввести обобщенную градацию как выражение изменения некоторого из параметров изображения, например яркости или нового цвета, то тогда в $\mathscr{I}_{BG}$ существуют четыре различные градации, отличающиеся одним из двух признаков.

На рис. 4.13 показан логический блок. Каждая градация B формирует с постоянной градацией другого цвета G новый цвет.

В наиболее часто встречаемом случае цветных телевизионных изображений требуется композиция трех монохроматических изображений. Пусть даны изображения I_R, I_G и I_B в трех основных цветах R, G и B, каждое из которых является двухградационным бинарным изображением (рис. 4.14). Сложные алгебры $\mathscr{A}_B = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x \rangle$, $\mathscr{A}_G = \langle \wedge, \vee, \bar{}, y \rangle$, $\mathscr{A}_R = \langle \wedge, \vee, \bar{}, z \rangle$, в которых эти изображения представлены, порождены одним элемен-

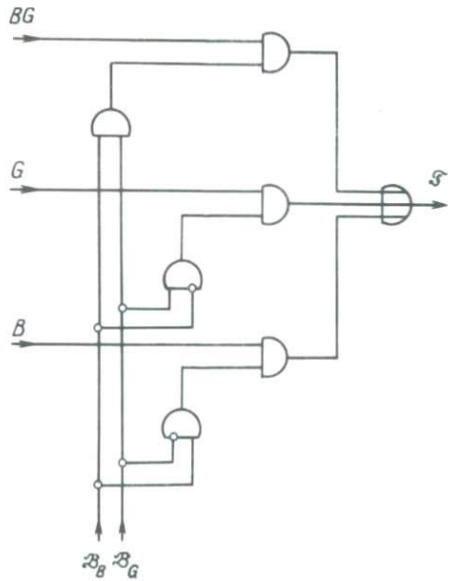


Рис. 4.13. Логический блок.

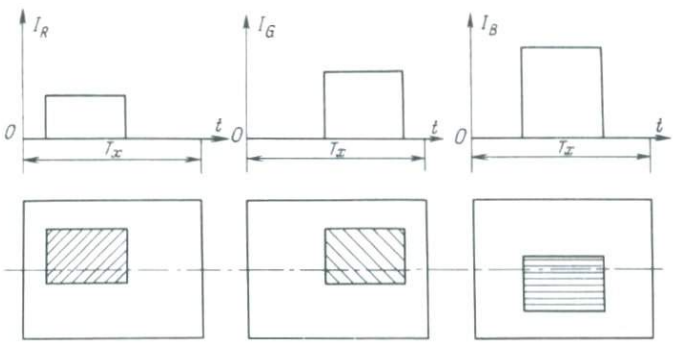


Рис. 4.14. Композиция трех монохроматических изображений.

том x, y, z, представляющим собой единичную яркость каждого из цветов R, G, B. При композиции этих двоичных изображений получаемое сложное многоградационное изображение $I_{BGR} = I_B \circ I_G \circ I_R$ (рис. 4.15) содержит три основные цвета и соответствующие комбинационные цвета композиции. Полученное композиционное изображение I_{BGR} можно задать в алгебре $\mathcal{A} = \mathcal{B}_B \circ \mathcal{B}_G \circ \mathcal{B}_R = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x, y, z \rangle$, генерированной суммой порождающих элементов алгебры монохроматических изображений I_B, I_G и I_R, т.е. I_{BGR} генерировано яркостными градациями трех основных цветов B, G и R.

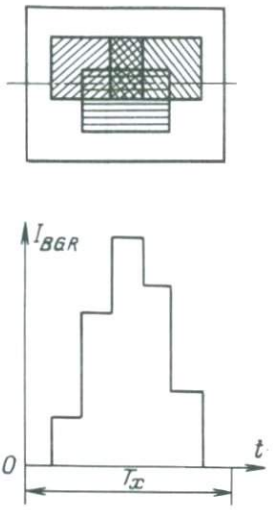


Рис. 4.15. Цветное изображение, полученное из трех монохроматических изображений.

Вообще, если даны монохроматические изображения I_B, I_G и I_R в соответствующих цветах B, G и R с конечным числом градаций яркости, то соответствующие им алгебры будут иметь вид $\mathscr{B} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, b_1, \ldots, b_k \rangle$, $\mathscr{G} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, g_1, \ldots, g_l \rangle$, $\mathfrak{R} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, r_1, \ldots, r_m \rangle$. Индексы k, l и m обозначают число элементов, порождающих соответствующую алгебру. В них возможно существование изображений соответственно с 2^k, 2^l, 2^m градациями (яркостными и (или) цветовыми для каждого из них).

Изображение $I_{BGR} = I_B \circ I_G \circ I_R$, полученное при композиции трех монохроматических изображений, можно представить в алгебре $\mathfrak{I} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, b_1, \ldots, b_k, g_1, \ldots, g_l, r_1, \ldots, r_m \rangle$, генерированной суммой порождающих подалгебры элементов. В этом случае число разрешенных градаций составляет 2^{k+l+m} в смысле обобщенных градаций. Часть этих градаций является различными степенями яркости постоянного цвета, тогда как члены другой группы отличаются главным образом различными цветами, которым принадлежат. В случае чистых основных цветов B, G и R (с насыщенностью 100%) насыщенными будут также комбинационные цвета типа D_iE_j, где $D \in \mathscr{E}$, $E \in \mathscr{E} = \{B, G, R\}$, а i и j — номера соответствующих градаций яркости основных цветов. В случае трех элементов D_i, E_j, L_p имеем $D \in \mathscr{E}$, $E \in \mathscr{E}$, $L \in \mathscr{E}$, причем каждый элемент принадлежит различному цвету, а i, j и p — номерам градаций яркости этих цветов. Несмотря на 100%-ную насыщенность каждого основного цвета, если выполняется закон аддитивности цветообразования $W = aB + bG + cR$, композиционный цвет не будет иметь 100%-ной насыщенности. В вышеуказанном равенстве W — результирующий белый цвет в системе; a, b и c — весовые коэффициенты скалярных функций интенсивности $B \equiv h_B(x, y)$, $G \equiv h_G(x, y)$ и $R \equiv h_R(x, y)$ в произвольной точке изображения $(x, y) \in \Gamma$. Обычно коэффициенты a, b и c

постоянны и не зависят от системы. Комбинационный цвет $D_iE_jL_p = iB + jG + pR = (a + \varepsilon)B + (b + \varkappa)G + (c + \mu)R = W + \varepsilon\varkappa\mu$ будет содержать некоторое количество белого цвета. Следовательно, степень насыщенности π цветов получается в зависимости от взаимоотношения трех скалярных функций яркости основных цветов. Для ненасыщенных цветов из основного множества $\mathscr{E} = \{B', G', R'\}$ сказанное выше остается в силе. Это относится также и к соответствующим двухэлементным комбинациям D_iE_j. Вообще соответствие между законом композиции алгебр $\mathscr{B}$, $\mathscr{E}$ и $\mathscr{R}$ и видом новых обобщенных градаций в $\mathscr{I}$ можно выбрать произвольным образом. В частности, возможно:

— чтобы все новые полученные комбинационные цвета имели 100%-ную насыщенность;

— чтобы различные цвета имели одинаковые яркости, т.е. обобщенная градация превратилась бы в цветовую разницу (градации);

— построение произвольного соответствия между яркостями цветов монохроматических изображений и композиционного изображения I_{BGR} и $\mathscr{I}$ (не выполняя основное колориметрическое уравнение);

— совпадение обобщенных градаций со степенью изменения насыщенности π;

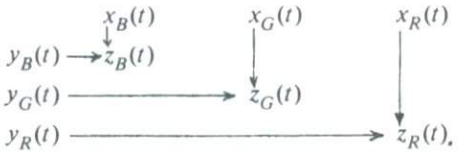
— переход от цветного изображения $\mathscr{E}$ к черно-белому BW и наоборот, т.е. окрашивать посредством произвольного соответствия $\mathscr{E} \to BW$ так, что $\tau(\mathscr{E}) = BW$ и $\tau^{-1}(BW) = \mathscr{E}$.

При использовании наиболее распространенного метода получения многоцветного изображения, применяемого в цветном телевидении, комбинационные цвета получаются на основе колориметрического уравнения, причем аддитивное смещение трех компонент — основных монохроматических изображений B, G и R — осуществляется на самом экране. Кроме того, три изображения непрерывны во времени и каждое из них получается с помощью отдельного электронного прожектора. На рис. 4.14,*а* показан сигнал одной строки, проходящей через центр изображения (рис. 4.14,*б*) I_{BGR}, полученного посредством аддитивного смещения монохроматических изображений I_B, I_G и I_R. Композиционное изображение I_{BGR} в алгебре $\mathscr{I} = \mathscr{B} \circ \mathscr{E} \circ \mathscr{R}$ превращается в одно целое, каждый элемент которого строго определен во времени и пространстве. Это изооражение (рис. 4.15) можно реализовать управляющей функцией $z(t, \lambda)$, зависящей от двух аргументов — времени t и соответствующего цвета λ:

$$y(t, \lambda) \to \begin{matrix} x(t, \lambda) \\ \downarrow \\ z(t, \lambda) \end{matrix} . \qquad (4.49)$$

Второй аргумент также можно представить в зависимости от времени $\lambda = \lambda(t)$.

Для показанного на рис. 4.15 изображения имеются три операционные схемы (соответственно управляющие функции), действующие независимо одна от другой



Из-за строго аддитивного закона схема на рис. 4.11 будет формировать определенный треугольник цветового локуса, тогда как при композиции изображения I_{BGR} (рис. 4.15) возможность почти произвольного соответствия между законом композиции и обобщенными градациями допускает воспроизведение всех цветов.

При $\mathscr{E} \to BW$, несмотря на полное соответствие многоэлементных алгебр $\mathscr{N}^c = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x_1, \ldots, x_n \rangle$, $\mathscr{N}^{BW} = \langle \wedge, \vee, \bar{}, y_1, \ldots, y_n \rangle$ и $\mathscr{N}^c \sim \mathscr{N}^{BW}$, в которых получается композиционное изображение и одинаковое число градаций 2^n, субъективная информативность изображения уменьшается в случае черно-белого варианта. Уменьшение является результатом того, что глаз различает весьма небольшое число чисто яркостных градаций, хотя, строго говоря, информация в обоих случаях одинакова $I_m = Nn$, где N — число элементарных областей дискретизации изображения I, а n — число порождающих алгебру элементов.

Когда имеется одна управляющая функция $z(t, \lambda)$, существует возможность выделения различных изображений, характеризующихся некоторой постоянной градацией.

4.5. Электронная система визуализации и интерпретации видеоданных

Одними из основных задач при интерпретации видеоданных, получаемых с различных участков земной поверхности, являются выявление однородных участков, определение некоторых параметров этих участков и их классификация. Квантование и кодирование монохроматических изображений в условных цветах позволяет решить эту задачу интерпретации с помощью системы оператор — ЭВМ.

Рассмотрим электронную систему интерпретации видеоданных, основанную на аналоговых методах преобразования изображений [80].

Как было показано, трансформация при цветовом кодировании изображения эквивалентна описанию объектов в многомерном пространстве, причем градациям серого монохроматического изображения соответствуют параметры яркости, цвет и насыщенность цвета нового изображения, полученного в условных цветах.

Электронная система включает в себя специализированную телевизионную камеру, с помощью которой выбирается масштаб полученного изображения и трансформируется основное фотоизображение в эквивалентный электрический сигнал. В электронных блоках системы полученное изображение квантуется и кодируется в условных цветах. Система дает возмож-

ность разложить основное монохроматическое изображение на субизображения, получить граничные участки областей субизображений, выделить выбранную строку или субизображение, наблюдать соответствующие осциллограммы на экране ЭЛТ и определить площадь, занимаемую данным субизображением.

Основное изображение можно рассматривать как монохроматический статистический объект на плоскости, представляя его как функцию яркости $B(x, y)$ или плотности $D(x, y)$ двух пространственных координат x и y. Оно инвариантно по отношению к преобразованию способа развертки и может быть адекватно представлено своим одномерным описанием во времени:

$$B(t) = B[f_x(t), f_y(t)], \tag{4.50}$$

где $f_x(t)$ и $f_y(t)$ — соответствующие функции развертки по обеим пространственным координатам x и y.

На выходе анализирующего блока формируется видеосигнал, амплитуда которого является функцией текущих значений яркости:

$$U(t) = U[B(t)] = U\{B[f_x(t), f_y(t)]\}. \tag{4.51}$$

Превращение выходного сигнала анализирующего блока в цифровой код можно осуществить посредством аналого-цифрового преобразования вида

$$U(t) \xrightarrow{q} Q = \{I_i' : [U(t) \in [(i-1)\Delta, i\Delta] \wedge (i \in N)]\}, \tag{4.52}$$

т.е. посредством функции $q[U(t)]$ осуществляется квантование сигнала по уровням.

Разложение изображения I на субизображения можно осуществить квантованием q видеосигнала $U(t)$ при числе уровней квантования n и множестве N. Субизображения $I_i'(t) \in Q$ характеризуются соответствующими эквипотенциальными поверхностями ρ в трехмерном пространстве многоградационного изображения I

$$V = (\{[X, Y, B_i] : [(X, Y) \in T] \wedge (B_i \in D)\}, \rho), \tag{4.53}$$

где T — область определения изображения I; X, Y — поверхности измерения; D — множество дискретных яркостей B_i, равномощное множеству $Q \approx D$.

Субизображения I_i' могут быть представлены в бинарных булевых подалгебрах $\mathscr{B}_i \subset \mathscr{M}$, не всегда свободных, порожденных каждым из I_i', причем $\mathscr{M}$ — алгебра, в которой представлено изображение. Имеет место неравенство $n \leqslant 2^m$, где m — число порождающих $\mathscr{M}$ элементов.

Даны изображения I_B, I_G и I_R, каждое из которых является двухградационным бинарным изображением. Соответствующие алгебры $\mathscr{B}_B = \langle \wedge, \vee, \bar{}, x \rangle$, $\mathscr{B}_G = \langle \wedge, \vee, \bar{}, y \rangle$ и $\mathscr{B}_R = \langle \wedge, \vee, \bar{}, z \rangle$, в которых представлены эти изображения, порождены одним элементом (соответственно x, y, z), представляющим собой единичную яркость каждого изображения. При композиции этих трех бинарных изображений получается сложное много-

градационное изображение $I_{BGR} = I_B \circ I_G \circ I_R$, содержащее три основные цвета и соответствующие комбинационные цвета. (Как частный случай, могут получиться цвета, которые возникают вследствие аддитивного наложения изображений I_B, I_G и I_R одно на другое и «0».) Полученное таким образом композиционное изображение I_{BGR} может быть задано в алгебре $\mathscr{I} = \mathscr{B}_B \circ \mathscr{B}_G \circ \mathscr{B}_R$ или $\mathscr{I} = \langle \wedge, \vee, \overline{\ }, x, y, z \rangle$, которая порождена суммой порождающих элементов подалгебр монохроматических изображений I_B, I_G и I_R. В этой алгебре возможно существование изображений I с 2^3 яркостными и цветовыми градациями, так как изображение I_{BGR} генерировано градациями яркости трех основных цветов B, G и R.

При окрашивании монохроматического изображения I в «фальшивых цветах» посредством выделения субизображений и их цветового кодирования осуществляется преобразование

$$I \to U(t) \to Q \to \mathscr{I}_c, \tag{4.54}$$

где $\mathscr{S}$ — множество цветов.

Полученное композиционное цветовое изображение можно рассматривать как подизображение (композицию субизображений) первоначального изображения I, т.е. $I_c \subset I$, что показывает, что при таком цветовом кодировании выделяется часть всего изображения с целью подчеркивания определенных его элементов.

При интерпретации необходимо измерять площадь данного изображения I. Наиболее подходящим для этой цели является выделение соответствующего подизображения $I^{(k)} < I$, $I^{(k)} = \dot{\cup} I'_i$ (в частном случае субизображения), представленного композицией соответствующих бинарных субизображений I'_i.

Один из точных методов измерения площади связан с преобразованием $S \to t$, где S — площадь или другой параметр, подлежащий измерению, а t — время, в течение которого осуществляются функции развертки $f_x(t)$ и $f_y(t)$. Для данной анализирующей системы с z строками имеет место равенство $zT_x = T_y$, где T_x и T_y — соответствующие периоды функций развертки по строкам и кадрам. Схема измерения представляется в виде

$$S = M \sum_{t=0}^{T_y} \Delta_t, \tag{4.55}$$

где M — масштаб, характерный для данного изображения в системе; Δ_t — интервалы непрерывного времени, в течение которых измеряемое подизображение $I^{(k)} \neq 0$ или $\forall \Delta_t \in T_x \in T_y$, $I^{(k)}_{(\Delta_t)} = 1$ за весь период $I(t) = I(t + T_y)$. Измерение можно осуществить по схеме

$$S = M \sum_{i=1}^{k} \sum_{t=0}^{T_y} \delta_{it}, \tag{4.56}$$

причем время дискретизировано в отдельных строках, но непрерывно на

одной строке $t \in (0, T_y)$. Для технической реализации удобно измерять дискретные интервалы, из-за чего вводится дискретное время также по строкам. Выражение приобретает вид

$$S = M \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{l} d_{ij}, \tag{4.57}$$

где d = const — шаг дискретизации времени в течение горизонтальной развертки; l — число интервалов на d, во время которых $I^{(k)} = 1$ в течение одной активной строки.

Чтобы измерить общую площадь, производится суммирование k строк в течение T_y (максимального периода подизображения). При этом выражение измерения видоизменяется следующим образом:

$$S = M \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{l} (d_{ij} = \delta_{ij} \wedge \pi_j), \tag{4.58}$$

где π_j — тактовая последовательность импульсов с частотой $f_T = c/\varepsilon T'_x$; T'_x — активная длительность одной строки; ε — ошибка.

При представлении изображений на телевизионном экране, а также при идентификации различных объектов особое значение приобретает определение геометрических размеров и проведение экспрессного визуального анализа. Из числа преимуществ растровой телевизионной системы можно использовать свойства функций развертки $f_x(t)$ и $f_y(t)$. Возможной реализацией этих требований является выделение определенной строки изображения и его визуализации.

В случае телевизионных растровых систем изображение можно представить в виде [77]

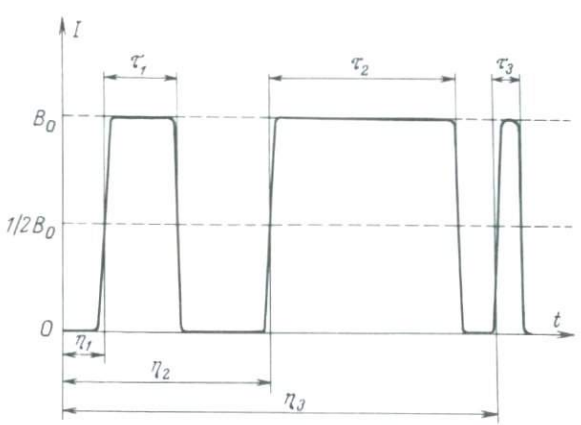


Рис. 4.16. Вид информации, соответствующей произвольной строке анализируемого изображения.

$$I = \sum_{z=1}^{N} \sum_{i=1}^{I} B_0 \left[\frac{k(t - \eta_{zi})}{1 + k(t - \eta_{zi})} - \frac{k(t - \eta_{zi} - \tau_{zi})}{1 + k(t - \eta_{zi} - \tau_{zi})} \right], \qquad (4.59)$$

$$t - \eta_{zi} \geqslant 0, \; t - \eta_{zi} - \tau_{zi} \geqslant 0,$$

где z — число строк.

На рис. 4.16 представлена информация, соответствующая j-й строке анализируемого изображения. В действительности это последовательность прямоугольных импульсов с длительностью τ_i и смещением от начала строки η_i, которые зависят от характера анализируемого изображения и уровня яркости.

Блок-схема системы преобразования и интерпретации аэрокосмических видеоданных показана на рис. 4.17[1]. Она включает следующие блоки и устройства: специализированную телевизионную камеру для получения черно-белого изображения, которая преобразует монохроматическое оптическое изображение в эквивалентный электрический сигнал и позволяет выбрать масштаб наблюдаемого изображения; синхрогенератор, обеспечивающий синхронную работу всей системы; черно-белый телевизионный монитор для наблюдения и контроля анализируемого камерой изображения; цветной телевизионный монитор, выполняющий роль выходного устройства системы, визуализируя преобразованную видеоинформацию при соответствующем цветовом кодировании.

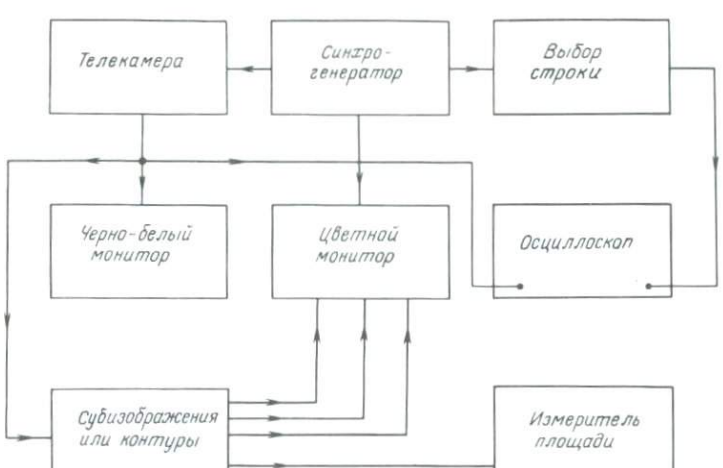


Рис. 4.17. Блок-схема системы преобразования и интерпретации аэрокосмических изображений.

[1] Система разработана в ЦЛКИ БАН Б. Пеевым.

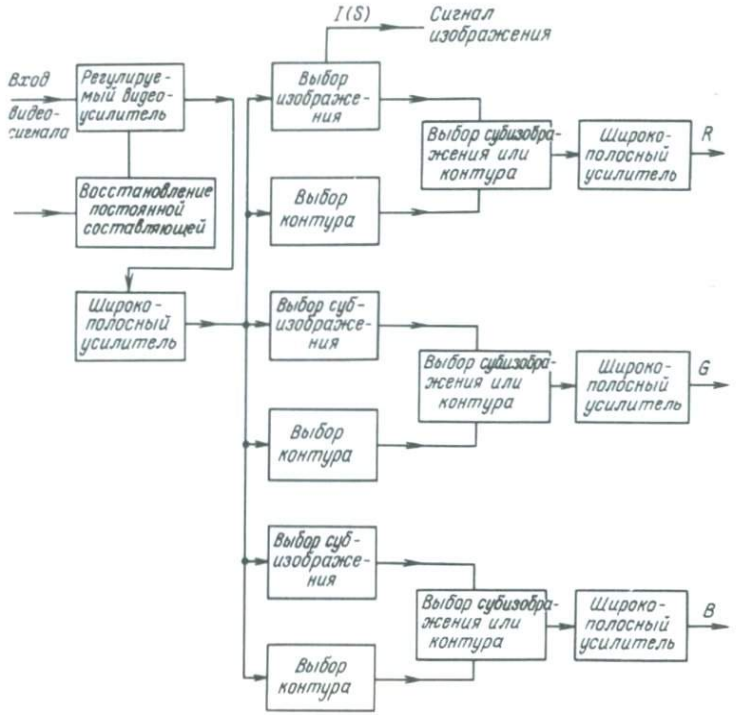


Рис. 4.18. Схема блока квантования видеоинформации, выбора субизображений или их контуров и цветового кодирования.

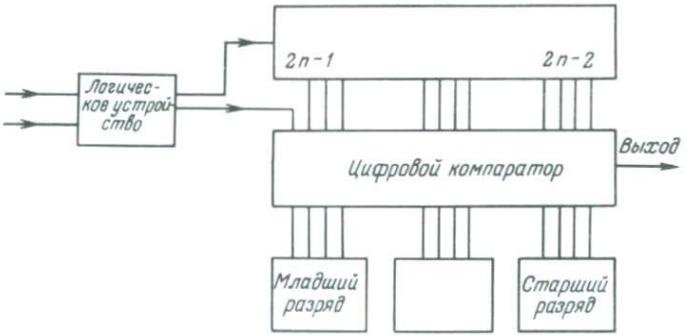


Рис. 4.19. Блок измерения площади выбранного субизображения.

Наиболее существенным узлом системы является блок квантования видеоинформации, выбора субизображений или их граничных областей (контуров) и их цветового кодирования. Его блок-схема представлена на

рис. 4.18. Видеосигнал, полученный на выходе телевизионной камеры, усиливается, восстанавливается его постоянная составляющая, после чего видеосигнал квантуется на N уровней (в конкретном случае $N = 64$). Устройство дает возможность наблюдать одновременно три субизображения или их контуры, или комбинацию субизображений и контуров при произвольном выборе уровня яркости в пределах 1 — 64. Каждое из наблюдаемых субизображений окрашивается в различный цвет. Полученные субизображения окрашиваются в различный цвет, выходной сигнал визуализируется на экране цветного телевизионного монитора.

Блок выбора произвольной строки наблюдаемого изображения позволяет выделять произвольную строку изображения или субизображения, визуализированного на экране цветного монитора. Осциллограмму выбранной строки можно наблюдать на экране осциллоскопа, что облегчает идентификацию областей и объектов на изображении.

Блок измерения площади выбранного субизображения (рис. 4.19) дает возможность измерять и обеспечивать визуальную индикацию площади, занимаемой выбранным субизображением.

На рис. 4.20 представлены синтезированные изображения, сфотографированные с экрана электронной системы интерпретации видеоданных. Изображения, представленные на рис. 4.21, получены многоспектральной камерой МКФ-6М во 2, 4 и 6-м каналах и синтезированы в Институте космических исследований АН СССР с помощью прибора МСП-4.

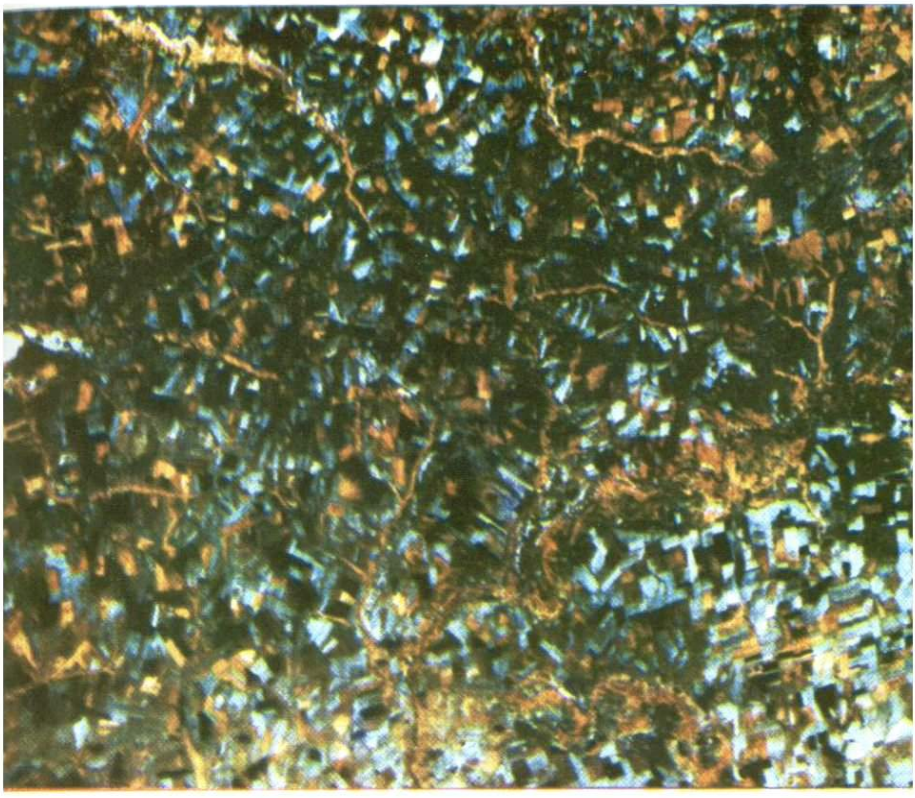
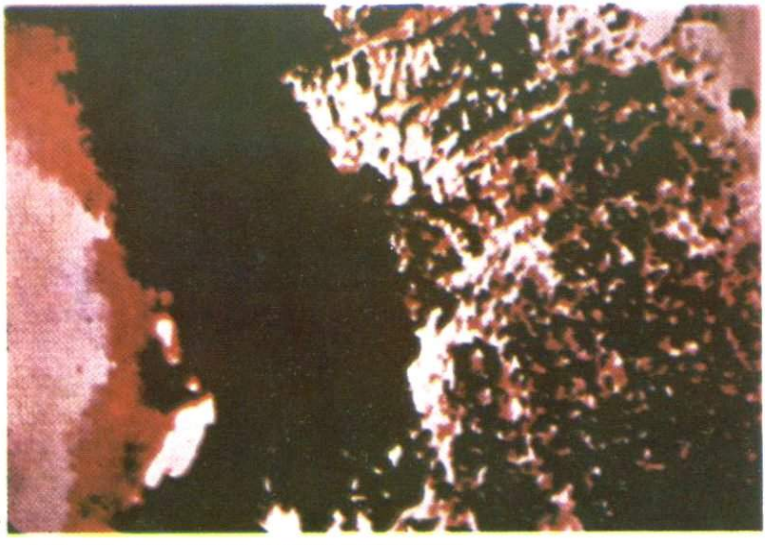
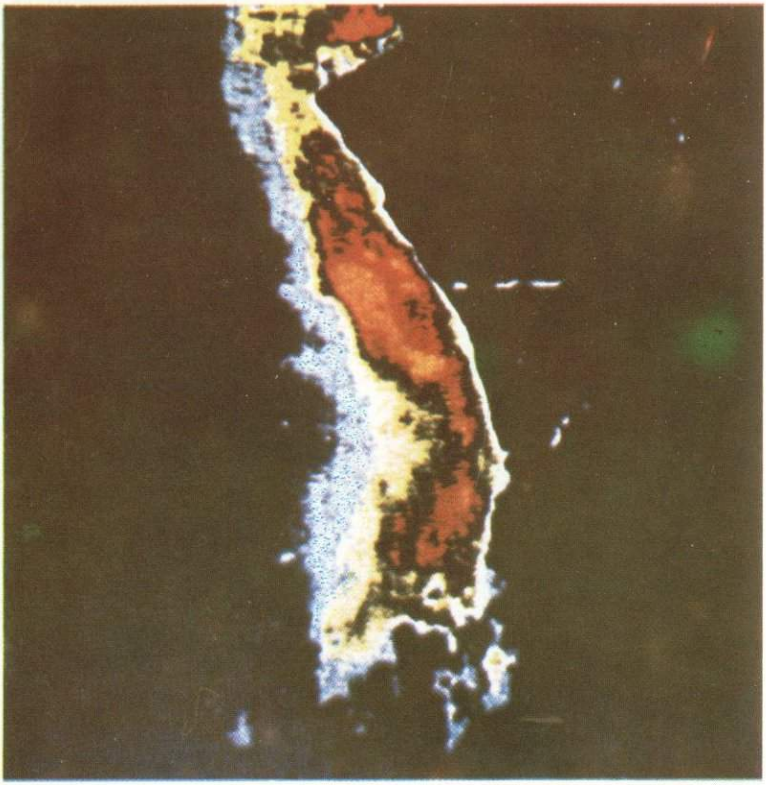


Рис. 3.16. Синтезированное в условных цветах многозональное изображение Калачской возвышенности в междуречье Дона и Хопра (МСС «Фрагмент»).



а

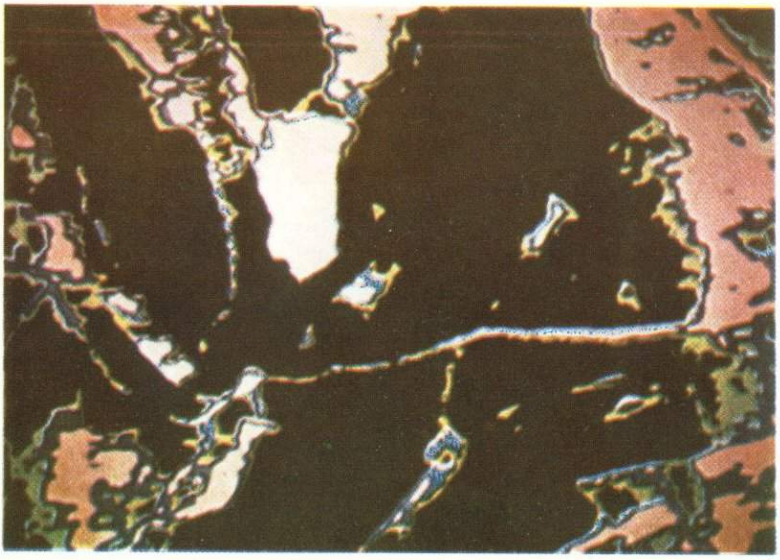
Рис. 4.20. Синтезированное цветное изображение.



б

Рис. 4.20. (продолжение)

б-часть района Черного моря



в

Рис. 4.20. (продолжение)

в — эталонный участок Патриарх Евтимово Пловдивского полигона.

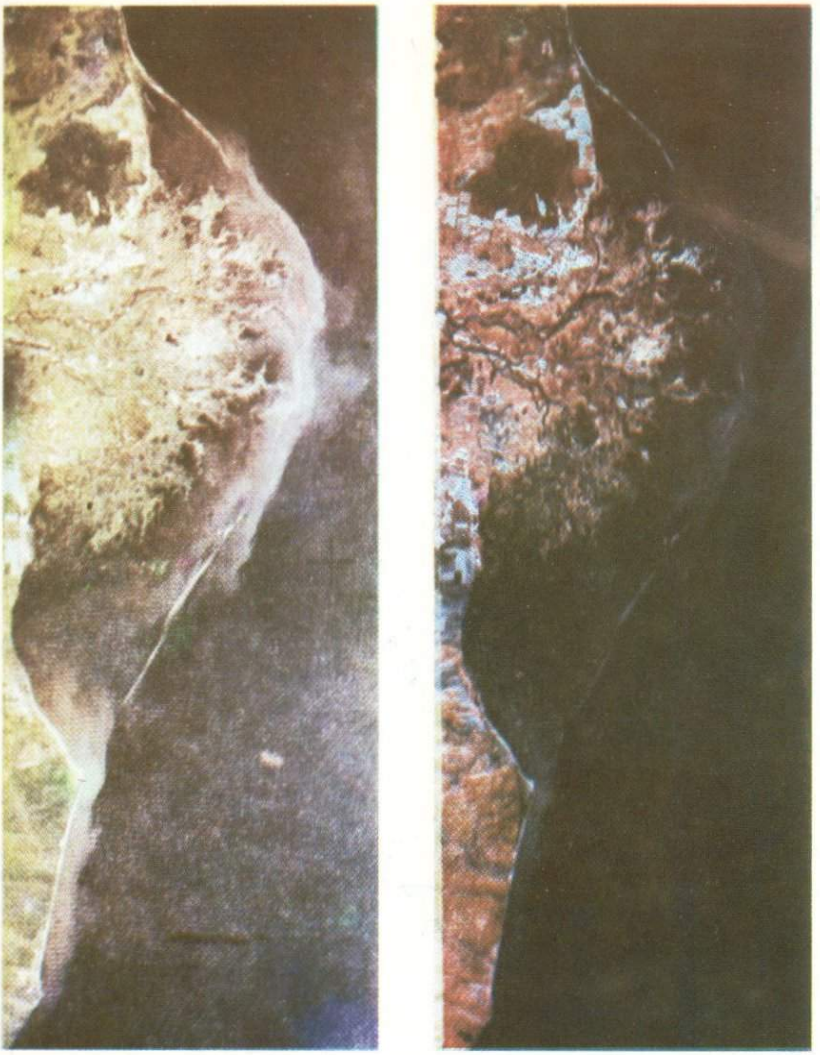


Рис. 4.21. Синтезированные цветные изображения дельты р. Селенга (оз. Байкал).

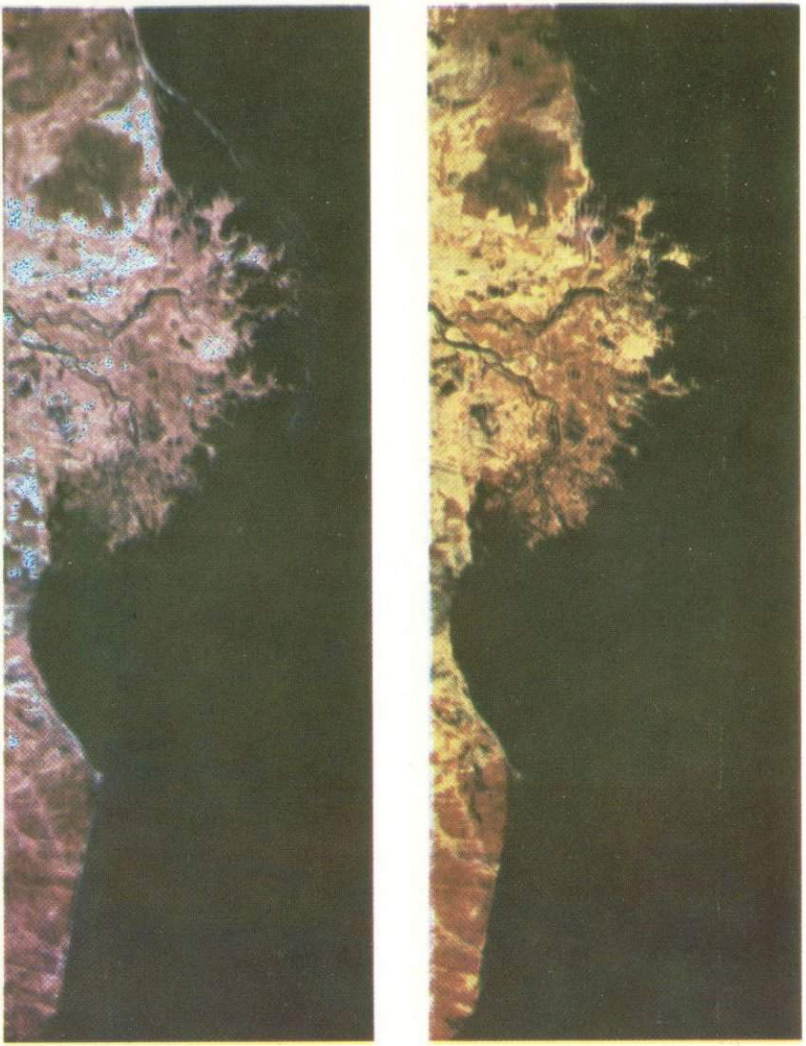


Рис. 4.21. (продолжение)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНЫМ ОТРАЖАТЕЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

5.1. Информационные характеристики природных образований

Спектр солнечной радиации, отраженной естественными природными образованиями, непрерывен. Однако при интерпретации спектральных отражательных характеристик исследуются их значения для конечного числа длин волн, причем чаще всего в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Множество значений коэффициентов отражения для этих длин волн формирует дискретизированную спектральную характеристику. Дискретизированные таким образом отражательные характеристики содержат информацию, позволяющую группировать естественные природные образования в классы объектов со схожими отражательными характеристиками. Однако для некоторых длин волн доверительные интервалы различных классов объектов могут пересекаться. В таком случае для идентификации классов объектов необходимо использовать методы теории распознавания образов.

Итак, каждое природное образование можно описать дискретизированной отражательной характеристикой $r(\lambda_i)$, где r — коэффициент отражения; λ_i — длина волны; $i = 1, 2, \ldots, n$. Образования со схожими отражательными характеристиками формируют класс объектов. Подобие объектов выражается в статистической близости $r(\lambda_i)$, т.е. в существовании для каждого природного образования распределения $r(\lambda_i)$ вокруг некоторой средней отражательной характеристики $r(\lambda_i)$, которую в дальнейшем для простоты будем обозначать как $r(\lambda_i)$. Заметим, что результаты исследований, проведенных различными авторами, дают основание считать эти распределения нормальными [51, 157] или суммой нормальных распределений.

Пусть дано множество $M \equiv \{r_j(\lambda_i)\}$ из $j = 1, 2, \ldots, N$ классов объектов. Появление объектов в границах класса j для фиксированной длины волны λ_i будет подтверждено, если полученное значение характеристики отражения попало в доверительные границы $r_j(\lambda_i) \pm \Delta r_j(\lambda_j)$ класса j. Однако этот объект может с соответствующей вероятностью принадлежать любому из других $N - 1$ классов множества M. В данном случае это условные вероятности $p_{ijk}(r_{ik}/r_{ij})$ того, что при фиксированной λ_i и при значении r в доверительном интервале j-го класса в действительности имеется объект k-го класса. Очевидно, что наличие вероятностей $p_{ijk} \neq 0$ при $j \neq k$ приводит при обработке данных к неопределенности, причем полная неопределенность множества характеризуется матрицами $A_i = \|p_{ijk}\|$ услов-

ных вероятностей p_{ijk}. Разумеется, матрицы A_i в каждом конкретном случае могут иметь разную размерность и соответственно разное число p_{ijk}. Для целей сравнительного анализа необходимо, чтобы условные вероятности p_{ijk} были нормированы так, чтобы их новые значения удовлетворяли условию $\sum_{(k)} p_{ijk}^{(n)} = 1$. Для этой цели удобно использовать выражение

$$p_{ijk}^{n} = p_{ijk} / \sum_{(k)} p_{ijk}. \tag{5.1}$$

События, связанные с появлением измеренной величины в доверительных интервалах j-го и k-го классов, принимаются в процессе их идентификации несовместными, так как объекты анализируются один за другим. Эти события образуют полную систему, т.е.

$$\sum_{(j)} p_{ij}^{(n)} = 1, \tag{5.2}$$

если принять, что множеством M исчерпываются возможности или интересы классификации природных образований.

Пусть в процессе измерения получено значение r_i, попадающее в доверительный интервал данного класса. Необходимо оценить среднюю неопределенность, которая вносится распределениями остальных классов рассматриваемого множества, если значение r_i принять принадлежащим данному классу. Для такой оценки можно воспользоваться количественной мерой информации.

Действительно, если выполняются условия (5.1) и (5.2), то неопределенность, которую содержит матрица A_i, оценивается величиной

$$I_i = H_i(p_j) - \tilde{H}_i(r_{ik}/r_{ij}), \tag{5.3}$$

где $H_i(p_j) = H_i = \sum_{(j)} p_{ij} \log p_{ij}$ — безусловная энтропия распределения вероятностей p_{ij} появления реализации j-го объекта на i-ой длине волны; $\tilde{H}_i = -\sum p_{ij} \sum p_{ijk}^{(n)} \log P_{ijk}^{(n)}$ — условная энтропия вероятностей $p_{ijk}^{(n)} = p(r_{ik}/r_{ij})$.

Для удобства проведения сравнительного анализа используется коэффициент

$$\delta_i = I_i/H_i = 1 - (\tilde{H}_i/H_i), \tag{5.4}$$

изменяющийся в пределах $0 \leq \delta_i \leq 1$.

Соотношения (5.3) и (5.4) позволяют оценить неопределенность при идентификации объектов множества M. Вклад отдельных классов множества M в общую неопределенность можно установить, применяя соотношения (5.3) и (5.4) к различным подмножествам M_l, полученным из множества M исключением подмножеств M_l, $l = 1, 2, \ldots, L$.

Итак, задачи определения $H_i^{(M)}$ и $\delta_i^{(M)}$ для $r_j(\lambda_i) \in M$ и соответственно

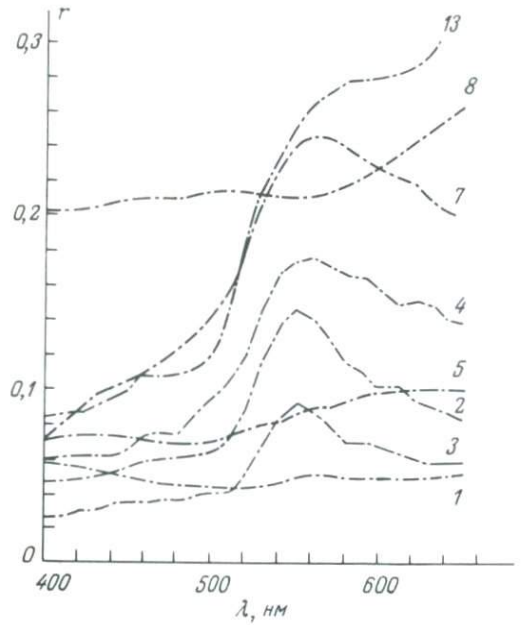


Рис. 5.1. Спектральные характеристики отражения широколиственных деревьев.

$H_i^{(M_l)}$ и $\delta_i^{(M_l)}$ для $r_j(\lambda_i) \in M$ можно решить путем введения различных доверительных интервалов $\pm \Delta r_j(\lambda_i)$, соответствующих различным дисперсиям распределений объектов множества M. В результате этого при заданном уровне значимости S доверительных интервалов можно определить, какой частью δ_i максимальной информации $I_{\text{макс}} = H_i$ является I_i и которое из подмножеств M_l вносит наибольший вклад в уменьшение I_i и соответственно δ_i.

Рассмотрим решение упомянутых задач в конкретных случаях множества M, составленного из 23 классов, полученных в одинаковых условиях [58] отражательных характеристик, соответствующих широколиственным деревьям (дубу, липе, березе, вязу и осине). Характеристики получены при одинаковых условиях: азимуте 225° и угле места 45°. Некоторые из этих спектральных характеристик представлены на рис. 5.1.

Пусть доверительные интервалы определяются линейной зависимостью

$$\Delta r_{ij} = q r_{ij}, \tag{5.5}$$

где q — коэффициент пропорциональности, изменяющийся согласно [51, 176] в пределах 0,01 — 0,075 при уровне значимости Δr $S = 0{,}95$.

Наибольшее допустимое значение интервала дискретизации характеристики отражения определяется следующими условиями. Положим, что восстановление непрерывных характеристик приводится полиномом Лагранжа

нулевого порядка. Такое предположение допустимо, так как значение $\Delta\lambda$, с которым получены спектральные характеристики отражения, находится на границе возможностей используемого прибора и, следовательно, в интервале $\Delta\lambda$ ничего определенного о поведении функции r неизвестно. Примем, что в этом интервале $r = \text{const}$ — нулевой порядок полинома Лагранжа. Тогда допустимое значение будет иметь вид [123].

$$\Delta\lambda_{\text{доп}} \leqslant \varepsilon_0/M_1, \tag{5.6}$$

где ε_0 — допустимая ошибка для r; M_1 — максимальное значение $dr/d\lambda$. Если для рассматриваемого множества спектральных отражательных характеристик принять, что точность измерения r ограничена $\varepsilon_0 = 0{,}01$ и $M_1 = 0{,}03/10\ \text{нм}^{-1}$, то из выражения (5.6) следует $\Delta\lambda_{\text{доп}} = 3{,}4\ \text{нм} < < 10\ \text{нм}$. Полученный результат показывает, что аппроксимация полиномом нулевого порядка при $\Delta\lambda = 10\ \text{нм}$ недостаточно точна. Отсюда следует, что среднее значение информации I в интервале между двумя соседними значениями λ_i и λ_{i+1}, строго говоря, не будет среднеарифметическим значением I_i и I_{i+1}. Однако, так как интервал $\Delta\lambda = 10\ \text{нм}$ сравнительно мал, можно предположить, что существует корреляция в распределениях r для λ_i и λ_{i+1}. В этом случае достаточно вероятно, что среднее значение I в интервале $\Delta\lambda = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ существенно не отличается от $I_{\text{ср}} = (I_i + I_{i+1})/2$.

При исследовании множества объектов можно сформулировать следующие две задачи: какова неопределенность при оценке принадлежности конкретной одиночной реализации; какова неопределенность при многократной оценке принадлежности всех наблюдаемых объектов. В первой задаче (одиночном эксперименте) появление какого-либо объекта множества равновероятно, т.е. $p_{ij} = \text{const} = p = 1/N$, при этом нас не интересует, сколько раз он появился бы при многократном повторении опыта. Во второй задаче (многократном эксперименте) уже имеет значение тот факт, что объектам могут соответствовать различные априорные частоты появления в условиях конкретного эксперимента. Заслуживает внимания первая задача, так как она независима от конкретного распределения вероятностей появления различных объектов.

Для приведенного ранее примера $p_{ij} = \text{idem} = 1/23$. Для определения условных вероятностей p_{ijk} примем, что распределение r для различных объектов является нормальным [51, 157]. Тогда

$$p_{ijk}(r_{ik}/r_{ij}) = \Phi(z)\Big|_{z_{1ijk}}^{z_{2ijk}}, \text{ где} \tag{5.7}$$

$$z_{1,2ijk} = (\pm\Delta r_{ij} - r_{ij} + r_{ik})/\sigma_{ij}, \tag{5.7а}$$

— соответственно левый и правый пределы интегрирования нормированного нормального распределения $\Phi(z)$.

Доверительные интервалы определяются соотношением (5.5), а стандартное отклонение σ_{ij} — выражением (5.7а) при условии, что $j = k$. Тогда $r_{ij} = -r_{ik}$ и, так как $S = 0{,}95$, $z_{1,2ij} = 1{,}96$. Из (5.5) и (5.6) следует, что

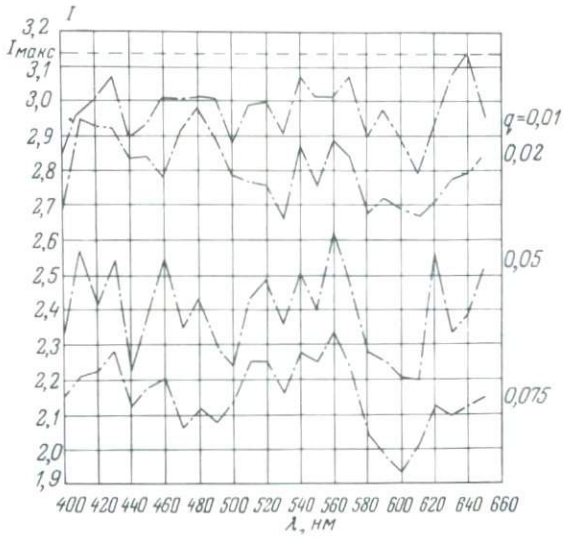


Рис. 5.2. Зависимость I от λ.

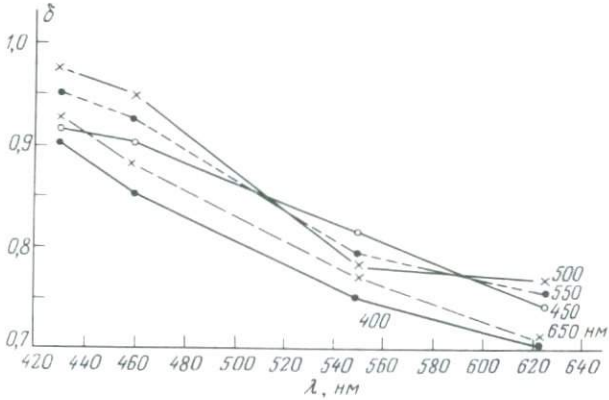


Рис. 5.3. Зависимость δ от λ.

$$\sigma_{ij} = qr_{ij}/1{,}96, \tag{5.8}$$

при этом выражение (5.7а) принимает вид

$$z_{1,2ijk} = 1{,}96(\pm qr_{ij} - r_{ij} + r_{ik})/qr_{ij}. \tag{5.9}$$

Остановимся подробнее на полученных результатах. Для $i = 1, 2, \ldots, 23$ и $q = 0{,}01; 0{,}02, 0{,}05, 0{,}075$ из соотношений (5.3), (5.4), (5.7) и (5.9) сле-

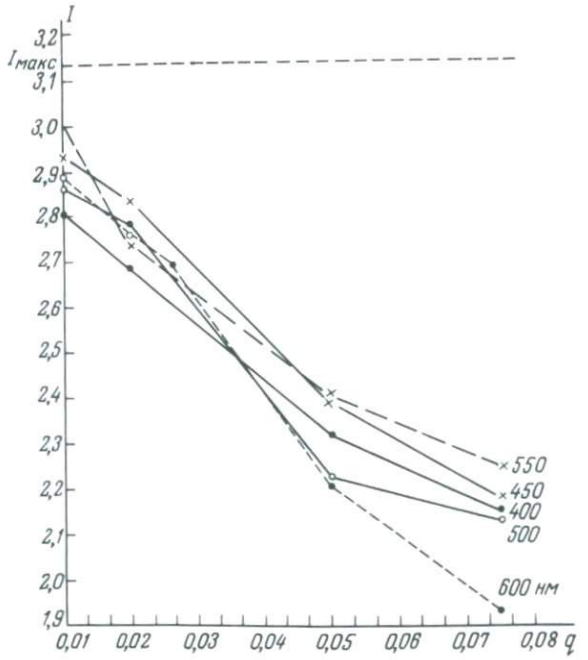


Рис. 5.4. Зависимость I от q.

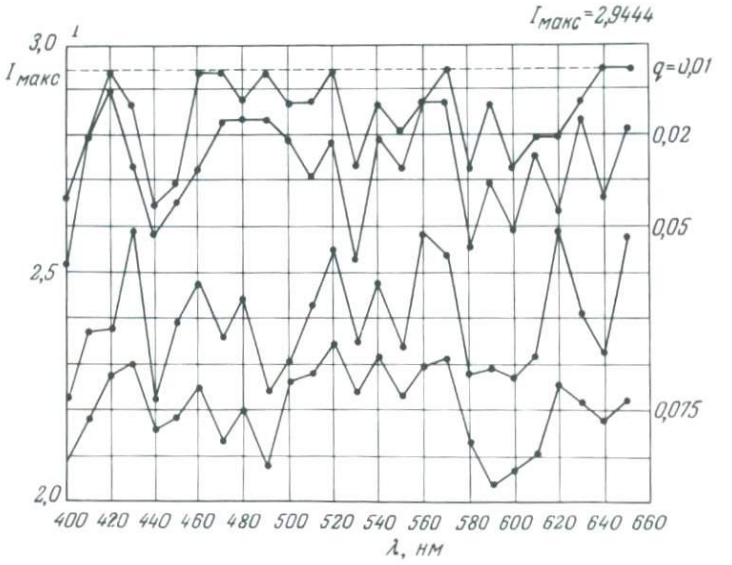


Рис. 5.5. Зависимость I от λ при исключении из анализируемого множества части исследуемых образований.

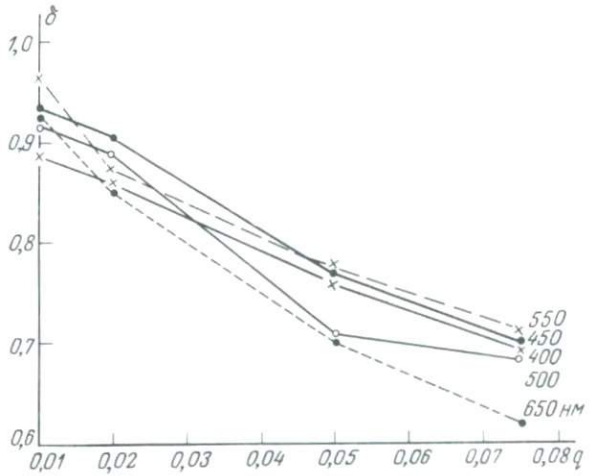


Рис. 5.6. Зависимость δ от q при исключении из анализируемого множества части исследуемых образований.

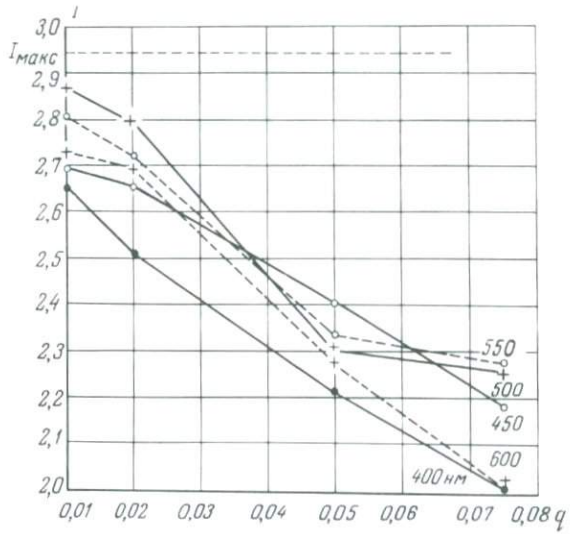


Рис. 5.7. Зависимость I от q при исключении из анализируемого множества части исследуемых образований.

дуют результаты, приведенные на рис. 5.2 — 5.4. Видно, что при $q > 0{,}05$ информация I и соответственно коэффициент δ значительно уменьшаются, т.е. возрастает неопределенность при идентификации множества рассмат-

риваемых спектральных отражательных характеристик. Исключение спектральных отражательных характеристик с номерами 12, 14, 15 и 22 из множества M и вычисление новых значений I и δ показали (рис. 5.5 — 5.7), что исключенные характеристики вносили значительный вклад в эту неопределенность.

Из сказанного можно сделать важный практический вывод: при уточнении действительных значений q следует уделить особое внимание планированию эксперимента, включая определение длин волн, для которых неопределенность, получаемая из сечений распределений, наибольшая, а также классы, которыми она преимущественно определяется [169, 176].

5.2. Оперативная обработка изображений с помощью градационного яркостного клина

Рассмотрим сравнительно быстрый и весьма удобный метод дешифрирования получаемых со спутников или самолетов изображений земной поверхности, когда последние анализируются для целей почвоведения, сельского и лесного хозяйств и т.д. Этот метод можно применять, если имеется априорная информация об основных типах природных образований, отображенных на дешифрируемых изображениях. Обычно такая информация имеется для тестовых участков, в результате чего известно, каким образованиям соответствуют существующие на изображении градации яркости.

Дешифрирование производится с помощью градационного клина (имеющего обычно 6 — 8 градаций яркости от наиболее светлого до наиболее темного поля), причем каждому уровню яркости присвоена соответствующая цифра. На рис. 5.8 показан градационный клин, яркость полей которого изменяется в пределах $B_{\text{мин}} - B_{\text{макс}}$. При линейном законе изменения яркости в этих пределах имеем

$$B_i = \sum_{i=1}^{n} (B_{\text{мин}} + i\Delta B), \tag{5.10}$$

а при нелинейном законе —

$$B_i = \sum_{i=1}^{n} (B_{\text{мин}} + i\Delta B_i), \tag{5.11}$$

где ΔB — константа при линейном законе, а ΔB_i — функция номера ступени при нелинейном законе изменения яркости градационного клина.

Эквивалентная схема процесса представлена на рис. 5.9. На один из выходов компаратора подается яркость исследуемого дешифрируемого участка в j-й спектральной области, а на другой — яркости градационного клина. При выравнивании яркостей на входах компаратора на его выходе получается число i, которое является в действительности кодовым числом этого анализируемого участка для j-й длины волны. После исследования

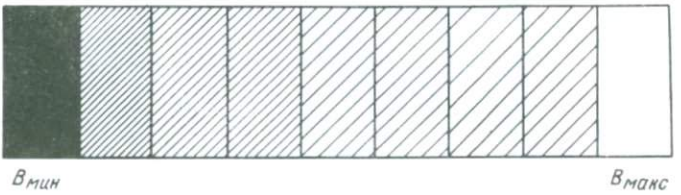


Рис. 5.8. Градационный яркостный клин.

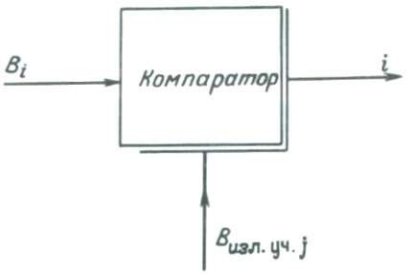


Рис. 5.9. Схема компаратора.

интересующего нас участка на всех имеющихся длинах волн получится его кодовое число

$$a_{ij},\ i = 1, 2, \ldots, n;\ j = 1, 2, \ldots, m, \tag{5.12}$$

где n — максимальное число градаций яркости используемого клина; m — максимальное число длин волн, на которых получены отдельные изображения.

При сравнении яркости анализируемого участка с яркостью градационного клина в качестве компаратора используется глаз оператора, который в состоянии различить два соседних участка с яркостями B_i и B_{i+1}.

На рис. 5.10 представлено изображение части Пловдивского полигона в четырех спектральных зонах[1]. После интерпретации этих изображений с помощью градационного яркостного клина получено изображение, приведенное на рис. 5.11. Видно, что классифицировано большое число природных образований, находящихся на этом полигоне. Более подробно применение этого метода описано в [170, 171].

Заметим, что рассмотренный метод можно применять также в модифицированном виде. Например, если интересующее нас изображение в j-й зоне спектра анализируется с помощью передающей телевизионной камеры,

---

[1] Это изображение получено с самолета — лаборатории Ан-30 Института космических исследований АН СССР [1, 36] в 1976 г. во время совместной болгаро-советской экспедиции в рамках программы «Интеркосмос». — *Прим. ред.*

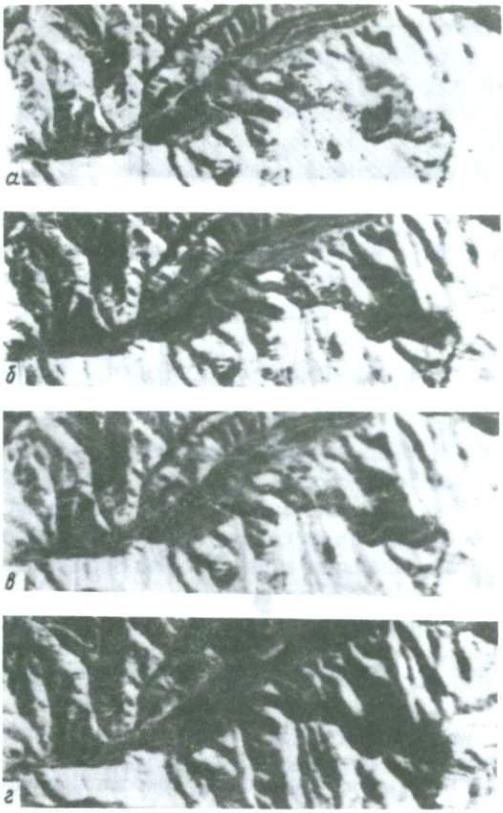


Рис. 5.10. Изображение участка Пловдивского полигона в четырех зонах спектра.

а — зона 1, λ = 0,52 ÷ 0,58 мкм; *б* — зона 2, λ = 0,63 ÷ 0,70 мкм; *в* — зона 3, λ = 0,68 ÷ 0,75 мкм; *г* — зона 4, λ = 0,86 ÷ 1,05 мкм.

на экране электронно-лучевого осциллографа можно визуализировать изменение яркости вдоль выбранной строки. Это означает, что на экране получается кривая, описывающая закон изменения яркости интересующей нас части изображения. Этот аналоговый сигнал можно использовать непосредственно или после его преобразования в цифровой код. При этом уже число различимых уровней яркости может быть значительно больше: 64, 128 или даже 256.

5.3. Дискриминантный анализ природных образований по их спектральным отражательным характеристикам

Известно, что различные природные образования по-разному отражают падающую на них энергию в видимой и инфракрасной областях спектра.

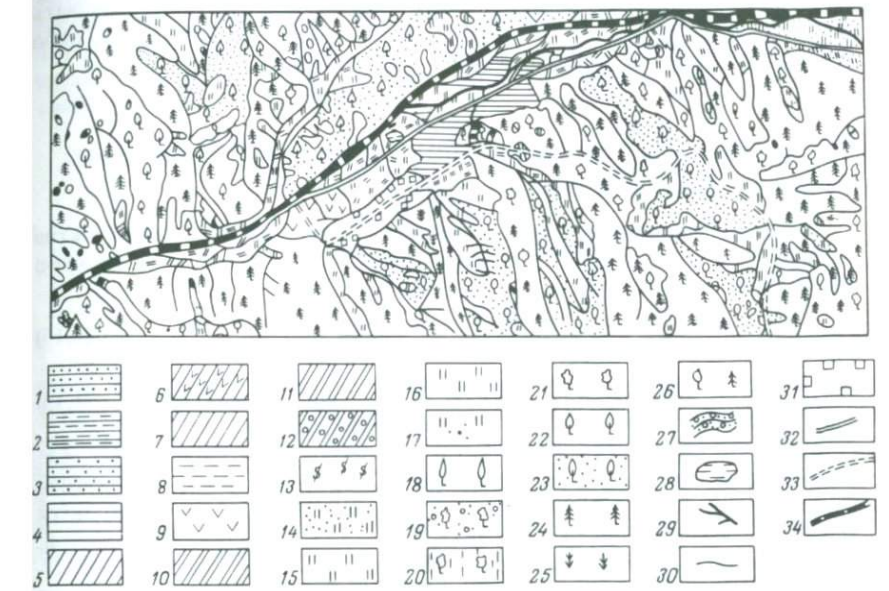


Рис. 5.11. Результат интерпретации изображения, представленного на рис. 5.10.

1 — поля, вспаханные после уборки табака; *2* — поля, вспаханные после уборки кукурузы; *3* — пшеница; *4* — другие вспаханные поля; *5* — поля собранного табака; *6* — поля скошенной люцерны; *7* — другие поля; *8* — кукуруза; *9* — люцерна; *10* — старые фруктовые сады на вспаханной почве; *11* — молодые фруктовые сады на вспаханной почве; *12* — молодые фруктовые сады с поросшими травой междурядьями; *13* — виноградники; *14* — орошаемые луга; *15* — луга на заливных террасах; *16* — луга; *17* — луга с кустарником; *18* — тополя; *19* — кустарниковая поросль бука и дуба; *20* — дубовый лес с кустами шиповника; *21* — дубовый лес; *22*— буковый лес; *23* — прореженный буковый лес; *24* — сосновый лес; *25* — молодой сосновый лес; *26* — смешанный широколиственный и хвойный лес; *27* — реки и речные русла со шебнем; *28* — водохранилище; *29* — овраги; *30* — оросительные каналы; *31*— жилые кварталы и отдельные крупные постройки.

Так как этот диапазон сравнительно велик, измерение спектральных отражательных характеристик производится на большом числе длин волн. Это затрудняет процесс измерения и анализа, а полученная информация имеет большую изоыточность.

Возникает следующая задача: для каких наименьших по количеству длин волн необходимо измерять коэффициент отражения, чтобы можно было идентифицировать спектральные отражательные характеристики $r_j(\lambda_i)$ некоторого заранее заданного множества M классов объектов O_j, $j = 1, 2, \ldots, J$ [206]. При этом примем, что функции $r_j(\lambda_i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$, известны со своими доверительными интервалами $\pm \Delta r_j(\lambda_i)$ в видимой области электромагнитных волн $\Delta\lambda_{вд} = \lambda_n - \lambda_1$. Кроме того, предположим, что $r_j(\lambda_i)$ являются стационарными случайными функциями.

Поставленную задачу можно решать двумя способами — использовать либо непосредственно спектральные отражательные характеристики, либо их предварительное преобразование.

5.3.1. Непосредственное использование спектральных отражательных характеристик

В этом случае разделяющая поверхность при идентификации объектов выбирается в соответствии с критерием Байеса для минимального среднего риска в одномерном случае

$$\lambda_0 = \frac{\omega(\lambda_i/a_k)}{\omega(\lambda_i/a_j)} = \frac{r_{kj}p(a_j)}{r_{ik}p(a_k)}, \tag{5.13}$$

где r_{jk} и r_{kj} — весовые коэффициенты j-го и k-го классов объектов; $p(a_j)$ и $p(a_k)$ — априорные вероятности появления этих классов.

Будем рассматривать все классы как равновероятные. Тогда $\lambda_0 = 1$, т.е. разделяющая поверхность критерия Байеса строится в точке пересечения распределений $\omega(\lambda_i/a_k)$ и $\omega(\lambda_i/a_j)$ j-го и k-го классов. Если точка находится вне доверительных интервалов $\pm\Delta r_j(\lambda_i)$ и $\pm\Delta r_k(\lambda_i)$ сравниваемых классов, то эти классы могут быть идентифицированы на длине волны λ_i (рис. 5.12). Алгоритмы реализации этого правила следующие. Образуется

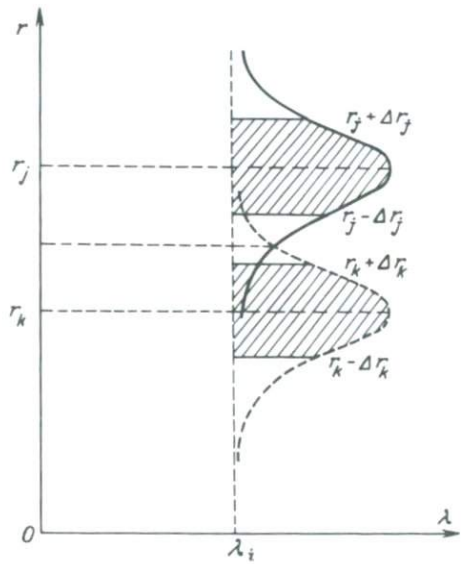


Рис. 5.12. Доверительные интервалы при двух огибающих.

матрица A отношений, условно обозначаемых через 1, если j-й и k-й классы различимы в интервалах $r_j \pm \Delta r_j$ и $r_k \pm \Delta r_k$, и через 0 в случае неразличимости, т.е. когда $r_j \pm \Delta r_j$ и $r_k \pm \Delta r_k$ имеют нулевое сечение. Матрица A составляется для всех комбинаций второго порядка c_J^2 классов O_j для всех длин волн λ_i:

$$A = \begin{array}{c|cccccccc} \lambda_i \backslash C_J^2 & O_{12} & O_{13} & \dots & O_{1n} & O_{21} & O_{22} & \dots & O_{n-1,n} \\ \lambda_1 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 0 & & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \lambda_n & 1 & 1 & & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{array}$$

Одно подмножество множества M идентифицируется для некоторой комбинации из m длин волн, если в каждом столбце матрицы A, содержащем эти длины волн, имеется хотя бы одна единица. Таким образом, определяется правило суммирования 0 и 1: $0 + 0 = 0$; $0 + 1 = 1$; $1 + 0 = 1$; $1 + 1 = 1$. Идентификация $r_j(\lambda_i)$ посредством комбинаций C_n^m из m длин волн возможна только в том случае, если все столбцы подматрицы, образованной C_n^m, имеют сумму, равную 1.

Полное решение задачи получаем после последовательного исследования комбинаций C_n^m, $m = 1, 2, \dots, n$, до получения первых решений, принадлежащих данному классу комбинаций C_m^n из m длин волн.

Особенности непосредственного использования спектральных отражательных характеристик. В случае когда исследуются и используются спектральные отражательные характеристики непосредственно для идентификации объектов различных классов, алгоритм дает ответ на вопрос, какое наименьшее число длин волн $\lambda_{(\text{мин})i}$, посредством которых возможно распознавание принадлежности новых объектов к заранее заданному множеству эталонных классов. Если число этих классов не очень большое, то необходимое количество длин волн $\lambda_{(\text{мин})i}$, для которых измеряется величина r, сравнительно мало. Это упрощает процесс измерения и анализа спектральных отражательных характеристик.

Когда матрица M содержит много эталонных классов — несколько сотен, то в большинстве случаев число $\lambda_{(\text{мин})i}$ будет соизмеримым с общим числом n дискретизированных значений r. В этом случае полезно использовать некоторые преобразования, рассматриваемые ниже.

5.3.2. Идентификация после преобразования спектральных отражательных характеристик

Преобразование первичной функции $r_j(\lambda_i)$ имеет смысл только в том случае, когда новая функция создает лучшие возможности идентификации. Поэтому для преобразованных функций $z = f(r_j)$ необходимо проверить,

дает ли критерий Байеса лучшие результаты, т.е. уменьшается ли суммарная ошибка I и II рода. Для этой цели необходимо определить закон распределения z:

$$p(z) = p[\psi(z)\psi'(z)],\ x = \psi(z),\ \psi'(z) = \frac{d\psi}{dz}. \tag{5.14}$$

После этого для распределений $p_j(z)$ и $p_k(z)$ обоих сравниваемых классов j и k исследуется суммарная ошибка I и II рода

$$p = \int_{-\infty}^{z_{\text{вн}}} p_k(z)dz + \int_{z_{\text{вн}}}^{\infty} p_j(z)dz, \tag{5.15}$$

где $z_{\text{вн}}$ — внутренние точки пересечения $p_j(z)$ и $p_k(z)$.

В общем случае интеграл (5.15) взять нельзя. При заданном множестве M его можно решить численными методами. Остановимся на некоторых частных случаях, объединяемых следующими ограничительными условиями: распределение $p(r_j)$ — нормальное, выполняется условие $\sigma_j \ll \mu_j$, точнее, $\sigma_j = q\mu_j$, $q \ll 1$; функции z являются интегральными преобразованиями, на место которых в соответствии с дискретизацией $r_j(\lambda_i)$ и $r_k(\lambda_i)$, подставляем соответствующие суммы.

Рассмотрим следующие функции трансформации:

а) модуль-структурную функцию

$$C(\tau) = \int_0^T |f(x) - f(x + \tau)|dx; \tag{5.16}$$

б) структурную функцию Колмогорова

$$C_k(\tau) = \int_0^T [f(x) - f(x + \tau)]^2 dx; \tag{5.17}$$

в) автокорреляционную функцию

$$K(\tau) = \int_0^T [f(x) - m][f(x + \tau) - m]dx; \tag{5.18}$$

г) интегральную функцию

$$I_i = \frac{1}{i} \sum_{l}^{i} r(\lambda_l),\ i = 0, 1, \ldots, n. \tag{5.19}$$

В нашем случае $f(x) = r(\lambda_i)$, а интегралы заменяются суммами

$$C_j(\tau) = \sum_{(i)} |r_j(\lambda_i) - r_j(\lambda_i + \tau)|, \tag{5.16а}$$

$$C_{kj}(\tau) = \sum_{(i)} [r_j(\lambda_i) - r_j(\lambda_i + \tau)]^2, \tag{5.17a}$$

$$K_j(\tau) = \sum_{(i)} [r_j(\lambda_i) - \bar{r}_j][r_j(\lambda_i + \tau) - \bar{r}_j], \tag{5.18a}$$

$$I(\tau) = \frac{1}{i} \sum_{(i)} r(\lambda_i). \tag{5.19a}$$

Из трех ограничительных условий следует, что сумма $C_j(\tau)$ также имеет нормальное распределение со среднеарифметическим $\bar{C}_j$ и дисперсией σ_j^2, соответственно равными

$$\bar{C}_j(\tau) \approx \sum_{(i)} |\overline{r_j(\lambda_i)} - \overline{r_j(\lambda_i + \tau)}|, \tag{5.20}$$

$$\sigma_j^2 \approx \sum_{(i)} q^2[(\overline{r_j(\lambda_i)})^2 + (\overline{r_j(\lambda_i + \tau)})^2]. \tag{5.21}$$

В соответствии с выражениями (5.17а) и (5.18а) и первыми двумя ограничительными условиями, пренебрегая малыми величинами высшего порядка для сумм C_{kj} и K_j, получаем

$$C_{kj}(\tau) \approx \sum_{(i)} [\overline{r_j(\lambda_i)} - \overline{r_j(\lambda_i + \tau)}]^2, \tag{5.22}$$

$$\sigma_{ckj}^2 \approx \sum_{(i)} 4q^2[\overline{r_j(\lambda_i)} - \overline{r_j(\lambda_i + \tau)}]^2\{[\overline{r_j(\lambda_i)}]^2 + [\overline{r_j(\lambda_i + \tau)}]^2\}, \tag{5.23}$$

$$\bar{K}_j \approx \sum_{(i)} [\overline{r_j(\lambda_i)} - \bar{r}_j][\overline{r_j(\lambda_i + \tau)} - \bar{r}_j], \tag{5.24}$$

$$\sigma_{kj}^2 \approx q^2 \sum_{(i)} \{[\overline{r_j(\lambda_i)} - \bar{r}_j]^2[\overline{r_j(\lambda_i)}]^2 + [\overline{r_j(\lambda_i + \tau)} - \bar{r}_j]^2[\overline{r_j(\lambda_i + \tau)}]^2\}. \tag{5.25}$$

Поскольку, как мы условились, распределения C, C_k и K в выражениях (5.16а), (5.17а) и (5.18а) — нормальные, точка их пересечения для двух различных классов j и k определяется уравнением

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left[-\frac{(r - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left[-\frac{(r - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right], \tag{5.26}$$

которое после логарифмирования приводится к виду

$$-(r - \mu_j)^2 \frac{1}{2\sigma_j^2} = \ln\frac{\sigma_j}{\sigma_k} - (r - \mu_k)^2 \frac{1}{2\sigma_k^2}. \tag{5.27}$$

Отсюда

$$r_{12} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \text{ где} \tag{5.28}$$

$$a = \frac{1}{\sigma_k^2} - \frac{1}{\sigma_j^2}; \tag{5.29}$$

$$b = 2\left(\frac{\mu_j}{\sigma_j^2} - \frac{\mu_k}{\sigma_k^2}\right); \tag{5.30}$$

$$c = \frac{\mu_k^2}{2} - \frac{\mu_j^2}{\sigma_j^2} - 2\ln\frac{\sigma_j}{\sigma_k}. \tag{5.31}$$

Эффективность каждого из преобразований определяется значением интеграла (5.15), который в нашем случае можно свести к виду

$$p = \int_{-\infty}^{\eta_{j12}} \exp\left(-\frac{\eta_j^2}{2}\right) d\eta_j + \int_{\eta_{k12}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\eta_k^2}{2}\right) d\eta_k, \tag{5.15a}$$

где $\eta_{jk} = (r - \mu_{jk})/\sigma_{jk}$ — координата нормированного нормального распределения.

Суммарная ошибка p будет меньше, когда граница

$$\eta_{12jk} = (\eta_{12} - \mu_{jk})/\sigma_{jk} \tag{5.32}$$

имеет большее абсолютное значение.

Несмотря на принятые ограничительные условия, аналитическое исследование критерия (5.32) все еще затруднено, так как выражения для μ_{jk} и σ_{jk} из (5.20) — (5.25) входят сравнительно сложным образом в (5.28). Поэтому рассмотрим следующие две частные задачи: 1) функции $\overline{r_j(\lambda_i)}$ и $\overline{r_k(\lambda_i)}$ связаны посредством детерминированной функциональной связью; 2) функции $\overline{r_j(\lambda_i)}$ и $\overline{r_k(\lambda_i)}$ таковы, что различия между ними случайны.

1. Функции $\overline{r_j(\lambda_i)}$ и $\overline{r_k(\lambda_i)}$ связаны детерминированной функциональной связью

$$\overline{r_k(\lambda_i)} = (1 + \theta)\overline{r_j(\lambda_i)}, \tag{5.33}$$

где $\theta = \text{const}$, $|\theta| \ll 1$.

Из соотношений (5.20) — (5.25) следует, что μ и σ, описываемые (5.33), в случае функций трансформации C, C_k и K будут определяться следующим образом:

$$\mu_k = (1 + \theta)\mu_j, \; \sigma_k^2 = (1 + \theta)^2\sigma_j^2. \tag{5.34}$$

Тогда выражение (5.28) будет иметь вид (если принять $\ln(\sigma_k/\sigma_j) \approx 0$)

$$r_{12} = -b/a = \mu_j 2(1 + \theta)/(2 + \theta), \tag{5.35}$$

а выражение (5.32) — вид

$$\eta_{12jk} = \eta_{jk} = \frac{\theta}{\theta + 2}\frac{\mu_j}{\sigma_j} = \frac{\theta}{\theta + 2}\frac{1}{v_j}, v_j = \frac{\sigma_j}{\mu_j}. \tag{5.36}$$

Следовательно, в этом случае эффективность критерия η обратно пропорциональна коэффициенту вариации v, и для сравнительного анализа нужно использовать величины v_C, v_{C_k} и v_K. Для этой цели полезно иметь отношения

$$\omega_{C,C_k} = \frac{v_{C_k}}{v_C} = \frac{\sigma_{C_k}}{\bar{C}_k}\frac{\bar{C}}{\sigma_C}, \tag{5.37}$$

$$\omega_{C,K} = \frac{v_K}{v_C} = \frac{\sigma_K}{K}\frac{\bar{C}}{\sigma_C}. \tag{5.38}$$

Имея в виду (5.20) — (5.25), для ω_{C,C_k} получаем

$$\omega_{C,C_k} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{(i)} |X_i - J_i|\right)^2 4 \sum_{(i)} (X_i - Y_i)^2 (X_i^2 + Y_i^2)}{\left[\sum_{(i)} (X_i^2 + Y_i^2)\right]\left[\sum_{(i)} (X_i - Y_i)^2\right]^2}}, \tag{5.39}$$

где $X_i = \overline{r_j(\lambda_i)}$; $Y_i = \overline{r_j(\lambda_i + \tau)}$. Сумму $\sum |X_i - Y_i|$ можно представить в виде

$$\sum_{(i)} |(X_i - Y_i| = \sum_{(M_1)} (X_i - Y_i) + \sum_{(M_2)} (Y_i - X_i), \tag{5.40}$$

где M_1 — множество значений i, для которых $X_i > Y_i$, а M_2 — множество значений i, для которых $X_i < Y_i$. Это представление $\sum |X_i - Y_i|$ позволяет дифференцировать как по X_i, так и по Y_i. В этом случае экстремумы ω_{C,C_k} определяются из условия

$$\frac{\partial \omega_{C,C_k}}{\partial x_i} = 0, \tag{5.41}$$

$$\frac{\partial \omega_{C,C_k}}{\partial y_i} = 0, \; i = 1, 2, \ldots, n. \tag{5.42}$$

Система (5.41) эквивалентна системе

$$\begin{aligned}
&\{\pm[2\sum |X_i - Y_i|][4\sum (X_i - Y_i)^2(X_i^2 + Y_i^2)] + [(\sum |X_i - \\
&- Y_i|)^2]4\sum [2(X_i - Y_i)(X_i^2 + Y_i^2) + (X_i - Y_i)^2 2X_i]\} \times \\
&\times \{\sum (X_i^2 + Y_i^2)[\sum (X_i - Y_i)^2]^2\} - \{[\sum |X_i - \\
&- Y_i|]^2 4\sum [(X_i - Y_i)^2(X_i^2 + Y_i^2)]\}\{2X_i[\sum (X_i - \\
&- Y_i)^2]^2 + [\sum (X_i^2 + Y_i^2)][2\sum (X_i - Y_i)^2][2(X_i - Y_i)] = 0.
\end{aligned} \tag{5.43}$$

В выражении (5.43) все суммы одинаковы для системы уравнений при $i = 1, 2, \ldots, n$. Следовательно, это система уравнений третьей степени относительно X_i. Так как в данном случае все $X_i > 0$, то уравнения третьей степени имеют только одно положительное решение

$$X_i = \text{const} = X. \tag{5.44}$$

Аналогичным образом можно получить условие $X_i = X$, $Y_i = Y$, которое удовлетворяет системе (5.42). Следовательно, ω_{C,C_k} имеет экстремум при $X_i = X$. Значение экстремума получается при

$$(\omega_{C,C_k})_{\text{экстр}} = 2. \tag{5.45}$$

Легко доказать, что экстремум является максимумом.

Для коэффициента $\omega_{C,K}$ получаем выражение

$$\omega_{C,K} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{(i)} |X_i - Y_i|\right)^2 \sum_{(i)} [X_i^2(X_i - \bar{r}_j)^2 + Y_i^2(Y_i - \bar{r}_j)^2]}{\sum_{(i)} (X_i^2 + Y_i^2)\left[\sum_{(i)} (X_i - \bar{r}_j)(Y_i - \bar{r}_j)\right]^2}} \tag{5.46}$$

и аналогично утверждаем при его исследовании, что $\omega_{C,K}$ имеет при $X_i = X$, $Y_i = Y$ экстремум, который является минимумом и его значение

$$(\omega_{C,K})_{\text{экстр}} = 2. \tag{5.47}$$

Отношение $\omega_{C,r}$, определяющее C относительно $\bar{r}_j$, имеет вид

$$\omega_{C,K} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{(i)} |(X_i - Y_i|\right)^2}{\sum_{(i)} (X_i^2 + Y_i^2)}}. \tag{5.48}$$

Величина $\omega_{C,r}$ зависит от конкретной структуры $r_j(\lambda_i)$. Например, в случае прямой линии $Y = X$ модуль-структурная характеристика дается зависимостью $C(\tau) = 2\tau(T - \tau)$, а в случае синусоиды $Y = \sin X$ — зависимостью $C(\tau) = 8\sin(\tau/2)$. Видно, что в случае прямой линии значение функции $c(\tau)$ становится больше половины площади между прямой линией и абсциссой, когда $\tau > T[1 - 1/\sqrt{2}]/2$, а в случае синусоиды — когда $\sin\tau/2 > 1/2$. Наш опыт показывает, что в случае кривых типа спектральных отражательных характеристик существует значительный диапазон τ, в котором выполняется условие

$$\sum |r_j(\lambda_i) - r_j(\lambda_i + \tau)| > n\bar{r}_j/2. \tag{5.49}$$

В этом случае, имея в виду, что

$$\sum X_i^2 = \sum Y_i^2 < nX_{\text{макс}}^2 \text{ и } \bar{r}_j > X_{\text{макс}}/2, \tag{5.50}$$

получается, что для $\omega_{C,r}$ существует область, для которой

$$\omega_{C,r} > \sqrt{n/8}. \tag{5.51}$$

2. Спектральные отражательные характеристики $\bar{r}_j$ и $\bar{r}_k$ отличаются только случайной функцией $\Delta r_{jk}(i)$, которая имеет среднеарифметическое значение, равное нулю для достаточно большого подмножества значений i. Тогда для разностей $C_k - C_j$, $C_{K_k} - C_{k_j}$ и $K_k - K_j$ получаем

$$C_K - C_j = \sum_{(i)} |X_{ki} - Y_{ki}| - \sum_{(i)} |X_{ji} - Y_{ji}| =$$

$$= \sum_{M_1} (\Delta X_{ik}(i) - \Delta Y_{ik}(i)) + \tag{5.52}$$

$$+ \sum_{M_2} [\Delta Y_{jk}(i) - \Delta X_{jk}(i)] = 0,$$

из-за последнего условия

$$|C_{K_k} - C_{K_j}| = \sum_{(i)} [\Delta X_{jk}(i) - \Delta Y_{jk}(i)]^2 \neq 0, \tag{5.53}$$

$$|K_k - K_j| = \sum_{(i)} [\Delta X_{jk}(i) \Delta Y_{jk}(i)] \neq 0. \tag{5.54}$$

Соотношения (5.52) — (5.54) показывают, что для функций, определяемых условием

$$\overline{r_k(\lambda_i)} = \overline{r_j(\lambda_i)} + \overline{\Delta r_{jk}(\lambda_i)}, \tag{5.55}$$

$$\overline{\Delta r_{jk}(\lambda_i)} = 0 \text{ — случайная функция,} \tag{5.56}$$

модуль-структурные характеристики имеют нулевую эффективность в отличие от C_k и K. Этот факт необходимо интерпретировать как фильтрующее свойство модуль-структурных характеристик C, каким структурная функция Колмогорова C_k и автокорреляционная функция K не обладают. Из этих же соотношений следует, что модуль-структурные характеристики могут иметь большую эффективность как по отношению к первичным функциям $r_j(\lambda_i)$, так и после их преобразований, определяемых выражениями (5.17) и (5.18). Эта эффективность проявляется в уменьшении вероятности ошибки I и II рода по Байесу для минимального риска при идентификации принадлежности $r_j(\lambda_i)$ некоторому эталонному классу.

5.3.3. Некоторые свойства модуль-структурной функции

Модуль-структурная функция предложена в работе [143], в которой проведено полное исследование ее свойств. Для полноты изложения здесь приведены лишь наиболее характерные ее свойства.

1. Модуль-структурная функция $C(\tau)$ инвариантна по отношению к изменению направления координатных осей, так как подынтегральная функ-

ция берется по модулю, т.е. при изменении пределов интегрирования

$$C(\tau) = \int_0^T |f(t) - f(t - \tau)|dt = \int_T^0 |f(t) - f(t - \tau)|dt; \tag{5.57}$$

подынтегральная функция сохраняет свое значение и, следовательно, $C(\tau)$ не изменяется.

2. Функция $C(\tau)$ инвариантна по отношению к дефазированию $f(t)$ по оси абсцисс. Это следует непосредственно из свойства алгебраических сумм — их величина не зависит от порядка суммирования.

Из первого и второго свойств модуль-структурной функции следует, что существует класс методически неразличимых посредством $C(\tau)$ функций $f(t)$, которые в дальнейшем будут обозначать как обобщенные функции

$$F = i_1 f(i_2 t), \tag{5.58}$$

где $i_1 = \pm 1$ — оператор изменения направления оси ординат; $i_2 = \pm 1$ — оператор изменения направления оси абсцисс. Тогда

$$C(\tau) = \int_\theta^{\theta + T} |F(t) - F(t - \tau)|dt, \tag{5.59}$$

где θ — дефазирование по оси абсцисс, по отношению к которому функция инвариантна.

3. Чтобы две непрерывные и однозначно определенные различные обобщенные функции $F_1(t)$ и $F_2(t)$ с периодом T имели одинаковые функции $C_1(\tau)$ и $C_2(\tau)$, необходимым и достаточным условием является то, чтобы они были одинаковы с точностью до аддитивной постоянной, т.е. если

$$F_1(t) = F_2(t) + \text{const}, \text{ то} \tag{5.60}$$

$$C_1(\tau) \equiv C_2(\tau) \tag{5.61}$$

для произвольного τ.

5.4. Многомерный классификационный анализ на основе спектральных отражательных характеристик

Как было показано, спектральные отражательные характеристики (СОХ) природных образований содержат исчерпывающую или хотя бы достаточную информацию для их классификации. Закономерно возросший интерес к спектральным отражательным характеристикам и их возможности для описания природных объектов поставили вопрос о необходимом числе длин волн λ, на которых измеряется спектральный коэффициент отражения $r(\lambda)$. Так как функция $r(\lambda)$ одномерна и стохастична (из-за естественного рассеяния характеристик природных образований данного класса), то для

исследования $r(\lambda)$ и классификации образований посредством спектральных отражательных характеристик необходимо применять статистико-вероятностные методы [203, 204, 212]. Задача состоит в том, что при определенных условиях найти наиболее экономичное описание классов природных образований в пространстве спектральных отражательных характеристик или их преобразований. Критерием качества такого минимизированного описания выбран критерий минимального риска Байеса. Известно [104, 214], что этот критерий позволяет при заданной априорной информации о статистико-вероятностных свойствах объектов получить минимальный риск при распознавании объектов или, точнее, минимизирует сумму вероятностей ошибок I рода (когда считается, что есть объект m-го класса, тогда как в действительности появился объект k-го класса) и II рода (считается, что не имеется объекта m-го класса, тогда как в действительности появился объект именно m-го класса).

А. Задача решается в условиях полной или достаточной априорной информации о классах, т.е. предполагается, что известны распределения $r(\lambda)$ по классам; априорная вероятность p_m появления m-го класса; платежная матрица C.

В общем случае критерий минимального среднего риска Байеса имеет вид [104]

$$\sum_{m=1}^{M} p_m C_{mk} f\left(\frac{\mathrm{X}}{\mu_m}\right) \leq \sum_{m=1}^{M} p_m C_{mk} f\left(\frac{X}{\mu_k}\right), \tag{5.62}$$

где $\mathrm{X}(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ — вектор, описывающий исследуемые объекты (природные образования) при СОХ $x_j = r_j$ в M-мерном пространстве признаков x_j; j — номер длины волны;

$$C = \begin{Vmatrix} C_{11} \cdots C_{1M} \\ \vdots \\ C_{M1} \cdots C_{MM} \end{Vmatrix} \tag{5.63}$$

является платежной матрицей, элементы C_{mk} которой определяют значения потерь, которые являются результатом принятия решения о присутствии k-го объекта, тогда как в действительности имеем m-й объект; M — число классов объектов, для которых имеет место платежная матрица C; $f(\mathrm{X}/\mu_m)$ — плотность вероятности появления объекта m-го класса.

Неравенство (5.62) должно выполняться при всех $l \neq k$, чтобы можно было считать достоверной гипотезу о принадлежности вектора $X(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ k-му классу.

Б. Чаще всего принимается, что

$$C_{mm} = 0 \text{ и } C_{mk} = \text{idem} = C, \tag{5.64}$$

т.е. считается, что правильное распознавание объекта данного класса не сопровождается потерями $C_{mm} = 0$, а во всех остальных случаях неправильного распознавания считается, что потери равнозначные.

При этом условии неравенство (5.62) принимает вид

$$\lambda = p_k f(X/\mu_k)/p_m f(X/\mu_m), \tag{5.65}$$

или в логарифмическом виде

$$\ln \lambda_{km} = \ln \frac{p_k}{p_m} + \ln \frac{f(X/\mu_k)}{f(X/\mu_m)} \geqslant 0. \tag{5.66}$$

В. Требование знания распределений $f(X/\mu)$ весьма жестко, если вид функции $f(X/\mu)$ необходимо уточнять экспериментально. Действительно, это привело бы к необходимости проведения значительного (до $\Omega = 100^n$) числа экспериментов для данного класса, так как считается, что одномерное экспериментальное распределение хорошо определяется при наличии около ста реализаций. В общем случае, когда $n > 2 \div 3$, значение Ω становится неприемлемо большим. В этом случае полагают, что распределения $f(X/\mu)$ близки к нормальным, при этом предположении определяются критерии минимального риска, а потом опытным путем проверяется правильность принятой гипотезы. Этот подход будет использован в дальнейшем, т.е.

$$f\left(\frac{X}{\mu_m}\right) = N(x, \mu_m, K_m) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |K_m|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(X - \mu_m)' K_m^{-1}(X - \mu_m)\right], \tag{5.67}$$

где K_m — корреляционная матрица $f(X/\mu_m)$; μ_m — вектор средних значений $r(\lambda)$ для m-го класса. Основанием для этого служат результаты некоторых последних исследований распределений $r(\lambda)$ [51, 157].

Г. Очень часто экспериментатор заинтересован в минимизации риска при одиночном эксперименте, т.е. эксперименте, при котором появляется только один объект, который с разной вероятностью может принадлежать любому классу. В этом случае принимается новое ограничительное условие

$$p_k = p_m = p. \tag{5.68}$$

Тогда неравенство (5.66) при всех перечисленных ограничительных условиях принимает вид (5.69)

$$\ln \frac{|K_k|}{|K_m|} - \frac{1}{2}(X - \mu_k)' K_k^{-1}(X - \mu_k) + \frac{1}{2}(X - \mu_m)' K_m^{-1}(X - \mu_m) \geqslant 0. \tag{5.69}$$

После преобразования (5.69) получаем

$$-2\ln \frac{|K_k|}{|K_m|} - X'(K_m^{-1} - K_k^{-1})X - 2X'(K_k^{-1}\mu_k - K_m^{-1}\mu_m) \leqslant$$

$$\leqslant (\mu_m' K_m^{-1}\mu_m - \mu_k' K_k^{-1}\mu_k). \tag{5.70}$$

Выражение (5.70) представляет собой дискриминантную функцию, опре-

деляющую граничную поверхность второго порядка, между k-м и m-м классами. Решение о принадлежности X k-му классу принимается только в том случае, когда неравенство (5.70) выполняется для каждого $m \neq k$.

Часто принимают, что $K_m = K_k = \text{idem}$, т.е. что все классы имеют одинаковые ковариационные матрицы. Это значительно упрощает вид неравенства (5.70) и приводит к линейной дискриминантной функции, но при этом существенно отдаляет решение от реального. Поэтому в дальнейшем не будем пользоваться таким ограничением, а рассмотрим два частных случая.

Д. Первый случай

$$\rho_{ij} = 0,\ i = 1, 2, \ldots, n;\ j = 1, 2, \ldots, n;\ k = 1, 2, \ldots, M, \tag{5.71}$$

где ρ_{ij} — коэффициент корреляции между i-й и j-й компонентами k-го класса, т.е. считается, что признаки x_i независимы.

Для данного класса этого можно достичь преобразованием посредством линейной комбинации

$$y_{ik} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ik} x_{ik}, \tag{5.72}$$

где коэффициенты α_{ik} являются компонентами собственных векторов матрицы K. Такое преобразование непригодно, так как если оно верно для k-го класса, то не будет верно для m-го класса.

Другой способ приближения к условию (5.71) заключается в проведении предварительного множественного корреляционного анализа (если имеется достаточное количество экспериментальных данных) спектральных отражательных характеристик. После этого определяется наименьшее множество некоррелирующих признаков $x_i = r(\lambda_i)$ для всего множества исследуемых классов. Итак, условие (5.71) можно реализовать, или оно может служить в качестве инструмента для аналитического приближенного исследования спектральных отражательных характеристик или их преобразований.

Е. Второй случай, еще более частный, имеет место при условии

$$n = 1, \tag{5.73}$$

т.е. при одномерном распределении.

Из условия «Д» для (5.70) следует

$$-2\ln \frac{\prod_{i=1}^{n} \sigma_{ik}^{-2}}{\prod_{i=1}^{n} \sigma_{im}^{-2}} + \sum_{i=1}^{4} x_i^2 \left(\frac{1}{\sigma_{im}^2} - \frac{1}{\sigma_{ik}^2} \right) -$$

$$- 2\left[\sum_{i=1}^{n} x_1 \left(\frac{\mu_{ik}}{\sigma_{ik}^2} - \frac{\mu_{im}}{\sigma_{im}^2} \right) \right] \leqslant \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\mu_{im}^2}{\sigma_{im}^2} - \frac{\mu_{ik}^2}{\sigma_{ik}^2} \right). \tag{5.74}$$

Из условия «E» для (5.70) получим

$$-2\ln\frac{\sigma_m^2}{\sigma_k^2}+x^2\left(\frac{1}{\sigma_k^2}-\frac{1}{\sigma_m^2}\right)+2x\left(\frac{\mu_m}{\sigma_m^2}-\frac{\mu_k}{\sigma_k^2}\right)\leqslant$$

$$\leqslant\frac{\mu_m^2}{\sigma_m^2}-\frac{\mu_k^2}{\sigma_k^2}. \tag{5.75}$$

Примем еще некоторые ограничения, соответствующие некоторым практическим задачам или облегчающие аналитическое исследование:

$$\sigma_{ik}=\nu_{ik}\mu_{ik},\ i=1,2,\ldots,M;\ \nu_{ik}\ll 1; \tag{5.76}$$

$$\nu_{ik}=\text{idem}=\nu,\ i=1,2,\ldots,n;\ k=1,2,\ldots,M; \tag{5.77}$$

$$r_m(\lambda_i)=(1+\theta_{mki})r_k(\lambda_i),\ \theta_{mk}\ll 1; \tag{5.78}$$

$$r_m(\lambda_i)-r_k(\lambda_i)=\Delta r_{mk}(i), \tag{5.79}$$

где Δr_{mk} — функция белого шума с $\Delta r_{mk}=0$, $\rho_{ij}(\Delta r_{mk})=0$.

Ограничение (5.76) соответствует современным экспериментальным данным о спектральных отражательных характеристиках. Ограничения (5.77) — (5.79) имеют идеализирующий характер и позволяют в некоторых случаях (например, при корреляционных преобразованиях спектральных отражательных характеристик) оценить относительные преимущества различных преобразований спектральных отражательных характеристик. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Учитывая ограничения (5.76) — (5.78), выражение (5.74) и (5.75) можно соответственно преобразовать:

при ограничении (5.76)

$$-\ln\frac{\prod_{i=1}^{n}\nu_{im}^2\mu_{im}^2}{\prod_{i=1}^{n}\nu_{ik}^2\mu_{ik}^2}+\sum_{i=1}^{n}x_i^2\left(\frac{1}{\nu_{im}^2\mu_{im}^2}-\frac{1}{\nu_{ik}^2\mu_{ik}^2}\right)-$$

$$-2\sum_{i=1}^{n}x_i\left(\frac{1}{\nu_{im}^2\mu_{im}}+\frac{1}{\nu_{ik}^2\mu_{ik}}\right)\leqslant\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{\nu_{im}^2}-\frac{1}{\nu_{ik}^2}\right), \tag{5.80}$$

$$-\ln\frac{\mu_{im}^2}{\mu_{ik}^2}+\frac{x^2}{\nu_k^2}\left(\frac{1}{\mu_m^2}-\frac{1}{\mu_k^2}\right)-\frac{2x_i}{\nu_k^2}\left(\frac{1}{\mu_m}-\frac{1}{\mu_k}\right)\leqslant 0; \tag{5.81}$$

при ограничении (5.77)

$$-\ln\frac{\prod_{i=1}^{n}\mu_{im}^2}{\prod_{i=1}^{n}\mu_{ik}^2}+\frac{1}{\nu_k^2}\leqslant 0; \tag{5.82}$$

при ограничениях (5.76) и (5.78)

$$-\ln\prod_{i=1}^{n}(1+\theta_{mki})^{2n}-\frac{1}{\nu_k^2}\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i^2}{\mu_{ik}^2}\frac{\theta_{mki}^2+2\theta_{mki}}{(1+\theta_{mki})^2}\right]+$$

$$+\frac{2}{\nu_k^2}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{\mu_{ik}}\frac{\theta_{mki}}{1+\theta_{mki}}\right)\leqslant 0, \tag{5.83}$$

$$-\ln(1+\theta_{mk})^2-\frac{x^2}{\mu_k^2}\frac{\theta_{mk}^2+2\theta_{mk}}{\nu_k^2(1+\theta_{mk})^2}+\frac{2\theta_{mk}x}{\nu_k^2(1+\theta_{mk})\mu_k}\leqslant 0. \tag{5.84}$$

Согласно критерию Байеса, если границы между каждыми двумя сравниваемыми m-м и k-м классами определяются (при соответствующих ограничениях) выражениями (5.69), (5.70), (5.74), (5.80) — (5.84), то средний риск ошибки I и II рода будет минимальным и соответственно равным

а) в общем случае

$$R=\int_{\Gamma}\sum_{k=1}^{M}\left[\sum_{m=1}^{M}p_mC_{km}f\left(\frac{\mathrm{X}}{\mu_m}\right)\right]\delta\left(\frac{\gamma_k}{\mathrm{X}}\right)d\mathrm{X}, \tag{5.85}$$

где Γ — область интегрирования вектора X; $\delta(\gamma_k/\mathrm{X})$ — единичная функция, равная 1, когда X находится в области k-й гипотезы, и 0, когда X находится в другой области.

Границы областей Γ_k определяются из выражений (5.66), (5.69), (5.70), (5.74), (5.75), (5.80) — (5.84);

б) в частном случае при ограничительных условиях «Б», «В» и «Г»

$$R=\frac{\mathrm{cp}}{\sqrt{(2\pi)^n}}\int_{\Gamma}\sum_{k=1}^{M}\left\{\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{\sqrt{K_m}}\exp\left[-\frac{1}{2}(X-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\mu_m)'K_m^{-1}(\mathrm{X}-\mu_m)\right]\delta\left(\frac{\gamma_k}{\mathrm{X}}\right)d\mathrm{X},\ k\neq m. \tag{5.86}$$

Выражения (5.85) и (5.86) определяют критерии сравнительного анализа качества данного преобразования спектральных отражательных характеристик, лучшим будет то преобразование, которое приводит к меньшему значению R. Возможности непосредственных аналитических заключений дают, по-видимому, только частные случаи, которым соответствуют выражения (5.85) и (5.86). Из них видно, что если принять $\ln \prod (1 + \theta_{mki})^2 \approx 0$, то из-за $\theta_{mki} \ll 1$ следует

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i^2}{\mu_{ik}^2} = \sum_{i=1}^{n} (1 + \theta_{mki}) \frac{x_i}{\mu_{ik}}, \tag{5.87}$$

$$x_k = \frac{2(1 + \theta_{mk})}{2 + \theta} \mu_k, \tag{5.88}$$

или после замены

$$\eta_{kmi} = \frac{x - \mu_k}{\sigma_k}, \tag{5.89}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \nu_{ki} \eta_{kmi}^2 + \sum_{i=1}^{n} (1 - \theta_{mki}) \nu_{ki} \eta_{kmi} = \sum_{i=1}^{n} \theta_{mki}, \tag{5.90}$$

$$\nu_k \eta_{km} = \theta, \tag{5.91}$$

где ν_k — коэффициент вариации k-го класса.

Выражение (5.90) описывает многомерный эллипсоид с центром с координатами $\eta_{kmi0} = (\theta_{km} - 1)/\nu_{kmi}^2$ и главными полуосями, равными $\sqrt{\theta_{km}} n / \nu_{kmi}$. Так как $\nu_{kmi} \ll 1$, $|\eta_{kmi0}| \gg 1$, то в большой части этого эллипсоида, формирующего область интегрирования Γ_{km} функции риска R, подынтегральная функция уже очень мала и ее вклад в значения R пренебрежимо мал. Вот почему интерес представляет область, где $|\eta| < 3 \div 4$, в которой подынтегральная функция нормированного нормального распределения все еще значимо отлична от нуля. Для таких значений η произведение $\nu\eta \ll 1$, так как $\nu \ll 1$ (например, $\nu = 0{,}02$) и выражение (5.90) можно аппроксимировать выражением

$$\sum_{i=1}^{n} \nu_{mki} \eta_{kmi} = \sum_{i=1}^{n} \theta_{kmi}, \tag{5.92}$$

являющимся уравнением гиперплоскости, полностью определяемой отношениями

$$\xi_{km} = \sum_{i=1}^{n} \theta_{kmi} / \nu_{kmi}. \tag{5.93}$$

В частности, при $n = 1$ получается выражение (5.91). Чем больше значение ξ_{km}, тем меньше значение R.

Выражение (5.91) показывает, что в одномерном случае при наличии ограничений «А» — «Е», (5.76) и (5.78), координата η интеграла R из выражения (5.86) зависит от θ и ν, а R имеет вид

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\Gamma} \sum_{k=1}^{M} \left\{ \sum_{m=1}^{M} \frac{1}{\sigma_m} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(X - \mu_m)^2}{\sigma_m^2} \right] \delta\left(\frac{\gamma_k}{X} \right) dX, \qquad (5.94)$$

где $\Gamma = \{\Gamma_k\}$ являются интервалами $(-\infty, \eta_{km})$ при $\mu_k > \mu_m$ и (η_{km}, ∞) при $\mu_k < \mu_m$.

Так как подынтегральная функция в выражении (5.94) является функцией Лапласа, то R будут иметь тем меньше значение, чем меньше значение η. Следовательно, (5.91) может служить в этом частном случае критерием эффективности идентификации спектральных отражательных характеристик или их преобразований.

В более общих случаях проверку эффективности следует проводить, определяя области интегрирования Γ_k в выражении (5.86) соответственно из (5.66), (5.70), (5.74), (5.75), (5.80) — (5.84).

Приведенные выше рассуждения основываются на различном и в большинстве случаев большом количестве введенных ограничений. Однако в действительности ограничительные условия «А» — «Д» со сравнительно хорошей точностью соответствуют реальной обстановке при исследовании спектральных отражательных характеристик.

Выявление априорной информации, в смысле ограничений «А» и «В», связано с рядом значительных трудностей, среди которых следует отметить следующие: большое число источников ошибки (влияние атмосферы, аппаратурные ошибки и др.); трудности, связанные с накоплением достаточной информации об отдельных классах. Однако эти трудности не являются непреодолимыми, поэтому были введены условия «А» и «В». Разумеется, это не означает, что недооцениваются трудности получения априорной информации, как и риск допущения условия «В».

Условия «Д», «Е», (5.76), (5.78) и (5.79) имеют идеализирующий характер. Они позволяют значительно упростить уравнения (5.66), (5.85) и (5.86). Естественно, что такое упрощение ухудшает точность и надежность сделанных выводов, но все-таки дает возможность получить заслуживающие внимания результаты.

5.5. Сравнение дискриминантных возможностей некоторых преобразований спектральных отражательных характеристик

Как было показано, основным критерием качества процесса классификации природных образований по их спектральным отражательным характе-

ристикам является функция риска R, т.е. сумма вероятностей появления ошибок I и II рода. Из-за неминуемого смешения классов спектральных отражательных характеристик в реальных случаях $R \neq 0$. При подходящем преобразовании пространства спектральных отражательных характеристик возможно уменьшение R [177].

Сравним возможности уменьшения функции риска R в случае применения некоторых преобразований спектральных отражательных характеристик. При этом каждую спектральную характеристику или ее преобразование будем рассматривать как многомерный вектор. Компонентами вектора являются значения спектрального коэффициента отражения $r(\lambda_i)$ или значения преобразований спектральной отражательной характеристики при соответствующем значении их аргумента. Сравнение проведем при следующих ограничительных условиях: 1) распределения спектральных отражательных характеристик нормальные; 2) их ковариационные матрицы диагональные (независимость распределений для отдельных длин волн); 3) дискриминантные функции как в первичном пространстве спектральных отражательных характеристик, так и в пространстве их преобразований являются многомерными параллелепипедами с центром, совпадающим с вершиной среднего вектора гиперраспределений спектральных отражательных характеристик, и с величиной образующих ребер, равной доверительному интервалу по соответствующей оси многомерного пространства спектральных отражательных характеристик или их преобразований; считается, что распределения локализованы полностью в параллелепипеде; 4) в пространстве спектральных отражательных характеристик дисперсия σ_λ для данной длины волны λ связана с компонентами среднего вектора $\bar{r}_\lambda$ соотношением

$$\sigma_\lambda = q\bar{r}_\lambda, \; q = \text{const} \ll 1. \tag{5.95}$$

Первое и четвертое ограничительные условия базируются на экспериментальных данных [51, 157], а второе и третье — упрощают анализ R. Заметим, что в отличие от третьего условия, не являющегося жестким ограничением из-за сравнительного характера проводимого анализа, второе условие весьма жестко, так как в реальных условиях K может быть существенно недиагональной.

Прежде всего обратим внимание на преобразования, которые дают возможность фильтровать помехи спектральных отражательных характеристик, имеющие низкочастотный спектр (например, неизвестная аддитивная постоянная или помехи, содержащие такую постоянную) и нормальный шум.

Как показано в работах [177, 206 и 212], некоторые автокорреляционные преобразования имеют фильтрующие свойства по отношению к аддитивной постоянной, а именно:

$$K(\tau_j) = \sum_{i=1}^{n} [r(\lambda_i) - \bar{r}][r(\lambda_j + \tau_j) - \bar{r}], \; j = 0, 1, \ldots, n - 1, \tag{5.96}$$

$$C(\tau_j) = \sum_{i=1}^{n} |r(\lambda_j) - r(\lambda_i + \tau_j)|^m, \tag{5.97}$$

где $m = 1, 2, \ldots,$ — целое положительное число; $j = 0, 1, \ldots, n/2$ для $i + j > n$; $r(\lambda_i + \tau_j) = r_k$, $k = i + j - n$; τ_j — разница фаз; n — число длин волн, для которых измерялось значение коэффициентов $r(\lambda)$. При $m = 2$ $C(\tau_j)$ является функцией Колмогорова в дискретном варианте.

Исследуем линейное преобразование

$$I_i = \frac{1}{i} \sum_{l=1}^{i} r(\lambda_l), \; i = 0, 1, \ldots, n, \tag{5.98}$$

которое является частным случаем цифрового фильтра. Из ограничительных условий *1* и *2* следует, что I_i является композицией случайных независимых нормально распределенных величин. В таком случае, согласно условию *4*, коэффициент вариации I_i будет

$$v_i = \sigma_i / \bar{I}_i = q \sqrt{\frac{1}{i^2} \sum_{l=1}^{i} r^2(\lambda_l)} \Big/ \frac{1}{i} \sum_{l=1}^{i} r(\lambda) \geqslant q\sqrt{i}. \tag{5.99}$$

[неравенство (5.99) существует согласно неравенству Коши — Шварца, причем равенство достигается при $r(\lambda_l) = \text{const}$].

Из (5.99) следует, что I_i можно рассматривать как фильтр шума $N(0, \sigma)$, хотя бы по отношению к величине v_i. Это дает основание применить выражение (5.98) в качестве преобразования спектральных отражательных характеристик с целью уменьшения функции риска R. Преобразование $C(\tau_j)$ также имеет фильтрующие свойства по отношению к шуму $N(0, \sigma)$, которые наиболее сильно выражены при $m = 1$, но даже тогда дисперсия $C(\tau_j)$ при ограничительных условиях *1*, *2* и *4* больше дисперсии I_i из-за разницы $r(\lambda_i) - r(\lambda_i + \tau_j)$. Это дает основание предположить, что комбинированное преобразование

$$L(\tau_j) = CI[r(\lambda_i)], \tag{5.100}$$

где CI — оператор последовательного воздействия I и C на $r(\lambda_i)$, будет хорошо сочетать фильтрующие свойства C относительно аддитивной неизвестной постоянной I и C, а также по отношению к шуму вида $N(0, \sigma)$. При условиях *1*, *2*, *4* и $m = 1$ дисперсия L будет иметь вид

$$\sigma_L^2 = 2q \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i^2} \sum_{l=1}^{n} r^2(\lambda_l). \tag{5.101}$$

Из условия *3* следует, что в пространстве спектральных отражательных характеристик или их преобразований возможно, но не обязательно получить $R = 0$ для данного множества классов спектральных характеристик

СОХ. Минимальная по числу длин волн или признаков в преобразованном пространстве комбинация $C_{мин}$, при которой в первый раз получается $R = 0$, принята здесь в качестве критерия дискриминантных возможностей преобразований спектральных отражательных характеристик, причем меньшему $C_{мин}$ соответствует лучшее преобразование (в смысле функции риска). Определение $C_{мин}$, осуществленное с помощью описанной в работе [206] комбинаторной программы, учитывает ограничительное условие *3*.

Сравнение преобразований (5.96) — (5.98) произведено для 34 классов спектральных отражательных характеристик широколиственной и хвойной лесной растительности. Дисперсии K и C при $m = 1$ определены в соответствии с формулами, выведенными в работах [206, 212] и приведенными здесь под номерами (5.20) и (5.24), а также при ограничительных условиях *1*, *2* и *4*. Пример решен с доверительным интервалом Δ для всех преобразований

$$\Delta = t\sigma = tqf(\lambda_{i \cap j}), \tag{5.102}$$

где $f(\lambda_{i \cap j})$ зависит от преобразования СОХ (при заданном $r(\lambda_i)$) в соответствии с условиями *1*, *2* и *4*.

Результаты вычислений для $tq = 0{,}03$ и $tq = 0{,}04$ приведены в табл. 5.1, причем $tq = 0{,}04$ относится только к преобразованиям I_i и L_i.

Из табл. 5.1 следует, что в непреобразованном пространстве $r(\lambda_i)$ и в пространстве преобразования K посредством $C(\tau_j)$ 34 класса спектральных отражательных характеристик нельзя различить только посредством измерений коэффициентов отражения $r(\lambda_i)$ на двух длинах волн и только с помощью двух значений K_j (по оси абсцисс K_j нанесены значения τ_j).

Таблица 5.1

tq	Вид преобразования				
	$r(\lambda_i)$	K_j	C_j	I_i	L_i
0,03	0	0	80	470	552
0,04	0	0	—	339	428

Видно, что наиболее эффективным в данном случае является преобразование L. Эта эффективность сохраняется даже в том случае, если в спектральных отражательных характеристиках неизвестных аддитивных постоянных не содержится. В рассмотренном примере их присутствие не предполагалось, но если бы они в действительности существовали, то были бы отфильтрованы преобразованием C_j.

Необходимо отметить еще, что эффективность (дискриминантные возможности) преобразования I_i по отношению R при наличии шума $N(0, \sigma)$ имеет место из-за условия *2*. Если это условие не выполняется, то дисперс-

сия I_i будет больше и в предельном случае [100%-ная положительная корреляция между всеми $r(\lambda_i)$] при $i = 1, 2, \ldots, n$ будет определяться выражением

$$\sigma_I = q\sqrt{\frac{1}{i^2}\sum_{l=1}^{i}\sigma_l^2 + \frac{1}{i^2}2\sum_{l=1}^{i}\sum_{k=1}^{i}\sigma_l\sigma_k}, \quad l < k, \tag{5.103}$$

и тогда функция риска R_I становится соизмеримой с $R_{r(\lambda_i)}$ непреобразованных спектральных отражательных характеристик. Кроме того, чтобы хорошо выявились фильтрующие свойства I_i, необходимо, чтобы $n > 5 + 10$, т.е. необходимо использовать многоканальную информацию о спектральных отражательных характеристиках.

В отличие от I_i преобразование C_j менее чувствительно к случаю положительной корреляции между значениями $r(\lambda_i)$, так как тогда разница $\Delta r(\lambda_i)$ между двумя случайными реализациями спектральных отражательных характеристик данного класса будет содержать в большинстве случаев относительно большую аддитивную составляющую. Эти свойства преобразования C_j существуют также и при постоянном мультипликативном соотношении реализаций.

Из всего сказанного следует, что применение преобразования I_i, а также комбинированного преобразования L_j создает перспективы уменьшения функции риска R при классификации спектральных отражательных характеристик природных образований.

Глава 6.

ПОЛИГОНЫ. ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОЛИГОНАХ

Аэрокосмическими полигонами называются специально выбранные территории, на отдельных участках которых проводят наземные наблюдения и измерения, а также аэросъемки с целью отработки методики дешифрирования космической информации и повышения надежности ее тематической интерпретации. В последнем случае наземные и аэрообследования на полигоне проводят одновременно (синхронно) с его съемкой со спутника.

Полигоны представляют собой сравнительно большие территории, физико-географические, геологические, климатические и другие характеристики которых типичны для соответствующего региона; кроме того, полигоны выбираются таким образом, чтобы обеспечивался доступ для исследования любых их участков.

Поскольку полигоны являются как бы природными эталонами данных регионов, целесообразно иметь полигоны в каждом регионе, представляющем интерес для дистанционного изучения. При этом количество и местоположение полигонов в границах одного региона должны определяться конкретными задачами исследований.

Так как территория полигонов весьма велика (в некоторых случаях до нескольких десятков квадратных километров) и обеспечить непрерывные наземные наблюдения на всей площади полигона практически невозможно, в пределах полигонов создаются хорошо опознаваемые на аэро- и космических изображениях эталонные участки, называемые еще *ключевыми* или *тестовыми*. Каждый эталонный участок включает в себя один или несколько типов природных образований или объектов, характерных для данного полигона. Число эталонных участков определяется количеством предполагаемых объектов исследования на полигоне и, следовательно, в данном регионе.

В качестве примера на рис. 6.1 представлено расположение основных полигонов в НРБ, а в табл. 6.1 — основные задачи, решаемые на их базе.

Как было показано, спектральные отражательные характеристики различных земных объектов зависят не только от свойств самих объектов, но и от множества внешних факторов, изменяющихся случайным образом в весьма широких пределах. Поэтому спектральные отражательные характеристики можно определить с необходимой точностью лишь на основе статистической обработки данных измерений. Это требует проведения доста-

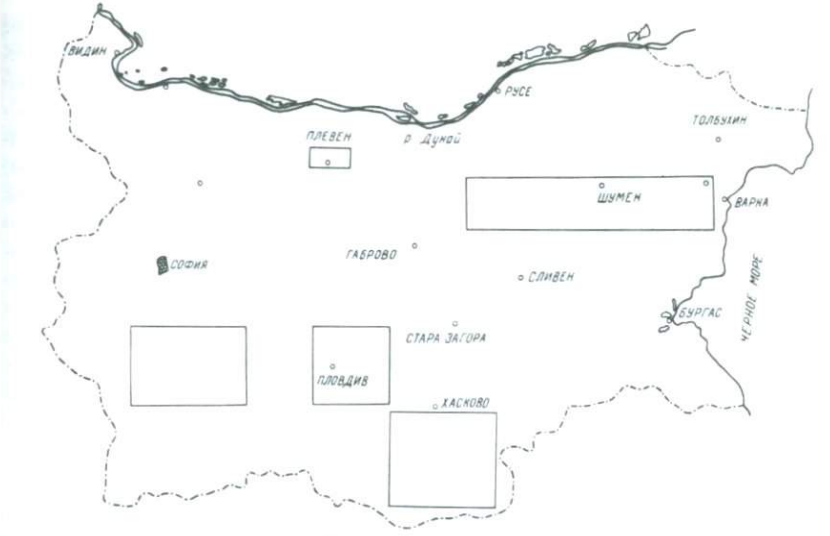


Рис. 6.1. Основные полигоны НРБ.

Таблица 6.1

Задачи	Полигон				
	Шумен	Восточные Родопи	Рила	Пловдив	Плевен
Определение влажности и типов почв				X	X
Определение состояния сельскохозяйственных культур				X	X
Определение степени загрязнения воды и воздуха	X			X	X
Выявление состояния лесов	X	X	X	X	
Использование мелкомасштабных аэроснимков для выявления неотектонических структур		X	X		
Определение геологической информативности различных спектральных зон и их сочетаний в видимом и ИК-диапазонах спектра	X	X	X		
Использование аэро- и космической информации для обнаружения нефтегазоносных структур	X				

точного числа измерений. Именно поэтому желательно, чтобы космическое изображение исследуемого объекта содержало достаточно большое количество отдельных различимых элементов. Естественно, что возможность выполнения этого условия определяется прежде всего разрешающей способностью используемых съемочных устройств. Наибольший объем информации дают многозональные фотографические и телевизионные системы, причем разрешающая способность последних в инфракрасной области, как правило, самая низкая. Поэтому при оценке размеров объектов на эталонных участках целесообразно знать линейную меру разрешающей способности, которую обеспечивают в инфракрасной области используемые многоспектральные съемочные системы. Когда на полигоне имеется более одного эталонного участка, желательно располагать их таким образом, чтобы при проведении (одновременно со спутниковыми) самолетных и наземных исследований все эталонные участки можно было бы обследовать за минимальное время.

Так как полигоны и выбранные на них участки являются эталонами, обеспечивающими правильное дешифрирование аэрокосмической информации, конкретные характеристики полигонов должны быть отражены в их паспортах. Паспорт представляет собой совокупность документов, включающих наиболее важные сведения о полигонах и его эталонных участках, а именно: географические координаты полигона, его физико-географическое описание и климатологические данные; перечень эталонных участков, их точные координаты и решаемые на них задачи; картографические материалы; фотографические материалы; другие материалы и данные, необходимые при сопоставлении аэрокосмической информации с результатами наземных измерений и наблюдений. Паспорт полигона и его эталонных участков является динамическим документом, который непрерывно корректируется и дополняется по мере поступления новых материалов, касающихся полигона.

6.1. Перечень исследований и измерений, проводимых на полигонах

Как правило, измерения и исследования на полигонах проводятся не непрерывно, а лишь в определенные периоды времени. Обычно эти периоды связаны со спутниковыми и самолетными обследованиями.

Опыт показывает, что на любых полигонах проводятся сравнительно однотипные исследования и измерения. Это позволяет создать унифицированный комплекс измерительной аппаратуры, который мог бы использоваться практически для всех работ на полигонах. Действительно, на полигонах должны измеряться: 1) спектральные отражательные характеристики представленных на данном полигоне образований; 2) спектральные характеристики излучения указанных образований; 3) спектральный состав падающей и отраженной солнечной радиации; 4) распределение температур в

поверхностном слое почвы, горных пород, водоемов и т. д., а также вертикальные температурные профили (по глубине и над поверхностью); 5) влажность почвы и приземных слоев атмосферы.

Кроме того, в зависимости от конкретных задач, решаемых на данном полигоне, дополнительно могут проводиться: 1) измерение основных параметров почв, в том числе их загрязненность; 2) измерение скорости и направления ветра в приземных слоях атмосферы; 3) наблюдения растительности, динамики ее развития, наличия заболеваний, биологической продуктивности и т. д.; 4) сейсмические измерения; 5) измерение скорости, направления течений, степени волнения и т. д., характеристик водных массивов; 6) измерение загрязненности водных поверхностей и его характеристик.

6.1.1. Применение зеркальных отражателей на полигонах

Центральной лабораторией космических исследований БАН во время космического, самолетного и наземного экспериментов, проведенных в НРБ в 1977—1978 гг. [78, 119], была исследована возможность применения при самолетных и спутниковых съемках земной поверхности размещаемых на полигонах плоских сферических зеркал. Указанные зеркала использовались для точной географической привязки получаемых изображений и для определения параметров атмосферы.

Основная задача эксперимента заключалась в выявлении оптимальной формы отражателей и отработке практической методики управления положением отражателей в процессе аэрокосмических съемок.

Предварительный расчет формы зеркал основывался на условии, что излучение Солнца должно отражаться в направлении зенита вблизи плоскости, перпендикулярной земной поверхности и содержащей предполагаемую траекторию пролета самолета. При этом плотность энергии в горизон-

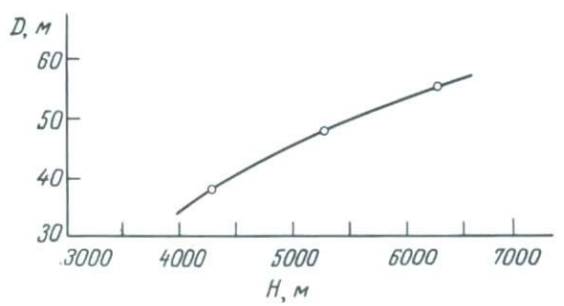


Рис. 6.2. Размеры ожидаемого сечения светового пучка, отраженного на различных высотах.

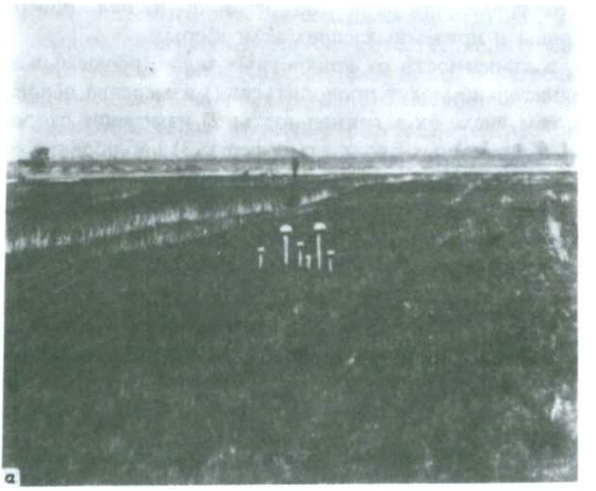


Рис. 6.3. Расположение отражателей на Пловдивском полигоне.
а — сферические отражатели; *б* — зеркальные отражатели.

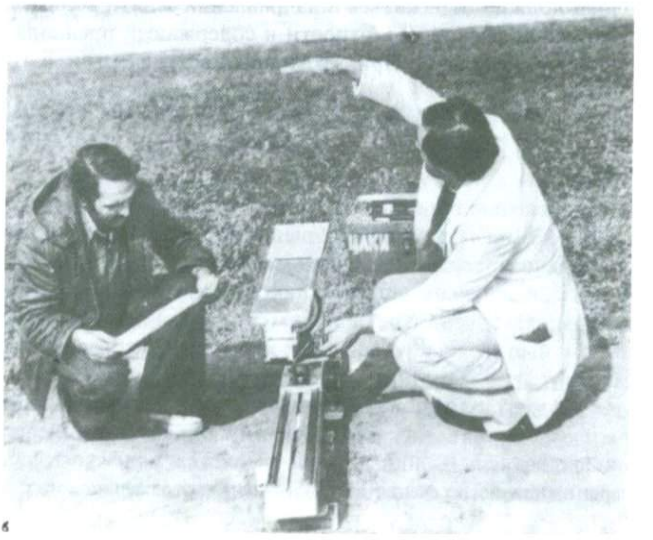


Таблица 6.2

Высота полета H, м	4300	5300	6300	250000	1000000
Диаметр сечения светового пучка D, м	38	48	55	2180	8720

тальном сечении отраженного светового луча на высоте H в зависимости от кривизны идеальной поверхности радиуса ρ можно определить из выражения [119]

$$P_E = k \left[\frac{\rho \cos(Z_\odot/2)}{H \operatorname{tg} [(0{,}5 + \theta)/2]} \right]^2, \qquad (6.1)$$

где k — постоянная, зависящая от спектра солнечной радиации и свойств атмосферы; $Z_\odot$ — зенитный угол Солнца; θ учитывает кривизну зеркальной поверхности и определяется из формулы

$$\theta = 2 \operatorname{arctg} d/\rho, \qquad (6.2)$$

где d — толщина прокладки в центре круглой пластины диаметром 2ρ, определяющая величину стрелки прогиба зеркальной поверхности.

Эти выражения верны при небольших толщинах прокладки, т. е. при небольших отклонениях от плоской формы, причем при $\theta = 0$ получаем выражение, характерное для плоского зеркала.

Размеры горизонтального сечения светового пучка плоского отражателя для различных высот соответствуют данным, приведенным в табл. 6.2 и рис. 6.2.

Эксперимент с зеркалами был проведен на Пловдивском полигоне 23 октября 1977 г. с помощью самолетной лаборатории АН-30 на высотах 4300, 5300 и 6300 м. На рис. 6.3 представлено расположение сферических отражателей и зеркала. Изменение площади зеркала проводилось по заранее выполненным вычислениям с учетом уровня фонового излучения окружающей поверхности. Положение зеркала корректировалось вручную. Суммарная ошибка направленности не превышала 0,2° и находилась в границах заданных отклонений траектории самолета.

Во время пролета самолета над отражателями экипаж и специалисты на борту ясно замечали проблеск отражателей. Это подтвердило возможность применения плоских отражателей при съемках с самолета.

6.1.2. Применение искусственных эталонных объектов на полигонах

Опыт проведения аэрокосмических экспериментов на полигонах НРБ показывает, что применение искусственных эталонных объектов имеет заметное практическое значение.

Эталонные объекты могут иметь произвольную конфигурацию, однако удобно, чтобы они представляли собой последовательность чередующихся

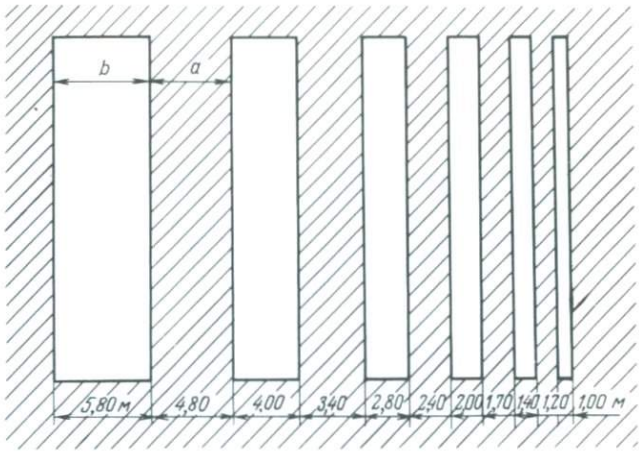


Рис. 6.4. Размеры эталонного объекта.

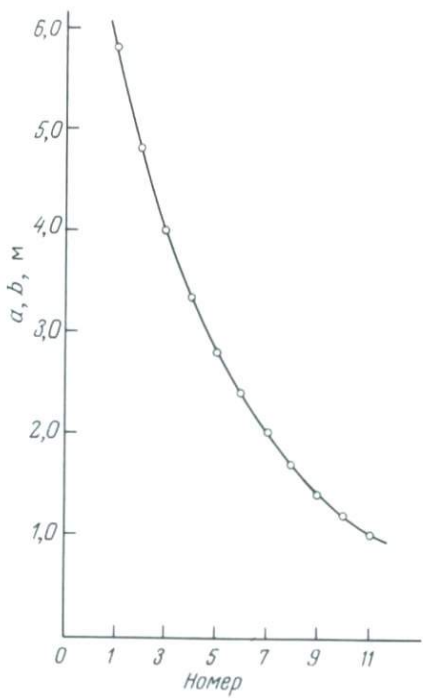


Рис. 6.5. Изменение ширины белых полос эталонного объекта и расстояния между ними.



Рис. 6.6. Расположение искусственного тестового объекта на эталонном участке Белозем Пловдивского полигона.

светлых и темных полос шириной, изменяющейся по определенному закону, причем $L_{макс} \gg L_{мин}$.

На рис. 6.4 показаны размеры эталонного объекта, который использовался во время третьей и четвертой болгаро-советских экспедиций, проведенных на территории НРБ в 1977 и 1978 гг. с участием самолета-лаборатории АН-30 [78]. Белые полосы длиной 20 м были выполнены из ткани. Изменения ширины b белых полос и расстояний между ними a представлены на рис. 6.5.

Эталонные объекты можно использовать для:

1) точной привязки самолетных и спутниковых изображений; 2) определения реальной разрешающей способности применяемых съемочных устройств, в том числе с учетом рельефа и угла наблюдения; 3) учета влияния атмосферы на получаемые на борту данные [92].

Расположение эталонного объекта на тестовом участке Белозем Пловдивского полигона показано на рис. 6.6.

6.2. Измерение параметров почв

Для дистанционных методов исследования Земли особый интерес представляют две характеристики поверхности почв: отражение падающей радиации и зависящее от температуры излучение в длинноволновой части спектра.

Отражение падающей радиации от поверхности почв связано с окраской, текстурой, шероховатостью, влагосодержанием, минеральными и химическими компонентами, углом освещения, степенью затенения растительностью и т. д. [40]. На рис. 6.7 представлены спектральные отражательные характеристики некоторых типов почв, распространенных в НРБ.

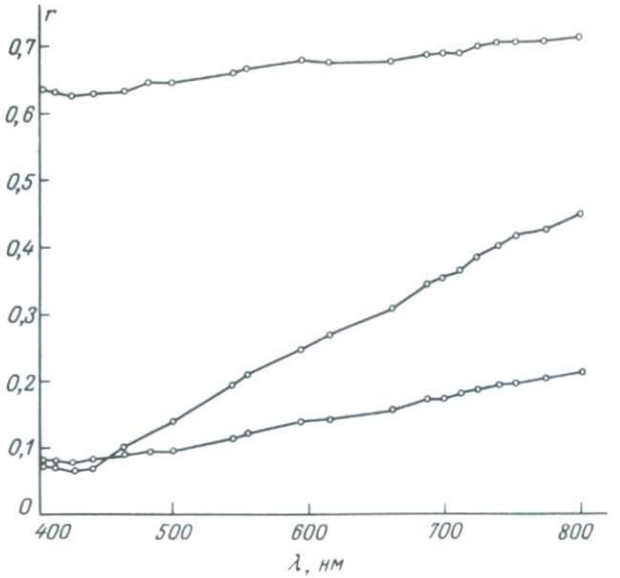


Рис. 6.7. Спектральные отражательные характеристики некоторых типов почв в НРБ.

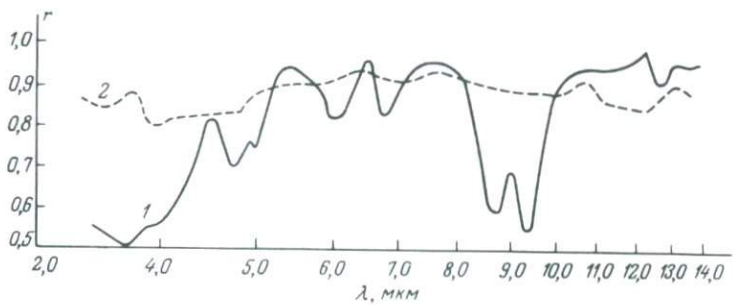


Рис. 6.8. Спектральные отражательные характеристики песка (*1*) и глины (*2*) в ИК-области электромагнитного спектра.

Излучение почв в тепловой ИК-области спектра (свыше 3,5 мкм) сильно зависит от длины волны: излучательная способность численно равна абсорбции в этой части спектра, принятой за 100%, минус коэффициент отражения энергии в той же области. На рис. 6.8 показаны спектральные отражательные характеристики песка и глины в ИК-области спектра.

Температура поверхности почвы влияет на величину излучаемой поверхностью радиации $R_{\text{п}}$, определяемой из выражения

$$R_{\text{п}} = \varepsilon \sigma T_{\text{п}}^4, \tag{6.3}$$

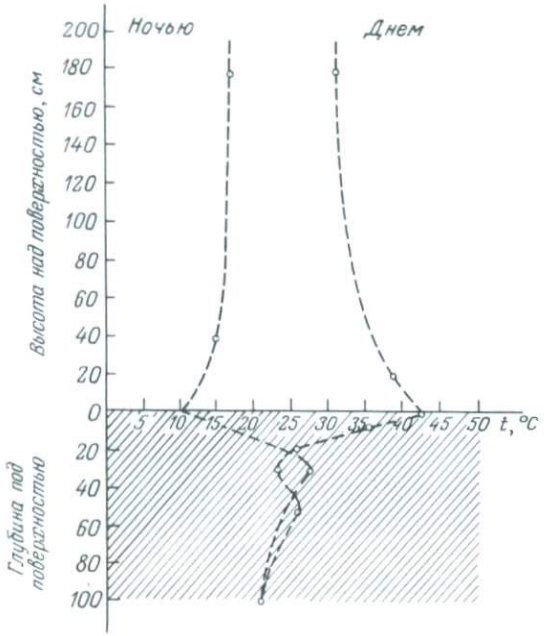


Рис. 6.9. Температурные профили воздуха вблизи поверхности почвы и самой почвы летом (днем и ночью).

где ε — излучение; σ — постоянная Стефана—Больцмана; $T_{\text{п}}$ — температура почвы (К).

Температура почвы зависит от энергетического баланса поверхности почвы

$$Q_{\text{абс}} = R_{\text{п}} \pm Q_{\text{конв}} \pm Q_{\text{пров}} \pm Q_{\text{исп}}, \qquad (6.4)$$

где $Q_{\text{конв}}$ — энергия обмена посредством конвекции между поверхностью почвы и воздухом; $Q_{\text{пров}}$ — тепло, проводимое от поверхности или к поверхности почвы (с положительным или отрицательным знаком соответственно); $Q_{\text{исп}}$ — энергия, теряемая при испарении влаги (с положительным знаком), или энергия, получаемая при конденсировании влаги (с отрицательным знаком). Если воздух холоднее поверхности почвы, то последняя теряет энергию и величина $Q_{\text{конв}}$ имеет положительный знак, если воздух теплее, то на поверхность почвы падает поток тепла и величина $Q_{\text{конв}}$ имеет отрицательный знак. Скорость конвекционной передачи зависит от шероховатости почвы и вида растительности на ней (травы, зерновых, леса и т. д.), а также от профиля скорости ветра.

Проводимость почвы $Q_{\text{пров}}$ зависит от ее компактности, размера частиц, влажности, содержания частиц горных пород и т. д.

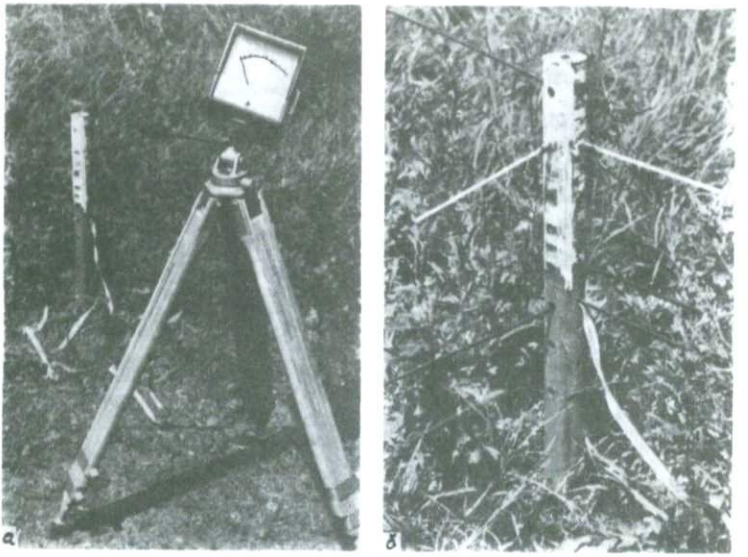


Рис. 6.10. Прибор для измерения температурных профилей приземного слоя атмосферы и поверхностного слоя почвы, разработанный в ЦЛКИ БАН.

а — общий вид; *б* — расположение датчиков.

Температурный профиль воздуха над поверхностью и под поверхностью почвы влияет на температуру на самой поверхности. Температура почвы на глубинах до 10-15 м подвержена сезонным изменениям: зимой она повышается с увеличением глубины, а летом — понижается. Годовые и суточные изменения температуры уменьшаются с увеличением глубины. Годовые изменения сводятся к нулю на глубине около 12 м, а суточные — на глубине около 75 см. На рис. 6.9 представлены температурные профили воздуха вблизи поверхности почвы и самой почвы, измеренные летом (днем и ночью). Видно, что большие суточные колебания температуры наблюдаются на поверхности и, следовательно, невысокая растительность находится в более суровых условиях. При съемке поверхности почвы эти колебания температуры поверхности сказываются на получаемых первичных данных. Нужно также иметь в виду, что растительный покров в той или иной степени уменьшает амплитуду колебаний температуры поверхности и почвы.

На рис. 6.10 представлен разработанный в ЦЛКИ БАН[1)] прибор для измерения температурных профилей приземного слоя атмосферы до 50 см и поверхностного слоя почвы на глубине до 50 см.

[1)] Инженером В. Ценовым.

6.2.1. Методика полигонных исследований почвы

Исследование поверхностного слоя почвы аэро- и космическими средствами требует (хотя бы на этапе создания) классификатора предватительной информации, полученной за счет непосредственного измерения параметров слоя почвы на эталонных участках и их сравнения со спектральными отражательными характеристиками тех же участков. При этом необходимо определить требуемое число проб с контрольных участков эталонных размеров и влияние длительности эксперимента (в пределах одного дня) на относительную дисперсию результатов (в первую очередь влажности).

Эти вопросы детально исследованы в Центральной лаборатории космических исследований БАН [78, 79]. На площади 500 × 500 м, засеянной до эксперимента, произведены измерения влажности поверхностного слоя почвы, количества гумуса и спектральных отраженных характеристик поверхностного слоя почвы. Пробы брались с участков квадратной формы размерами 0,5 × 0,5 м; 1,0 × 1,0 м и 1,5 × 1,5 м. В дальнейшем эти участки для краткости будем называть квадратами.

Влажность почвы определена методом высушивания, причем с каждого квадрата брались по пять проб только с поверхностного слоя (толщиной около 1 см), что вызвано необходимостью сопоставления результатов со спектральными отражательными характеристиками соответствующего участка. Влажность и количество гумуса определялись для одних и тех же проб[1)].

Отбор проб осуществлялся в течение 4 ч, причем сначала брались пробы с квадратов 1,5 × 1,5 м, затем с 1,0 × 1,0 м и наконец с 0,5 × 0,5 м. Зоны расположения квадратов различных размеров не перекрываются и приблизительно соответствуют концентрическим окружностям, из-за чего число квадратов различных размеров составляет соответственно 15, 7 и 4.

Предполагаемые факторы, влияющие на распределение влажности и гумуса почвенных проб, взятых с территории полигона, разделяются на две группы. Фактор A (табл. 6.3) формально связан с размером квадрата. На самом деле этот фактор является результатом совместного влияния по крайней мере следующих содержательных (неформально связанных с размером квадрата) факторов: территориального распределения влажности и гумуса, длительности эксперимента, локального распределения влажности и гумуса в пределах отдельного квадрата (в зависимости от его размера). Фактор A имеет три градации: 0,5 × 0,5; 1,0 × 1,0; 1,5 × 1,5. Фактор B зависит от числа проб с одного квадрата и имеет пять градаций: 1, 2, 3, 4 и 5 (табл. 6.3).

Большое число случайных, независимых факторов, сравнительно равнозначно влияющих на влажность и гумус в пределах данного квадрата, дает основание предположить нормальное распределение влажности и гумуса в границах одного квадрата. При таком предположении проверена гомо-

[1)] В лабораториях Института почвоведения и программирования урожая им. Н. Пушкарова.

Таблица 6.3

A, м	B									
	m, %					v				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,5 × 0,5	3,81	3,68	3,65	3,63	3,58	0,10	0,05	0,04	0,05	0,03
1,0 × 1,0	3,94	4,20	4,17	4,12	4,14	0,26	0,21	0,23	0,19	0,15
1,5 × 1,5	5,62	5,72	5,71	5,72	5,73	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10

генность дисперсий отдельных квадратов по критерию Бартлета. При доверительном уровне $p < 0{,}05$ не доказано значимое различие между ними. Это дает возможность применить критерий Стьюдента и аппарат дисперсионного анализа.

В табл. 6.3 приведены данные о средней влажности $m_{ср}$, причем усреднение производится по всем квадратам, соответствующим данной комбинации градаций обоих факторов. Анализ разностей между «соседними» значениями градаций показывает, что фактор B не является статистически значимым. Таким образом, можно сделать вывод, что (поскольку пробы с данного квадрата имеют случайный характер) размер квадрата также незначим по отношению к средней влажности со всех квадратов с данным размером (в пределах исследуемых размеров). Итак, из перечисленных ранее факторов, влияющих на конечный результат, остаются факторы времени и территориального распределения влажности.

Для обеспечения сравнимости результатов удобно использовать безразмерную величину — коэффициент вариации

$$v = s/\bar{x}, \tag{6.5}$$

где $\bar{x}$ — среднеарифметическое значение влажности для данного квадрата; s — оценка среднеквадратичного отклонения x.

Значения v для рассматриваемого случая также приведены в табл. 6.3 и указывают на очевидную корреляцию между A и B: по строкам — монотонно убывающая зависимость, по столбцам — один выраженный максимум значений v, соответствующий полуденным часам (рис. 6.11).

Наличие максимума в зависимости величины v от фактора A (для всех градаций B) требует дополнительной интерпретации. Ниже эта зависимость исследована на уровне качественной модели, позволяющей анализировать изменение v в отношении не только фактора времени высыхания почвы в ходе эксперимента, но и территориальной негомогенности, если она проявляется в уменьшении влажности (по фактору A), что в модели соответствует высыханию[1)].

[1)] Данные табл. 6.3 указывают именно на такой характер изменения влажности.

Коэффициент вариации определяется из выражения

$$v = \frac{\beta}{x} = \frac{s_m}{m} = \sqrt{n^2 \sum_{i=1}^{n} (m_i - \bar{m})^2/(n-1)\left(\sum_{i=1}^{n} m_i\right)^2}, \quad (6.6)$$

где s_m — дисперсия влажности: $\bar{m}$ — среднее значение влажности; $m_i(t)$ — текущее значение влажности; n — число частиц в представительной выборке, $i = 1, 2, \ldots, n$. Значение $m(t)$ определяется при следующих ограничениях [208]:

1) частицы почвы имеют сферическую форму и радиус r;

2) испарение влаги происходит только с поверхности частицы;

3) распределение частиц по размерам одинаково для всех проб, взятых с каждого квадрата с данными координатами на исследуемом эталонном участке;

4) сухое вещество во всех пробах с одного и того же квадрата имеет одинаковую удельную влажность ρ;

5) испарение влаги подчиняется закону

$$m_{i_k}(t) = m_{i_k}(t_0) - s_{i_k} t, \quad (6.7)$$

где $m_{i_k}(t)$ — текущее значение влажности k-й частицы с i-го квадрата; $m_{i_k}(t_0)$ при $i = 1, 2, \ldots, n$; $k = 1, 2, \ldots, N$ — начальное значение $m_{i_k}(t)$; s_{i_k} — площадь испарения k-й частицы с i-го квадрата.

В выражении для m_{i_k} нет номера пробы с i-го квадрата, так как, согласно ограничению *3*, пробы с данного квадрата неразличимы между собой.

Из первых двух ограничений следует, что

$$m_{i_k}(t) = m_{i_k}(t_0) - a_{i_k} \pi r_{i_k}^2 t = k_{i_k} \pi r_{i_k}^3 - a_{i_k} \pi r_{i_k}^2 t, \quad (6.8)$$

где k_{i_k} — среднее значение коэффициента объемной влажности (удельная влажность частиц) для сферы радиусом r_{i_k} сразу после последнего увлажнения; a_{i_k} — среднее значение коэффициента поверхностного испарения (удельное поверхностное испарение) частицы для сферы радиусом r_{i_k}.

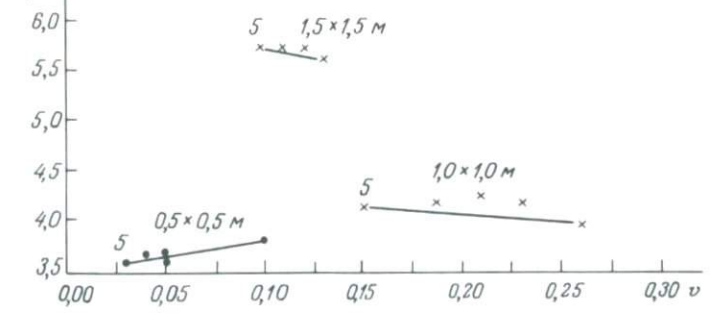


Рис. 6.11. Зависимость влажности от коэффициента вариации.

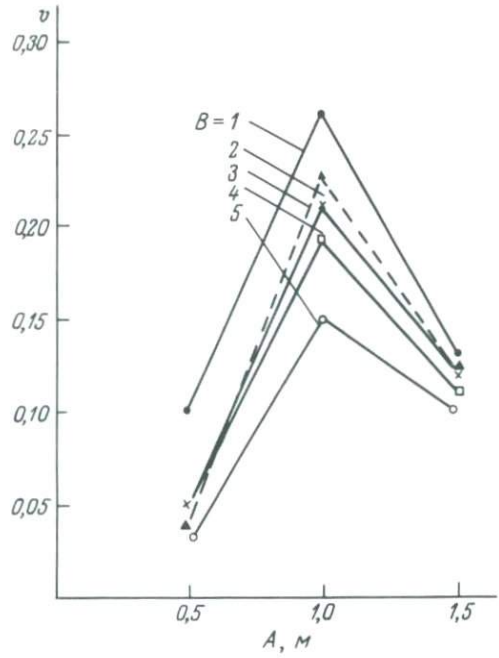


Рис. 6.12. Зависимость коэффициента вариации от размера исследуемого участка.

Относительная влажность $x_{i_k}(t)$ (количество влаги в единице массы) определяется из выражения

$$x_{i_k}(t) = m_{i_k}(t)/M_{i_k}, \tag{6.9}$$

где $M_{i_k} = 4\pi\rho_i r_{i_k}^3 /3.$ (6.10)

Но, согласно ограничению *4*,

$$\rho_{i_k} = \rho_i. \tag{6.11}$$

Тогда из выражений (6.8) и (6.9) следует

$$x_{i_k}(t) = (k_{i_k} r_{i_k} - a_{i_k} \cdot t \cdot 0{,}75)/r_{i_k}\rho_i \tag{6.12}$$

и уравнение (6.6) принимает вид

$$v_x = \sqrt{\frac{n^2 \sum_{i=1}^{n} \left(w_i - \frac{1}{n} \Sigma w_i \right)^2}{(n-1)\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \right)^2}} = \sqrt{\frac{n^2}{n-1}\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \right)^2} - \frac{1}{n} \right]}, \tag{6.13}$$

$$\text{где } k_i = \sum_{k=1}^{N} k_{i_k};\ a_i/r_i = \sum_{k=1}^{N} 0{,}75 a_{i_k}/r_{i_k} \text{ и} \tag{6.14}$$

$$w_i = k_i - a_i\, t/r_i. \tag{6.15}$$

Первая производная v_x по времени описывается выражением

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{n^2}{n-1}\left[\frac{\left(\Sigma w_i \dfrac{\partial w_i}{\partial t}\right)(\Sigma w_i) - \left(\Sigma \dfrac{\partial w_i}{\partial t}\right)(\Sigma w_i)^2}{(\Sigma w_i)^3 v_x}\right]. \tag{6.16}$$

Из условия $\dfrac{\partial v_x}{\partial t} = 0$ экстремумы определяются в виде временных функций t:

$$\left(\Sigma w_i \frac{\partial w_i}{\partial t}\right)(\Sigma w_i) = \left(\Sigma \frac{\partial w_i}{\partial t}\right)(\Sigma w_i^2). \tag{6.17}$$

Из выражения (6.17), имея в виду (6.14), после раскрытия скобок в суммах получаем

$$t^2 \sum_{(i)} \sum_{(j)} \left[\frac{a_i a_j}{r_i r_j}\left(\frac{a_j}{r_j} - \frac{a_i}{r_j}\right)\right] + t \sum_{(i)} \sum_{(j)} \left[-\frac{a_i a_j}{r_i r_j}(k_i - k_j) + \right.$$

$$\left. + \frac{a_i}{r_i}\left(\frac{a_j}{r_j} - \frac{a_i}{r_i}\right) k_j\right] + \sum_{(i)} \sum_{(j)} k_j (k_i - k_j) \frac{a_i}{r_i} = 0,\ i \neq j. \tag{6.18}$$

Вследствие симметрии индексов коэффициенты перед t^2 в (6.18) равны и, следовательно, функция $v_x(t)$ имеет один экстремум при

$$t = \frac{\sum \sum k_j (k_j - k_i) a_i / r_i}{\sum \sum k_j [(a_j/r_j) - (a_i/r_i)] a_i/r_i}, \quad i \neq j. \tag{6.19}$$

Этот экстремум является максимумом, так как $v_x \geqslant 0$ и $w_i \geqslant 0$; следовательно, для $t \geqslant (k_i r_i/a_i)$ все $w_i = 0$, т. е. $v_x = 0$.

Данные измерений подтверждают ход теоретических выводов, т. е. значение коэффициента вариации при размере квадрата 1,0 × 1,0 м (этот размер соответствует среднему интервалу времени в ходе эксперимента) больше как начального (участок с размерами 1,5 × 1,5 м), так и конечного (участок 0,5 × 0,5 м) значения v (рис. 6.12).

Таблица 6.4. Двухфакторная таблица содержания гумуса в почве

A, м	B				
	1	2	3	4	5
0,5 × 0,5	1,54	1,56	1,56	1,56	1,56
1,0 × 1,0	1,69	1,67	1,67	1,65	1,67
1,5 × 1,5	1,87	1,79	1,79	1,80	1,79

Исследование содержания гумуса H_x во взятых пробах проведено по отношению к факторам A и B (табл. 6.4), которые имеют почти такое же содержание, как в случае исследования влажности с той лишь разницей, что в ходе эксперимента не приходится учитывать высыхание почвы (рис. 6.13).

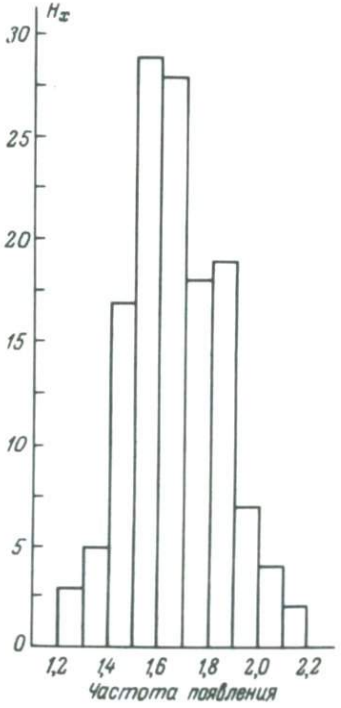


Рис. 6.13. Частотное распределение содержания гумуса в почве.

Посредством случайной выборки по 4 квадратам каждого размера получена матрица среднего содержания гумуса. Для этой матрицы проведен двухфакторный анализ с параллельными измерениями. Получены следующие результаты для критерия Фишера:

$$F_A = 14 > F_{A_T} = 5{,}1,\ p < 0{,}01;$$
$$F_B = 3{,}8 > F_{B_T} = 2{,}6,\ p < 0{,}05;$$
$$F_{AB} = 3{,}8 > F_{AB_T} = 2{,}2,\ p < 0{,}05.$$

Следовательно, оба фактора A и B имеют обеспеченную статистическую значимость, однако влияние B несущественно по величине ($< 5\%$). Это показывает, что только фактор A (территориальное распределение) оказывает значительное влияние на среднее содержание гумуса.

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

— статистическая незначимость числа проб в квадрате и размера квадрата при измерении влажности и содержания гумуса указывает на необходимость случайного распределения точек отбора проб по территории полигона (без локальной концентрации);

— наличие максимума значения коэффициента вариации влажности указывает на целесообразность проведения измерений влажности поверхностного слоя почвы в утренние и вечерние часы (это уменьшает число проб, необходимое для получения средней влажности с заранее заданной точностью), либо проводя измерения в полуденные часы, увеличивать число обрабатываемых проб.

6.2.2. Влажность почвы

Обычно о влажности слоя почвы судят по результатам точечных измерений с применением радиационной техники или взятия образцов и их последующего высушивания (типичное точечное измерение). Часто влажность почвы оценивается на основе количества выпавших осадков (или искусственного дождевания). Все указанные измерения не удовлетворяют требованиям практики, поскольку ошибка прогнозирования на основе этих измерений, как правило, заметно превышает 25—30%.

Точность измерения влажности почвенного слоя можно значительно повысить при переходе от точечных измерений к интегральному определению влажности слоя почвы; как показывает опыт ЦЛКИ БАН, такие методы оперативны и отличаются большой точностью. Требования, предъявляемые к используемым при этом приборам для измерения влажности почвенного слоя, следующие: непосредственная зависимость измеряемой величины от содержания влаги в почве; возможность определения распределения влажности в слое почвы с приемлемой пространственной разрешающей способностью; возможность измерения влажности почвенного слоя в вертикальном направлении (например, на глубинах примерно до 40—50 см); возможность работы в условиях облачности.

Рассмотрим существующие интегральные методы измерения влажности слоя почвы, удовлетворяющие указанным требованиям и находящие применение при полигонных и аэрокосмических измерениях.

Пассивные радиометоды измерения влажности почвенного слоя. Проведенные полигонные измерения показали непосредственную и четко выраженную зависимость между микроволновой радиацией почвы и содержанием влаги в поверхностном слое почвы.

Интенсивность естественной микроволновой радиации, излучаемой или отражаемой земной поверхностью в диапазоне длин волн 0,1—30 см, выражается обычно яркостной температурой $T_я$ поверхности (гл. 2). Устройства, применяемые для измерения этой радиации, представляют собой микроволновые радиометры, которые калибруются с использованием радиации источников с заранее известной яркостной температурой T_e.

Яркостная температура $T_я(\theta,h)$, регистрируемая радиометром, находящимся на борту самолета или спутника на высоте h, испытывает влияние атмосферы (рис. 6.14). Радиация, восходящая с поверхности исследуемого природного образования, включает составляющие, обусловленные собственным излучением поверхности и отражением падающей на поверхность радиации атмосферы. Кроме того, восходящая с поверхности образования радиация, проходя сквозь атмосферу, затухает. Пусть это затухание описывается функцией $\tau(h)$. Наконец, атмосферный слой между исследуе-

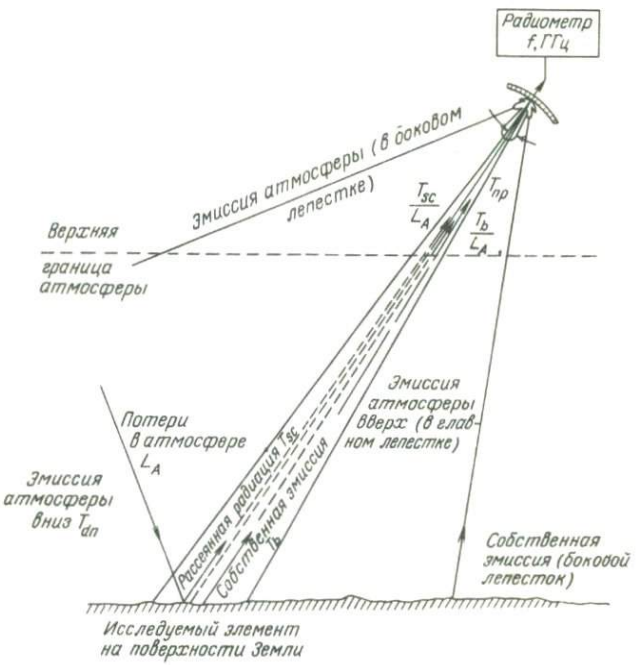


Рис. 6.14. Регистрация яркостной температуры.

мым образованием на земной поверхности и радиометром также является источником радиации, которая добавляется к принимаемому сигналу. Следовательно, яркостную температуру можно выразить следующим образом:

$$T_{я}(\theta,h) = [\varepsilon(\theta)T + r(\theta)T_s]\tau(h) + \int_0^h T_A(h)\frac{\partial\tau}{\partial h}dh, \qquad (6.20)$$

где T — температура поверхности образования; T_s — яркостная температура неба; T_A — температура атмосферы; ε — коэффициент излучения поверхности образования; $r = 1 - \varepsilon$ — отражательная способность поверхности; τ — коэффициент пропускания атмосферы; θ — угол между нормалью к поверхности и направлением на антенну радиометра. При этом первый член уравнения описывает радиацию с поверхности исследуемого природного образования, а второй член учитывает радиацию атмосферы.

Необходимо иметь в виду, что радиация многих природных образований поляризована. Тогда уравнение (6.20) можно записать для горизонтальной и вертикальной составляющих. Напомним, что горизонтальная и вертикальная поляризации определяются таким образом, что электрические векторы лежат в плоскостях, соответственно параллельной и перпендикулярной поверхности Земли. Тогда

$$T_{я,\Gamma}(\theta,h) = [\varepsilon_\Gamma(\theta)T + r_\Gamma(\theta)T_s]\tau(h) + \int_0^h T_A(h)\frac{\partial\tau}{\partial h}dh, \qquad (6.21)$$

$$T_{я,B}(\theta,h) = [\varepsilon_B(\theta)T + r_B(\theta)T_s]\tau(h) + \int_0^h T_A(h)\frac{\partial\tau}{\partial h}dh. \qquad (6.22)$$

Индексы Γ и B в уравнениях обозначают соответственно горизонтальную и вертикальную поляризацию. При этом только ε и r зависят от поляризации, т. е. поляризация строго связана с характеристиками поверхности природного образования.

Разность двух составляющих $T_{я,\Gamma}$ и $T_{я,B}$ сильно зависит от изменения угла θ. Эта разность наибольшая при угле Брюстера, который для большинства поверхностей природных образований составляет около 70°. Вертикальная составляющая $T_{я,B}$ никогда не может быть меньше горизонтальной. По определению обе компоненты $T_{я,\Gamma}$ и $T_{я,\Gamma}$ равны только при измерении в надир, т. е. при $\theta = 0$. Для любого другого значения угла θ разность уменьшается с увеличением шероховатости поверхности образования.

Микроволновая яркостная температура почв в естественных условиях зависит от многих факторов: влагосодержания, шероховатости поверхности (учитывающей микрорельеф, размер и форму частиц и фрагментов, растительный покров и т. д.), а также термодинамической температуры. Все факторы, за исключением термометрической температуры, влияют на

диэлектрические свойства материалов. Изменения диэлектрических свойств со своей стороны влияют на излучательную способность и, следовательно, на измеряемые радиометрические яркостные температуры.

В частности, изменения влагосодержания слоя почвы оказывают значительное влияние на коэффициент излучения и в результате приводят к большим изменениям радиометрических яркостных температур. Проводя измерения на нескольких различных частотах, можно получить также данные о распределении влажности по вертикали.

Интегрирующие зондовые методы измерения влажности. Недостатком известных зондовых методов измерения влажности поверхностного слоя почвы является нарушение структуры или загрязнение поверхности исследуемого слоя почвы; кроме того, область измерения не соотнесена с собственными неоднородностями исследуемого слоя почвы.

В ЦЛКИ БАН был разработан зонд для быстрого измерения влажности поверхностного слоя почвы, который не обладает указанными недостатками. Он интегрирует измеряемую величину в области, определенной в соответствии с собственными неоднородностями слоя почвы. Зонд для измерения влажности поверхностного слоя почвы представляет собой кольцевой конденсатор, сечение которого совпадает с областью интегрирования измеряемой величины, а его высота задается толщиной исследуемого поверхностного слоя почвы. Пластины конденсатора имеют в данном случае форму колец, к которым прикреплены вертикальные иглы длиной, равной высоте пластин конденсатора. Расстояние между иглами соответствует максимальным размерам твердых компонент исследуемого слоя почвы. Кольца и иглы покрыты тонким изоляционным слоем (рис. 6.15). При из-

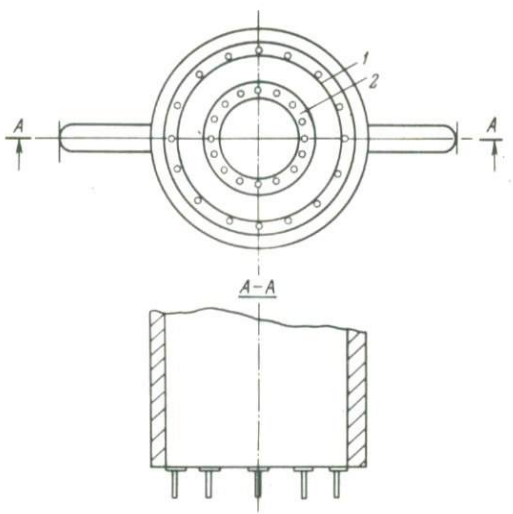


Рис. 6.15. Зонд для быстрого измерения влажности поверхностного слоя почвы.
1 — внешнее кольцо; *2* — внутреннее кольцо.

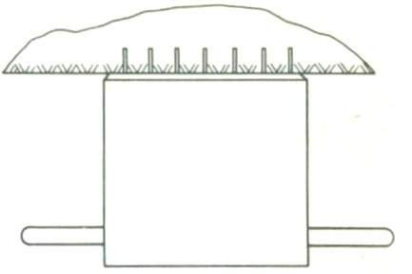


Рис. 6.16. Измерение влажности поверхностного слоя почвы.

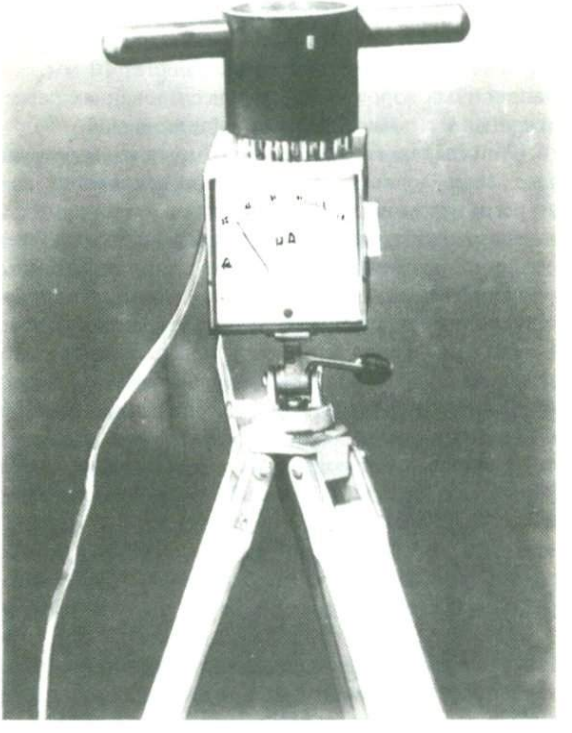


Рис. 6.17. Прибор для быстрого измерения влажности поверхностного слоя почвы, разработанный в ЦЛКИ БАН.

мерении зонд забивается в исследуемый слой почвы (рис. 6.16). Получается конденсатор, основным диэлектриком которого является исследуемая почва.

В результате интегрирования измеряемая величина, т. е. влажность почвы, описывается формулой

$$m_0 = \int\limits_{V = Dz} m(V)dV, \tag{6.23}$$

где D — область интегрирования измеряемой влажности поверхностного слоя почвы; z — толщина поверхностного слоя почвы.

Проведенные в ЦЛКИ БАН исследования показали, что глубина слоя почвы, в котором оценивается влажность, т. е. длина игл зонда, не должна превышать 10 мм. При проведении измерений влажности методом взятия проб и их последующего высушивания также используется лишь поверхностный слой почвы толщиной, не превышающей 10 мм.

При дистанционных аэрокосмических исследованиях регистрируется радиация, отраженная от поверхностного слоя почвы.

На рис. 6.17 представлен прибор для быстрого измерения влажности поверхностного слоя почвы. Этот прибор, состоящий из автономного измерительно-регистрирующего блока и набора зондов, которые интегрируют данные измерений на площади, определенной в соответствии с конкретными неоднородностями поверхностного слоя почвы, многократно использовался при проведении национальных и международных самолетных и наземных синхронных экспериментов по программе «Интеркосмос».

Быстрый метод измерения влажности поверхностного слоя почвы дает ряд преимуществ по сравнению с широко применяемым до сих пор классическим методом (оценка посредством высушивания образцов): позволяет проводить измерение в реальном масштабе времени, обладает значительно более высокой точностью по сравнению с классическим методом, при котором ошибка иногда превышает 50—70% (в данном случае ошибка не превышает 5—6%).

6.2.4. Проводимость почвы

Известно, что распространение радиоволн над поверхностью почвы связано с прохождением и поглощением преломленной волны в поверхностном слое почвы и зависит от ее физико-химических свойств, прежде всего электропроводимости σ, электрической ε и магнитной μ проницаемостей.

Обычно речь идет о локальных параметрах почвы, свойственных определенным участкам. Проводимость, или точнее градиент проводимости, почвы является одним из параметров, которые характеризуют данный тип почвы (сюда включается также зависимость электропроводимости от влажности и т. д.).

Определять проводимость слоя почвы очень удобно посредством измерения изменения амплитуды электромагнитного поля в глубине почвы. Амплитуда электромагнитного поля уменьшается с увеличением глубины по экспоненциальному закону $\exp(-\beta z)$, где z — глубина почвенного слоя, а β — коэффициент поглощения, являющийся функцией σ и λ. Отсюда следует, что посредством измерения затухания электромагнитного поля на данной глубине z можно определить величины σ и β.

Пусть H_0 — амплитуда магнитного поля на поверхности Земли. Тогда в однородной почве при глубине слоя почвы z напряженность электромагнитного поля будет описываться формулой

$$H_z(z) = H_0 \exp(-\beta z). \tag{6.24}$$

Отсюда

$$\beta = (1/z) \ln (H_0/H(z)) \tag{6.25}$$

и

$$\sigma = \frac{\beta^2 \lambda}{1200} = 0{,}833\beta^2\lambda \cdot 10^{-3}. \tag{6.26}$$

Видно, что для определения β необходимо знать не абсолютное, а относительное значение напряженности электромагнитного поля. Это является большим преимуществом метода, так как не требуется предварительная градуировка прибора; для измерения можно использовать любой приемник, выходное напряжение (или ток) которого пропорционально напряженности электромагнитного поля. Если показания прибора на поверхности составляют $\varkappa_0$, а на глубине z — $\varkappa(z)$, то очевидно, что

$$H_z(z) = H_0 \varkappa(z)/\varkappa_0. \tag{6.27}$$

При измерении приемник первоначально располагают на поверхности почвы и настраивают на приемную станцию (обычно на местную или близкую средневолновую), ориентируясь на максимальное выходное напряжение. Регулятором чувствительности устанавливают показание $\varkappa_0$. После этого, не изменяя положения приемника в азимутальной плоскости, его опускают на глубину z и отсчитывают показание $\varkappa(z)$.

Результаты некоторых измерений, проведенных в районе с. П. Евтимово, с. Златоврых (Пловдивского округа) и Божурище (Софийского округа) (табл. 6.6), показали, что с увеличением содержания влаги в анализируемом почвенном слое увеличивается проводимость σ[1]. Это обусловлено главным образом увеличением концентрации растворенных в почве солей при увеличении содержания влаги. При определенной разности Δ, характерной для данного типа почвы, начинается процесс насыщения. Проводимость стремится к определенному значению, зависящему от типа почвы и содержания солей в ней. На рис. 6.18 приведена зависимость $m_0 = f(m_z)$ для различных почв.

[1] Одновременно с измерениями проводимости брались пробы из поверхностного слоя и с глубины z, по которым в лабораторных условиях определялась влажность методом высушивания.

Таблица 6.6

$\varkappa_z$, дел.	σ, мСм/м	Средняя влажность поверхностного слоя m_0, %	Средняя влажность на глубине m_z, %	$\Delta = m_z - m_0$
		Патриарх Евтимово, z = 15 см, $\varkappa_0$ = 20		
19,3	60,0	19,80	29,68	9,88
18,6	80,0	12,63	31,72	19,09
19,5	10,0	27,34	29,48	2,14
		Божурище, z = 15 см, $\varkappa_0$ = 20		
18,6	62,5	7,87	38,27	30,40
19,1	32,6	11,61	30,46	18,85
18,6	62,5	7,28	36,86	29,58
18,8	54,2	6,78	39,56	32,78
18,7	61,2	5,71	37,10	31,39
		Златоврых, z = 10 см, $\varkappa_0$ = 20		
18,0	427,0	8,24	26,21	17,97
19,1	670,0	4,95	23,99	19,04
19,0	95,0	7,09	24,32	17,23
19,5	24,4	4,81	22,62	17,31

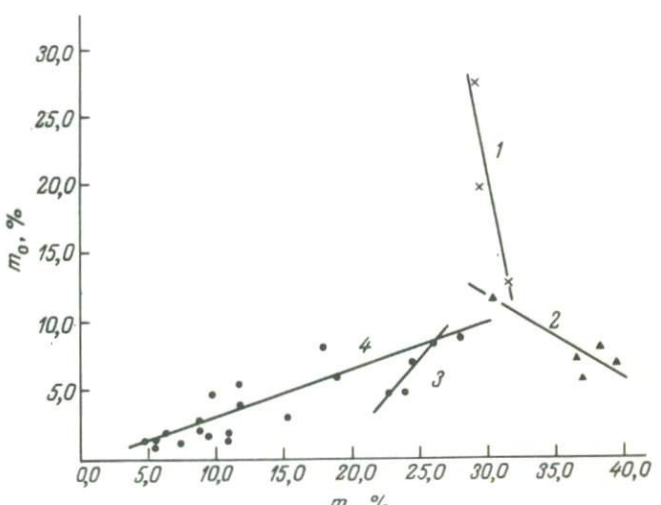


Рис. 6.18. Зависимость проводимости поверхностного слоя почвы от влажности.

1 — П. Евтимово, вылуженная чернозем-смольница; *2* — Божурище, чернозем-смольница; *3* — Златоврых, вылуженная коричневая лесная почва; *4* — Белозем, аллювиально-луговая почва.

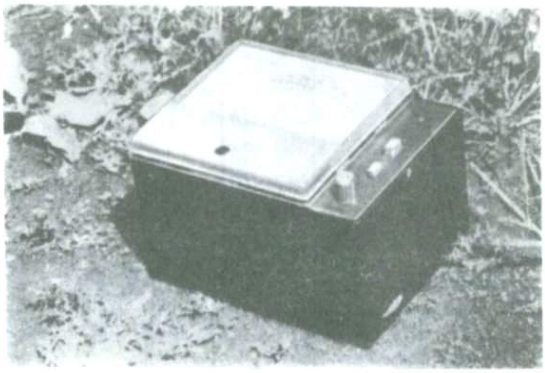


Рис. 6.19. Прибор для измерения градиента проводимости поверхностного слоя почвы, разработанный в ЦЛКИ БАН.

Указанный способ непосредственного определения проводимости почвы, как показали измерения в естественных условиях, дает быстрые и точные результаты, которые не зависят от предварительной градуировки измерительного прибора. Кроме того, при наличии графической зависимости $\sigma_s = f(m)$ и при известной величине Δ для данного типа почвы можно определить также содержание влаги в почвенном слое, что является существенным преимуществом метода.

На рис. 6.19 показан разработанный в ЦЛКИ БАН прибор для измерения градиента проводимости поверхностного слоя почвы во время работы (прибор разработан инж. Т. Назырским).

6.3. Измерение параметров растительности

Различные виды растительности характеризуются весьма схожими спектральными отражательными характеристиками. В видимой и ближней инфракрасной области эти характеристики имеют две зоны поглощения радиации хлорофиллом: 400—470 и 590—680 нм. В спектральных отражательных характеристиках растительности наблюдаются также две зоны отражения: в видимой области 510 - 580 нм и в ближней инфракрасной 800—2500 нм.

Принято характеризовать растительность зональным оптическим контрастом $k_r(\lambda_i/\lambda_j)$. Он представляет собой отношение коэффициентов отражения на двух различных длинах волн. Для растительности очень удобно использовать длины волн $\lambda_i = 560$ км и $\lambda_j = 640$ нм, т. е.

$$k_r(\lambda_i/\lambda_j) = k_r(\lambda_i = 560/\lambda_j = 640). \qquad (6.28)$$

По спектральным отражательным характеристикам лучше всего можно различить экологические виды растительности (рис. 6.20).

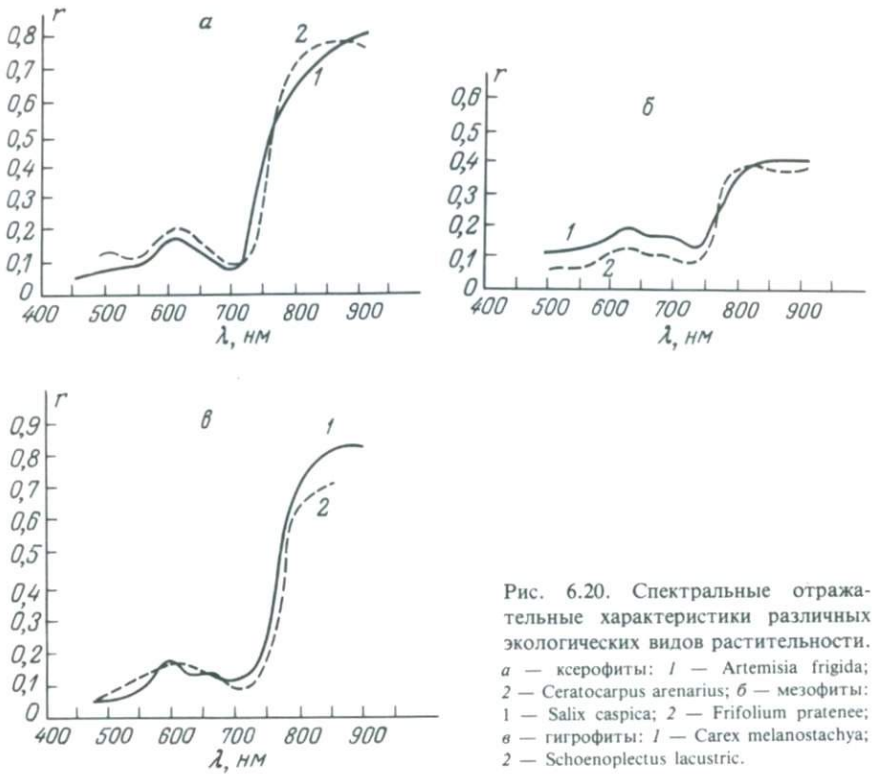


Рис. 6.20. Спектральные отражательные характеристики различных экологических видов растительности. *а* — ксерофиты: *1* — Artemisia frigida; *2* — Ceratocarpus arenarius; *б* — мезофиты: 1 — Salix caspica; *2* — Frifolium pratenee; *в* — гигрофиты: *1* — Carex melanostachya; *2* — Schoenoplectus lacustric.

Ксерофильные (*а*) виды растительности имеют $k_r(\lambda_i/\lambda_i) = 1{,}5$, причем спектральный коэффициент отражения в видимой области составляет 0,13—0,165, а в ближней инфракрасной области 0,30—0,40. Мезофиты (*б*) характеризуются зональным оптическим контрастом $k_r(\lambda_i/\lambda_j) = 1{,}8$. Значения спектрального коэффициента отражения в видимой области заключены в пределах 0,08—0,13, а в ближней инфракрасной области — в пределах 0,5 — 0,8. Гигрофильные (*в*) виды растений отличаются пониженным значением спектрального коэффициента отражения в видимой области (0,07—0,11) и повышенными значениями в ближней инфракрасной области (0,70—0,90).

Вариации спектральных отражательных характеристик растительности при измерении со спутника, с самолета и на полигоне. При генерализации спектральных коэффициентов отражения $r(\lambda)$, т. е. при переходе от наземных к самолетным и спутниковым измерениям, происходят качественные изменения спектральных отражательных характеристик растительности. Остановимся на них подробнее.

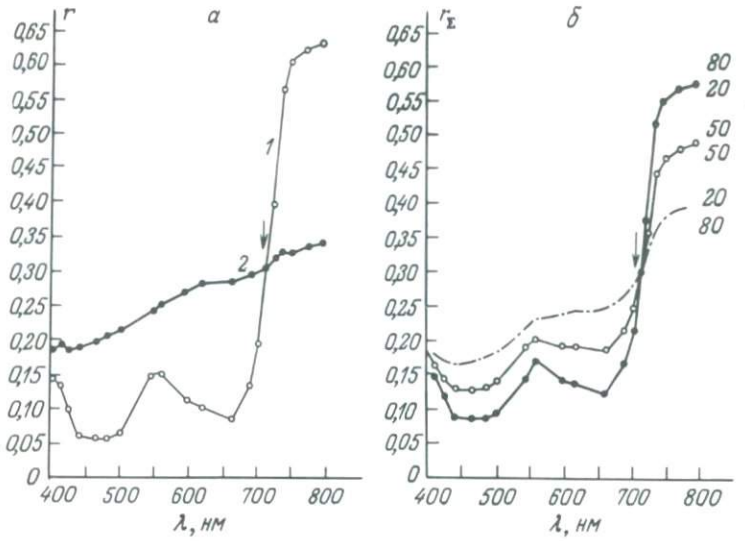


Рис. 6.21. Спектральные отражательные характеристики.
а — люцерна (*1*) и почва (2); *б* — люцерна и почва при различном покрытии в анализируемом элементе.

1. С увеличением размера элемента изображения (пикселя) спектральный коэффициент отражения $r(\lambda)$ уменьшается, т. е. растения или группы растений отражают в видимой области в среднем на 50—60%, а в ближней инфракрасной области на 30% меньше по сравнению с отдельными освещенными листьями (разумеется, тех же растений). При измерениях с самолета, летающего на сравнительно небольших высотах, уменьшение спектрального коэффициента отражения $r(\lambda)$ по сравнению с наземными измерениями составляет 10-25%.

2. С уменьшением относительного веса растительности в общем пикселе, т. е. с уменьшением отношения

$$\frac{\text{Эквивалентная площадь растительности}}{\text{Эквивалентная площадь почвы}},$$

сильно сглаживается зональный оптический контраст $k_r(\lambda_i/\lambda_j)$. Это видно из рис. 6.21 (кривые получены на эталонном участке Белозем Пловдивского полигона): с уменьшением доли растительности все слабее проявляются зоны поглощения хлорофиллом.

3. Вследствие влияния атмосферы кривая спектрального коэффициента отражения $r(\lambda)$ растительности, измеренная со спутника [46], сильно деформируется (рис. 6.22). Наложение яркости атмосферной дымки, которая над поверхностью, покрытой растительностью, как правило, имеет повышен-

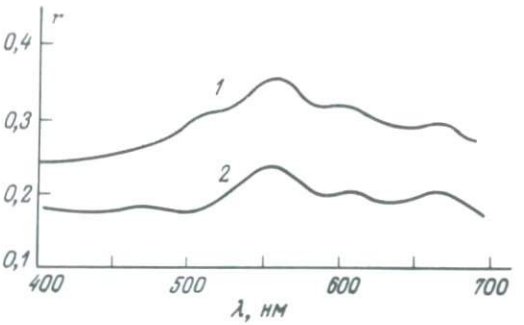


Рис. 6.22. Влияние атмосферы на вид спектральных отражательных характеристик полупустынной (1) и луговой (*2*) растительности.

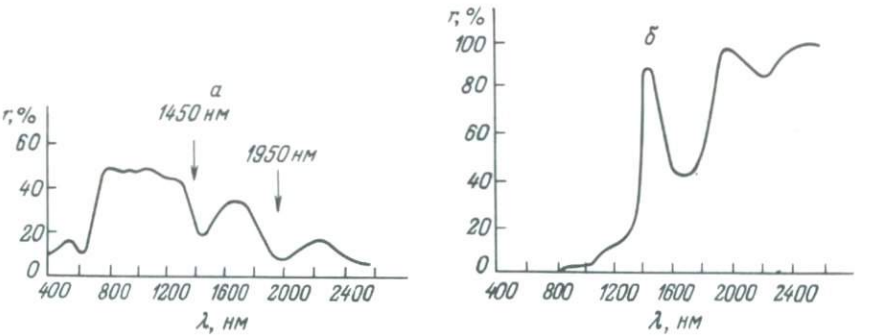


Рис. 6.23. Спектральные отражательные характеристики (*а*) листа растения и спектральный коэффициент (*б*) поглощения воды.

ные значения, приводит к увеличению спектрального коэффициента отражения растительности в интервале 400—510 нм на 0,1—0,2, а в интервале 510—560 нм—на 0,05—0,1. При этом максимальное значение зонального оптического контраста резко уменьшается: с 2,0—2,5 при наземных измерениях до 1,1—1,25 при спутниковых измерениях [46].

Влияние рассмотренных факторов следует учитывать при интерпретации аэро- и космических данных об участках земной поверхности, покрытых растительностью. Сказанное еще раз подчеркивает роль и значение эталонных участков и проведения синхронных самолетных и спутниковых измерений на полигонах.

Связь между полосами поглощения воды и спектральным коэффициентом отражения листьев растений. Известна зависимость [159] между полосами поглощения воды и коэффициентом отражения радиации обычным листом растения в видимой и ближней инфракрасной области спектра (рис. 6.23). Видно, что там, где коэффициент абсорбции воды высок,

коэффициент отражения $r(\lambda)$ небольшой. Это особенно сильно выражено в полосах, имеющих максимумы на длинах волн 1450 и 1980 нм. Существуют еще два максимума поглощения воды в этом диапазоне около 960 и 1200 нм, которые вызывают сравнительно небольшие уменьшения коэффициента отражения листьев.

6.4. Почвы и растительность

Поверхность почвы может быть обнаженной, частично или полностью покрытой растительностью. Обозначим часть поверхности анализируемого элемента, покрытую растительностью, через $S_р$, а остальную часть без растительности — через $S_п$. В самом общем случае

$$S_р = \sum_{i=1}^{n} S_{pi} \tag{6.29}$$

и

$$S_п = \sum_{j=1}^{m} S_{nj}, \tag{6.30}$$

где S_{pi} и S_{nj} — отдельные элементарные площади, в рамках анализируемого элемента, соответственно покрытые или лишенные растительности.

Если пренебречь очень малым количеством радиации атмосферы в тепловой инфракрасной области, которая отражается от растительности, и небольшим количеством света, который проходит через листья растений и отражается от подстилающего слоя почвы, возвращаясь вверх в пространство между растениями, то энергию, которая отражается в пределах данного анализируемого элемента, покрытого почвой и растительностью, можно приближенно определить из выражения

$$[S_р r_р(\lambda) + S_п r_п(\lambda)](E + L_A), \tag{6.31}$$

где S_{pi} и S_{nj} — отдельные элементарные площади в рамках анализируемоферой в направлении к земной поверхности.

Применяя принцип аддитивности отраженной радиации, можно записать выражение для общего коэффициента отражения $r_\Sigma(\lambda)$ анализируемого элемента, покрытого почвой и растительностью

$$r_\Sigma(\lambda) = S_р r_р(\lambda) + S_п r_п(\lambda). \tag{6.32}$$

Определение результатов индикатрисы отражения следует из выражения (6.32):

$$\rho_\Sigma(\lambda, z_\odot, \varphi_0, 2\pi)\eta_\Sigma(\lambda, z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) = S_1\rho_1(\lambda, z_\odot, \varphi_0, 2\pi)\eta_1(\lambda, z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi) + \\ + S_2\eta_2(\lambda, z_\odot, \varphi_0, \theta, \varphi)\rho_2(\lambda, z_\odot, \varphi_0, 2\pi),$$

$$\eta_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \theta, \varphi) = S_1 \frac{\rho_1(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)}{\rho_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)} \eta_1(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi) +$$

$$+ \quad S_2 \frac{\rho_2(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)}{\rho_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)} \eta_2(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi).$$

Видно, что результирующая индикатриса отражения зависит от соотношения площадей каждого образования, от альбедо каждого из них и анализируемого элемента в целом, а также от индикатрис отражения отдельных образований. Если образования имеют диффузно отражающие поверхности, то результирующая индикатриса будет индикатрисой диффузно отражающей поверхности. Действительно,

$$\eta_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi) = S_1 \frac{\rho_1(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)}{\rho_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)} \eta(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi) +$$

$$+ S_2 \frac{\rho_2(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)}{\rho_{\Sigma}(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, 2\pi)} \eta(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi) =$$
$$= (S_1 + S_2)\eta(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi) = \eta(\lambda, z_{\odot}, \varphi_0, \theta, \varphi).$$

Интерес представляет определение спектрального коэффициента отражения $r_{\Sigma}(\lambda)$ рассматриваемого элемента посредством спектрального коэффициента отражения только слоя почвы $r_{\text{п}}(\lambda)$. Поделив выражение (6.32) на $r_{\text{п}}(\lambda)$, получаем

$$\frac{r_{\Sigma}(\lambda)}{r_{\text{п}}(\lambda)} = S_{\text{п}} + S_{\text{р}} \frac{r_{\text{р}}(\lambda)}{r_{\text{п}}(\lambda)}. \tag{6.33}$$

В видимой области почвы чаще всего имеют больший спектральный коэффициент отражения, чем растительность

$$r_{\text{п}}(\lambda_{\text{вд}}) > r_{\text{р}}(\lambda_{\text{вд}}), \tag{6.34}$$

в результате элемент с растительностью будет иметь меньший коэффициент $r_{\Sigma}(\lambda_{\text{вд}})$ по сравнению с коэффициентом $r_{\text{п}}(\lambda_{\text{вд}})$.

В ближней инфракрасной области

$$r_{\text{п}}(\lambda_{\text{ик}}) < r_{\text{р}}(\lambda_{\text{ик}}) \tag{6.35}$$

и тогда

$$r_{\Sigma}(\lambda_{\text{ик}}) > r_{\text{п}}(\lambda_{\text{ик}}). \tag{6.36}$$

На рис. 6.21,*а* показаны спектральные отражательные характеристики люцерны и аллювиально-луговой почвы, полученные в видимой и ближней инфракрасной области (эталонный участок Белозем Пловдивского округа, 21—23 октября 1977 г.), а на рис. 6.21,*б* — такие же характеристики анализируемого элемента с различным процентным соотношением почвы и растительности.

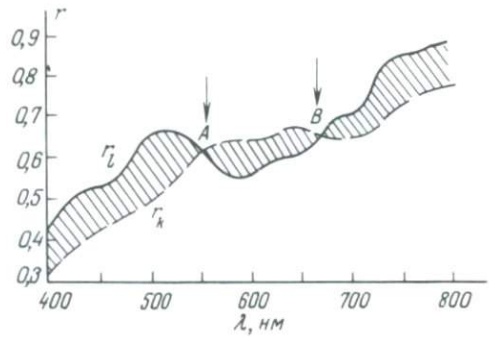


Рис. 6.24. Спектральные отражательные характеристики двух различных природных образований.

При произвольном комбинировании в рамках анализируемого элемента двух природных образований, имеющих спектральные характеристики $r_l(\lambda)$ и $r_k(\lambda)$ (рис. 6.24), эквивалентный спектральный коэффициент отражения

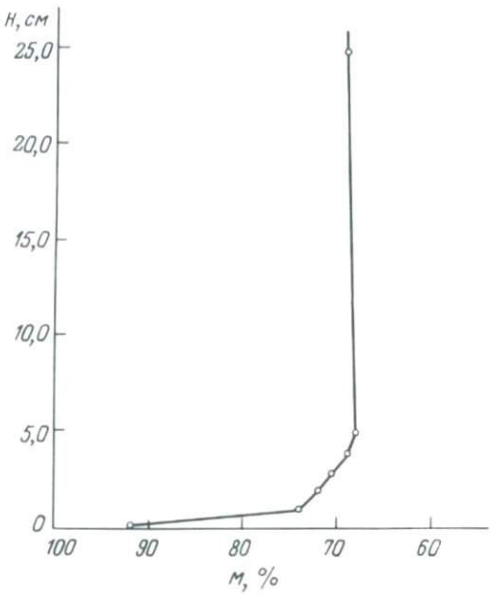


Рис. 6.25. Изменение относительной влажности воздуха над водной поверхностью.

$r_{\Sigma}(\lambda)$ будет всегда находиться в области, определенной выражением

$$\Delta_{\Sigma} = |r_l(\lambda) - r_k(\lambda)|. \tag{6.37}$$

На рис. 6.24 эта область заштрихована. Данный факт имеет особое значение при анализе, классификации и распознавании природных образований посредством их спектральных отражательных характеристик. Кроме того, при произвольном комбинировании обоих образований, точки пересечения их спектральных характеристик (в случае A и B) не меняют своего положения, что важно при классификации и распознавании природных образований. Как правило, в рамках анализируемого элемента топология S_{pi} и S_{ni} не имеет значения.

6.5. Влажность воздуха

Влажность является важной характеристикой атмосферы; от содержания водяных паров в воздухе зависит режим испарения с суши и водных поверхностей. Способность водяных паров поглощать солнечную и излучаемую Землей радиацию существенно влияет на тепловой режим земной поверхности и атмосферы, а также на величины отраженной и собственной радиации различных природных образований, измеряемых с самолетов и спутников. На рис.6.25 показано изменение относительной влажности воздуха над водной поверхностью с изменением высоты [34].

До настоящего времени не существует единого метода измерения влажности воздуха; в качестве характеристик влажности используют различные величины, что отрицательно отражается на возможностях сравнения и интерпретации данных полигонных измерений. Считается, что одним из наилучших при измерении влажности воздуха является метод определения точки росы, т. е. измерение температуры охлаждаемой металлической пластины в момент образования конденсата на ее поверхности. Однако этот метод, дающий приемлемую точность, неоперативен, трудно реализуем в полевых условиях и в практике полигонных измерений, как правило, не используется.

Глава 7.

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1. Влияние локального гравитационного поля разломов на распределение облачности

При интерпретации космических снимков отмечается, что конфигурация распределения облачности в определенных районах Земли сохраняется сравнительно постоянной даже в различные сезоны. Облачность как бы оконтуривает геологические структуры [64]. Если в горах это явление можно было бы легко объяснить резким изменением рельефа и аномальными воздушными потоками, для равнинных районов этого сделать нельзя. У специалистов создалось впечатление, что закономерности распределения облаков отражают внутреннюю структуру района. Эта связь проявляется не только там, где структура характеризуется резким изменением рельефа, но и над равнинами. Более того, иногда распределение облаков связано больше с геологической структурой участка, нежели с рельефом местности [129].

Связь зон формирования облаков с геологической структурой и прежде всего с разломами была впервые описана французским геологом Шлумбердже в 1933 г. Он показал, что иногда линии системно возникающих облаков простираются на десятки километров, пересекая даже разнородные геоморфологические структуры. Анализ распределения облачности повышает геологическую информативность космических изображений. Это распределение используется при интерпретации космических изображений, несмотря на то что до сих пор оно не обосновано теоретически [129].

Предложим объяснение этого явления на основе функции гравитационного потенциала вблизи разлома [185]. Рассмотрим следующую модель системы геоид — разлом (возмутитель):

1) фигура геоида близка к сфере (это приближение основывается на пренебрежимо малых размерах разлома по сравнению с радиусом R_3 геоида) со сферической симметрией распределения плотности ρ_3 земных слоев, т. е. $\rho_3 = f(R)$, $0 \leqslant R \leqslant R_3$;

2) разлом имеет показанную на рис. 7.1 форму, причем горизонт разлома достигает обратной стороны геоида; в цилиндрической системе координат это соответствует условию $0 \leqslant \theta \leqslant \tau$;

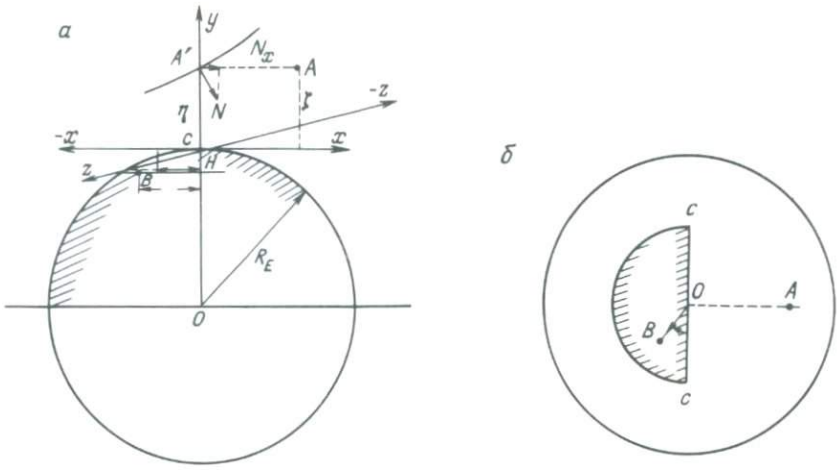


Рис. 7.1. Структура разлома.

3) плотность возмутителя $\rho_{\text{возм}}$ постоянна и составляет

$$\rho_{\text{возм}} = \rho_{\text{разлом}} - \rho_{3,\ \text{разлом}}, \tag{7.1}$$

где $\rho_{3,\ \text{разлом}}$ — плотность геоида при $R = R_{\text{разлом}}$.

При этих условиях потенциал точки A

$$p_A = k\frac{M_3}{\sqrt{(R_3 + \eta)^2 + \xi^2 + \zeta^2}} + k\int\limits_{(V)} \frac{\rho_{\text{возм}} dV}{\sqrt{(\eta + y)^2 + (\xi + x)^2 + (\zeta + z)^2}}, \tag{7.2}$$

где V — объем разлома; k — гравитационная постоянная; M_3 — масса Земли; $(-x,\ -y,\ z)$ — координаты точки B разлома относительно верхней поверхности разлома; $(\xi,\ \eta,\ -\zeta)$ — координаты точки A относительно верхней поверхности разлома.

Функция $T_A(\xi,\ \eta,\ \zeta)$ эквипотенциальной поверхности, на которой лежит точка A, определяется из условия

$$P_A = \text{const}. \tag{7.3}$$

Производная $(d\eta/d\xi)_{(\xi = 0,\ \zeta = 0)} = \eta'_{0,0}$ точки A с координатами $(0,\ \eta,\ 0)$ имеет вид

$$\eta'_{0,0} = -\frac{\rho_{\text{возм}} \int\limits_{(V)} x[x^2 + (\eta + y)^2 + z^2]^{-3/2} dxdydz}{M_3(R + \eta)^{-2} + \rho_{\text{возм}} \int\limits_{(V)} (\eta + y)[x^2 + (\eta + y)^2 + z^2]^{-3/2} dxdydz}. \tag{7.4}$$

Интеграл в числителе выражения (7.4) намного больше нуля ($V \neq 0$) и, следовательно, знак $\eta'_{0,0}$ при фиксированном $\rho_{\text{возм}}$ зависит от суммы в зна-

менателе. Интеграл

$$I = \rho_{\text{возм}} \int\limits_{(V)} (\eta + y)[x^2 + (\eta + y)^2 + z^2]^{-3/2} dx\, dy\, dz \tag{7.5}$$

можно представить в цилиндрических координатах $[\theta,\ r^2 = x^2 + z^2,\ y]$, $0 \leqslant \theta \leqslant \pi$, $0 < r^2 < r^2_{\text{гр}} = 2R_3 y - y^2$, $0 \leqslant y \leqslant H$ и тогда

$$I = \pi\rho_{\text{возм}} H - \pi\rho_{\text{возм}} \int\limits_0^H (y + \eta)[(y + \eta)^2 + 2Ry - y^2]^{-1/2} dy < \pi\rho_{\text{возм}} H,$$

если $\rho_{\text{возм}} > 0$. (7.6)

Для разломов на земной поверхности выполняется условие

$$\rho_{\text{возм}} = \rho_{\text{воздух}} - \rho_{\text{з. разлом}} < 0, \tag{7.7}$$

и тогда для суммы в знаменателе выражения (7.4) получаем

$$M_3(R + \eta)^{-2} - \rho_{\text{возм}} \int\limits_{(V)} (\eta + y)[x^2 + (\eta + y)^2 + z^2]^{-3/2} dx dy dz >$$

$$> \frac{4}{3} \rho_{\text{з. ср}} \pi R_3^3 (R^3 + \eta)^{-2} + \rho_{\text{возм}} \pi H > 0, \tag{7.8}$$

так как $\eta \ll R_3$, $H \ll R_3$, $|\rho_{\text{возм}}| \sim \rho_{\text{з. ср}}$.

Следовательно, $\eta'_{0,0} > 0$ в случае открытого разлома на земной поверхности. Тогда нормаль N к эквипотенциальной поверхности $P = \text{const}$ в точке A имеет составляющую N_x по оси x, направленную к вертикальной стене разлома, и именно она определяет эффект формирования наблюдаемого фронта облачности (рис. 7.1,*а*).

Те же рассуждения и выводы остаются в принципе в силе в случае линейного горного массива, который можно рассматривать как двусторонний разлом.

В приведенных выше рассуждениях было принято, что $0 \leqslant \theta \leqslant \theta_{\text{гр}} = \pi$. Это условие необязательное. Если $\theta_{\text{гр}} < \pi$, то неравенство (7.8) усиливается.

Условие $\rho_{\text{возм}} = \text{const}$ также необязательное. Если $\rho_{\text{возм}} \neq \text{const}$, то неравенство (7.6) усиливается при замещении $\rho_{\text{возм. макс}}$ $\rho_{\text{возм}}$, а неравенство (7.8) сохраняется при условии, что $\rho_{\text{возм. макс}} \sim \rho_{\text{з. ср}}$.

7.2. Определение гравитационного потенциала Земли по дистанционным измерениям топографии поверхности океана

Гравитационный потенциал Земли можно определить, используя информацию о топографии поверхности океана, полученную с помощью космиче-

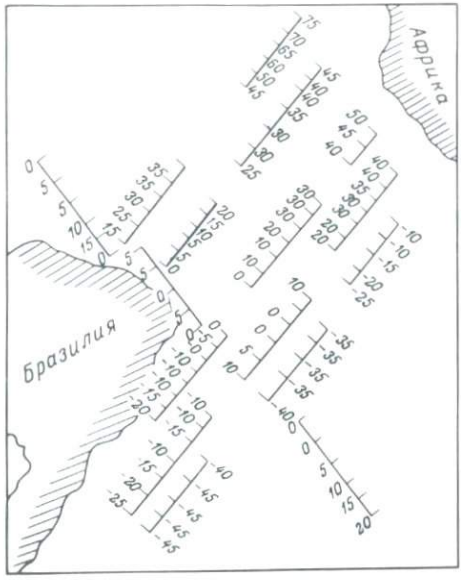


Рис. 7.2. Зоны понижения и подъема поверхности воды по отношению к поверхности геоида (в метрах).

ских летательных аппаратов [188]. На основе работы [188] рассмотрим предложенный метод определения гравитационного потенциала Земли.

Известно, что на орбитальной космической станции Skylab в 1973 г. использовался радиолокационный высотомер для изучения топографии поверхности океана. Эксперимент был повторен на пилотируемом спутнике GEOS [188] в марте 1975 г. В этих измерениях верхняя граница суммарной ошибки из-за случайных факторов, включая инструментальную ошибку, ошибки неточной стабилизации платформы летательного аппарата, нестационарности атмосферы и т. д., оценивается величиной в 2,25 м. Результаты, часть которых представлены на рис. 7.2, показывают зоны понижения и подъема водной поверхности относительно поверхности геоида. Максимальные амплитуды этих отклонений составляют порядка нескольких десятков метров.

Исследование проведено при следующих условиях:

1) дана топография области поверхности океана, описываемая функцией $h(\varphi, \theta)$, где φ — географическая широта, а θ — географическая долгота;

2) предполагается, что зависимость $h(\varphi, \theta)$ обусловлена только гравитационными аномалиями [167].

При этих условиях определяются:

А. Функция распределения гравитационного потенциала над поверхностью океана и вообще над всей земной поверхностью.

Б. Распределение масс в пространстве, ограниченном земной поверхностью.

Из условия *2* следует, что функция $h(\varphi, \theta)$ удовлетворяет уравнению гидростатики:

$$p_A = \rho U = \rho(U_3 + U_{\text{возм}} + C) = \text{const}, \tag{7.9}$$

где p_A — атмосферное давление; U_3 — потенциал геоида на эквипотенциальной поверхности $h(\varphi, \theta)$; $U_{\text{возм}}$ — потенциал возмущения (гравитационная аномалия), измеренный также на $h(\varphi, \theta)$; ρ — плотность воды в океане; C — постоянная интегрирования. Постоянную $(p_A/\rho) - C$ можно определить из выражения (7.9), если заменить координаты $\varphi_{\text{гр}}$ и $\theta_{\text{гр}}$, для которых $U_{\text{возм}} \approx 0$. Тогда

$$(p_A/\rho) - C = kM_3/R_{\text{гр}} \tag{7.10}$$

и из выражения (7.9) следует

$$U_{\text{возм}}(\varphi, \theta) = \frac{kM}{R_{\text{гр}}} - U_3(\varphi, \theta),\ R_{\text{гр}} = R_3 \text{ при } \varphi = \varphi_{\text{гр}},\ \theta = \theta_{\text{гр}}. \tag{7.11}$$

Посредством гравиметрических измерений получаются частные производные полного потенциала $U_{\text{суша}}$ суши. По ним можно вычислить $U_{\text{суша}}$ и из аналогичного (7.11) уравнения найти $U_{\text{возм, суша}}$. Суммарный потенциал возмутителя $U_{\text{возм, суша}} + U_{\text{возм, вода}} = U_{\text{возм 0}}$ позволяет решать задачу *А* как внешнюю задачу Дирихле, имея в виду, что функция потенциала вне земной поверхности гармоническая.

Задачу *Б* можно свести к решению обратной гравиметрической задачи, и в частности — обратной контактной задачи [120].

В работе [188] с применением упрощенных моделей структуры возмутителя проведены отдельные ориентировочные оценки $U_{\text{возм}} = U_{\text{возм, вода}}$ в некоторых из показанных на рис. 7.2 зонах понижения и подъема поверхности океана. В трех случаях, рассмотренных в [188], глубина возмутителя z принята произвольной относительно $M_{\text{возм}}$. На самом деле эти величины связаны функцией $h(\varphi, \theta)$.

7.3. Применение аэроснимков в археологии

При применении аэрофотограмметрии для целей археологии возможны следующие основные случаи [13]: археологический объект находится на поверхности исследуемого участка; археологический объект находится под поверхностью, но имеются признаки его существования, выраженные в микрорельефе; археологический объект полностью скрыт и нет видимых признаков его существования на поверхности участка.

В первом, наиболее простом случае аэрофотограмметрические методы применяются при археологическом дешифрировании и стереокартировании ситуации и рельефа в масштабах 1 : 100, 1 : 200 и 1 : 500. Такое дешифри-

рование применяется при обследовании первых болгарских столиц Плиска и Преслав, Мадара, средневековых крепостей Червен, Калиакра, Хисаря, Кракра Пернишки и др. В последнее время этот метод заменяется составлением аэрофотоплана в масштабе 1 : 500.

Во втором случае, когда археологический объект находится под поверхностью, но проявляет себя в микрорельефе, сделаны попытки дешифрирования теней, однако оказалось, что стереокартирование рельефа с большой точностью дает больший эффект.

В третьем случае дешифрирования полностью скрытых под земной поверхностью археологических объектов проводится по двум основным элементам (почве и растительности). Например, в процессе подготовки к изучению археологического объекта Рациария, включающим маркировку опорных точек для пространственной аналитической фототриангуляции, стереокартировании рельефа, ортофотоскопии и проведения раскопок, было уста-

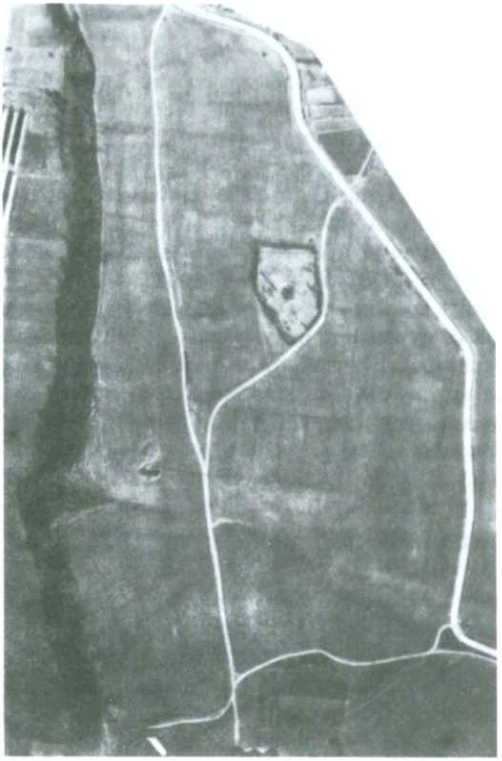


Рис. 7.3. Аэроснимок части поселка Рациария.

новлено, что растительность отдельных участков немного выше. Это дало основание произвести двукратное аэрофотографирование, причем первое — ранней весной до развития растительности, а второе — по возможности в процессе покоса люцерны, которой покрыт участок. Аэрофотографирование было проведено 22 марта и 23 мая 1976 г. Аэрофотосъемки проводились с борта ИЛ-14 аэрокамерой RMK-A с фокусным расстоянием 150 мм и форматом кадра 23 × 23 см; диафрагма 1,0—5,6; использовалась фотопленка АГФА — ГЕВЕРТ — Авиафот РАН-30 с чувствительностью 20 DIN, разрешающей способностью 125 лин/мм и спектральной чувствительностью в диапазоне от 330 до 700 нм; высота полета составляла 250 и 750 м, скорость 130 км/ч. В обоих случаях были выбраны масштабы снимков 1 : 1700 и 1 : 5000 соответственно.

На аэрофотоизображениях, сделанных в мае, как в районах с растительностью, так и в районах со скошенной люцерной, для обеих высот полета, не обнаружено никаких признаков существования античного поселка Рациария, покрытого слоем почвы толщиной в несколько метров. То же самое относится и к предыдущим аэроснимкам этого района, выполненным в масштабе 1 : 4000.

Однако на аэрофотоснимках, сделанных в марте, ясно видны следы античного поселка как в случае большей, так и меньшей высоты полета. На снимках (рис. 7.3) ясно дешифрируется дорога, соединяющая поселок с р. Дунай, крепостная стена, внутреннее устройство поселка и, кроме того, в нижней части, параллельно р. Дунай, видна более плотная и длинная полоса, которая все еще не объяснена археологами. Появление этих следов на аэрофотоизображении можно объяснить влагой, задерживающейся в стенах, под действием которой началось более раннее развитие растительности.

Литература

1. Аванесов Г. А., Баринов И. В., Глазков В. Д., Многоспектральная сканирующая система в самолетном эксперименте по исследованию земных ресурсов, *Метеорология и гидрология,* 1974, № 4.

2. Аванесов Г. А. Оперативные средства получения космической видеоинформации оптического диапазона. — В кн.: Космические исследования земных ресурсов. — М.: Наука, 1975.

3. Аванесов Г. А. Экспериментальный информационно-измерительный комплекс исследований Земли из космоса, *ИЗК,* 1981, № 5.

4. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Курманалиев Т. И., Муравьев В. М., Рожавский Э. И., Глазков В. Д., Игнатенко С. А. и др. Многозональная сканирующая съемочная система «Фрагмент», *ИЗК*, 1981, № 5, с. 45—56.

5. Аванесов Г. А., Глазков В. Д., Тарнопольский В. И. Разработка специализированной оптико-электронной системы оперативного сбора многоспектральной видеоинформации о поверхности Земли с борта ИСЗ. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки Земли. — М.: Наука, 1981, с. 57—76.

6. Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Сычев А. Г., Тарнопольский В. И. Метрологическое обеспечение измерений яркости земной поверхности многозональной сканирующей системой «Фрагмент», *ИЗК*, 1981, № 5, с. 65—77.

7. Аванесов Г. А., Богданов А. А., Наумов А. П., Сычев А. Г., Тарнопольский В. И., Толстых Г. Н. Методика и аппаратура радиометрической градуировки в абсолютных энергетических единицах многозональной сканирующей системы «Фрагмент», *ИЗК*, 1981, № 6, с. 79—88.

8. Акулова Е. А. Об изменении отражательной способности листьев некоторых пород во времени. — В кн.: Физиология древесных растений. — М.: Изд. АН СССР, 1982.

9. Алексеев В. А. Световой режим леса. — М.: Наука, 1975.

10. Бадаев В. В., Малкевич М. С., *Известия АН СССР,* ФАО, 14, № 10, 1978.

11. Бадаев В. В., Козлов В. М., *Известия АН СССР,* ФАО, 16, № 5, 1980.

12. Барнаулов Т. В., Волов Н. И., Вейсманн У. К. Телерадиометр для дистанционного зондирования в ближней ИК-области спектра. Тарту, 1980.

13. Башаринов А. Е., Гурвич А.С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. — М.: Наука, 1975.

14. Белоногова И. Н., Толчельников Ю. С. О зависимости спектральной яркости минералов от их дисперсности, *Известия АН СССР*, сер. геологическая, № 11, 1959.

15. Беляев В. И., Киселевский Л. И., Плюта В. Е., Сметанин Е. А. Малогабаритный скоростной спектрометр МСС-2, *Журнал прикладной спектрометрии*, том XXIX, вып. 6, дек. 1978.

16. Богданов А. А., Налимов В. Н., Сычев А. Г., Тарнопольский В. И., Толстых Г. Н. О возможном повышении спектрометрической точности при дистанционных исследованиях Земли с помощью многозональных съемочных систем, *ИЗК*, 1981, № 3, с. 77—84.

17. Богданов А. А., Смойлов Л. Н., Саприцкий В. И., Сычев А. Г., Тарнопольский В. И. Способ измерения абсолютной спектральной чувствительности яркомеров. А/с № 870966 СССР.

18. Богомолов А. Ф., Попов С. М., Смолянников Ю. Д., Степин А. В. Проблемы цифровой передачи и регистрации многозональной видеоинформации и их решение в эксперименте «Фрагмент», *ИЗК*, 1981, № 5, с. 57—64.

19. Богородский В. В., Козлов А. И., Тучков Л. Т. Радиотепловое излучение земных покровов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977.

20. Брандт А. Б., Тагеев С. В. Оптические параметры растительных организмов. — М.: Наука, 1967.

21. Вейсманн У. К., Вилманн Ч. И., Гречко Г. М., Климчук П. И. и др. Результаты исследования зависимости яркости водоемов от зенитного угла Солнца с орбитальных научных станций «Салют-4» и «Салют-6». Атмосферно-оптические явления по наблюдениям с орбитальных научных станций «Салют». — Тарту, 1981.

22. Вейсманн У. К., Вилманн Ч. И. Телерадиометр для ближнего инфракрасного диапазона, метеорологические исследования, № 23, — М.: Сов. радио, 1977.

23. Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976.

24. Войшвило Н. А. Спектрометрические и фотометрические характеристики молочного стекла МС-14, *Оптика и спектроскопия*, т. 12, вып. 3, 1982.

25. Войшвило Н. А., Смолдин М. П. К вопросу о применении молочного стекла в качестве эталона отражения, *Оптика и спектроскопия*, т. 14, вып. 5, 1964.

26. Вольконштейн А. А., Михайлов О. М. Фотометрическое исследование молочных стекол, *Светотехника*, № 2, 1971.

27. Георгов Г., Миленова Л. П. Исследования спектральных коэффициентов отражения водоемов с естественной мутностью. — Научный семинар, КАПГ, Курск, СССР, 1982.

28. Глаголев Ю. А. Справочник по физическим параметрам атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970.

29. Гойса Н. И. Некоторые закономерности суточного и годового хода радиационного баланса подстилающей поверхности и его составляющих. — Тр. Укр. НИГМИ, вып. 31, 1982.

30. Гойса Н. И. О закономерностях суточного и годового хода радиационного баланса подстилающей поверхности и его составляющих. — Тр. ВНМС, т. 6, 1963.

31. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости непрерывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,025—2,5 мкм, ГОСТ 8.196—76.

32. Делеур М. С. Космические методы изучения снежного покрова Земли. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980.

33. Заитов И. Р., Индиченко И. Г. О спектральной отражательной способности некоторых типов почв, *Изв. ВУЗОВ*, геодезия и аэросъемка, вып. 1, 1958.

34. Зайцев В. А., Ледохович А. Н., Никанорова Г. Т. Влажность воздуха и ее измерение. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974.

35. Зиман Я. Л. Исследование природных ресурсов Земли из космоса. — М.: Знание, 1980.

36. Зиман Я. Л., Сажко М. Ю., Цитович В. С. Самолетные лаборатории и опыт их использования при отработке методов и средств дистанционных исследований земных ресурсов. Космические исследования земных ресурсов. — М.: Наука, 1976.

37. Зиман Я. Л., Юров В. И. Предполетная фотограмметрическая калибровка многозональной сканирующей системы «Фрагмент», *Исследование Земли из космоса*, № 5, 1981.

38. Искусственный спутник Земли «Метеор—Природа» с научной аппаратурой по программе «Болгария-1300». — М.: ГОСНИЦИПР, 1981.

39. Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972.

40. Карманов И. И. Спектральная отражательная способность и цвет почв как показатели их свойств. — М.: Колос, 1974.

41. Катюк А. Ф., Панасюк В. С., Самойлов Л. Н. и др. Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения, *Измерительная техника*, 1976, № 3, с. 17—24.

42. Клешнин А. С. Растение и свет. — М.: Изд. АН СССР, 1954.

43. Код А. Д. Распределение энергии в спектральных звездах. — В кн.: Звездные атмосферы. М., 1963, с. 73—74.

44. Кондратьев К. Н. Актинометрия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965.

45. Кондратьев К. Я., *Доклады АН СССР*, 200, 1971.

46. Кондратьев К. Я. и др. Некоторые результаты спектрофотометрирования природных образований с пилотируемого космического корабля «Союз-9», *Космические исследования*, 9, 1972, № 2.

47. Кондратьев К. Я. Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979.

48. Кондратьев К. Я., Манолова М. П. Угловое распределение интенсивности радиации, отраженной естественными подстилающими поверхностями, *Вестн. ЛГУ,* серия физики и химии, вып. 2, № 10, 1957.

49. Кондратьев К. Я., Миронова З. В., Отто А. Н. Спектральное альбедо естественных подстилающих поверхностей, *Проблемы физики атмосферы,* вып. 3, с. 165.

50. Кондратьев К. Я., Тер-Маркарянц Н. Е. О дневном ходе альбедо, *Метеорология и гидрология*, № 6, 1953.

51. Кондратьев К. Я., Григорьев Л. А., Покровский О. М. Информационное содержание данных космической дистанционной индикации параметров окружающей среды и природных ресурсов. — Л.: ЛГУ, 1975.

52. Кондратьев К. Я., Федченко Н. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982.

53. Космическая фотосъемка и геологические исследования. — Л.: Недра, 1975.

54. Космические исследования земных ресурсов. Методы и средства измерений и обработки информации. — М.: Наука, 1976.

55. Красильщиков Л. Б., Новосельцев Е. Н. Спектральная отражательная способность боритованной бумаги, *Оптика и спектроскопия*, 1957, т. 2, вып. 3.

56. Кривошеев М. И. Телевизионные методы и устройства отображения информации. — М.: Сов. радио, 1975.

57. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной технике. — М.: Сов. радио, 1973.

58. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.: Изд. АН СССР, 1947.

59. Крумов А. Х. Прибор для измерения спектральных отражательных характеристик. Совещание комиссии № 6 ГССС, София, 1977.

60. Крумов А. Х., Мишев Д., Живков С., Кнышкова Л., Макалова К. Многозональные спектрометрические системы в составе комплексов научной аппаратуры для дистанционного исследования Земли из космоса. Основные проблемы и перспективы. Интеркосмос — III конференция по научному приборостроению, СССР, 1982.

61. Лебедев Д. С., Цуккерман И. И. Телевидение и теория информации. — М.: Энергия, 1965.

62. Ливитин В. И. Введение в динамическую теорию конечных автоматов. — Рига: Зинатне, 1975.

63. Леман В. М. Курс светокультуры растений. — М.: Высшая школа, 1976.

64. Макаров В. И. и др. Глубинная структура земной коры на космических изображениях. — В кн.: Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. т. II, М., 1974.

65. Маклейн С., Баркхор Г., Съвременна алгебра. — С., Наука и изкуство, 1974.

66. Мелешко К. Е. Изучение спектральных коэффициентов яркости природных объектов в полевых условиях. — В кн.: Исследование оптиче-

ских свойств природных объектов и их аэрофотографического изображения. — Л., 1970.

67. Миленький А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности. — М.: Сов. радио, 1975.

68. Мишев Д. Н. Дистанционные аэро- и космические методы за изследоване Землята. — Списание на БАН, кн. 1, 1976.

69. Мишев Д. Н. Дистанционные аэро- и космические методи за изследоване Землята у нас. — Списание на БАН, кн. 2, 1976.

70. Мишев Д. Н. Спектральные отражательные характеристики природных образований и их применение для целей дистанционного исследования Земли из космоса. № 1, 1980.

71. Мишев Д. Н. Многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15» на борту научно-исследовательского комплекса «Союз-Салют». Научное сообщение РГДЗ Интеркосмос, Варшава, 1980.

72. Мишев Д. Н. Дистанционные исследования Земли из космоса. — С., БАН, 1981.

73. Мишев Д. Н. Устройство за анализиране на сканерно изображение с различна разделителна способност. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 04.02.1982.

74. Мишев Д. Н. Устройство за сканиране на изображения без застъпване на информацията от два съседни елементе. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 20.02.1982.

75. Мишев Д. Н. «Спектър-15» на борда на пилотирания орбитален научно-изследователски комплекс «Союз-Салют». — Списание на БАН, № 3, 1981.

76. Мишев Д. Н. Развитие на дистанционните исследования, — Вестник на БАН, бр-8, год IV, 1982.

77. Мишев Д. Н. Распознавание состояния основных параметров телевизионного тракта с целью создания адаптивных ТВ систем. — В кн.: Распознавание образов. т. 1. — Рига: Зинатне, 1974.

78. Мишев Д. Н. и др. Задачи и предварительные результаты болгаро-советской экспедиции в НРБ в 1977. Симпозиум по дистанционным методам исследования Земли из космоса. Интеркосмос, Будапешт, 1978.

79. Мишев Д. Н. и др. Аэрокосмически изследвания на еталонен участък П. Евтимово, Пловдивско. — Проблеми на географията, 1977, № 4.

80. Мишев Д. Н., Бончев Б. Л., Петров П. В, Дмитров Д. С. Система для преобразования и интерпретации аэрокосмических данных. Интеркосмос, Варна, 1977.

81. Мишев Д. Н., Ковачев С. Т. Дискретен фотопреобразувател. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 16.06. 1977, № 24, 638.

82. Мишев Д. Н., Ковачев С. Т. Многоканальная спектрометрическая система «Спектр-15М». Интеркосмос — III конференция по научному приборостроению, СССР, 1982.

83. Мишев Д. Н., Назърски. Програмируем многоканален микровълнов радиометър. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 14.11.1980.

84. Мишев Д. Н., Петров П. В., Ковачев С. Т. Многоцелева спектроколориметрична система. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 28.09.1982.

85. Мишев Д. Н., Петров И. В., Ковачев С. Т. Многоцелевая спектроколориметрическая система для дистанционного исследования Земли с аэрокосмических носителей. Интеркосмос — III конференция по научному приборостроению, СССР, 1982.

86. Мишев Д. Н., Серафимов К. Б., Ковачев С. Т., Стоименов А. И. Многоканална система «Спектр-15» за дистанциони изследования на Земята и атмосферата от борда на научно-изследователски комплекс «Союз-Салют». — Научно-приложна конференция. Ст. Загора, 1980.

87. Мишев Д. Н., Стоименов А. И. Многоканален сканиращ спектрофотометър. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 29.12.1976, № 24, 169.

88. Мишев Д. Н., Стоименов А. И., Ковачев С. Т. Електронно управляем сканиращ спектрофотометър. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 27.08.1975, 21, 762.

89. Мишев Д. Н., Спиридонов Х. Б., Беликов В., Руменина Е. К., Петрова В. П. Опыт за използуване на сканерни изображения за ландшафтно картироване. Проблема не географията, кн. 2, 1981.

90. Мишев Д. Н., Спиридонов Х. Б., Георгов Г., Милонина Л. П., Мишева Е. К. Определяне на местността на подата във водохранилища чрез измереване на спектралния коэфициент на отражение. Проблемы на географията, № 2, 1982.

91. Мишев Д. Н., Янев Т. К. Геометрично подобие на възприетого телевизионно изображение: Сб. научни доклади трудове на НИИ по сообщенията, № 5, 1966.

92. Мишев Д. Н., Янев Т. К., Кънчева Р. Использование эталонных изображений для оценки влияния атмосферы на аэрокосмические снимки. Симпозиум по дистанционным методам исследования Земли из космоса. Интеркосмос, Будапешт, 1978.

93. Многозональная аэрокосмическая съемка, ее использование при изучении природных ресурсов/Под ред. Ю. Ф. Книжникова. Изд. МГУ, 1976.

94. Мулламаа Ю.-А.Р. Атлас оптических характеристик взволнованной поверхности моря. — Тарту, 1964.

95. Назърски Т. Г., Мишев Д. Н. Българско геофизическо описание, № 3, 1983.

96. Назърски Т. Г., Мишев Д. Н., Каменов Г., Петков Д., Сотиров И., Ценов Б., Генчев А. Проблемы при создании радиометрических СВЧ-систем как элементов комплексов для дистанционного исследования Земли из космоса. Интеркосмос. — III конференция по научному приборостроению, СССР, 1982.

97. Научная программа проекта «Болгария-1300-П», ЦЛКИ БАН, 1980.

98. Никитинская Н. И. Свойства современных интерференционных светофильтров. — Тр. ГГО, вып. 153, 1964.

99. Николов И. Д., Ковачев М. И., Съонов В., Матвеева Ц. Оптично устройство за спектрофотометър. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 18.08, 1973, № 20615.

100. Новый эксперимент в космосе, *Исследование Земли из космоса*, № 1, 1981, с.5—6.

101. Обухов А. И., Орлов Д. С. Спектральная отражательная способность главнейших типов почв и возможности использования диффузного отражения при почвенных исследованиях. — Почвоведение, № 2, 1964.

102. Орлова Н. С. Определение коэффициентов яркости природных покровов в естественных условиях при различных углах падения и отражения. *Изв. АН КазССР*, серия астроботаники, вып. 1—2, № 90, 1950.

103. Орлов Д. С. Количественные закономерности отражения света почвами. Влияние размера частиц (агрегатов) на отражательную способность. — Биологические науки, № 4, 1966.

104. Пересада В. П. Автоматическое распознавание образов. — Л.: Энергия, 1970.

105. Петков Д. И., Станков С. М., Ценов Б., Пеев Б. Б. Бортовой вычислительный комплекс и его программное обеспечение на борту спутника «Метеор-Природа». Интеркосмос — III конференция по научному приборостроению, СССР, 1982.

106. Плешкова Т. Т. Альбедо растительного покрова. — Тр. ГГО, вып. 109, 1961.

107. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности/ Под ред. К. Я. Кондратьева. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969.

108. Радиолокационные методы исследования Земли/Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. радио, 1980.

109. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Влияние некоторых факторов на отражательные свойства почв. — Тр. САРНИГМИ, вып. 64 (79), 1972.

110. Росс Ю. К. К теории альбедо растительного покрова. — Научн. сообщения Инст. геол. и геогр. АН ЛитССР, XIII, вып. 1, 1962.

111. Рубин В. А. Курс физиологии растений. — М.: Высшая школа, 1976.

112. Серафимов К. Б. Космические исследования в Болгарии. — С., БАН, 1979.

113. Сидько А. Ф., Филимонов В. С., Сидько Ф. Я., Рубцов И. Д. Полевой двухлучевой дифференциальный спектрофотометр, *Журнал прикл. спектроскопии*, том XXIX, вып. 5, 1978.

114. Ситинская Н. П. Абсолютная фотометрия протяжных небесных объектов. — Л.: Изд. ЛГУ, 1948.

115. Ситинская Н. П. К вопросу о наличии воды на Марсе. Изв. сектора астроботаники АН КазССР, вып. 1—2, № 90, 1950.

116. Соул Х. Электро-оптическое фотографирование. — М.: Военное издательство МО СССР, 1972.

117. Сотиров И. А., Назърски Т. Г., Димитров Н. К. Диоден влъноводен модулятор. Авт. свид. за изобретение. Приоритет 02.07.1979, № 29, 259.

118. Станко С. А., Беденко В. И., Неботатова М. С. Использование растениями лучистой энергии в зависимости от вертикальной зональности. — Тр. сектора астроботаники АН КазССР, 6, 1958.

119. Стоименов А. И., Петров П. В. Возможности использования зеркальных отражателей при дистанционном исследовании Земли. Симпозиум по дистанционным методам исследования Земли из космоса. Интеркосмос, Будапешт, 1978.

120. Страхов В. Н. Об обратной задаче логарифмического потенциала для контактной поверхности. *Изв. АН СССР, физика Земли*, 6, 1974, № 2.

121. Сычев А. Г., Тарнопольский В. И. О спектрометрических характеристиках многоспектральных съемочных систем. — В кн.: Многозональные аэрокосмические съемки Земли. — М.: Наука, 1981, с. 87—93.

122. Тарнопольский В. И. Оптические характеристики поверхности и атмосферы Земли с точки зрения дистанционных исследований природных ресурсов. — Препринт Пр-287, ИКИ АН СССР, 1977.

123. Темников Ф. Е., Афонин В. В., Дмитриев В. П. Теоретические основы информационной техники. — М.: Энергия, 1971.

124. Толчелников Ю. С. Природные факторы, влияющие на тон изображения почв распаханных массивов на аэроснимках. — Тр. лаб. аэрометодов, МГ СССР, т. 9, 1960.

125. Томинг Х. Дневные и сезонные изменения альбедо некоторых естественных поверхностей ЭССР. — В кн.: Исследования по физике атмосферы, вып. 2. Тарту, 1960.

126. Федченко П. П. О влиянии высоты Солнца на отражательные свойства некоторых почв. — Экспресс информация. Метеорология, вып. 11(43), 1975.

127. Федченко П. П. Возможности определения гумуса в почвах по данным спектральных измерений, *Исследование Земли из космоса*, № 5, 1982.

128. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981.

129. Флоренский П. В., Петренко А. С., Шорин Б. П., Ведешин Л. А. Место космического изображения при комплексной обработке геолого-геофизической информации при изучении глубинного строения, Нижнего Поволжья. — В кн.: Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. т. V, М., 1976.

130. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.

131. Харин Н. Г. Лесохозяйственное дешифрирование аэроснимков. — М.: Наука, 1965.

132. Холопов Г. К., Шуба Ю. А. О нормировании чувствительности радиометров, *ОМП*, 1977, № 10, с. 6.

133. Холопов Г. К. К расчету эффективной длины волны измерительной системы, *ИПС*, 1975, т. 23, № 2, с. 354.

134. Юцевич Ю. К. Оптические характеристики природных образований. — В кн.: Исследование оптических свойств природных объектов и их аэрофотографического изображения. — Л.: Наука, 1970.

135. Шаронов В. В. Природа планет. — М.: Физматгиз, 1958.

136. Шахов А. А. Фотометрическое приспособление растений на Крайнем Севере. *Изв. Карельск. и Кольского филиалов АН СССР*, № 5, 1958.

137. Шифрин К. С. К теории альбедо. — Тр. ГГО, вып. 39 (101), 1953.

138. Шифрин Л. А. Контуры полутонового изображения. — Минвуз. сб. Ленинградского электротехнического института, 1977, № 115.

139. Шуваров Ю. А. Оптические свойства листьев в связи с минеральным питанием сахарной свеклы, *Агрохимия*, № 6, 1965.

140. Шульгин И. А. Морфофизиологические приспособления растений к свету. — М.: Изд. МГУ, 1964.

141. Эльясберг П. Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. — М.: Наука, 1965.

142. Январева Л. Ф. Изучение и картографирование сельскохозяйственного использования земель по космическим снимкам, *ИЗК*, 1981. № 5, с. 103—110.

143. Янев Т. К., Астардман Г., Начев Ч. Множество от признании и взаимеме на решение при структурон анализ на едномерни объекти. В Тр. на международен симпозиум по големи системи, информация и управление. — С., БАН, 1973.

144. Янев Т. К., Стоименов А. Й. Редукция информации и формирование интерпретационного класса при дистанционном исследовании Земли многоспектральными методами. Совещание РГДЗ, Интеркосмос, 1975, Варна.

145. Янишевский Ю. Д. Вопросы методики измерений пиранометрии и рассеяния радиации в Павловске. — Тр. ГГО, вып. 26(88), 1951.

146. Benford., Loyd G. P., Schwarz S., Coefficients of Reflection of MgO and $MgCO_3$, *J. Opt. Soc. Am.*, 149, vol. 8, No 38.

147. Bishoff, Orlicek E., Schmelovsky K. H., Zimmerman G., Gatske J., Wiegmann J., First Results of the Intercosmos Satellite IN 2.

148. Bracken P. A., Bullingsley J. B., Linch T. J., Qnann J. J., The Landsat-D Assessment System.

149. Bowers S. A., Hanks R. J., Reflection of Radiant Energy from Soil, *Soil Sci.*, (1965). **100**, No. 2.

150. Carlslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. London, Oxford University press, 1959.

151. Castruccio P. A., The Role of Phenology in Statistical Crop Acreage Measurements, XXX-th IAF Congress, Munich, 1979.

152. Condit H. R., The spectral Reflectance of American Soils, *Photogram. Ing.*, **36**, No 9, (1970).

153. Egorov V. V., Tarnopolsky V. I., In: Proceedings of the UN Training Seminar of Remote Sensing Applications. Baku, 1977.

154. ERTS Data Users Handbook. Goddard Space Flight Centere, Greenbelt, Maryland, 1972.

155. Elterman L., visible and IR attenuation for altitudes to 50 km, AFCRL, Project AFCRL-68-0153, 1968.

156. Fraser R. S., Computed Intensity and Polarization of Light Scattered from the Earth and Overlying Aerosols, *J. Opt. Soc. Am.*, **54**, No. 2, (1964).

157. Fu S., Landgrabe D. A., Phillips T. L., Informational Processing of

Agricultural Data Obtained through Distance Measurements, *IEEE*, No 10 (1968).

158. Hafer R., Maetzler C., Investigations on Snow Parameters by Radiometry in the 3 to 60 mm wavelenth Region, *J. Geophys. Res.*, **85**C, (1980).

159. Hoffer R. M., Johansen C. J. Ecological Potential in Spectral Signature Analysis. In: Remote Sensing in Ecology. Univ. of Georgia Press, 1969.

160. Holz R. R., The Surveillant Science Remote Sensing of the Envirenment, Boston, USA, 1973.

161. Idso S. B., Jackson R. D., Reginate R. J., Albedo Measurements as a Technique for Remote Sensing of Crop Yields, *Nature*, 266 (1976).

162. Idso S. B., Jackson R. D., Reginate R. J., Remote Sensing of Crop Yield, *Science*, 196 (1977).

163. Johson, Satellite Environment Handbook, Stanford University Press, 1961.

164. Kelton G., etc. Infrared Target and Background Radiometric Measurements. Concepts Units and Techniques, *Infrared Phys.*, **3**, 139—169 (1963).

165. Kempe V., et. al., Infrarot Fourier Spektrometer SI-1 und Meteor-25, *Radio, Fernsehen, Elektronik,* **26**, Nr. 19/20 (1977).

166. Kondratyev K. Ya., Lazarev D. N., Shuba Yu. A., Characteristics of Reflection, Transmission and Emission *Applied Optics*, **16**, No 7, (1977).

167. Leitao C. D., McGoogan J. T. IAF, Paper XXVI-th International Astronautical Congress, Lisbon, 1975.

168. Manuel of Remote Sensing, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 1975.

169. Mishev D. N., La exploracion de la tierra por medios aerocosmicos, Habana, Consejo Intercosmos, Academia de Ciencias de Cuba, 1976.

170. Mishev D. N., Measurement and Processing of the Spectral Reflective Characteristics of Natural Formation, Un Remote Sensing Seminar, Baku, 1977.

171. Mishev D. N., Operative Processing of Aerospace Information by Means of a Grey Scale, UN Seminar on Remote Sensing, Baku, 1977.

171. Mishev D. N., Multichannel Radiometer "Spectar-15", UN Seminar on Remote Sensing, Damascus, Dec., 1979.

172. Mishev D. N, Petrov P. V., Representation of Multigradation Images in Boulean Algebras, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **29**, No 10 (1976).

173. Mishev D. N., Petrov P. V. Decomposition of Multigradation Images by Iso-Images, *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.*, **29**, No 11. (1976).

174. Mishev D. N., Nazarski T. N., Earth Radiation Receivers in a Range of 6,0—7,0 GHz, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **30**, No 5 (1977).

175. Mishev D. N., Krumov A. H., Instrument for Measuring Spectal Reflective Characteristics of Natural Formations for Purposes of Remote Sensing, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **30**, No. 6 (1977).

176. Mishev D. N., Djepa V. S., Yanev T. K., Informational Characteristics of Some Natural Formations, Space Rec. in Bulgaria, 1978.

177. Mishev D. N., Yanev T. K., Comparison of Discriminating Possibilities of Some Transformations of Spectral Reflective Characteristics of Natural Formations, *Com. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **31**, No. 5 (1978).

178. Mishev D. N., Stoimenov A., Kovachev S., A New Type Programmable Multichannel Radiometer, *Acta Astronautica,* **6** (1979).

179. Mishev D. N., Bakalova, Multichannel Imagery Obtained with Interference Filters, *Compt. Rend. Bul. Acad. Sci.*, **33**, No. 9 (1980).

180. Mishev D. N., Kancheva R., Testsites, UN/FAO Remote Sensing, Sofia, Sept., 1981.

181. Mishev D. N., Trifinov Yu., Serafimov K., Vetlov I., Program and Instrumentation of the Satellite Experiment Bulgaria-1300-11, XXXII-nd IAF Congress, Rome, Italy, Sept., 1981.

182. Mishev D. N., Petrov P., Complex Data Processing of Bulgaria-1300-11 Experiments., XXXIII-th IAF Congress, Paris, 1982.

183. Mishev D. N., Petrov P. V., Visualization of Some Features of an Object though Monochromatic and Colour Images, *Compt. Rend. Bulg.* Acad. Sci., **31**, No. 6. (1978).

184. Mishev D. N., Petrov P. V. Composition and Decomposition of Colour and Black-White Images, *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.*, **30**, No. 7 (1978).

185. Mishev D. N., Yanev T. K., Nedjakov I. P. Effect of Local Gravitatio Field of Faults on Cloudiness Distribution, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **30**, No. 10 (1977).

186. Mishev D. N., Yanev T. K. Comparison of the Discriminant Possibilities of Some Transformationsof the Spectral Reflective Characteristics. IAF, Paper XXVIII-th IAF, Congress, Praha, 1977.

187. Simulation de la reflexion budirectionnelle des Couverts végétaux, Programme Spatial Francais, Rapport au COSPAR, Ottawa, 1982.

188. Nedialkov I. P., Michev D. N., Yanev T. K. Method of Discrimination the Earth's Gravitation Potential be the Measurement of the Topographical Coordinates of the Ocean Surface, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **30**, No. 3 (1977).

189. Plass G. H., Kattowar G. W., Gninu J. A., Radiance Distribution over a Ruffled Sea: Coutribution from Glitter, *Sky and Ocean Appl., Opt.*, **15**, No. 12 (1976).

190. Sanberer F., Hartel O., Pflanze und Strahlung, Leipzig, 1959.

191. Schanda E., Mätzler C., Knenzik Patil S., Microwave Signatures and Mapping of Snow, Actes du Symposium International de la Commission VII de la Société Internationale de Photogrammétrie et Télédétection, Toulouse, 13—17 Sept., 1982.

192. Schanda E., Hofer R., Microwave Multispectral Investigations of snow, Proc. 11-th Internat. Symp. Sens. Environmerment, Ann Arber, Mich., 25—29 April, 1977.

193. Scherz J. P., Graff D. R., Boyle W. C., Photographic Characteristics of Water Pollution, *Photogram. Ing.*

194. Scherz J. P., Development of a Practical Remote Sensing Water Quality Monitoring System.

195. Simonds J. L., Application of Characteristics Vector Analysis to Photographic and Optical Response Data, *J. Opt. Soc. Am.*, **53**, Aug. (1963).

196. Spiridonov H. B., Kroumov A. H., Katzkov N. K., Yovchev S. R., Measurement Results and Conculusion on the Spectral Reflective Coefficients of Volcanites, Granitoides and Gneisses Remote Sensing and Mineral Exploration (COSPAR), Pergamon Press Oxford and N. Y., 1980.

197. Spiridonov H. B., Kroumov A. H., Katzkov N. K., Yovchev S. R. Measurements of Spectral reflective Characteristics of Magmatic and Metamorphic Rocks, *Compt. Rent. Bul. Acad. Sci.*, **33**, No. 2 (1980).

198. SPOT, Imagery Simulation, Prospective Uses.

199. Strumgren B. Handbuch der Experimental Physik. B. 26. Leipzig, Akademische Verlags, Gesellschaft m. b. H., 1937, 321 S.

200. Taylor R. C., Terrain return measurements at X, Ku and Ka Bands. *IRE Nat. Conv. Res.*, **1**, No. 7 (1959).

201. Waldron J. R., Fellex P. A., Reflectance of Magnesium-Oxide, *J. Opt. Soc. Am.*, No. 5 (1955).

202. Weinstein O., Lindstrom L., Bremer J., Development of the Thematic Mapper.

203. Yanev T. K., Optimization of a Parallelepiped Discriminant Function at a Multidimansional Analysis, *Space Res. in Bulg.*, No. 1 (1978).

204. Yanev T. K., Interval Estimation of Spectral Reflective Characteristics for Test Field Measurements, *Space Res. in Bulg.*, No. 5 (1982).

205. Yanev T. K., Power Autocorrelative Function, *Space Res. in Bulg.*, No. 1 (1978).

206. Yanev T. K., Mishev D. N., Discriminant Analysis of Natural Formation Reflective Characteristics by a Minimal Number of Wave-Lengths, XVIII COSPAR Mtg., Bulg., Varna, 29.V. — 7.VI., 1975.

207. Yanev T. K., Mishev D. N., Experimental Planning for Complex Test site Studies of Spectral Reflectance Signatures of Natural Formation, Siminar on Test Site Studies in Bulgaria, Asenovgrad, Bulgaria, 1976.

208. Yanev T. K., Mishev D. N., Model of Relationship between the Coefficient of Variation and Soil Dehydration, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **30**, No. 5 (1977).

209. Yanev T. K., Mishev D. N., Radiance of Reflective Surface of Natural Formations, *Compt. Rend. Bulg. Acad. Sci.*, **31**, No 8, 1978.

210. Yanev T. K., Mishev D. N., Programme Passage from Classification of Spectral Reflectance Signatures, First Bulgarian-Soviet Seminar on the Results from Bulgaria-1300-11 Project, Sofia, December, 1981.

211. Yanev T. K., Mishev D. N, Mathematical/Statistical Methods for Classification of Objects by Means of Spectral Reflective Characteristics, *Space Res. in Bulg.*, **5**, (1982).

212. Yanev T. K., Mishev D. N. Multidimensional Classification Analysis of Spectral Reflective Characteristics Obtained by Aircraft, Sattelites and Earth Survey. XXX-th Meeting of COSPAR, Philadelphia, Pa., USA, 1976.

213. Yanev T. K., Stoimenov A., Optimizing the Multispectral Volume of Terrestrial Studies of Natural Formations, *Comp. Rent. Bulg. Acad. Sci.*, **31**, No. 11 (1978).

214. Van Tress H. L., Delection, estimation and Modulation Theory. New York. 1967.

215. Vieillefosse M. J., Favard M. J. CITHARE: Thermal Inertia and Humidity cartography Over Africa by Geostationary Satellite. IAF Paper XXIX-th IAF Congress, Dubrovnik, 1978.

Оглавление

Предисловие редактора перевода 5
Предисловие к русскому изданию 8
Предисловие 9

Глава 1. Введение в дистанционное изучение Земли 11

1.1. Физические основы дистанционного изучения Земли ... 11
1.2. Анализ процессов получения данных дистанционными методами 15
1.3. Орбиты космических аппаратов, используемых для исследования Земли 19

Глава 2. Отраженная и собственная радиация 25

2.1. Спектральные характеристики отражения природных образований 25
2.2. Спектральные характеристики излучения природных образований 48
2.3. Аддитивность и ее применение при анализе многоспектральной информации 64
2.4. Тепловая инерция 69

Глава 3. Методы и аппаратура измерения отраженной и собственной радиации 71

3.1 Измерение спектральных характеристик отражения ... 71
3.2. Измерение спектральных характеристик излучения 97
3.3. Метрологическое обеспечение измерений 103

Глава 4. Изображения 113

4.1. Общие сведения 113
4.2. Представление многоградационных изображений в булевой алгебре 126
4.3. Декомпозиция многоградационных изображений посредством субизображений 131
4.4. Композиция и декомпозиция цветных и черно-белых изображений 134

4.5. Электронная система визуализации и интерпретации видеоданных 138

Глава 5. Идентификация природных образований по их спектральным отражательным характеристикам 145

5.1. Информационные характеристики природных образований 145
5.2. Оперативная обработка изображений с помощью градационного яркостного клина 152
5.3. Дискриминантный анализ природных образований по их спектральным отражательным характеристикам ... 154
5.4. Многомерный классификационный анализ на основе спектральных отражательных характеристик 164
5.5. Сравнение дискриминантных возможностей некоторых преобразований спектральных отражательных характеристик 171

Глава 6. Полигоны. Измерения на полигонах 176

6.1. Перечень исследований и измерений, проводимых на полигонах 178
6.2. Измерение параметров почв 183
6.3. Измерение параметров растительности 201
6.4. Почвы и растительность 205
6.5. Влажность воздуха 208

Глава 7. Специфические примеры применения дистанционных исследований 209

7.1. Влияние локального гравитационного поля разломов на распределение облачности 209
7.2. Определение гравитационного потенциала Земли по дистанционным измерениям топографии поверхности океана 211
7.3. Применение аэроснимков в археологии 213

Литература 216

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер. 2, издательство «Мир».

Д. Мишев
ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Редактор Соболев В. С.
Мл. редактор Сысоева Л. С.
Художник Медников В. А.
Художественный редактор Прищепа В. Б.
Технический редактор Тихомирова Л. А.
Корректор Голубева И. С.

ИБ № 3813

Подписано к печати 16.10.84 г.
Формат 60 × 90 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная № 1.
Гарнитура таймс. Печать офсетная.
Объем 7,34 бум.л. Усл.печ.л. 14,50 + вкл. 0,25.
Усл.кр.-отт. 15,68. Уч.-изд.л. 14,51.
Изд. № 20/3142. Тираж 1800 экз. Зак. 15
Цена 1 р. 80 к.

Набрано в издательстве «Мир» на фотонаборном комплексе «Компьюграфик»
129820, ГСП Москва, 1-й Рижский пер., 2.

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
300600, Тула, проспект им. В. И. Ленина, 109.

В издательстве «Мир»
в 1984 году вышла книга

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В МЕТЕОРОЛОГИИ, ОКЕАНОГРАФИИ И ГИДРОЛОГИИ: Пер. с англ./Под ред. А. Крэкнелла, 41 л., 4 р. 40 к.

Излагаются проблемы, относящиеся к организации и проведению наблюдений, обработке данных и интерпретации результатов дистанционного зондирования Земли из космоса. Значительное внимание уделено применению современных средств вычислительной техники для этих целей. Приводимый справочный материал дает возможность использовать книгу как руководство при решении практических задач.

Для инженеров, аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей вузов.

Исправление:
у рис. 6.16 верх и низ
поменять местами

1р.80к.

103
1

