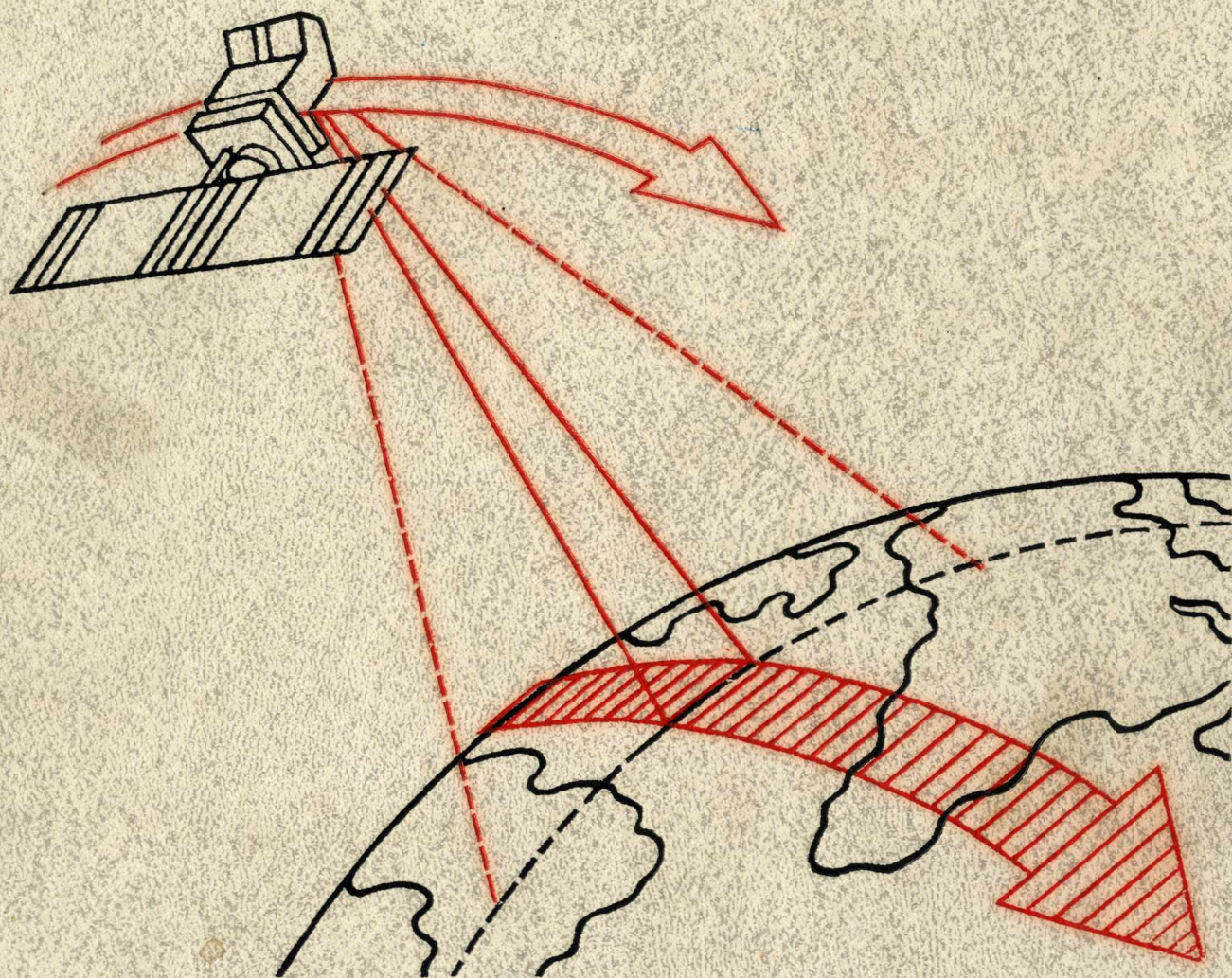


550.8
К 23

П.Кронберг

Дистанционное изучение ЗЕМЛИ



Издательство
„Мир“

Peter Kronberg
**Fernerkundung
der Erde**
Grundlagen und Methoden
des Remote Sensing
in der Geologie

Ferdinand Enke
Verlag Stuttgart 1985

П.Кронберг
**Дистанционное изучение
ЗЕМЛИ**

**ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ГЕОЛОГИИ**

Перевод с немецкого
д-ра геол.-мин. наук В. А. Буша
и
кандидатов геол.-мин. наук
В. П. Колчанова и С. Ф. Скобелева

под редакцией
д-ра геол.-мин. наук
В. Г. Трифонова



Москва «Мир» 1988

Кронберг П.

К83 Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем.—М.: Мир, 1988.—343 с., ил.

ISBN 5-03-000545-5

Книга известного ученого из ФРГ посвящена актуальной теме использования аэрокосмической информации в геологии и других областях науки и хозяйственной деятельности. В ней излагаются физические основы дистанционного зондирования, поглощающие свойства атмосферы и особенности излучения земных поверхностей разного типа. Приводятся новые результаты аэрокосмических измерений спектральных характеристик различных природных образований, особенности многозональных фотографических, телевизионных и сканирующих систем.

Для широкого круга геологов и специалистов, использующих и создающих средства дистанционного зондирования, а также для преподавателей и студентов геологических специальностей.

К 1904010000-328
041(01)-88 114-88, ч. 1

ББК 26.3:26.2

Редакция литературы по геологии и геофизике

ISBN 5-03-000545-5 (русск.)
ISBN 3-432-94601-5 (нем.)

© 1985 Ferdinand Enke Verlag
© перевод на русский язык, «Мир», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Предлагаемая читателю книга принадлежит перу П. Кронберга—ученого из ФРГ, получившего в последние годы известность благодаря своим исследованиям в геологии, прежде всего по тектонике Центральной Европы, Греции, Ирана и района Красного моря, выполненным на основе материалов космических съемок. Эта книга является логическим развитием предыдущей монографии автора—Photogeologie. Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern (1984)—Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart («Фотogeология. Введение в основы и методы геологического применения аэроснимков»).

Монографии, всесторонне освещающие дистанционные и особенно космические методы геологических исследований, пока еще редки. Среди зарубежных изданий книга Кронберга принадлежит к числу немногих, где комплексно рассматриваются обширные и разнообразные сведения о средствах и способах получения, обработки и геологического использования аэрокосмической информации. Большинство других публикаций представляют собой либо рекламные издания (известные альбомы И. Бодехтеля, У. Д. Картера, многие издания НАСА), либо хотя и насыщенные содержанием, но ограниченные по тематике или, наоборот, не дающие систематического представления о проблеме сборники статей и докладов (издания НАСА, КОСПАР, симпозиумы памяти В. Пекоры, труды конференций «Тектоника основания» и др.). В СССР неоднократно издавались обобщающие работы, где рассматривались в комплексе физико-технические и природоведческие аспекты изучения Земли из космоса, но они не имели отчетливой геологической направленности. Известен также ряд обобщающих работ по отдельным разделам космической геологии. Особое место среди изданий последних лет занимает опубликованная у нас в 1983 г. коллективная монография «Космическая информация в геологии» (под ред. В. Г. Трифонова и др.—М.: Наука, 1983), не имеющая пока аналогов по широте охвата и глубине проработки различных аспектов геологического применения материалов космических съемок. Однако средства получения и обработки ин-

формации в указанной монографии практически не рассматриваются. Недостаточно освещены и проанализированы они и в других советских космогеологических публикациях. Особенно это касается достижений, накопленных зарубежными специалистами.

Книга Кронберга, таким образом, представляет значительный интерес как работа, суммирующая методы и взгляды на космическую геологию, определяющие ее развитие за рубежом. Сразу же следует подчеркнуть, что достижения советских ученых в области космической геологии остались практически неизвестными Кронбергу. Во введении к своей книге автор кратко определяет круг понятий космической геологии и ее значение. Он пишет: «Возможности применения новых методов в геологии в настоящее время лишь испытываются и изучаются, и в ближайшем будущем эти методы перейдут из экспериментальной стадии к практическому применению». Если бы Кронберг был знаком с состоянием космогеологических исследований в СССР, ему пришлось бы изменить эту оценку. Космические методы широко используются в фундаментальных геологических исследованиях, а космогеологическое картирование органически включено ныне в систему геолого-съемочных и поисковых работ, принятую в Министерстве геологии СССР и широко применяется на практике. Нельзя, однако, не сказать о несовершенстве как самих методов, так и средств их реализации—книга Кронберга может помочь их развитию.

Большой интерес для советских читателей, не только геологов, но и специалистов других областей космического землеведения, представляют разделы книги, подробно освещающие физические основы дистанционных исследований, спектральные свойства природных объектов, технические средства и материалы космических съемок, способы обработки материалов. Эти разделы занимают более половины книги. Особенно интересна глава, где рассматриваются спектральные свойства природных объектов, обусловленные как отраженным, так и эмиссионным излучением. Приводятся спектральные характеристики горных пород разного состава, полученные не только в лабораторных условиях, но и в природе, в

том числе для выветрелых и покрытых растительностью поверхностей. Характеризуются спектральные свойства почв в зависимости от их механического и минерального состава и степени влажности, а также свойства растительности в зависимости от времени года и, что весьма интересно геологам, от содержания тяжелых элементов в почвах. Эта часть работы Кронберга основана на современных данных и имеет большое фактологическое значение, поскольку суммирует экспериментальный материал, мало известный широкому кругу советских специалистов.

Следующая глава посвящена съемочной аппаратуре и получаемым с ее помощью материалам. Рассматриваются преимущественно американские съемочные системы: многозональные фотокамеры и среди них (редкий случай!) советско-германская камера МКФ-6; телевизионная система РВВ (RBV) и сканерные системы МСС (MSS). Дано подробное описание американского спутника для исследования природных ресурсов «Лэндсат». Охарактеризованы снимки, получаемые сканером нового типа ТМ (Thematic Mapper—«Тематический картограф») — установленным на спутнике «Лэндсат-4» и имеющие разрешение на местности около 30 м. Приведен пример сканерных стереоскопических снимков, полученных новой аппаратурой типа SPOT (СПОТ). Подробно охарактеризованы ИК-тепловая сканерная аппаратура НСММ, а также космические и авиационные системы радиолокационной съемки, в том числе формирование радарного изображения в зависимости от наклона, шероховатости, влажности, диэлектрических свойств отражающих площадок. Весьма интересен образец стереоскопических радиолокационных снимков, полученных с разных траекторий.

Рассматривая способы обработки материалов съемок, Кронберг наряду с фотографическими подробно останавливается на электронно-оптических способах, как аналоговых, так и цифровых: на контрастировании, эквиденситных линиях, цветовом кодировании, фильтрации разного рода, построении ложноцветных изображений и изображений соотношения яркостей в разных зонах спектра и др. Возможности, предоставляемые разными способами обработки, иллюстрируются на примере одного и того же снимка. Характеризуются некоторые программы автоматизированной геологической обработки снимков с помощью компьютеров.

Немногом менее половины книги занимает последняя глава — описание геологической информации, извлекаемой из снимков разных типов. Рассматривая информативность космических снимков, сделанных в видимой и ИК-ближней частях спектра (стереофото-снимки, сканерные и телевизионные изображения «Лэндсат»), Кронберг опирается в значительной мере на опыт западногерманских геологов и показывает, что результаты дешифрирования могут быть использованы в первую очередь для составления карт струк-

турно-тектонического содержания и собственно геологических. Кроме того, Кронберг подчеркивает возможности применения космических снимков для изучения процессов современного осадконакопления и гидрогеологии, а также вопросов охраны среды обитания в прибрежно-морских районах. Все это представляет несомненный интерес для советских геологов. Вместе с тем автор, незнакомый с работами советских космогеологов, лишь в незначительной мере касается возможностей использования космических снимков для изучения глубинного строения земной коры — той области космического землеведения, где советским специалистам принадлежит приоритет и достигнуты значительные научные и практические результаты. Почти не освещен и другой аспект применения аэрокосмической информации, также наиболее полно исследованный советскими геологами, — использование для оценки сейсмической опасности активных районов. Возможности применения космических снимков для изучения закономерностей размещения и поисков минерального сырья, в частности для выявления структур, перспективных для поисков нефти и газа, Кронбергом только упоминаются, в то время как в СССР этому направлению исследований уделяется самое пристальное внимание. То же самое можно сказать и об инженерно-геологических исследованиях с помощью космических снимков.

Тем не менее и эта часть монографии имеет большую ценность для советских читателей. Здесь приведено много иллюстративного материала высокого качества с детальными данными геологической интерпретации. На отпечатках снимков «Лэндсат» и «Скайлэб» масштабов 1:1 000 000 и 1:500 000, иногда 1:250 000 и 1:100 000 демонстрируется дешифрирование литологических разностей пород, линейных разрывно-трещинных структур (как экспонированных на поверхности, так и погребенных), интрузивных пород, складок, тектонических покровов, кольцевых структур, четвертичных образований и других элементов геологического строения. Весьма обширен и круг ландшафтных зон, структурно-тектонических провинций и областей, описанных в книге. Это складчатые системы Аппалачей, варискиды Центральной Европы, альпийские системы Динарид, Эллинид, Альп, Атласа и Ирана, структуры докембрия в Нигерии, Австралии, Канаде, Аравии. Тектонический синтез для больших территорий демонстрируется на примерах Ирана (складки и разрывы, возникающие в условиях сжатия) и района Красного моря (разрывы в условиях растяжения). Анализируются изменения информативности снимков в зависимости от спектральных диапазонов, ландшафтных условий, времени года. По разнообразию рассмотренных ситуаций трудно найти аналогии книге Кронберга в зарубежной литературе.

Особый интерес у геологов нашей страны вызовет характеристика информативности тепловых ИК-

снимков, космических и самолетных. Она иллюстрируется на примере снимков вулканов Килауза, Этна, термальных полей Йеллоустона, Исландии, Греции. Особенно интересны тепловые снимки, позволяющие дешифрировать структуры коренных пород под плащом наносов в Южной Африке. Достаточно полно рассмотрена и геологическая информативность радиолокационных снимков. Демонстрируется дешифрирование литологических разностей пород, складок, разрывов, кольцевых структур по данным радиолокационных съемок масштаба 1:500 000 программы «РАДАМБразил» (Бразилия, Венесуэла), а также по данным космических радарных съемок аппаратурой SIR в Омане, Новой Гвинее, Алжире.

Большим достоинством книги является и обширная библиография зарубежных работ, опубликованных до 1983 г. включительно.

При переводе по возможности сохранены термины автора. При необходимости они снабжены комментарием переводчиков. Список литературы дополнен важнейшими советскими работами по космической геологии и связанным с ней аспектам аэрокосмических исследований.

Хотелось бы остановиться также на термине «дистанционное зондирование», неоднократно встречающемся в тексте. Этим термином в советской литературе принято переводить английское «Remote Sensing», что, строго говоря, неверно. Sensing скорее означает получение информации, идентификацию или индикацию, причем в нашем случае она осуществляется в основном путем регистрации естественного излучения, реже (при радарной съемке) излучения, отраженного от посланного искусственного источни-

ка. Что же касается термина «зондирование», то в геологии им обозначают способы исследования литосферы, осуществляемые путем возбуждения искусственных сигналов, регистрации и интерпретации «откликов» на них от земных недр (сейсмическое зондирование, электрозондирование и т. п.). Тем не менее термин «дистанционное зондирование» широко вошел в советскую литературу, и мы сочли возможным его сохранить.

Итак, книга Кронберга будет встречена с большим интересом широким кругом советских геологов. Она адресована прежде всего преподавателям вузов для использования в качестве учебного пособия в курсе геологического картирования, а также студентам старших курсов для самостоятельной работы. С целью обучения книгу могут использовать и геологи, осваивающие дешифрирование космических снимков. Специалист, развивающий методы и пути геологического (и в целом природоведческого и народнохозяйственного) применения аэрокосмической информации, сможет использовать книгу как справочник по различным вопросам этой новой, но уже достаточно разветвленной и многоаспектной области знаний. Комплексное рассмотрение проблемы способно натолкнуть исследователя на новые подходы и методические разработки. Надеемся, что это окажется полезным.

Перевод книги на русский язык выполнен канд. геол.-мин. наук С. Ф. Скобелевым (гл. 1—разд. 4.4), д-ром геол.-мин. наук В. А. Бушем (разд. 4.5—гл. 5) и канд. геол.-мин. наук В. П. Колчановым (гл. 6).

В. Буш, В. Трифонов

ПРЕДИСЛОВИЕ

С начала 70-х годов нашего столетия дистанционное зондирование Земли стало быстро развиваться как единое многодисциплинное направление исследований в науке и практике. Основанное более чем на полувековом опыте аэрофотосъемки и тематическом использовании ее результатов (классические методы дистанционного зондирования), оно применяется сегодня при решении многих задач геологии, в том числе при поисках в разведке месторождений полезных ископаемых и подземных вод, в географии, лесном и сельском хозяйстве, океанологии и океанографии, при планировке местности под строительство. Непрерывно увеличивается роль его при решении экологических проблем.

Однако классические методы составили только малую часть разработанных и применяемых в настоящее время методов дистанционного зондирования, даже фотографических, таких, как многозональная (мультиспектральная) фотография и различные фотоспособы обработки снимков, часть которых ранее применялась только в кино или художественной фотографии. Постоянно растет значение принципиально новых видов дистанционного зондирования – радарных и сканерных съемок, технические возможности которых совершенствуются и приспособляются к растущим и изменяющимся требованиям, предъявляемым к дистанционному зондированию различными практическими направлениями использования его данных. Например, при одновременной съемке местности в нескольких спектральных диапазонах видимого и длинноволнового электромагнитного излучения получают принципиально новые изображения поверхности Земли. Такие съемки проводились, например, с ресурсных спутников «Лэндсат» и космического корабля многоразового использования «Спейс шаттл Колумбия». Они предполагают возможность наблюдений и измерений принципиально иных параметров и соответственно иной интерпретации. Повторные съемки одной и той же местности, например, способствуют новым взглядам на ежегодное течение или динамику процессов, происходящих на поверхности Земли. Возможность ускоренной синхронной съемки многочисленных спектральных ха-

рактеристик объектов и запись этого огромного множества данных на магнитную ленту потребовали внедрения компьютерной (с помощью ЭВМ) обработки результатов. Это открыло другую полезную сторону новых методов зондирования – получение и обработку числовых, так называемых кодированных, т.е. улучшенных для решения тематических задач, изображений.

Для понимания и правильного использования данных дистанционного зондирования потребителю и интерпретатору необходимо по крайней мере минимальное знание основ техники съемки и, прежде всего, знание зависимостей спектральных яркостей интересующих его объектов от частоты электромагнитного излучения, величин отражения, поглощения, пропускания, рассеяния электромагнитных волн выбранного диапазона на поверхности объекта и в атмосфере, а также проявлений этих процессов в различных ландшафтных зонах Земли. При этом необходимо обращать внимание на динамику ежегодного изменения ландшафта, вероятностные связи или переменные величины взаимодействия между геологическим субстратом и развивающимися на нем почвами и растительностью, выработанным на нем рельефом, вносимыми в ландшафт антропогенными изменениями, т.е. всеми теми изменениями, которые естественны для лика Земли и фиксируются в момент съемки на изображении. Наконец, надо учитывать естественные и техногенные помехи, возникающие при съемке и искажающие спектральные сигналы объектов, а иногда и полностью маскирующие их.

Основные положения дистанционного зондирования, возможности и проблемы его тематического применения в геологии и других вышеназванных направлениях космического землеведения широко обсуждались в последние годы на симпозиумах разного ранга и освещались в многочисленных публикациях.

В предлагаемой вниманию читателя книге кратко изложены основы дистанционного зондирования и его методы, применяемые для геологических исследований на уровне современных знаний, обращено внимание на наиболее важные вопросы, касающиеся возможностей и границ применения этих методов. За

обзором и введением в существо и состояние проблемы следует раздел о физических основах дистанционного зондирования, после которого идут разделы о спектральных характеристиках природных сред и материалов (горных пород, почв, растительности, водоемов) и о применяемых в настоящее время различных методах съемок. Последующие разделы представляют собой изложение основных способов обработки изображений. В последнем разделе на наглядных примерах обсуждаются информационное содержание, применение и практическая эффективность изображений Земли из космоса. В конце книги приведен список литературы.

Выход в свет этой книги был невозможен без критики и советов коллег, особенно специалистов в смежных областях космического землеведения. За критические замечания и просмотр рукописи автор сердечно благодарит проф. Лабуша из Технического университета в Клаустхале (разд. «Физические основы дистанционного зондирования»), д-ров Дёрффера и Фишера из компании «GKSS-Geesthacht» (разд. «Спектральные характеристики водоемов»), проф. Кенневега из Гёттингенского университета (разд. «Спектральные характеристики растительности»), д-ра Лампа из Кильского университета и д-ра Квиля из Университета в Карлсруэ (разд. «Спектральные характеристики почв»), проф. Мюленфельда из Тех-

нического университета в Клаустхале и д-ра Ломанна из Технического университета в Ганновере (разд. «Телевизионные и сканерные методы»), д-ра Зибера, сотрудника DVFLR¹ в Оберпфaffenхофене (разд. «Радарные методы»), проф. Листа из Свободного университета Западного Берлина (разд. «Применение и обработка изображений»).

Публикация отдельных примеров изображений стала возможной благодаря любезности многочисленных институтов в стране и за рубежом, которым автор приносит благодарность в соответствующих местах книги. Изготовители отдельных иллюстраций указаны в подписях к ним. Особую благодарность автор выражает техникам-чертежникам Геологического института при Техническом университете в Клаустхале Бёму и Ризену, а также фотографу института Розе за их помощь в изготовлении иллюстраций. Автор весьма признателен издательству «Фердинанд Энке» за предоставленную возможность публикации книги и оказанную помощь при редактировании текста и рисунков.

¹ DVFLR Deutsche Versuchsanstalt für Luft und Raumfahrt – буквально Немецкая организация аэро- и космических полетов; точнее по смыслу может быть названа «Управление аэрокосмических полетов», ФРГ. – *Прим. перев.*

1. ВВЕДЕНИЕ И ОБЗОР

Дистанционное зондирование – перевод американского термина “remote sensing”, который обозначает в общем, наиболее широком его смысле, изучение объектов на расстоянии, т. е. без непосредственного контакта приемных чувствительных элементов аппаратуры (датчиков или сенсоров) с поверхностью исследуемого объекта.

В обычной повседневной практике «дистанционным зондированием» называют фотографические и нефотографические методы съемок поверхности Земли или других планет и их естественных спутников, которые проводятся с самолетов, космических аппаратов или других носителей, для изучения состояния или тематического картографирования поверхности исследуемого тела.

Фотографическими методами дистанционного зондирования называют как классические традиционные виды аэрофотосъемок, так и съемки, осуществляемые с помощью новой многозональной или мультиспектральной фото- и телеаппаратуры. К нефотографическим методам в первую очередь относят съемки, проводимые с помощью оптико-механических сканеров или радаров бокового обзора¹.

Новые возможности дистанционного изучения Земли появились в конце 1960-х годов с внедрением в практику гражданских исследований радарных и сканерных методов, разработанных для военной разведки, которые позволили проводить съемки в ранее не использовавшихся диапазонах электромагнитных волн и получать качественно иную информацию, в том числе изображения разных по площади участков поверхности Земли.

В противоположность аэрофотосъемке, которая ограничена волнами видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов солнечного излучения, оптико-механические сканеры могут регистрировать идущее от объектов излучение в более широком диапазоне длин волн – от самых коротких, ультра-

фиолетовых, до волн так называемого теплового излучения. При этом одни и те же объекты на поверхности Земли могут быть сняты сканерами мультиспектральной (многозональной) модификации сразу в нескольких узких зонах, или каналах, спектра электромагнитного излучения. Другое преимущество сканерных методов по сравнению с аэрофотосъемкой заключается в том, что данные зондирования могут быть получены и тиражированы как в аналоговом, т. е. в виде изображения, так и в числовом виде. Благодаря этой новой возможности съемочной аппаратуры и новым методам обработки и представления данных достигается более высокая контрастность изображений и улучшается возможность обособления объектов. Например, можно добиться более высокой степени дешифрируемости горных пород, почв или растительности, чем на обычных спектральных, узкозональных черно-белых, панхроматических и цветных снимках.

Принципиально новые возможности дает применение радарных систем, работающих в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения. Система радара бокового обзора (РБО), установленная на борту самолета, посылает сфокусированной антенной узконаправленный высокочастотный импульсный пучок электромагнитных волн к поверхности Земли. Отразившись от нее, он вновь принимается той же или другой, приемной, антенной и регистрируется на борту носителя приемной аппаратурой в виде изображения, так называемого радарного снимка, или магнитной записи. Радарные системы бокового обзора как бы прожекторным лучом освещают полосу по одну или обе стороны от линии полета самолета. Такие съемки можно проводить в любое время суток, при любых погодных условиях и облачности, так как поток электромагнитного излучения в определенном диапазоне длин волн, направляемый антенной системы, беспрепятственно проходит сквозь облака, дождь и туман. Этой методикой пользуются, как правило, в тех районах, где облачный покров, постоянный или временный, препятствует обычным аэрофотосъемкам или сканерным съемкам. Получаемые таким способом радарные изображения местности создают не-

сколько преувеличенное представление о контрастности рельефа снимаемого участка, что в ряде случаев способствует более четкому восприятию дешифровщиком тектонических структур, морфологических и литологических различий геологического субстрата и других вещественных различий в ландшафте, например влажности или обезвоженности почв.

Разносторонние возможности новых методов проведения съемок, прежде всего возможности многозонального сканирования, очень скоро стали широко известны геологам, географам, землеустроителям, специалистам лесного и сельского хозяйства, которые на базе этих новых материалов внесли существенный вклад в свои области исследований. Кроме того, были достигнуты значительные успехи в океанографии и охране окружающей среды. Все вместе это привело к становлению в конце 1960-х годов нового многодисциплинного направления исследований – «дистанционного зондирования». В то время оно стало актуальным еще и потому, что его становление совпало с полетами первых пилотируемых космических кораблей вокруг Земли, высадкой астронавтов на Луну и необходимостью в дальнейшем планировать космические полеты для решения научных задач.

Первые фотографии Земли, сделанные для синоптиков со спутников типа «Меркурий», «Джемини» и «Аполлон», показали возможность их использования в разных областях и космического земледелия и доказали полезность спутников в качестве носителей для установки на них съемочной аппаратуры. Но для беспилотных космических аппаратов проблема заключалась не столько в проведении фотографических съемок в автоматическом режиме, сколько в доставке этой информации на Землю. Иначе говоря, требовались такие устройства, которые позволяли бы наземным станциям приема получать информацию в виде электрических импульсов или радиосигналов. Первый многозональный сканер соответствовал этим требованиям. Его установка на американском исследовательском ресурсном спутнике «Лэндсат» дала начало новой отрасли тематического картографирования поверхности Земли. Периодически повторяющиеся съемки одних и тех же участков сделали возможным не только постоянную съемку поверхности Земли, но и слежение (мониторинг) за происходящими на ней процессами.

С некоторых пор мультиспектральные сканеры и радары бокового обзора перешли в коммерческое владение. Полученные этой аппаратурой изображения Земли позволяют исследователям различных направлений земледелия использовать их, с одной стороны, в качестве рабочей основы для рутинных исследований в традиционных направлениях, а с другой – проводить многоцелевое тематическое картирование и повторные съемки для анализа состояний окружающей среды на участках разной площади, т. е. осуществлять мониторинг поверхности Земли. В этом

смысле новые методы дистанционных съемок представляют прогресс в сравнении с аэрофотосъемкой. Однако космическими снимками невозможно полностью заменить существующие виды аэрофотоснимков, которые были и остаются стандартными материалами для изготовления топографических карт разных масштабов. В этом качестве желательно сохранить их и в обозримом будущем для составления основ топо- и фотокарт крупного и среднего масштабов. Основанием для этого служат малая стоимость черно-белых панхроматических снимков и простота технологии изготовления. С другой стороны, аэрофотоснимки можно использовать для построения стереомodelей местности и соответственно вести их фотограмметрическую обработку, что не всегда и не для всякой местности можно сделать по снимкам из космоса. Аэрофотоснимки, основное свойство которых высокое пространственное разрешение, и построенные по ним стереомodelи местности дают неисчерпаемый материал как для выпуска топографических карт, так и для подготовки фотогеологической основы для картирования литофациального состава и структуры горных пород. Изображения, полученные с помощью установленных на спутниках сканеров, не всегда позволяют построить такие стереомodelи, но это в принципе технически реализуемая проблема, в то время как по радарным изображениям уже сейчас возможно построение стереомodelей исследуемого региона.

Возможности применения новых методов в геологии в настоящее время лишь испытываются и изучаются, и в ближайшем будущем эти методы перейдут из экспериментальной стадии к практическому применению. Современное же положение дистанционных методов определяется рядом моментов. В первую очередь, техническим совершенством съемочной и приемной аппаратуры, особенно той, которая устанавливается на борту спутника или самолета. Поэтому постоянно совершенствуются и испытываются новые типы сенсоров (датчиков) съемочной и приемной аппаратуры. Следующее место занимают проблемы собственных спектральных характеристик исследуемых объектов, а из них прежде всего – отражение, поглощение и вторичное тепловое излучение потока энергии поверхностями объектов. Кроме того, слабо изучено влияние переменных внешних факторов на спектральные сигналы объектов и на прием самого сигнала. Количественных данных получено пока недостаточно. Системы дистанционного зондирования только тогда будут результативны при проведении специальных исследовательских работ, когда будут накоплены следующие данные: специфика спектральных характеристик естественных и искусственных объектов на поверхности Земли, количественные различия спектральных яркостей разных объектов и их классификация, на основе которой возможно тестирование получаемых материалов космических съемок. С

¹ В советской литературе принято иное деление: к нефотографическим методам относят телевизионные, сканерные, радиолокационные, лидарные и т. п. методы. – Прим. перев.

технической стороны должны быть изготовлены такие приемники, рабочие характеристики которых были бы удовлетворительными как по величине спектральной яркости, так и по пространственному разрешению. Иначе говоря, чтобы получить точную привязку объекта в пространстве по его импульсу, технические возможности аппаратуры должны позволять регистрировать малые значения спектральной яркости объектов и их небольшие размеры. Если чувствительность аппаратуры достаточна, то соответственно при съемке в разных спектральных диапазонах получаются изображения высокого разрешения, которые можно размножать для картографических работ в оптимальном по степени детальности виде. Улучшенное, более контрастное изображение ландшафта исследуемого района можно получить во многих случаях специально разработанными методами обработки данных, аналоговыми или числовыми. Числовая обработка возможна и при числовой первичной регистрации (записи данных на магнитную ленту), или после перевода изображения (аналоговой записи) специальными устройствами в числовую, кодированную запись. Внедрение числовых методов наиболее успешно осуществляется после установки на борту спутников «Лэндсат» многозональной сканирующей системы (MCC или MSS), которая передает числовую

запись изображения ландшафта на Землю. Уже сейчас имеется значительный опыт автоматизированной классификации и распознавания горных пород, почв и растительности, накопленный при составлении тематических карт. Числовые методы получения и обработки данных и разработка для них систем и комплексов стали важнейшей областью перспективных исследований в дистанционном зондировании наряду с разработкой техники ведения съемок, с получением спектральных характеристик природных и искусственных сред на поверхности Земли, а также внедрением отдельных методов в практику специальных, тематических работ в земледелии.

Специалисту, обрабатывающему и использующему данные дистанционного зондирования, необходимо серьезное знание как физических основ всего комплекса методов, так и физических и технических особенностей каждого из них в отдельности. Кроме того, он должен иметь представление об ограничениях применения того или иного метода дистанционного зондирования. Последующие разделы книги должны способствовать получению такой информации и показывают, как можно использовать различные методы дистанционного зондирования на сегодняшнем уровне их возможностей.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

2.1. Электромагнитное излучение, электромагнитный спектр, источники излучения

Распространение энергии в пространстве в виде волн или прямолинейного потока световых частиц – фотонов – называют электромагнитным излучением. В соответствии с этим оно может быть описано или специфическими волновыми параметрами – скоростью распространения, длиной волны и частотой, – или в понятиях корпускулярной теории как поток световых квантов или фотонов, когда речь идет о световом излучении. Двойственность природы электромагнитного излучения становится очевидной на примере солнечного света. Доказательством его волновой природы служит явление интерференции; например, общеизвестны радужные интерференционные картины на тонких пленках мыльного пузыря или разлитого по поверхности воды масла. Корпускулярная природа света проявляется в фотоэлектронной эмиссии; например, при попадании света на фотоэлемент в нем возникает электрический импульс, который по величине пропорционален числу попавших на него квантов света, или фотонов.

Характер всех электромагнитных волн одинаков. Они распространяются в вакууме со скоростью света и отличаются друг от друга собственной частотой, длиной волны и энергией, занимая соответствующее положение в электромагнитном спектре. Длина волны λ (фемтометры – километры) определяется расстоянием между двумя соседними точками волнового цуга, например между двумя ближайшими минимумами или максимумами колебания. Частота ν (герцы) обратно пропорциональна длине волны и по определению равна числу полных колебаний в секунду. Общий спектр встречающегося в природе электромагнитного излучения охватывает волны длиной от фемтометров¹ до километров или десятков километров. Он непрерывен и делится на несколько областей, или групп, излучения, иначе называемых зонами или диапазонами. Границы между ними условны. Для дистанционного зондирования используют следующие

группы излучения, или диапазоны волн: ультрафиолетовый – от 0,27 до 0,4 мкм; видимый, или световой, – от 0,4 до 0,78 мкм; ближний, или фотографический, инфракрасный (ИК), – от 0,7 до 0,9 мкм; тепловой инфракрасный – от 3,5 до 5,0 мкм и от 8,0 до 14 мкм; микроволновой – от 0,3 до 10 см (рис. 1).

Аэрокосмические съемки в видимом и ближнем ИК-диапазонах¹ (0,4–0,9 мкм) проводят обычно тремя методами: фотографическим, телевизионным и сканерным. Методы оптико-механического сканирования в настоящее время являются главными методами дистанционного зондирования, и их значение постоянно возрастает в связи с необходимостью получения информации в тепловом диапазоне (0,9–14 мкм). Оптико-механический сканер – радиометр, который измеряет амплитуду электромагнитного излучения, восходящего от малых и больших элементов ландшафта на поверхности Земли или другой планеты, и формирует кодированную по величине и развернутую по строкам запись снятого сюжета.

Фотографические, телевизионные и сканерные способы аэрокосмических съемок считают пассивными, так как в них используется естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов, обусловленное солнечной радиацией. Им противопоставляют радарные методы, которые называют активными, так как они работают в микроволновой области излучения, создаваемого искусственным источником направленного действия.

В природе главный источник электромагнитной энергии – Солнце. При температуре поверхности около 6000 К оно излучает огромное количество энергии непрерывного спектра – от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов (рис. 2). Максимум солнечного излучения приходится на 0,47 мкм; в ультрафиолетовой части оно резко убывает, а в инфракрасной регистрируется в виде широкой и пологой кривой. Солнечная энергия, или солнечная радиация, достигшая поверхности Земли, проникнув через ее атмосферу, частично отражается, а частично поглощается поверхностью планеты и расположенными на

¹ Фемтометр (фм) равен 10^{-15} м.

¹ Ниже, в соответствующих разделах, речь идет о диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм и даже до 2,5 мкм. – Прим. перев.

поглощаются озоном. Они не проходят сквозь атмосферу и не могут быть использованы для дистанционного зондирования поверхности Земли. Более длинноволновое излучение (в оптическом диапазоне 0,4–5,5 мкм) проходит через атмосферу, и если рассеяние и поглощение энергии в ней не очень велики, то излучение отражается от поверхности Земли и может быть зарегистрировано сенсорными системами (приемниками), на борту носителя – самолета или спутника. Атмосфера прозрачна для теплового излучения только в двух узких зонах (рис. 1). Поэтому для дистанционного зондирования используют только два интервала длин волн: 3,5–5,0 и 8–14 мкм, – так как только в них может быть зарегистрирован сканером поток эмиттерной энергии. Все остальное тепловое излучение Земли поглощается водяным паром, озоном, углекислым газом и метаном. Волны других длин инфракрасного диапазона не достигают аппаратуры, установленной на борту самолета или спутника и не могут быть зарегистрированы. По мере увеличения длины волны излучения воздействие атмосферы уменьшается, и она становится практически прозрачной для волн микроволнового диапазона (рис. 1). Это единственно возможный диапазон действия радарных методов зондирования, работающих с волнами сантиметровой и дециметровой длины.

Рассеяние электромагнитных волн в атмосфере, так же как и их поглощение, зависит от длины волны. Рассеяние светового потока происходит вследствие разнонаправленного отражения проходящих лучей маленькими или большими частицами: молекулами газа и центрами концентрации аэрозолей (пылью, твердыми частицами дыма), а также каплями воды. Вид и интенсивность рассеяния зависят от соотношения между длиной волны излучения и размером отражающей частицы. Так, молекулами газов рассеивается коротковолновая часть излучения (рассеяние Рэлея), а аэрозолями, размеры частиц в которых соизмеримы с длиной волны, рассеивается длинноволновая часть оптического излучения (рассеяние Ми).

Атмосферное рассеяние света уменьшает прямую солнечную радиацию и повышает рассеянное, диффузное, излучение атмосферы. В принципе рассеяние в коротковолновой части спектра сильнее, чем в длинноволновой. Особенно сильно оно в голубой и ультрафиолетовой частях спектра, поэтому небо имеет голубой цвет. Рассеяние света в этой части спектра иногда называют небесным свечением или голубой дымкой. Освещенность поверхности Земли определяется совокупностью прямой солнечной радиации и диффузного излучения атмосферы. Рассеянное свечение атмосферы играет очень большую роль в освещении затененных участков на поверхности Земли, которые на цветных пленках и в природе приобретают голубой цвет – так называемая дымка, или вуаль. Практически во всех частях земного шара наблюдается этот эффект молекулярного рассеяния света, так же

как в промышленных районах – серая дымка аэрозольного рассеяния.

Интенсивность рассеяния солнечного излучения так же, как интенсивность его поглощения, возрастает с длиной пути луча в атмосфере. Этим определяется освещенность поверхности Земли, которая зависит от положения Солнца по отношению к плоскости экватора и в первую очередь от высоты Солнца над горизонтом. Положение, или стояние, Солнца определяет спектр и интенсивность потока солнечной радиации, который отражается и поглощается элементами ландшафта. В общем при проведении аэрокосмических съемок предпочтительнее большая высота Солнца – около 60–80° над горизонтом; при ней создаются лучшие условия освещенности ландшафта, различия в цвете и яркости отдельных его элементов становятся более четкими, а теневые контуры рельефа уменьшаются до минимума. В некоторых случаях, наоборот, низкое стояние над горизонтом создает лучшие условия для проведения специальных, тематических, съемок. Так, например, при съемках равнинных территорий для картирования тектонических структур, когда рельеф подчеркивает морфологию структуры и является важным критерием, предпочтительнее малые высоты стояния Солнца. Поэтому выбор оптимальных условий аэрокосмических съемок в значительной мере зависит от конкретных топографических условий района, целей съемки, ее методов, решаемых задач и самих объектов исследования.

Интенсивность рассеяния солнечного света в ближнем инфракрасном диапазоне незначительна. При нормальной, ясной, атмосфере рассеяние не играет никакой роли. Слабая задымленность приповерхностного слоя атмосферы, также мало влияет на излучение ближнего ИК-диапазона, если размеры твердых частиц дыма в целом не более 1 мкм. Туман и облака, наоборот, очень сильно рассеивают ИК-излучение в этом интервале длин волн (0,75–1,1 мкм), так как размеры водяных капель имеют размер около 4 мкм.

Наряду с вышеописанными процессами селективного рассеяния в атмосфере электромагнитных волн определенной длины (или частоты) происходит другое, более полное рассеяние света в дыму, тумане и облаках, если размер частиц на его пути примерно на порядок превышает длину световой волны. Частицы таких размеров одинаково рассеивают электромагнитные волны любой длины, почему и кажутся облака белыми, хотя капли воды в них окраски не имеют.

Для дистанционного зондирования вышеописанные процессы очень важны. С одной стороны, ими определяется ширина и интенсивность спектра солнечного или искусственного электромагнитного излучения, достигающего поверхности Земли. С другой стороны, ими же определяются спектральные диапазоны и интенсивность потоков отраженного и эмиттерного (вторичного теплового) излучений, регистри-

руемых бортовой аппаратурой носителя. Поэтому зависимость прохождения электромагнитных волн сквозь атмосферу от их частотного диапазона должна учитываться как при проведении аэрокосмических съемок, так и при обработке их результатов.

Молекулярное или аэрозольное, а чаще комбинированное, т.е. и то и другое, рассеяние солнечного света в атмосфере приводит к диффузному, рассеянному, излучению в ней, имеющему также разные частотные характеристики и вызывающему ее свечение. Это свечение атмосферы, или, как принято называть, дымка, или вуаль, при аэрокосмических съемках регистрируется вместе с «полезным» излучением (восходящим от поверхности Земли потоком энергии, несущим полезную информацию), и создает помехи в приеме полезных сигналов бортовой аппаратурой. Это приводит к искажениям сигналов от исследуемых объектов, уменьшению контрастности и яркости изображения ландшафта, ухудшению пространственного разрешения. Другими словами, помехи снижают технические возможности съемочной аппаратуры. Чтобы избавиться от помех, диффузное свечение атмосферы отфильтровывают, например, с помощью светофильтров или заранее выбирают такие спектральные диапазоны для съемки, в которых эти помехи будут минимальны. Так, при аэрокосмических фотосъемках засветку атмосферной дымкой, происходящую из-за сильного рассеяния волн в ультрафиолетовой и голубой частях спектра, уменьшают поставленным перед объективом фотокамеры желтым или оранжевым светофильтром. Они поглощают ультрафиолетовые и голубые лучи, пропуская световые волны с длиной более 0,5 мкм – соответственно 0,5–0,9 и 0,53–0,9 мкм. При съемке на цветную пленку с этой уже целью ставят дымчатый светофильтр, который еще больше поглощает голубые лучи.

Влияние атмосферного рассеяния света на качество получаемых при дистанционном зондировании изображений становится более понятным, если сравнить принятые со спутника «Лэндсат» изображения одного ландшафта в четырех спектральных диапазонах (см. рис. 81). Если эти снимки положить рядом, то сразу бросаются в глаза их различия в контрастности, четкости и детальности отображения сюжета в разных спектральных каналах. Особенно велика эта разница в качестве и информативности изображений для снимков, сделанных в канале 4 и канале 7 многозонального сканера спутника «Лэндсат». Изображения канала 4, т.е. сделанные в зеленой зоне спектра от 0,5 до 0,6 мкм, намного хуже по контрастности фотоблизностей, четкости и детальности проработки, иначе говоря, по «резкости изображения», чем снимки в канале 7. Отснятый в канале 4 сюжет оказывается сильно завуалированным. Очевидно, что рассеяние света в этой спектральной зоне так велико, что интенсивность атмосферного рассеяния и потока излучения, отраженного от поверхности Земли, близки

по величине. Другими словами, в этом спектральном диапазоне полезный сигнал почти полностью гасится импульсом диффузного излучения. В канале 7 сканер регистрирует длинноволновую часть светового излучения, включая и ближний ИК-диапазон (0,8–1,1 мкм), которая почти не рассеивается в атмосфере. Поэтому на снимке этого спектрального канала так ясно передается сюжет, выше четкость и контрастность образов, т.е. выше информативность снимка. В принципе информативность снимков в канале 7 выше, чем в других каналах – 4, 5, 6.

Влияние атмосферных помех велико для волн с длиной менее 0,8 мкм и меньше в ближнем ИК-диапазоне. Действительно, изображения канала 7 должны получаться самыми четкими, так как в нормальной атмосфере волны этой длины почти не рассеиваются и отраженный от объектов на поверхности Земли поток излучения в ближнем ИК-диапазоне почти без искажений достигает бортовых сенсоров. Это же излучение практически без искажений проходит через атмосферу слабо задымленных районов, в то время как остальная, коротковолновая, часть светового потока рассеивается твердыми частицами дыма. Следовательно, для того чтобы получить высококачественные снимки таких районов, аэросъемку над ними надо проводить с инфракрасной черно-белой пленкой и темно-красным светофильтром. Зональные черно-белые ИК-пленки специально сенсибилизированы для диапазона волн 0,75–0,9 мкм, а темно-красный фильтр не пропускает свет с длиной волны менее 0,7 мкм. Поэтому на пленках такого типа регистрируется только полезный сигнал-индикатор объекта, т.е. отраженное от объекта излучение в диапазоне 0,7–0,9 мкм. Только спектральной избирательностью съемочной техники и объясняется то, что качество изображений в ближнем ИК-диапазоне всегда выше (лучше по детальности и контрастности), чем аналогичные кадры, снятые в тех же условиях, но на черно-белую панхроматическую пленку через желтый светофильтр.

Во многих районах Земли, скрытых под постоянным или временным сплошным или разреженным облачным покровом, дистанционное зондирование Земли представляет большую проблему. Облака непрозрачны – капли воды поглощают и рассеивают все электромагнитные волны менее 3 мкм. В таких районах могут быть применены только активные методы дистанционного зондирования, основанные на микроволновом излучении. Речь идет о радарных системах бокового обзора (РБО). Одна или две антенны радара посылают монохроматические волны длиной 0,86–100 см поперек направления полета самолета соответственно в одну или две стороны от направления полета. На распространение волн с длиной более 2 см не влияют ни облака, ни туман, ни дождь. Отраженный от поверхности Земли сигнал возвращается и принимается антенной радара. С помощью ЭВМ эти

сигналы могут быть преобразованы в радиолокационное изображение местности, несколько отличающееся от обычных аэрофотоснимков, но с большой степенью точности передающих рельеф местности, так как длинноволновые импульсы радарных систем практически без искажений проходят через атмосферу.

Все рассмотренные выше примеры способов получения данных в важнейших для дистанционного зондирования диапазонах длин волн показывают, как влияют на получение спектральной характеристики объектов ландшафта процессы рассеяния и поглощения лучей в атмосфере в зависимости от длины волны. Поэтому при планировании аэрокосмических съемок необходимо учитывать не только долю отраженного, поглощенного и эмиттерного потоков энергии, восходящих от поверхности Земли, но и процессы взаимодействия электромагнитных волн с атмосферой.

Таким образом, для получения качественных результатов дистанционных съемок необходимо принять во внимание много факторов: состояние атмосферы, высоту Солнца и азимут на него во время полета, а также технические параметры аппаратуры (спектральное, радиометрическое, частотное, температурное и пространственное разрешения). При необходимости количественной оценки результатов съемки в ряде случаев проводят не только геометрическую коррекцию изображения, но и радиометрическую коррекцию приемника. Она основана, с одной стороны, на теоретических математических моделях процессов распространения электромагнитных волн, а с другой – на практических измерениях спектральных характеристик во время полета. Для коррекции важнейших параметров измеряют содержание водяного пара, концентрацию пыли и аэрозолей, определяют размеры частиц, измеряют температурный профиль, а также учитывают данные об изменениях погоды (осадки, ветер) [30]. Большинство этих данных на практике получают с метеорологических спутников и при специальных наземных и воздушных измерениях в районе съемок.

2.3. Взаимодействие электромагнитного излучения с различными веществами и средами на поверхности Земли

(Отражение, поглощение, пропускание, вторичное тепловое излучение электромагнитных волн веществами, излучательная способность разных веществ и сред, влияющие физические параметры среды.)

Излучение, идущее от Солнца или искусственного источника в виде пучков или лучей электромагнитных волн (потока энергии), вступает во взаимодействие с веществом или средой на поверхности Земли. Одна

часть этого падающего потока энергии в соответствии со свойствами поверхности вещества или среды или направленно отражается, или рассеивается. Другая часть излучения проникает внутрь среды и в ней преломляется или отражается на граничных поверхностях, т.е. на поверхностях раздела веществ, образующих среду. В той или иной мере электромагнитные волны взаимодействуют с носителями зарядов в веществе (атомами или молекулами) и поглощаются ими (абсорбция). Возникающий в результате такого поглощения разогрев вещества вызывает испускание им потока вторичного теплового излучения – эмиссию. Наконец, возможно проникновение волн определенной длины внутрь среды на некоторую глубину от поверхности, как бы ее просвечивание, – трансмиссия или пропускание.

В соответствии с законом сохранения энергии общая мощность отраженного, поглощенного, рассеянного и пропущенного потоков излучения должна быть равна мощности направленного на поверхность среды общего потока электромагнитных волн (суммарного потока), или (рис. 1):

$$\Phi_{\text{abs}} + \Phi_{\text{refl}} + \Phi_{\text{scatt}} + \Phi_{\text{trans}} = \Phi_i.$$

В методическом руководстве-справочнике Кастена и Рашке [141] даны определения и краткие описания процессов отражения, рассеяния, поглощения, пропускания и вторичного излучения (эмиссии) электромагнитных волн и приведены важнейшие константы этих процессов. Автор счел необходимым не только использовать эти краткие, но исчерпывающие данные, но и в некоторых случаях процитировать эту работу.

Отражением называют возвращение электромагнитного излучения от поверхности среды без изменения частоты монохроматических волн. Различают направленное, или зеркальное, отражение и диффузное, или рассеянное, отражение.

Направленное отражение – это отражение без рассеяния, например отражение луча света от зеркала, которое может быть описано законами линейной оптики. При полном диффузном отражении мощность или интенсивность потока отраженного излучения одинакова во всех направлениях, т.е. индикатриса вектора мощности потока равновелика во всех направлениях. (Мощность потока – величина излучения, проходящего через элементарную площадку.) Полное диффузное отражение, равновеликое во всех направлениях, определяется в соответствии с законом Ламберта как отражение от абсолютно однородной матовой поверхности, величина отражения которой принята за единицу. В природе обычно рассеянное и зеркальное отражения происходят одновременно. Такое отражение принято называть смешанным или комбинированным [41].

Коэффициент отражения, или отражательная способность, определяется количественным соотношением

между отраженным (r) и падающим (i) потоками электромагнитных волн:

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}.$$

При комбинированном отражении суммарный поток (ρ) определяется как сумма величин зеркального (ρ_r) и диффузного (ρ_d) потоков отраженной энергии:

$$\rho = \rho_r + \rho_d.$$

Для измерения отражательной способности поверхностей используется рефлектор Ламберта. Она обозначается индексом L и вычисляется по формуле

$$\rho_L = \frac{\Phi_r}{\Phi_{r,L}},$$

где Φ_r – мощность потока излучения на единицу площади в полупространстве для выходящего потока, а $\Phi_{r,L}$ – мощность потока излучения, отраженного от полностью матовой поверхности в том же полупространстве. Например, цинковые белила и окись магния, нанесенные на металл или другую поверхность, рассеивают падающий на них свет в соответствии с законом Ламберта и поэтому кажутся вблизи одинаково светлыми, с какого бы направления на них не смотреть.

Большинство естественных поверхностей не дает полного диффузного отражения. Поток отраженной от них энергии имеет, как правило, большую или меньшую зеркальную компоненту [144]. При этом величины падающего (Φ_i) и отраженного (Φ_r) потоков излучения зависят от косинуса угла падения потока энергии на поверхность среды. Естественное соотношение освещенностей зависит еще и от положения поверхности по отношению к Солнцу. На освещенность влияет не только зенитное стояние Солнца, но и азимут на него от поверхности природного объекта. Стояние Солнца и азимут на него определяют мощность светового потока и ширину спектра излучения, падающего на поверхность. В метеорологии отражение принято измерять величиной альbedo, т.е. отражением выровненных горизонтальных площадок, освещенных естественным светом. Иначе говоря, альbedo – это отношение отраженного от поверхности потока энергии к падающему на нее потоку. Измерение альbedo аналогично измерениям отражательной способности любой поверхности.

Рассеяние – это ослабление направленного потока излучения вследствие отклонения направления его падения, но без поглощения энергии падающего излучения или перехода светового потока в другие формы энергии [141].

Коэффициентом поглощения, или абсорбции (α), называют отношение величины поглощенного потока энергии к величине падающего потока [141]:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}.$$

Ослабление потока энергии при прохождении его через среду в результате рассеяния или поглощения света называется экстинкцией. В явлениях пропускания или прохождения потока энергии через среду также различают направленное, рассеянное или диффузное и смешанное **пропускание** (трансмиссию), которое иногда называют комбинированным.

Коэффициент пропускания или поглощения энергии (τ) определяется отношением между прошедшим через среду, т.е. вышедшим из нее, и падающим на ее поверхность потоками излучения:

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}.$$

При комбинированном пропускании его величина определяется суммой величин диффузного и направленного потоков энергии, прошедших через среду, и выражается соответственно суммой диффузного и направленного коэффициентов пропускания:

$$\tau = \tau_r + \tau_d.$$

Под чистым пропусканием понимают отношение интенсивности потока излучения на поверхности среды, через которую он выходит, к интенсивности потока излучения на поверхности, через которую он попадает внутрь среды, иначе говоря, это – отношение величины энергии, прошедшей через слой или среду, к энергии падающего потока излучения. Таким образом, чистое пропускание (τ_n) обозначает величину проницаемости среды без потерь энергии волны на граничных плоскостях разных слоев среды [141]. Чистое пропускание, или проницаемость, рассчитывают для слоев определенной толщины (например, для слоя 1 см) и называют проницаемостью или прозрачностью среды.

Прохождение волны через две заданные граничные поверхности описывается так же, как отражение на двух плоскостях – граничных поверхностях раздела двух оптически разных сред. Количественная характеристика проницаемости важна, например, для точных наблюдений за прозрачностью моря или другой водной глади, например волнующегося моря, напротив, изменяют углы падения пучков волн в потоке излучения [141].

Эмиссия возникает вследствие поглощения веществом падающего потока энергии. Нагретое в результате этого тело излучает вторичное тепло, т.е. обладает тепловым излучением.

Черный излучатель, черное или абсолютно черное тело – это такой излучатель теплового потока энер-

гии, который поглощает все падающее на него излучение независимо от длины его волны, направления падения потока энергии и поляризации волн. Его специфическое спектральное излучение (в полупространстве) имеет для всех длин волн максимально возможное значение величины теплового излучения, которое описывается законом Планка [141]. Оно имеет собственное название: «равновесное тепловое излучение, не зависящее от природы вещества».

Закон Стефана – Больцмана выводится из обобщения закона Планка для всех длин волн. В нем излучение черного тела рассматривается как функция от температуры:

$$M(T) = \sigma T^4 \quad \text{при} \quad \sigma = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Как показано на рис. 3, максимум излучения смещается с повышением температуры в сторону коротковолнового излучения (закон смещения Вина).

Коэффициент эмиссии¹ в полупространстве ε теплового излучения любого тела определяется в соответствии с законом Кирхгофа по отношению энергетического спектра тела (M_ε) к излучению абсолютно черного тела ($M_{\varepsilon=1}$):

$$\varepsilon = \frac{M_\varepsilon}{M_{\varepsilon=1}}.$$

Абсолютно черное тело при сравнении со всеми другими источниками обладает максимумом энергии температурного излучения при той же температуре источника. Горные породы, почвы, растения, водоемы, искусственные и естественные предметы и материалы на поверхности Земли в первом приближении можно рассматривать как источники вторичного теплового излучения, соответствующие понятию «серое тело». Они поглощают только часть падающего на них потока энергии и соответственно отдают ее меньше, чем абсолютно черное тело при такой же температуре. Но на коэффициент эмиссии или радиационную (яркостную) температуру тела цвет объекта не влияет, если максимум его температурного излучения находится в инфракрасной области.

Для правильного использования возможностей выбранного диапазона электромагнитного излучения при дистанционном зондировании местности важно учитывать то, что вид и интенсивность взаимодействия между потоком солнечной радиации (или искусственного излучения) и средой, на которую он падает, зависят от длины волны излучения и вещества среды. Спектр излучения и атомный и молекулярный состав вещества на поверхности Земли определяют диапазоны, в которых электромагнитные волны будут отра-

жаться, рассеиваться или поглощаться веществом на поверхности Земли, а также способность тела излучать вторичное тепло.

Представляющие интерес для геологического дистанционного изучения материалы – горные породы, почвы, растительность, водные поверхности и т. д. – подчиняются ранее описанным закономерностям, и широта спектра их температурного излучения зависит от вещества. Большинство этих материалов имеет в области видимого, инфракрасного и микроволнового излучений свой особый, характеристический спектр отраженного, поглощенного и вторичного теплового излучения. Исходящий от них поток энергии регистрируется на борту носителя приемниками и может быть обработан в числовом или аналоговом виде, например в виде кодированного телевизионного или фотографического изображений, которые могут использоваться в геологии для изучения и картирования состояний поверхности Земли. Спектральные сигналы природных объектов различаются в зависимости от их класса по интенсивности и широте диапазона отраженного и температурного потоков излучения. Поэтому в качестве характеристики объекта принимают энергетическую величину идущего от него сигнала, т. е. плотность мощности энергетического потока. Она регистрируется специальными системами дистанционного зондирования, может быть измерена и систематизирована по классам природных объектов. Таким образом, спектральные характеристики объектов являются их опознавательным признаком при дистанционном зондировании. Особенно важное значение они имеют для числовой обработки данных дистанционного зондирования и автоматизации процесса дешифрирования материалов аэрокосмических съемок.

При тематических аэрокосмических съемках природных объектов следует исходить из того, что идущий поток энергии целесообразно регистрировать только в том диапазоне, который наиболее резко обособляет изучаемый объект. Условия съемки идеальны только в том случае, если спектральное, пространственное и радиометрическое (тепловое) разрешение приемника согласуются со спектральными характеристиками интересующих исследователя объектов. Например, при проведении аэрокосмического спектрометрирования учитывается то, что регистрируемое на борту носителя излучение наряду со спектральным сигналом или импульсом самого объекта, расположенного на поверхности Земли, включает также часть потока энергии, идущей от окружающих его объектов, и атмосферные помехи (см. выше), которые в основном снижают интенсивность сигнала, т. е. рассеивают его. Рассеянное излучение, которое проявляется прежде всего в коротковолновой части спектра, может существенно изменить и исказить величину спектрального импульса объекта на поверхности Земли. Но есть и другие, более неопределенные и изме-

няющиеся факторы, создающие помехи в приеме сигналов, например экспозиция объекта и его положение среди окружающих его объектов ландшафта на снимаемой местности. Степени антропогенного и природного изменений и т. п. рассмотрены ниже, но прежде вернемся еще раз к общим закономерностям взаимодействия падающего потока энергии с поверхностью Земли и их значению для дистанционного зондирования.

Все материалы или среды на поверхности Земли отражают поток прямой солнечной радиации, достигающей ее поверхности. Их отражательная способность определяется, как уже ранее упоминалось, молекулярным и атомным строением вещества, свойствами поверхности среды: ее выровненностью или шероховатостью, структурностью или скульптурностью и ориентировкой самой поверхности к направлению падения солнечных лучей, т. е. экспозицией. Если поток солнечного излучения падает на ровную поверхность, то отражение зеркально только тогда, когда неровности поверхности меньше длины волны пуга волн. Увеличение шероховатости вызывает диффузное отражение. В этом самом распространенном в природе случае поток электромагнитного излучения отражается во многих направлениях, которые не зависят от направления падения лучей потока. При переходе светового излучения из оптических чистых, прозрачных сред в оптически плотные среды, такие, как вода, горные породы, почвы, растительный покров, отражается только часть непрерывно падающего потока солнечной радиации. Материалы, которые в зависимости от длины волны поглощают или отражают остаток потока солнечной радиации, кажутся окрашенными. Для дистанционного зондирования важна ширина интервала длин волн видимого и ближнего ИК-диапазонов, в котором горные породы, почвы и т. д. наиболее интенсивно отражают или поглощают поток солнечной энергии. Для получения количественных характеристик спектральных яркостей природных объектов и выбора наиболее оптимальных для дистанционного зондирования спектральных диапазонов были проведены прежде всего более чем шестилетние обширные лабораторные и полевые измерения. Из данных лабораторных спектрометрических измерений были получены некоторые важнейшие константы, но перенесение этих результатов на условия натурных съемок оказалось достаточно проблематичным. Поэтому с помощью спектрометров были проведены измерения ряда спектральных яркостей естественных и искусственных поверхностей в видимом и ближнем ИК-диапазонах на тестовых участках в естественных природных условиях, где измерялось также температурное излучение. При этом выяснилось, какие параметры вторичного теплового излучения зависят, а какие не зависят от свойств природного или искусственного объекта. Одновременно проводились съемки с помощью мульти-

спектральных камер сначала с самолетов, а позднее и со спутников. Данные наземного и воздушного спектрометрирования коррелировались между собой. Были определены передаточная функция атмосферы и ее влияние на силу сигнала от объекта, а также установлены большие вариации в параметрах отражения и поглощения солнечной энергии природными и антропогенными объектами разных типов. Кроме того, был установлен ряд параметров, от которых зависит спектральная яркость объекта, связанная с его вещественным составом. Среди них для природных объектов, относимых к классу горных пород и почв, наиболее важными являются шероховатость поверхности объекта, его цвет, пористость, трещиноватость, степень цементации и степень выветрелости.

Наиболее важными свойствами поверхности горных пород и почв, определяющими их спектральные признаки, являются: вид неровностей поверхности, их размер и форма; скульптурность (текстура и структура горной породы или почвы); размер, степень связности и минеральный состав частиц, образующих массу горной породы. Эти свойства влияют на спектры отраженного и поглощенного потоков энергии, так как находятся в корреляционной зависимости с длиной волн в падающем потоке энергии. Но и из этих свойств наибольшее влияние на величину спектральной яркости объекта оказывают минеральный состав, степень цементации и величина кристаллов или зерен горной породы, ее пористость и микротрещиноватость. Так, невыветрелые, плотные и слабо трещиноватые породы имеют более высокий коэффициент спектральной яркости, чем трещиноватые или слабосцементированные породы того же состава, в которых большая часть падающего на них потока солнечной радиации, поглощаясь порами и трещинами, превращается в тепло и нагревает породу.

Цвет пород или почв, зависящий от их минерального состава, и соответственно цвет их поверхностей определяют энергетический спектр отраженного и поглощенного потоков энергии, ширину диапазона идущего от объекта сигнала и его интенсивность.

Светлые породы или почвы, например, отражают свет сильнее темных. Влажность изменяет их отражательную способность, вероятно повышая долю диффузного отражения волн видимого диапазона, вследствие чего приемниками улавливается только незначительная часть отраженного потока энергии. Поэтому, например, пески после дождя кажутся на панхроматических снимках более темными, чем до дождя. Практически все увлажненные породы и почвы темнее сухих, а излучение ближней ИК-области практически полностью поглощается влажными почвами и породами.

Особое значение среди всех параметров, влияющих на соотношение между отраженным и поглощенным потоками энергии и на величину сигнала-им-

¹ Коэффициент эмиссии иногда называют коэффициентом черноты. В советской литературе больше принято название «коэффициент излучения» – отношение энергетической яркости данного источника излучения (обычно света) к энергетической яркости абсолютно черного тела при одинаковой температуре. – *Прим. перев.*

пульса природного объекта, имеет ориентировка поверхности объекта по отношению к Солнцу и ее топографическое положение: она может оказаться в зоне прямой экспозиции или на затененном участке. При этом важнейшим оказывается время прямой солнечной экспозиции на ту площадку, для которой количественно установлены значение потока солнечной радиации и, следовательно, спектральный диапазон и интенсивность потока падающего излучения. Именно время экспозиции определяет в основном корреляционные связи между отражением и поглощением энергии.

Наконец, не менее важными оказываются внешние факторы влияния атмосферы на сигналы, идущие от расположенных на поверхности Земли объектов. Как уже упоминалось, освещенность местности зависит не только от прямой солнечной радиации, но и от рассеянного диффузного свечения неба. Полутеневые участки освещаются только рассеянным светом, поэтому однотипные объекты на освещенных и затененных участках имеют разные спектральные яркости. Это может привести к ложным определениям, особенно в тех случаях, когда волновые зависимости в спектральных характеристиках объектов выявлены недостаточно [31]. В первую очередь эта неоднозначность выявляется при классификации природных и естественных объектов по их спектральным характеристикам. Кроме всего прочего на интенсивность и широту диапазона регистрируемого сигнала влияют расстояние до поверхности объекта и ее наклон и ориентировка по отношению к направлению на приемник. Все тела с температурой выше абсолютного нуля излучают в пространство тепловую энергию. Мощность или интенсивность этого излучения зависит от температуры поверхности тела и излучательной способности его материала. На этом принципе основаны регистрация объектов при съемках в тепловом ИК-диапазоне (рис. 4) и их классификация. Разные объекты на поверхности Земли в течение дня по-разному нагреваются и по-разному отдают накопленное тепло в окружающее пространство. Это зависит от их вещественного состава, состояния поверхности и многих других свойств. В целом все же сильнее нагреваются те горные породы и прочие естественные среды и объекты, которые преимущественно поглощают солнечную энергию днем.

Какое количество энергии может аккумулировать та или иная среда на поверхности Земли и в течение дня и какое ее количество она сможет эмитировать (выделить в пространство), в значительной мере зависит от цвета, минерального состава, плотности, пористости, влажности горной породы или почвы, гладкости поверхности, степени вегетации растительного покрова на них и т. п. Для водоемов это определяется плотностью воды, ее соленостью, глубиной бассейна, наличием течений и растительностью, а также количеством биомассы на единицу объема воды. Из этих

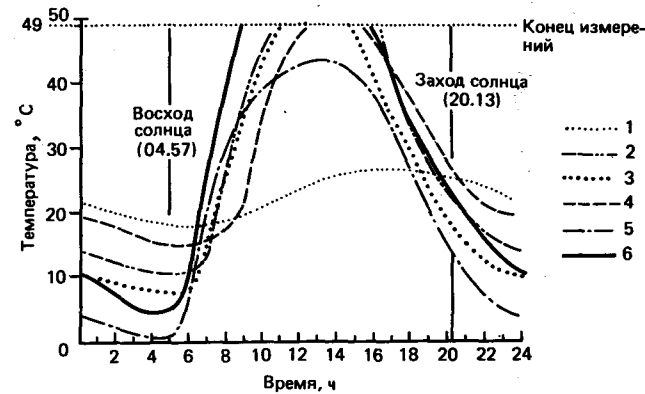


Рис. 4. Температуры поверхностей различных материалов в течение суток [186].

1 — вода в луже; 2 — гравий; 3 — скошенный газон; 4 — бетон; 5 — газон; 6 — крыша дома.

специфичных для каждого объекта свойств складывается ряд констант или признаков, характерных для того или иного типа объектов: альбедо как отношение интенсивности падающего потока электромагнитного излучения к отраженному; коэффициент теплопроводности как мера того количества тепла, которое тело может выделить в пространство за единицу времени при определенной температуре; теплоемкость как мера накопления этого тепла в определенном объеме; коэффициент теплопроводности и тепловая инерция как мера времени, за которое материал объекта реагирует на изменение температуры.

Как правило, все эти данные получают непосредственными измерениями на объектах и при необходимости интегрируются для корреляции с данными дистанционного зондирования. Некоторые из выше-названных параметров могут быть получены расчетным путем, но только для наиболее простых сред, например сезонного льда. Обобщение этих данных — важнейших для дистанционного зондирования — приведено ниже в табл. 1а и 1б (разд. 3.2.2).

К независимым параметрам дистанционных съемок относят топографию местности, ориентировку отражающей поверхности по отношению к прямому солнечному излучению, время съемок, сезон и соответственно наличие или отсутствие растительности, а также плотность, мощность и увлажненность почвенно-растительного покрова. К зависимым от среды параметрам для съемок в ИК-диапазоне относят обычно состояние ее поверхности. Так, для горных пород и почв наиболее важна шероховатость. Грубо-текстурные поверхности (неровные, изрезанные, трещиноватые или пористые) имеют большую площадь, чем сглаженные поверхности плотных микрозернистых почв и горных пород, к тому же пористость и проницаемость грунтов и горных пород увеличивают коэффициент поглощения. Большие поверхности быстрее нагреваются днем и быстрее остывают

ночью, поэтому на аэрокосмических изображениях песчаники, например, темнее, чем глины.

Цвет и спектральная яркость горных пород и почв определяются их минеральным составом. При этом светлые породы отражают, а темные поглощают большую часть попадающего на них потока солнечной энергии. Степень нагрева и быстрота остывания, кроме того, зависят от минерального состава и температурного коэффициента, а также от того, в какое время суток порода нагревалась солнечными лучами и на какую глубину успевала прогреться за день. Глубину прогрева определяет температурный коэф-

фициент горной породы или почвы, им же соответственно определяется температурное ослабление, или снижение температуры с глубиной.

Схематическое представление о важнейших для дистанционного зондирования процессах отражения и поглощения солнечной энергии на поверхности Земли, а также о прохождении потока солнечной энергии к Земле через атмосферу в дневное и ночное время суток дано на рис. 5а и 5б.

Величина температурного ослабления в большой мере зависит от температурной или тепловой инерции почвы или горных пород. При высоких темпера-

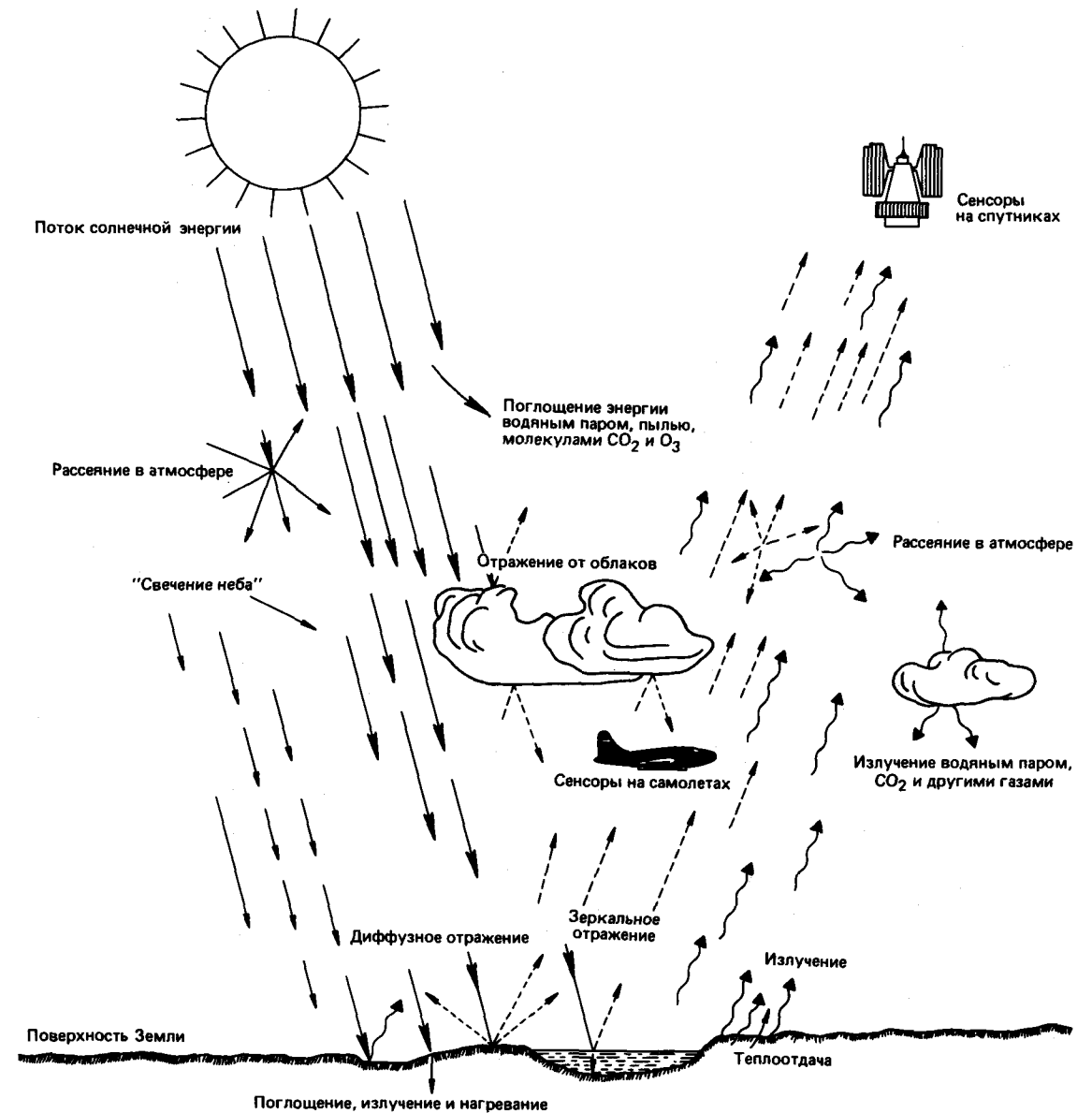


Рис. 5а. Схема процессов отражения, рассеяния и поглощения солнечной энергии в атмосфере и на поверхности Земли.

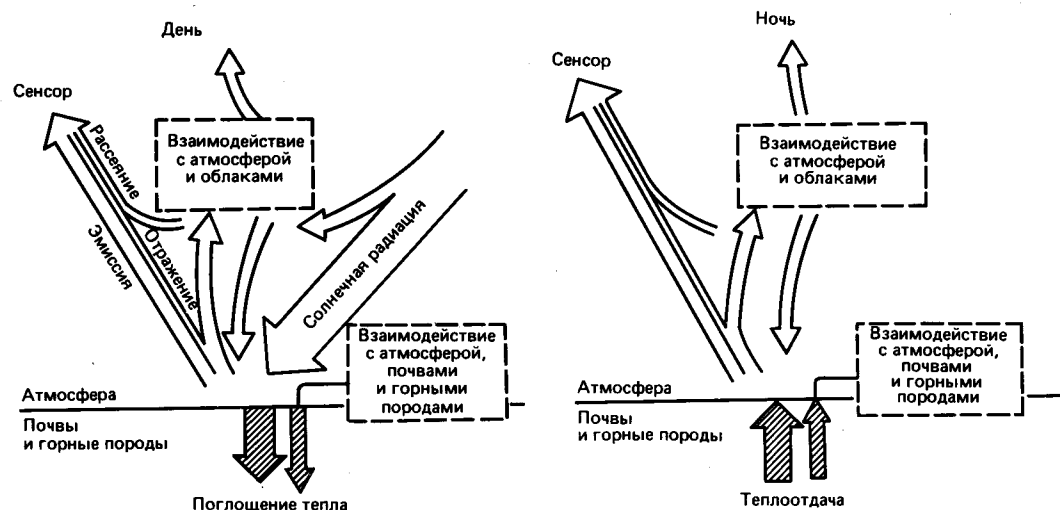


Рис. 56. Схема распределения потоков излученной Солнцем энергии днем и ночью на поверхности Земли и в атмосфере [13].

турных коэффициентах большая часть поглощенной солнечной энергии, т.е. соответственно тепла, относительно быстро пройдет на ту или иную глубину внутрь слоя почвенно-растительного покрова или горной породы. Там она будет накапливаться и затем медленно излучаться после захода солнца. При малых температурных коэффициентах поверхность породы или почвы нагреется быстрее, но за день тепло пройдет только на незначительную глубину от ее поверхности, и поэтому они быстрее будут остывать ночью. Гюнтер [95] на примере показал разницу между гранитами и базальтами. Базальты поглощают большую часть попавшей на них солнечной энергии, и только малая доля ее проходит внутрь породы. Более светлые граниты днем отражают свет сильнее, чем базальты, но и прогреваются за день больше, обладая более высоким коэффициентом теплопроводности. Из этого следует, что ночью базальты остынут быстрее гранитов и будут иметь меньшую яркостную температуру, чем граниты, которые на тепловых изображениях будут выглядеть светлее.

Пористость, т.е. общий объем пор горной породы, оказывает влияние на ее температурные характеристики по многим причинам. Пористость увеличивает реакционную способность поверхности породы и, следовательно, способность породы к поглощению энергии электромагнитных волн и соответственно к отдаче ее после захода солнца. Заполненные воздухом поры действуют как теплоизоляция. Они понижают коэффициент теплопроводности породы. Поры же, заполненные водой, повышают температурную инерцию, что снижает коэффициент теплопроводности. Это объясняется тем, что вода сама по себе имеет коэффициент излучения, близкий к единице, и высокую теплоемкость. Поэтому температурные контра-

сты для переувлажненных горных пород и почв в течение дня более выровнены, чем у однотипных с ними сухих грунтов. Из этого следует, что большая влагонасыщенность грунтов способствует сильному поглощению ими солнечной энергии днем и сильному вторичному тепловому излучению ночью.

Из не связанных со свойствами объекта параметров выделим по значимости положение на местности отражающей поверхности объекта (горной породы, почвы, растительности покрова или зеркала водоема). Окружающий ландшафт и позиция в нем исследуемого объекта оказывают решающее влияние: на дневное изменение температуры поверхности объекта, называемое ходом температур, или температурным профилем; на соотношение между процессами отражения и поглощения солнечной энергии поверхностью и, следовательно, на выделение вторичного тепла в ночное время.

Количество аккумулируемой солнечной энергии зависит от времени суток и продолжительности прямой освещенности солнечными лучами поверхности объекта, т.е. суммарной величины прямого и диффузного на затененных участках освещения. Величина падающего (нисходящего) потока определяет соотношение процессов отражения и поглощения энергии на поверхности среды и, следовательно, количество аккумулированной и выделяемой в пространство энергии. Это обуславливает резкое различие температурного профиля—соотношения вторичного излучения однотипных объектов на освещенных и затененных участках местности. Таким образом, контрастность рельефа местности и положение в ландшафте определяют радиационную температуру объекта. Например, если снимать однотипные объекты в разных широтах на склонах северной и южной экспозиции, то

их яркостные характеристики будут различаться очень существенно, что заставляет привлекать для их идентификации (на снимках тепловых съемок) материалы других видов дистанционного зондирования, как правило, визуализированные данные сканерных или мультиспектральных съемок.

К внешним факторам, влияющим на суточный ход температур, или температурный профиль объектов, относится растительный покров. Вид растительности, высота, мощность крон и густота растительного покрова определяют то количество солнечной радиации, которое достигает поверхности почвы или горной породы днем, и какое количество коротковолновой энергии может быть выделено ею ночью. Только на лишенных растительного покрова поверхностях горных пород и почв радиационная температура определяется их вещественным составом. Спектральные яркости и радиационные температуры на участках со скудной растительностью или же на участках, где покров растительности пятнистый, зависят как от отражения и поглощения растительным покровом, так и от этих же свойств субстрата. С увеличением мощности и плотности растительного покрова возрастает его влияние на спектральные характеристики геологических объектов. В большинстве случаев группы или сообщества растений на покрытых ими площадях образуют свой микроклимат, который искажает или даже полностью глушит сигнал субстрата. В любом случае растительность вносит искажения в частоту и силу сигнала.

Наконец, весьма сильное влияние на спектральные характеристики объектов в температурном ИК-диапазоне оказывают метеоусловия. Здесь существенны не только метеоусловия во время непосредственного проведения съемки, но и погода в течение предыдущих суток.

Рассмотрим сначала искажающее влияние погоды. Например, сильный ветер над районом проведения съемок или дождь в течение предыдущего дня могут выровнять и без того небольшие температурные контрасты горных пород, так как нормальное тепловое излучение от них нарушается конвекцией воздуха над поверхностью Земли и испарением влаги. Кроме того, существуют температурные различия в величине спектральных сигналов однотипных горных пород и почвенно-растительного покрова, находящихся на разных участках местности—открытых равнинных или сильно пересеченных, где возникает ветровая тень. Ветровую тень могут создавать и группы растительности, например отдельные роши деревьев. Таким образом, разница в положении объекта на местности, открытой ветру, или на участке, защищенном от ветра рельефом или группой растительности, обуславливает различия в его температурном изображении и его спектральной характеристике. Но эти трудности, возникающие при интерпретации теп-

ловых изображений (материалов тепловых съемок), могут быть разрешены в конечном итоге при учете метеоусловий ближайших суток, расчлененности и контрастности рельефа. Необходимо, кроме того, принимать во внимание и то, что скопление холодных масс воздуха в долинах может снижать интенсивность сигналов от горных пород и почв, а возникающие при этом движения холодных масс воздуха могут смазывать реальные границы объекта. Испарения почвенной влаги (роса) также сглаживают различия между объектами, близкими по спектральным характеристикам, и также искажают собственную величину их сигналов. Следовательно, при проведении тепловых съемок необходимо выбирать наиболее оптимальное для них время, чтобы свести к минимуму искажающие влияния контрастов местности, растительности, рельефа и почвенных испарений. Климатические данные—синоптические условия съемок—при планировании исследований можно не учитывать, так как они вводятся в ЭВМ непосредственно при обработке результатов тепловых ИК-съемок.

Процессы и их параметры, существующие на поверхности Земли, можно выразить уравнением теплового баланса—уравнением энтропии

$$R_n + LE + H + G = 0,$$

где R_n характеризует баланс излучения, т.е. излучение, идущее от Солнца и атмосферы к поверхности Земли, без отраженного и эмиттерного (вторичного теплового) потоков от нее; LE —скрытый, латентный, поток тепла, который расходуется на испарение растений и их дыхание, а также на образование росы; H —теплообмен между поверхностью Земли и пограничным с ней слоем воздуха; G —тепловой поток, идущий с глубины через почву к ее поверхности. Днем тепловой баланс R_n содержит значительную выравнивающую контрасты компоненту и энергетические источники других процессов. Большая часть тепла днем расходуется на эвапотранспирацию (транспирация растений и испарение с поверхности почвы) и на разогрев воздуха. Только незначительная часть его (около 10–30%) идет на разогрев почв. Ночью энергетическое влияние растений и атмосферы существенно уменьшается. В это время направленный вверх тепловой поток можно рассматривать как тепловое излучение природных объектов на поверхности Земли и использовать его для дистанционного зондирования [245].

Эти важные для дистанционного изучения поверхности Земли процессы, соотношения между процессами отражения и поглощения на ее поверхности, а также процессы прохождения электромагнитных волн через атмосферу схематически показаны на рис. 5а. На рис. 5б схематически изображено течение потока солнечной радиации днем и ночью.

3. О СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПРИРОДНЫХ СРЕД И МАТЕРИАЛОВ

3.1. Введение

Отражательная, поглощательная и эмиссионная способности естественных природных поверхностей зависят от материала и длины волны. Поэтому следует ожидать, что поверхности горных пород, почв или растительного покрова имеют свою вещественно обусловленную специфику исходящего от них спектрального сигнала или импульса. Как было показано в предыдущем разделе, на спектральные характеристики горных пород, почв и растительных сообществ или растительного покрова влияют внешние факторы с переменными параметрами. Если выражение и комбинация внешних факторов в регионе изменяются, то возможны изменения данных съемки, а также спектральных характеристик определенных типов горных пород или почв (в известных пределах, связанных с этим сочетанием внешних факторов). Поэтому спектральный сигнал, идущий от поверхности горной породы, почвы или растительности, прежде всего несет информацию о связи между веществом и условиями съемки и только потом о специфике самого материала. Кроме того, спектральный сигнал на своем пути к приемнику, установленному на борту самолета или спутника, может исказиться или полностью измениться рассеянным излучением окружения объекта или взаимодействием с атмосферой. Спектральный импульс горной породы, почвы или растительного покрова, а также водной поверхности, принятый сенсором, поэтому всегда коррелируется с состоянием местности и условиями съемки во время полета. Кроме того, спектральная характеристика объекта, отражающая ландшафтную единицу определенного типа, изменяется в соответствии с техническими параметрами установленного датчика, от которого зависит величина разрешения по спектру, радиометрического и пространственного разрешения. Поэтому едва ли возможно получить единые для любых условий съемки данные о специфическом характерном сигнале-индикаторе, определенном для отдельных разновидностей или типов горных пород, почв и растительных сообществ. Но из данных и результатов исследовательских и практических работ можно по-

лучить основные величины спектральных яркостей горных пород, почв и растительности и вывести некоторые принципы их интерпретации. Вышеизложенные соображения раскрываются в последующих разделах, где также обсуждается их значение для дистанционного зондирования.

3.2. Горные породы

3.2.1. Отражательная и поглощательная способности горных пород. К числу первых работ, в которых приведены спектральные яркости поверхностей горных пород и доказано значение их выборочных измерений для интерпретации аэрофотоснимков, относится публикация Рея и Фишера [308]. На основании экспериментов ими было установлено, что литофа-циальные различия между горными породами некоего ландшафтного района не всегда контрастны и поэтому они не всегда уверенно могут быть выделены повторно на аэрофотоснимке, сделанном на нормальной черно-белой панхроматической пленке. Эти исследователи искали технику съемки и обработки, которая позволила бы лучше использовать отражательную и поглощательную способность различных типов горных пород и тем самым получить улучшенные по контрастности вторичные данные для определенных разновидностей горных пород на черно-белых аэрофотоснимках. Рей и Фишер искали спектральный канал, соответственно диапазон длин волн, в котором отражательные способности определенных разновидностей пород были бы наиболее различны. С помощью колориметра они исследовали отражательные способности выветрелых и свежих проб глинистых сланцев, известняков и песчаников из Нью-Мексико. Они установили, как изменяется отражательная способность отдельной поверхности горной породы, и построили по этим данным графики отражения по спектру. Форма и положение кривой на нем показывают, сколько процентов энергии светового потока отразилось от поверхности горной породы в определенном интервале длин волн (рис. 6 и 7).

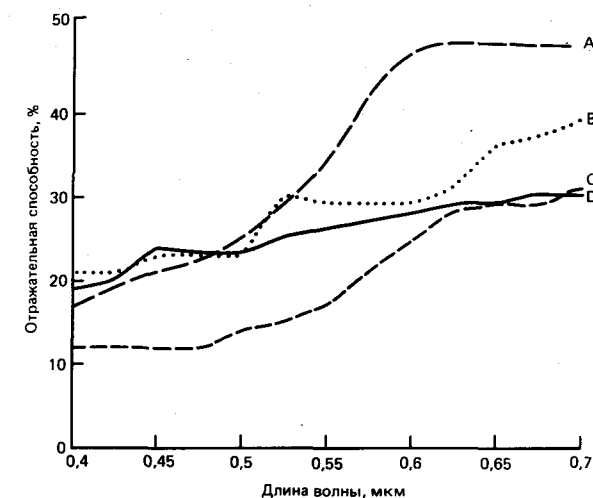


Рис. 6. Спектральные отражательные способности четырех типов горных пород: светло-коричневого песчаника (A), серого известняка (B), красного алевролита (C) и серого песчаника (D) [249].

В общем отражательная способность изученных горных пород уменьшается с уменьшением длины волны (рис. 6). Каждый раз спектральная составляющая интенсивности отражения определяется уровнем и формой отдельной спектральной кривой. Различное положение этих кривых на графике для четырех типов горных пород показывает, что отражательная и поглощательная способности горных пород зависят от вещества. Если сравнивать положение отдельных спектральных кривых этого графика, то можно определить, с одной стороны, области спектра, в которых кривые подходят близко друг к другу или пересекаются, и области спектра или, вернее, зоны спектра, в которых отражательные способности изученных горных пород явно сходны, и, с другой стороны, зоны спектра, в которых кривые отражения разных пород со всей очевидностью расходятся между собой. В этой спектральной зоне изученные типы пород отражают падающий световой поток с наибольшим различием. Эта ситуация поясняется графиком рис. 7, на котором представлены кривые отражения красного алевролита (A) и выветрелого серого известняка (B). В зоне спектра 0,45–0,5 мкм, так же как в зоне 0,65–0,7 мкм, различие в отражательной способности обоих типов горных пород особенно четко выражено. В зоне 0,45–0,5 мкм (голубой) известняк (B) отражает падающий на него световой поток намного сильнее, чем красный алевролит (A). Напротив, в зоне 0,65–0,7 мкм (красной) отражение красного алевролита (A) намного больше, чем известняка (B). В зоне 0,575 мкм отражательная способность обеих пород одинакова, здесь пересекаются их спектральные кривые. На этом примере выясняется, что: а) различие в отражательной способ-

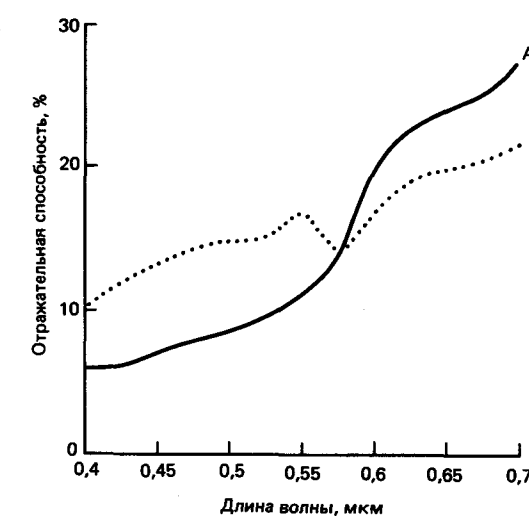


Рис. 7. Спектральные отражательные способности двух типов пород: красного алевролита (A) и выветрелого серого известняка (B) [249].

ности двух типов горных пород в определенном интервале длин волн или части спектре выражено сильнее, чем в других; б) отношение отражательных способностей двух типов горных пород в диапазоне видимого излучения может обращаться; в) спектральные характеристики различных горных пород в определенном интервале длин волн могут быть похожи или одинаковы. Из анализа графиков (рис. 6) следует, что различия отражательных способностей двух или более типов горных пород в видимом диапазоне электромагнитного излучения могут быть более или менее меняться. Так, в коротковолновой части спектра кривые спектральной яркости светло-коричневого песчаника (A), серого известняка (B) и серого песчаника (D) находятся близко друг к другу. Породы, имеющие разные цвет, минеральный состав и величину зерен, имеют похожие формы кривых спектральной яркости. С другой стороны, эти три разновидности пород отражают падающий на них световой поток в голубой части спектра сильнее, чем красный алевролит (C). В красной части спектра (около 0,65–0,7 мкм) светло-коричневый песчаник (A) отражает падающий на него световой поток сильнее, чем серый известняк (B), красный алевролит (C) и серый песчаник (D), которые в этой части спектра обнаруживают близкие спектральные характеристики.

Рей и Фишер [308] по данным анализа полученных ими отражательных способностей горных пород установили, что выделение различных типов пород на выбранном тестовом участке по черно-белому аэрофотоснимку, снятому на панхроматическую пленку с желтым фильтром, возможно только по очень небольшой разнице серых тонов. Это обусловлено тем, что черно-белая пленка с установленным перед ней

желтым фильтром воспринимает отраженный от ландшафта поток света в относительно широком диапазоне спектра, в интервале длин волн 0,5–0,7 мкм, т.е. в таком спектральном диапазоне, в котором спектральные яркости горных пород типа *A* и *B* (рис. 7) примерно одинаковы. Таким же образом (незначительными контрастами оттенков серого тона) на аэрофотоснимках выделялись четыре типа горных пород с другой отражательной способностью (рис. 6). Но если бы для съемки местности с обнажениями пород типа *A* и *B* была применена комбинация фильтр–пленка, при которой через светофильтр на пленку попадали бы лучи определенного цвета, т.е. длины волны, например, голубые (0,4–0,5 мкм) или красные (0,6–0,7 мкм), то можно было бы ожидать, что на такой спектрально-зональной фотографии резкими контрастами оттенков серого тона выделятся красные аргиллиты (*A*) и серые известняки (*B*). На таком снимке, сделанном в голубой зоне спектра, темно-серые известняки выделились бы более светлыми, а красные аргиллиты – более темными оттенками. На аэрофотоснимке, сделанном в красной зоне спектра, фототона изменились бы на противоположные, но сохранилась бы величина контрастности между ними.

Если местность с четырьмя выделенными типами пород (рис. 6) сфотографировать в лучах голубой зоны спектра, то на аэрофотоснимке обнажения пород типа *C* выделятся самым темным оттенком серого тона среди более светлых оттенков, соответствующих более сильно отражающим выходам пород других типов (*A*, *B* и *D*). При соответствующей пропусканию красных лучей комбинации фильтр–пленка на узкозональном снимке обнажения пород типа *A* выделятся самыми светлыми тонами среди более темных в этот раз выходов пород типа *B* или *C/D*. Основываясь на этих сведениях и используя подходящие комбинации фильтр–пленка, Рей и Фишер добивались наиболее контрастных изображений различных типов горных пород на аэрофотоснимках. Их исследования показали прежде всего, как важна технология съемки, тот спектральный диапазон, в котором производится съемка местности и который определяется спектральными характеристиками (каждый раз своими) материалов или сред–поверхностей природных и антропогенных объектов съемки. В методике исследований и использовании экспериментальных данных, примененных Рейем и Фишером, были заложены важнейшие начала для развития, начавшегося несколькими годами позднее развития многозональных съемок и способов обработки и данных при дистанционном зондировании.

Для контрастного изображения оттенками серого тона соседних поверхностей разных литофациальных единиц на аэрофотоснимках (соответственно на узкозональных спектральных снимках) имеет значение величина различия в отражении поверхностями этих

горных пород выбранного для съемки диапазона электромагнитных волн (см. разд. 4.1 и рис. 53). Улучшенное по контрастности изображение интересующих исследователя поверхностей горных пород на узкозональном аэрофотоснимке следует ожидать прежде всего в таком диапазоне длин волн, в котором эти типы горных пород наиболее сильно отражают или поглощают (по сравнению с соседними обнаженными разностями) падающий на них поток электромагнитного излучения.

Для выбора оптимального спектрального канала или диапазона съемки и получения оптимального изображения при обработке данных дистанционного зондирования прежде всего необходимо знать отражательные и поглотительные способности интересующих материалов (объектов съемки) в предполагаемом диапазоне длин волн. В 1960–1970 гг. изучению этих закономерностей были посвящены измерения отражательных способностей (альбедо) важнейших минералов и горных пород в лабораториях, на местности, а также с самолетов и спутников. Исследования ограничивались сначала измерениями в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения. Позднее стали изучать спектральные яркости минералов и пород в среднем ИК-диапазоне, а также их эмиссионную способность (или коэффициенты теплового излучения) их в температурном, или тепловом, диапазоне инфракрасного излучения.

Отражательные способности важнейших минералов и горных пород в видимом и ближнем ИК-диапазонах в лабораторных условиях всесторонне исследовали Хант и его коллеги [119–128]. Результаты их исследований послужили важнейшим началом для всех последующих измерений спектральных характеристик горных пород. Сравнительно скоро стало известно, что ни в измельченных, гомогенных, пробах, ни на пришлифованных поверхностях штучных отражательная способность горных пород (их коэффициент спектральной яркости) не увеличивается. Эти данные не могут быть прямо использованы при измерениях на местности. В природных условиях отражательная способность, или альбедо, естественных поверхностей определяется влиянием ряда переменных параметров, которые лишь частично зависят от материала поверхности, а частично связаны с влиянием окружающей среды (см. разд. 2.3). Точнее, сравнение данных лабораторных и полевых измерений показало, что спектральная яркость одинаковых типов горных пород изменяется в зависимости от величины окна или щели спектрометра или радиометра, т.е. поля измерений, в котором проводится определение коэффициента спектральной яркости объекта. Если при лабораторных измерениях охватывается площадь в несколько квадратных миллиметров, то для полевого спектрометра или радиометра поле измерений может меняться от квадрат-

ных дециметров до квадратных метров, что зависит от технических данных прибора и методики измерений. Мультиспектральный сканер, установленный на борту спутника «Лэндсат», охватывает минимальную площадь около 6000 м². Кроме того, поверхности проб, измеряемых в лаборатории, гомогенны. Естественные природные поверхности, которые попадают в поле измерений спектрометра, радиометра или сканера, установленного на борту самолета или спутника, почти всегда гетерогенны, неоднородны, из-за возможных различий в структуре поверхности, вариаций минерального состава и т.п. Доказано, что с изменением содержания железистых минералов может меняться спектральная яркость поверхности горной породы, так как изменяется почвообразование, вид и состав растительности на ней. Спектральные яркости поверхностей горных пород, которые были получены в разное время, в разных районах и с помощью разных измерительных и съемочных систем, зависящих от назначения съемки, едва ли следует прямо сравнивать и сопоставлять друг с другом. Несмотря на это, имеющиеся данные прежних спектральных измерений показывают, что относительные различия в отражательной, поглотительной и эмиссионной способностях важнейших типов горных пород могут быть использованы при ландшафтных исследованиях и составлении тематических карт. В отдельных случаях даже возможно отыскать некоторые специфические признаки для выделения каких-то определенных типов горных пород или изменений их минерального состава на аэрокосмических изображениях. Различия спектральных яркостей материалов или сред в отдельных диапазонах видимого и ближнего инфракрасного излучения можно использовать и при числовой обработке данных съемки, и при синтезировании улучшенных изображений, для того чтобы еще раз их обработать, повышая контрастность выделяемых объектов. Но прежде необходимо рассмотреть результаты некоторых основополагающих исследований спектральных характеристик минералов и горных пород.

Уотсон [315] провел исследование четырех типов горных пород одной из долин шт. Оклахома в лабораторных и полевых условиях. Им были выбраны свежие размельченные пробы кварцевого песчаника и гранита, штучные выветрелого известняка, гранита и доломита, а также покрытые коркой лишайников граниты. Каждый раз измерялись спектральные яркости нескольких проб разных типов пород. По данным проведенных измерений были построены графики (рис. 8а), на которых показана отражательная способность пород (в процентах по отношению к референц-поверхности, т.е. эталонной белой матовой поверхности).

Отражательная способность повышается во всех пробах с возрастанием длины волны. Но графики не отражают особенностей, связанных с длиной волны

излучения. Только кривые, соответствующие свежим и выветрелым гранитам, показывают четкое возрастание отражательной способности в интервале 0,525–0,65 мкм. Уотсон связывает это повышение с изменением окраски полевых шпатов в гранитах благодаря окислению в них гематита. Кривые, характеризующие граниты, поверхность которых покрыта зеленым лишайником, не имеют такого возрастания, так как лишайник маскирует породу. В большинстве случаев в видимой части спектра свежие, невыветрелые поверхности гранитов отражают излучение сильнее, чем поверхности тех же пород, но выветрелые или покрытые лишайниками. Выветрелые шероховатые поверхности хуже отражают во всех интервалах длин волн. Корка зеленых лишайников усиливает отражение в видимой части спектра, несмотря на рассеивающее воздействие лишайника [102]. В сравнительно длинноволновой красной части спектра отражение поверхностями, покрытыми лишайниками, еще более возрастает по сравнению с выветрелыми, но лишенными корки лишайников поверхностями.

В видимом диапазоне электромагнитных волн поверхности выветрелых известняков отражают большую часть падающего излучения всегда сильнее, чем поверхности выветрелых доломитов (рис. 8а). Кварцевый песчаник на свежем изломе благодаря своей чистой и однородной поверхности отражает падающий поток значительно сильнее, чем другие типы пород (рис. 8а).

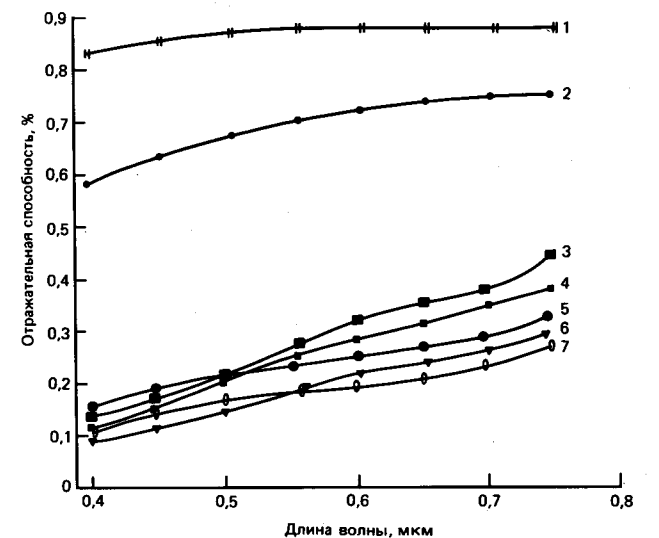


Рис. 8а. Спектральная отражательная способность свежей и выветрелой поверхности различных горных пород. (Spectral reflectance and photometric properties of selected rocks, by R. Watson, Remote Sensing of Environment, Vol. 2, 1972, pp. 95–100.)

1 – стандартная поверхность; 2 – кварцевый песчаник (свежий скел); 3 – гранит (свежий скел); 4 – гранит, покрытый зеленым лишайником; 5 – известняк выветрелый; 6 – гранит выветрелый; 7 – доломит выветрелый.

Полевые измерения отражательной способности тех же типов пород показали увеличение отражения с возрастанием длины волны для всех разностей. Однако величина отражения (яркость) всех измеренных поверхностей существенно меньше, чем измеренная в лаборатории. В зоне около 0,6 мкм отражательная способность выветрелых и покрытых лишайниками гранитов инверсивно изменяется. Выветрелые граниты увеличивают отражение с возрастанием длины волны при натурных измерениях. Усиление отражения в диапазоне 0,52–0,65 мкм, установленное при лабораторных измерениях, подтвердилось и в поле. Кроме того, натурные измерения подтвердили, что выветрелый известняк имеет большую яркость, чем выветрелый доломит во всем видимом диапазоне электромагнитных волн. После полевых измерений было обнаружено, что в самой коротковолновой части спектра отражательные способности известняка и доломита сильно различаются. Но в интервале длин волн более 0,75 мкм отражательная способность обоих типов пород резко возрастает, и увеличение ее для известняка наблюдается в интервале длин волн до 1,55 мкм.

Уотсон [315] подчеркивает, что сравнение значений отражения, измеренных в лаборатории и на местности, может быть только приближенным. Прежде всего напомним, что спектрометром в лаборатории и на местности измеряются разные по величине площади. Уже поэтому возможны сильные различия в измеренных величинах отражения. К тому же угол освещения в лаборатории постоянный или регулируемый, а в естественных условиях, на природе, угол падения солнечных лучей меняется в зависимости от времени дня и года, что приводит к переменному освещению объекта. Различные значения естественной освещенности изменяют интенсивность спектрального отражения одних и тех же поверхностей в течение дня и в разное время года. Поэтому значения спектральных яркостей, полученные в разное время наземными измерениями или в результате облетов тестовых участков, не сопоставимы или сопоставимы условно друг с другом. Сравнение, конечно, возможно, если данные измерений приведены к стандартному спектру и проведена радиометрическая коррекция освещенности по высоте и азимуту на солнце и прозрачности атмосферы, т.е. при прецизионных измерениях. Такие прецизионные измерения естественных поверхностей горных пород были проведены в 1982 г. [144]. Особое внимание при этом обращалось на направленность (геометрию) отраженного потока излучения и геометрические параметры обстановки эксперимента. Большинство измерений было сделано в лаборатории, где имитировались природные условия. Этот эксперимент показал, что величина отражения энергии зависит от геометрии той обстановки, в которой проводились измерения. Высота солнца, угол восхождения и по-

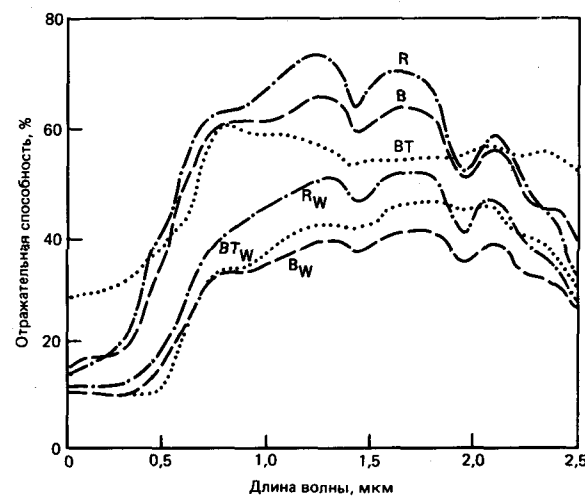


Рис. 86. Спектральная отражательная способность свежей и выветрелой поверхности горных пород на примере риолита (R), базальта и туфа. (The multiband approach to geological mapping from orbiting satellites: is it redundant or vital? by R.J. Lyon, Remote Sensing of Environment, Vol. 1, 1970, pp. 237–244.

R—риолит; B—гидротермально измененный базальт; BT—туф с аметистом; индекс W—выветрелые пробы.

ложение приемника излучения учитывались в качестве дополнительных параметров. При классификации и идентификации горных пород по их спектральным признакам, полученным при дистанционном зондировании, как показал эксперимент, необходимо учитывать геометрию рельефа снимаемой местности, иначе говоря, геометрию окружения снимаемого объекта, условия его освещенности и расположение его по отношению к приемнику излучения.

Еще одно сравнение отражательной способности выветрелых и свежих поверхностей горных пород: риолита, базальта и туфа (рис. 86)—свидетельствует об уменьшении величины коэффициента отражения на выветрелых поверхностях. Как видно из графика, форма характеристических кривых почти не меняется, что можно объяснить устойчивостью спектральных признаков определенных типов пород [189].

Рассмотрим теперь количественную зависимость спектральной яркости поверхностей разных типов горных пород от густоты покрывающей их растительности [279]. Эти измерения проводились в поле спектрометром с шириной диапазона измерений от 0,45 до 2,4 мкм, т.е. от видимого до среднего (отраженного) инфракрасного излучения, с высоты около 1,3 м при площади измерений около 200 см². В качестве объектов были выбраны поверхности андезита, базальта, риолита, лавы (красно-оранжевой), кварца, трахиандезита (латита), известняка, красного глинистого сланца, лимонитизированных и аргилитизированных щебня и почвы, окварцованного известняка и мраморизованного доломита с лимони-

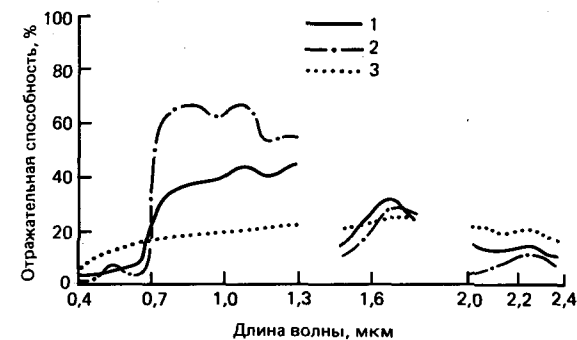


Рис. 9. Спектральная отражательная способность живой и засохшей растительности на примере зарослей толокнянки, зеленой луговой травы и засохшего шалфея [279]. 1—заросли толокнянки; 2—зеленое луговое разнотравье; 3—заросли засохшего шалфея.

том. Поверхности каждого типа пород были покрыты неоднородным по густоте покровом зеленых луговых трав, и семени сосны, а также кустиками толокнянки и увядшего шалфея. Чтобы можно было сопоставлять данные, полученные при разных условиях съемки (в разное время, при разных погодных условиях и разной освещенности объекта), измерения велись прецизионно, т.е. замеренная величина яркости объекта каждый раз сравнивалась с яркостью эталона.

Сначала были измерены коэффициенты спектрального отражения покрытых растительностью поверхностей, для того чтобы получить представление о доле отраженной растительностью энергии в общем потоке отраженной от поверхности объекта энергии (рис. 9). Было установлено, что для живой растительности типично резкое возрастание спектральной яркости в полосе около 0,7 мкм, тогда как засохшая или увядшая растительность не дает такого скачка яркости и имеет малую долю в общем спектре отраженного потока энергии. Разрывы всех графиков яркости соответствуют полосам поглощения водяного пара 1,45 и 1,9 мкм.

Влияние плотности растительного покрова на величину спектрального отражения андезита, известняка и глиноземистых лимонитизированных выветрелых почв показано на рис. 10. На этих графиках сопоставляется яркость не покрытых растениями и заросших поверхностей горных пород (густота растительности в поле измерения спектрометра выражена в процентах). Как и ожидалось, эффект растительности в спектре отраженного потока энергии четко выражен только для горных пород с незначительным альбедо. Уже при 10% луговых злаков спектральные характеристики андезита и известняка маскируются спектральным сигналом луговой растительности (рис. 10, а). Даже при незначительном растительном покрове была затруднена идентификация спектральных сигналов пород этих двух типов. При плотности растений 30% спектральные импульсы из-

вестняка и андезита полностью определялись как спектральный сигнал растительности на измеряемой площадке. Обратим внимание, что для известняка характерен четкий спад кривой отражательной способности около 2,3 мкм (рис. 10, а). Характерный спектр отражения выветрелой, содержащей глинистые минералы и лимонит почвы маскируется растительностью. Так, при плотности покрова луговых трав, равной 30%, выделяется широкая и резкая полоса поглощения электромагнитных волн длиной 0,85 мкм катионом трехвалентного железа; на графике она выделяется местным минимумом (рис. 10, а) [123]. Вторая полоса поглощения—около 2,2 мкм на этом графике—соответствует гидроксильной группе глинистых минералов и распознается не менее отчетливо. При плотности луговых трав около 60% в спектре отражения покрытых ими почв преобладает сигнал растительности. Только около 2,2 мкм слабо выделяется полоса поглощения гидроксильной группой OH⁻. Во всех рассмотренных трех примерах график спектральной яркости сильно меняется в коротковолновой зоне спектра, так как до 0,68 мкм отражательная способность живой растительности сильно возрастает.

В опубликованных результатах исследований [279] отмечено влияние растительности на форму кривой графика спектральной яркости гидротермально измененных пород. Глинистые минералы различных типов, имеющие в своем составе гидроксильную группу, дают в спектре отражения гидротермально измененных вторичных пород характерный минимум поглощения энергии около 2,2 мкм. Если положение полосы поглощения изменяется в зависимости от типа глинистого минерала в пределах от 2,15 до 2,25 мкм, то можно использовать точную позицию минимума для распознавания вида содержащегося глинистого минерала [123]. Если же встречаются площадки с густой растительностью, то доля отраженного потока от растений преобладает в спектральном сигнале. Происходит смещение минимума к 2,1 мкм, и спектральный сигнал-импульс глинистого минерала искажается и маскируется.

Эффект проявления толокнянки, растущей на андезитах, известняках и почвах, содержащих лимонит и глинозем, показан на другой группе графиков (рис. 10, б). В целом кривые этой группы похожи на кривые, представленные на рассмотренной выше группе графиков (рис. 10, а). Спектральная интенсивность отражения толокнянки меньше, чем луговых трав, и при плотности ее покрова от 30 до 50% собственные спектры отражения андезита, известняка и лимонитизированных глиноземистых почв преобладают над спектром растительности (рис. 10, б).

Увядшая или увядшая растительность почти не дает маскирующего эффекта для спектральных сигналов подстилающего основания. Это очевидно из сравнения двух рассмотренных групп графиков (ср.

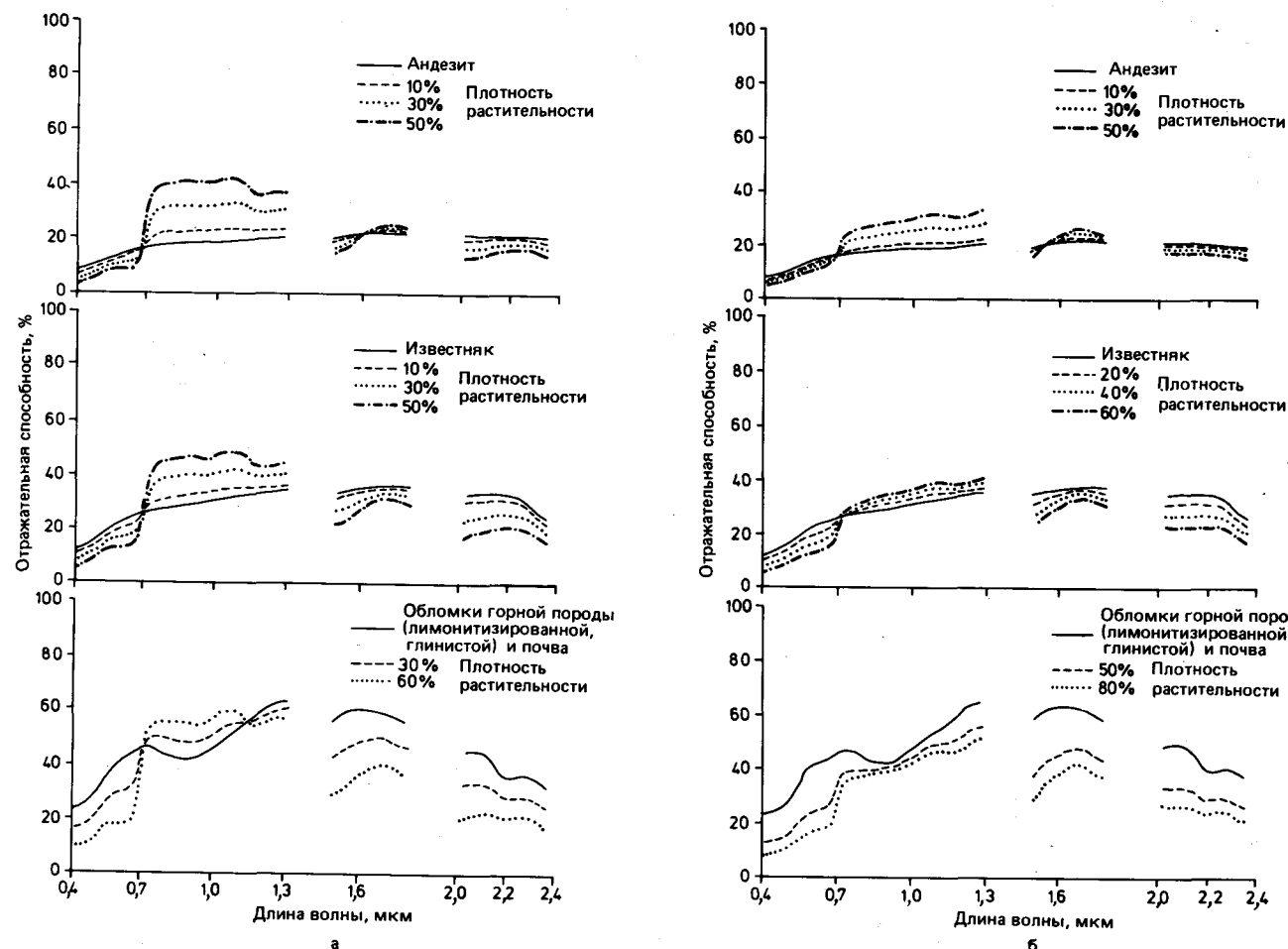


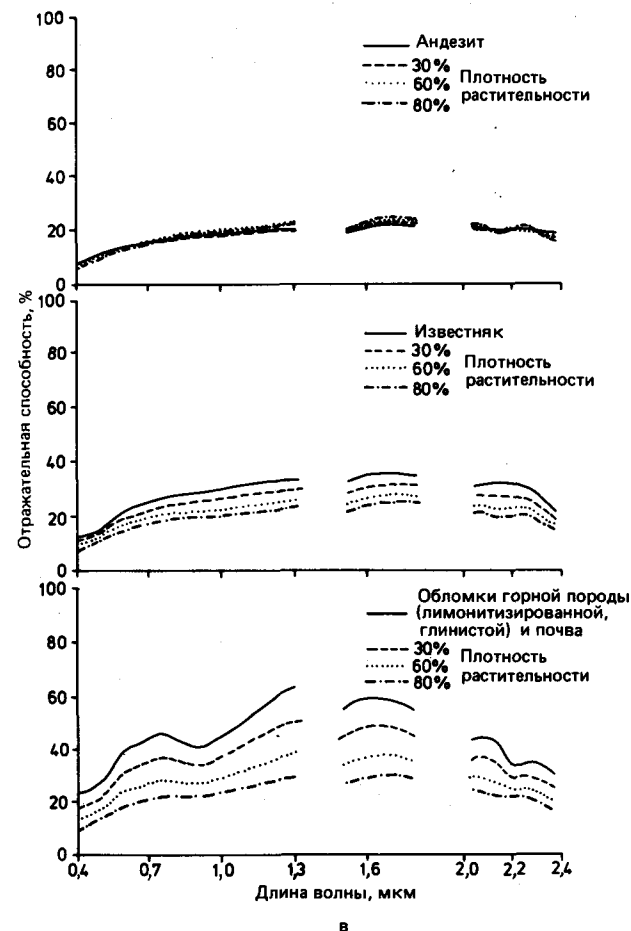
Рис. 10. Влияние растительности разных видов и разной плотности на спектральную яркость андезита, известняка и лимонитизированной глинистой почвы с обломками выветрелой горной породы (почва на коре выветривания): а — луговые травы; б — заросли толокнянки; в — заросли засохшего шалфея. Плотность растительности показана в процентах на каждом графике [279].

рис. 10, а, б). Даже при плотности покрова около 60% спектральные признаки подстилающей его почвы сохраняются. Конечно, с увеличением густоты растительности уменьшается альbedo известняка и лимонитизированной глиноземистой почвы. Но известняк сохраняет характерное падение интенсивности отражения около 2,2 мкм даже при 80% покрова высушенного шалфея на его поверхности. И только при еще большей плотности высушенного шалфея ослабевает выражение этого минимума интенсивности на графике.

В интервале длин волн от 0,68 до 1,3 мкм влияние спектров отражения растительностью на сигналы, поступающие с перекрытых ею почв и горных пород, наиболее четко выражено. В этом интервале очень резко возрастает отражение живыми растениями, зеленая масса которых отражает падающий солнечный свет очень сильно. Сухая и увядающая раститель-

ность изменяет характер спектра пород и почв мало. Она только уменьшает величину альbedo.

Так как волны длиной более 1,4 мкм отражаются от зеленой растительности слабо, то ожидалось, что измерения в длинноволновой области до диапазона среднего инфракрасного излучения включительно дадут большую информацию о горных породах, чем измерения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах волн. Предполагалось идентифицировать горные породы и минералы по их спектральным характеристикам прежде всего в интервале длин волн от 2,0 до 2,5 мкм [279]. Для этих измерений в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах излучения был использован спектрометр нового типа. На основании полученных данных исследователи [279] доказали возможность использования этого интервала длин волн для целенаправленного лито-фациального изучения местности.



Вне границ аридной зоны поверхности горных пород и почв почти всегда скрыты растительностью. Ее вид и плотность меняются от района к району. Соответственно изменяется и площадь свободных от растений поверхностей горных пород или почв. Насколько спектральный сигнал, идущий от поверхности Земли и регистрируемый приемником, будет определяться спектральными признаками растительности или собственными характеристиками скрытых под ее покровом пород и почв, зависит от густоты и распределения растительности по поверхности снимаемой местности. Соответственно надо учесть и пространственное разрешение (по площади) регистрирующих элементов в используемом приемнике. В большинстве случаев в «поле зрения» приемника попадает участок местности с тем или другим видом растительности и с разной ее густотой. Если пространственное разрешение регистрирующего элемента составляет, например, дециметры или метры, то можно получить раздельную регистрацию сигналов от площадок, покрытых растениями, и от свободных от растений поверхностей пород или почв. Если же пространственное разрешение регистрирующих эле-

ментов низко, порядка сотен-тысяч метров (например, для сканера на спутнике «Лэндсат» около 6000 м²), то приемником будет одновременно восприниматься излучение, отраженное растительностью и поверхностями, лишенными ее, т.е. в большинстве случаев будет регистрироваться смешанный сигнал.

Наряду с изучением спектральной отражательной способности горных пород в последнее время увеличилось число исследований по поглощению падающей энергии Солнца определенными минералами и его возможного значения для дистанционного зондирования.

Рядом исследователей [1, 87, 89, 233, 257, 260] было показано, что минералы, содержащие железо и слоистые силикаты с группами Al-OH и Mg-OH (глинистые минералы и гидрослюда) в определенной части спектра электромагнитной энергии, прежде всего в отраженном среднем диапазоне инфракрасного излучения, сильно поглощают падающий поток энергии. Этот эффект выражается минимумом отражения в соответствующей части спектра или полосой поглощения, по которой можно диагностировать минералы и горные породы. Так, двух- и трехвалентным железом создаются сильные полосы поглощения около 1,0 мкм, около 0,92 мкм и более тонкие, расположенные рядом друг с другом полосы поглощения в интервале 0,40–0,55 мкм [119]. Поэтому спектр отражения горной породы может быть ее спектральной характеристикой, которая определяется железистыми минералами. Так, например, красный цвет некоторых пород и почвы обусловлен большим содержанием гематита и гетита (см., например, график отражательной способности красного арсиллита на рис. 7).

Полосы поглощения энергии выделяются прежде всего в спектрах железисто-магнезиальных и водных минералов. Влияние этих минералов на спектральные характеристики горных пород уменьшается, если в составе горной породы имеются вместе с минералами, содержащими железо, или гидроксильную группу, или и те и другие, кварц и полевые шпаты. Однако и в этом случае вышеуказанные полосы поглощения проявятся на графике отражательной способности породы.

Отражательная способность мафических и ультрамафических горных пород слабо меняется в диапазоне 0,4–1,1 мкм. В противоположность им отражательная способность фельзитовых пород возрастает непрерывно по мере увеличения длины волны [260], хотя имеются некоторые минимумы и максимумы в интервале 0,7–1,1 мкм (рис. 11). По-видимому, породы с составом, средним между мафическими и фельзитовыми, должны иметь и спектральные характеристики промежуточного типа [256].

Изучение спектральных характеристик природных объектов способствовало выбору двух наиболее оптимальных интервалов длин волн: 1,2–1,3 и 1,6–2,2 мкм, в которых возможен поиск медно-порфи-

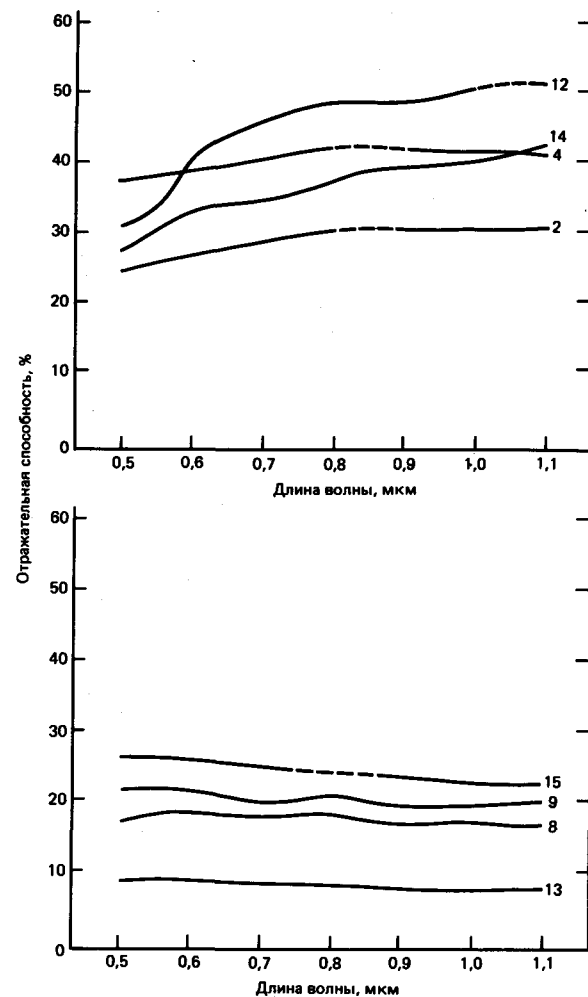


Рис. 11. Спектральная яркость основных и ультраосновных (внизу) и кислых горных пород (вверху). Риолит (12), гранит (14), риолит (4), гранодиорит (2) с увеличением длины волны излучения увеличивают свою спектральную яркость. Серпентинит (15), габбро (9), перидотит (8) и базальт (13) уменьшают спектральную яркость при увеличении длины волны излучения [260].

рового оруденения в неизменных интрузивных, вулканогенных и осадочных породах по зонам вторичных минералов и пород, образующихся в результате гидротермальных изменений [85, 89].

В результате лабораторных измерений было установлено [86, 87], что определенные минералы, которые встречаются в зонах гидротермально измененных пород близ месторождений, например, медно-порфировых руд, имеют специфические спектральные признаки, особенно в интервале длин волн 2,1–2,4 мкм. Эти признаки можно использовать для дистанционного зондирования. Так, каолинит, монтмориллонит, алуниг и кальцит распознаются по характерным узким и широким полосам поглощения

энергии в среднем инфракрасном диапазоне (рис. 12). Исходя из предположения, что с помощью десятиканального радиометра с диапазоном измерений 0,5–2,3 мкм удастся отыскать для начала хотя бы каолин или карбонатные породы по их спектральным характеристикам, были проведены экспериментальные съемки с борта космического корабля многообразового использования «Спейс шаттл Колумбия» [88]. Наряду с измерениями в специфических узких

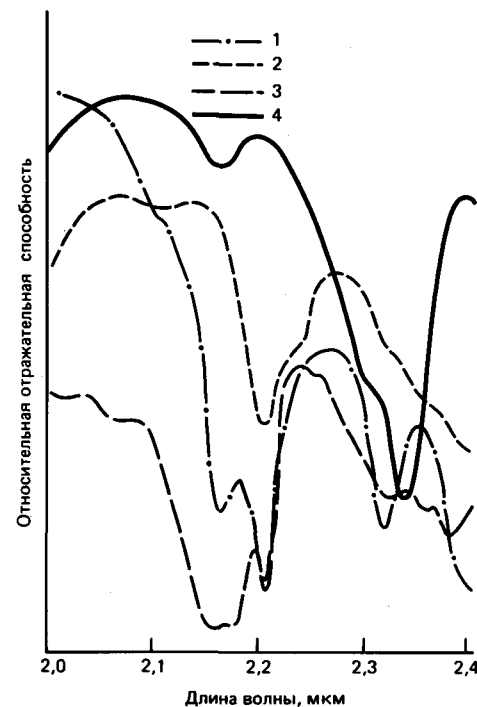


Рис. 12. Спектральная отражательная способность некоторых минералов, встречающихся на участках развития гидротермальных изменений в горных породах (по данным лабораторных измерений [186]). Для определения минералов важным оказалось положение спектральных полос поглощения.

1 – каолинит; 2 – монтмориллонит; 3 – алуниг; 4 – кальцит.

зонах спектра были предложены [86] и измерения в определенной комбинации зон или каналов для доказательства возможности определения интересующих минералов. Проведенными на тестовом участке исследованиями была доказана эффективность предложенной комбинации двух каналов: 1,6 и 2,2 мкм. Первый из них очень важен для обнаружения гидроксильных групп в минералах, типичных для гидротермально измененных зон месторождений. По данным проведенных измерений в обоих этих каналах оказалось возможным различать лимонитизированные, гидротермально измененные породы и магматические породы в большинстве случаев тоже с лимонитом, который образуется в результате окисления

железо-магнесьных минералов и раскристаллизации стекла. Кроме того, обнаружили сильно осветленные гидротермально измененные породы без лимонита, если они имели в своем составе минералы с гидроксильной группой OH^- .

Использование среднего инфракрасного диапазона стало возможным только в последние годы благодаря разработке таких приемников, которые позволили проводить эти измерения. Тематические изображения-схемы получаются многозональным сканером спутника «Лэндсат-4», имеющим специальный канал 2,2 мкм, предназначенный для составления карт литофаций или минеральных фаций. Мультиспектральные сканеры предшествующих спутников этой серии могли регистрировать отраженный от поверхности Земли поток солнечной энергии только в диапазоне 0,5–1,1 мкм. При испытаниях мультиспектрального сканера для получения данных тематических изображений в районе медно-порфировых месторождений Саффорд, шт. Аризона, были выявлены зоны вторичного гидротермального изменения пород: кварц-серпентитового, хлоритизации и пропилитизации. По данным дистанционного зондирования были указаны каолинит и монтмориллонит во вторично измененных породах другого медно-порфирового месторождения – Мэрисвейл, шт. Юта [233]. Здесь измененные породы были опознаны по признакам поглощения – полосам абсорбции между 2,17 и 2,22 мкм, которые обнаруживаются благодаря алюмо-гидроксильной группе вышеуказанных минералов. В спектральных характеристиках гидротермально неизменных пород отсутствуют соответствующие полосы поглощения или же они выражены очень слабо.

Особенно полезным для представления и обработки данных мультиспектрального сканирования в среднем инфракрасном диапазоне при составлении литофациальных карт или карт минеральных ассоциаций оказалось внедрение компьютерной, или машинной, обработки, в результате которой получают так называемые числовые изображения. Они представляют собой специальные шаги в обработке данных путем деления для одной плоскости данных измерений в двух диапазонах (см. разд. 5.3.11). Как правило, для таких преобразований изображения используются данные синхронных измерений, полученные многоканальной аппаратурой. Для распознавания минералов с гидроксильной группой OH^- наиболее оптимальным оказался вариант числового изображения, составленный методом частного по данным измерений в каналах 1,6 и 2,2 мкм [1, 81, 86, 89]. Во время полета космического корабля «Спейс шаттл Колумбия» в ноябре 1981 г. была проведена спектрометрическая съемка пятиканальным спектрометрическим прибором. После соответствующей обработки на ЭВМ по данным измерений в пяти каналах было проведено распознавание и отождествление каолинита, алунига, кальцита и монтмориллонита [88].

В другом случае для распознавания каолинита, монтмориллонита, алунига, кальцита, гипса, ирита, серпентинита и хлорита потребовались только три варианта числовых ратно-изображений [323]. Из этих приведенных примеров становится очевидным значение спектрометрирования в среднем ИК-диапазоне для составления литофациальных карт и поисков определенных групп минералов или мономинеральных пород методами дистанционного зондирования. Другие данные и критические замечания по поводу еще слабо используемого в дистанционном зондировании диапазона электромагнитных волн можно найти в вышеуказанных работах, а также в специальной литературе по дистанционному зондированию, добыче и разведке минерального сырья.

По результатам одного из экспериментов, проведенного для решения геологических задач дистанционными методами, был сделан вывод об эффективности спектрометрирования в следующих зонах спектра: 1,18–1,3; 4,0–4,75; 0,46–0,50; 1,52–1,73; 2,10–2,36 мкм [280]. Этот вывод основан на результатах обработки данных с одного тестового участка в шт. Юта. Измерения проводились многозональным сканером во время облета территории участка с обнаженными выходами пород основных типов – осадочных и интрузивных, а также с зонами их вторичных гидротермальных изменений. Размер поля измерения по поверхности изучаемой породы составлял около 0,24 км². Для всех типов пород измерения проводились по 15 каналам с интервалом между ними 0,34–0,75 мкм. С помощью дискриминантного анализа были выявлены зоны, в которых чаще всего проводилась съемка всех разностей пород с оптимальным контрастом специфических разностей пород по отношению к другим типам. Запись выделенных зон предназначалась для повторного изучения и картирования литофациальных разностей. Использованный мультиспектральный сканер имел спектральное разрешение в видимом диапазоне 0,04–0,06 мкм, в ближнем ИК-диапазоне 0,05–0,26 мкм и в тепловом диапазоне 0,25–0,36 мкм. Только один из спектральных каналов этого сканера действовал в том же спектральном диапазоне, что и сканеры первых спутников «Лэндсат» – от 0,4 до 1,1 мкм, остальные четыре оптимальных канала работали в длинноволновой, инфракрасной, области излучения, значение которой подчеркивалось вышеприведенными примерами.

Исследованиями спектральных характеристик неизменных и измененных пород близ урановых месторождений установлен ряд спектральных зон: 1,25; 0,95; 2,20; 2,15; 1,75; 2,45; 2,10; 1,60; 1,55 и 0,75 мкм, измерения в которых, проведенные в указанной последовательности, наиболее эффективны для разделения литофаций в районах урановых месторождений [54]. Этот пример подчеркивает значение спектральных съемок в строго ограниченных узких

зонах спектра, в которых более или менее эффективно можно использовать методы дистанционного зондирования при поисково-разведочных работах.

3.2.2. О вторичном тепловом излучении горных пород. Наряду с характеристиками спектрального отражения поверхностей горных пород и почв в видимом и ближнем ИК-диапазонах в 1960-е годы часть геологов интересовалась и вторичным тепловым излучением горных пород, которое надеялись использовать при дистанционном зондировании.

В результате исследований, проводившихся с конца 50-х годов [188, 194, 195], было установлено, что форма кривых на графиках вторичного теплового излучения горных пород тесно связана с минеральным составом пород, что силикатные и несиликатные породы можно различать по спектрам их вторичного теплового излучения в диапазоне 8–13 мкм и что, наконец, можно разделить по этим же спектрам силикатные породы разного минерального состава. Признаком для распознавания во всех случаях служило положение минимумов на графиках вторичного теплового излучения горных пород.

Обратимся теперь к конкретным примерам экспериментов [190], проводившихся на разных почвах и горных породах в окрестностях кратера Писга в Калифорнии, США. Семейство графиков вторичного теплового излучения горных пород и почв этого района построено по четырем линиям залетов, по которым проводилось спектрометрирование в диапазоне 6,8–13,3 мкм. Протяженность каждой линии измерений 28 км, измерения велись с высоты 650 м при темпе съемки 6 спектров в 1 с. Пространственная привязка данных съемки проводилась по направлению полета с использованием результатов наземных измерений на тестовых участках, расположенных вдоль линий полетов. Во время полета спектрометром измерялась площадка 15 × 15 м перед носителем с установленной аппаратурой. Полученные данные коррелировались с измерениями вторичного теплового излучения озера, так как спектр излучения водоемов в диапазоне 8–14 мкм близок к спектру излучения абсолютно черного тела (см. разд. 2.3), т. е. его можно использовать как эталон референц-поверхности. Таким образом, семейство графиков (рис. 13) характеризует не абсолютные, а относительные величины вторичного теплового потока от горных пород и почв, вычисленные относительно средней величины излучения от водной поверхности.

Графики эмиссии (вторичного теплового излучения) по вычисленному среднему спектру (рис. 13) построены для молодого, современного аллювия (B), древнего аллювия (C), песчаника (D), сухих озерных осадков, так называемой плайи (E), а также для трех разных потоков оливин-базальтов (J, G, H). Верхняя и нижняя группы графиков (рис. 13) построены относительно эмиттерного потока соответственно от

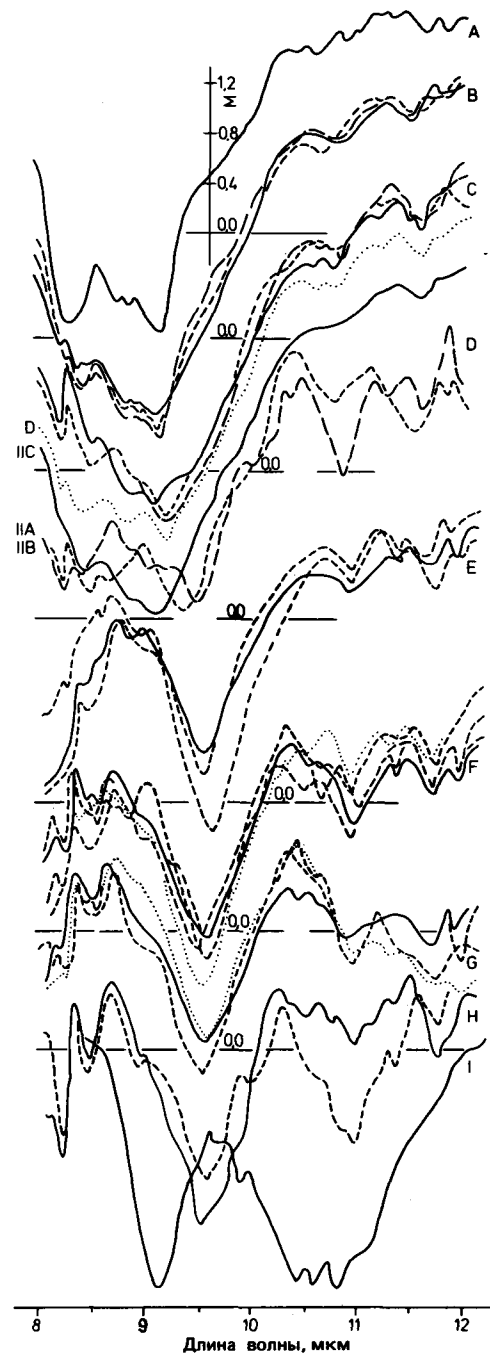


Рис. 13. Спектральная излучательная способность различных горных пород и почв в районе кратера Писга, Калифорния. Пояснения в тексте. (С разрешения автора из: Infrared spectral emittance in geological mapping—Airborne spectrometric data from Pisgah Crater, California, by R.J. Lyon, Science, Vol. 175, pp. 983–986, March 1972.)

гранодиорита (A) и габбро (I). В качестве характеризующего, маркирующего, признака той или иной породы служит положение (относительно оси абсцисс) главного минимума на графике, а также ряд дополнительных частных минимумов в спектре излучения объекта.

Кривые спектров современного (B) и древнего (C) аллювия похожи один на другой. Они имеют один сильный постоянный минимум в интервале длин волн 9,1–9,2 мкм. Точное сопоставление этих кривых показывает, что для современного аллювия минимум в спектре эмиттерной энергии смещается в сторону коротковолновой области, т. е. влево по оси абсцисс, по отношению к графикам энергии древнего аллювия. Кроме того, изгиб кривой около 9,5 мкм, соответствующий высокому содержанию кварца [190], на кривой C отсутствует.

При сопоставлении графиков эмиттерного излучения оливин-базальтовых лав (рис. 13, F–H) выявилось, что все они имеют единственный минимум в интервале 9,45–9,55 мкм, резко выраженный на всех кривых. По характеру графиков потоки базальтов можно разделить дополнительно на две подгруппы: в первой кривые F и G имеют слабый минимум около 10,97 мкм, во второй тот же минимум выражен резко (кривая H). По-видимому, можно провести еще более точное отождествление этих пород по форме их графиков вторичного теплового излучения в диапазоне от 11,5 до 12,0 мкм [190], где кривые F, характеризующие базальты, более пологи, чем кривые пород типа G. Спектры энергии вторичного теплового излучения горных пород, построенные по данным аэроизмерений, сопоставлялись с графиками вторичного теплового излучения, полученными при измерениях шлифованных штучек гранодиорита (A) и габбро (I). При этом выявилось сходство семейства кривых для базальтов с графиком эмиссии габбро.

Величины вторичного теплового потока (см. семейство кривых D на рис. 13) были получены также для участка, на котором выветрелые мелкозернистые песчаники полого залегают на базальтах. Оказалось, что данные измерений соответствуют спектрам современного аллювия (B) там, где песчаники имеют большую мощность, и базальтам там, где покров песчаников непостоянен, маломощен и редуцирован. На графиках некоторых участков (II C) отражаются характерные признаки семейства кривых G. Проведя это сопоставление, Лион [189] продемонстрировал возможность выявления пород различного минерального состава при аэросъемках.

Проблематична интерпретация графиков эмиттерного излучения плейстоценовых отложений, так как они оказались аналогичными семейству графиков, характеризующих базальты (G). Наземное спектрометрирование подтвердило корректность данных аэросъемки, после чего был проведен более тщательный анализ ее результатов. Им было установлено, что спект-

ры вторичного теплового излучения белых мелкокристаллических глинистых минералов в озерных отложениях близки, почти тождественны спектрам оливиновых базальтов.

Таким образом, сопоставление всех групп графиков, соответственно семейств кривых внутри них (рис. 13) показало, что положение минимума эмиссии изменяется в зависимости от минерального состава горных пород или почв. При этом выявились вариации минимума, зависящие от соотношения темноцветных и щелочных или щелочно-земельных минералов и содержания кремнезема в породе.

Рассмотрим группу графиков энергии вторичного теплового излучения, полученных при измерениях некоторых грубозернистых свежих измельченных проб гранитов из Новой Англии [192]. Цвет отдельных проб меняется от темно-серого до коричневого, розового или голубоватого. Но различие в цвете, по мнению Лайона и Грина [192], не влияет на интенсивность эмиттерного излучения. Измерение положения минимума энергии на графиках (рис. 14) вызвано изменениями в минеральном составе проб (химическом модуле) кварцевых гранитов (D и E) и щелочных полевошпатных гранитов (F). Для сравнения приведены оба минимума в спектре излучения кварца (Q) [192].

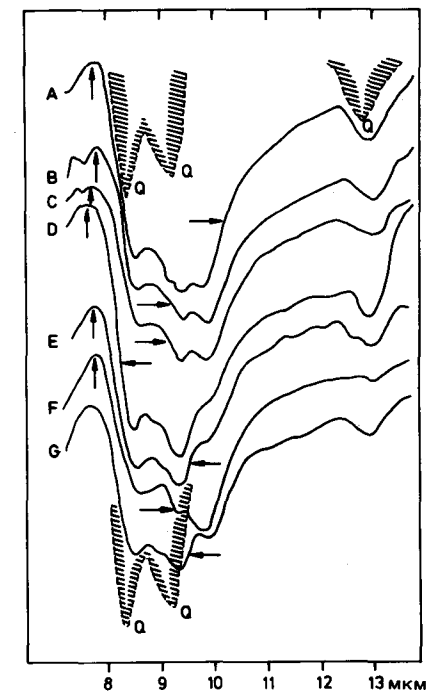


Рис. 14. Спектральные излучательные способности свежей поверхности грубозернистых гранитов из Новой Англии [192]. Q—эмиссионный минимум кварца, для сравнения. Вертикальные стрелки показывают, где эмиссия равна 1 ($\epsilon_\lambda = 1,0$), а горизонтальные 0,9 ($\epsilon_\lambda = 0,9$).

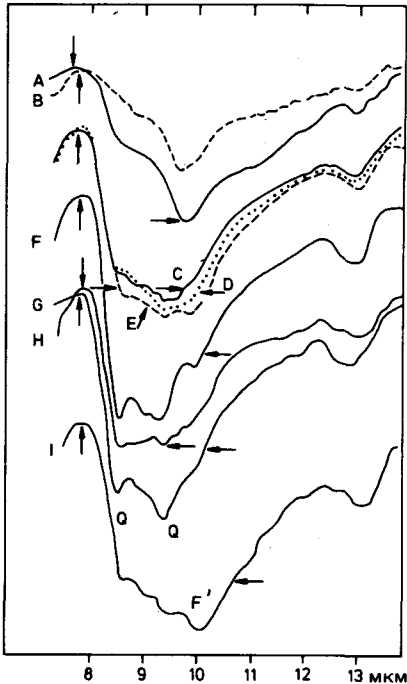


Рис. 15. Спектральная излучательная способность базальтов (А и В), кварцевого монцонита (Е и F) и гранодиорита (I) [192]. Значение стрелок такое же, как и на рис. 14.

Результаты следующей серии измерений, проведенных этими же исследователями в поле на кристаллических породах разного минерального состава – от базальтов (А и В) до кварцевых монцонитов (Е и F) и гранодиоритов (I), приведены на рис. 15 [192]. Базальты, с их отсутствием кварца и высоким содержанием плагиоклазов, четко отделяются по положению минимума эмиссии от кварцевых монцонитов и гранодиоритов (рис. 15). Богатые плагиоклазом кварцевые монцониты (F, G и H) больше похожи между собой по форме минимума эмиссии, чем однотипные с ними породы несколько иного состава (C, D, E). Спектральные кривые шести разностей кварцевых монцонитов похожи одна на другую, но отличаются от кривой I (гранодиориты). На форму графиков, как и ожидалось, влияет содержание в породе железисто-магнезиальных минералов (Fe–Mg) и полевых шпатов, что выразилось в форме кривой, например, гранодиоритов (I) с минимумом около 10 мкм (рис. 15).

В этой же работе Лайона и Грина [192] кроме вышеприведенных графиков вторичного теплового излучения горных пород имеются данные по спектрам эмиссии разных пород Бушвелдского интрузивного комплекса и одного из районов крупных медно-порфириковых рудопоявлений. Сопоставление этих данных показывает, что положение минимума вторичного теплового излучения смещается с увеличе-

нием содержания окиси кремния в породе (в процентах) в сторону коротковолновой части спектра электромагнитных волн. Следовательно, спектры эмиттерного излучения горных пород можно использовать для их распознавания и определения. Для диагностики имеет значение положение не только главного, но и побочных минимумов эмиттерного потока энергии на графике ее интенсивности. Это подтверждается приводимой авторами таблицей положений минимумов различных пород.

Вполне однозначна связь интенсивности вторичного теплового излучения с минеральным составом горной породы. Она предполагает правомочность и обратного вывода о связи спектра испускания с химическим составом горной породы. Согласно Лиону и Грину [192], речь идет прежде всего о начальной или исходной величине спектра излучения. Эта величина получается при измерениях на местности на очень небольшом расстоянии от поверхности горной породы. Топографическое положение, степень и особенности выветрелости, вид и плотность растительности на поверхности горной породы не бывают постоянными. Переменные свойства поверхности горной породы или почвы, так же как и технические условия спектрометрирования во время полета, состояние атмосферы в момент съемки и в течение ближайших суток – все эти факторы оказывают влияние на спектральную характеристику горной породы и на получаемый сенсором импульс (при условии что он вообще может быть зарегистрирован приемником на борту самолета или спутника). В принципе на спектральную характеристику поверхности горной породы или почвы влияют многочисленные факторы, как зависящие от свойств поверхности объекта измерения, так и не зависящие от них, а связанные с его окружением и атмосферой. Однако для регионов, в которых обширные участки территории лишены растительного покрова, например в аридных областях, в высокогорных районах и т. п., сканером при тепловой съемке охватываются большие площади обнаженных горных пород. Здесь можно использовать минимумы на графиках вторичного теплового излучения объектов, закономерно связанные с их минеральным составом, для интерпретации определенных литофациальных разностей пород или их комплексов. Это предположение было доказано при сканерных самолетных тепловых съемках в районе кратера Писга [305, 306, 307]. Один из авторов проводившегося там эксперимента, Винсент, составил по его результатам при помощи компьютерной обработки так называемые числовые изображения по методу отношений данных съемки двух каналов: 8,2–9,1 к 9,1–12,1 мкм. Участки обнаженных горных пород разного состава на нем выразились наиболее контрастно и были переданы оттенками серого тона. Эти так называемые ратфо-изображения, или изображения, построенные по методу частного (иногда для сокращения их

называют числовыми), позволяют все зафиксированные на снимке разности пород или почв классифицировать в соответствии со спектром их излучения, определенным в вышеописанных нами экспериментах Лайоном [190]. Он указал, что при применении методов числовой обработки данных тепловых сканерных съемок основное значение должно иметь отношение спектральных сигналов двух диапазонов: 8–9 к 9–11 мкм. По его мнению, наименьшие значения величин этого отношения имеют горные породы или почвы, в состав которых входят кварц или плагиоклазы. Более высокие значения величин этого отношения свидетельствуют о бедности пород или почв кварцем и полевыми шпатами. Но окончательно вопрос об оптимальности (и эффективности) использования этих двух спектральных диапазонов для изучения литофациальных особенностей регионов по данным тепловых съемок и влиянии на них атмосферных и других помех при прохождении сигнала к приемнику, установленному на борту носителя – са-

молета или спутника, – не решен на современном этапе исследований.

Пока все же удалось выделить [139] ряд силикатных пород (кварцит, кварцевый монцонит, монцонит, кварцевый трахит и трахит) на ратфо-изображениях, построенных по методу частного, по результатам самолетных съемок многозональным тепловым сканером. Кроме того, успешно было проведено картирование различных силикатных пород в районе Тинтик, шт. Юта, США, и других районах с помощью съемки усовершенствованным шестиканальным тепловым сканером с высоким спектральным разрешением [86].

Таким образом, решающее значение для внедрения методов тепловых сканерных съемок в геологические исследования имеет возможность одновременного проведения спектрометрирования по многим критическим (характерным) спектральным диапазонам, т. е. возможность проведения многозональной тепловой сканерной съемки с самолетов или спут-

Таблица 1а. Термические свойства различных горных пород и воды при температуре 20 °C [134]

Горные породы	Теплопроводность λ, Дж·см ⁻¹ ·с ⁻¹ ·К ⁻¹	Плотность ρ, г·см ⁻³	Удельная теплоемкость С, Дж·г ⁻¹ ·К ⁻¹	Температуропроводность α, см ² ·с ⁻¹	Теплоперенос Р (температурная инерция), Дж·см ⁻² ·с ^{-1/2} ·К ⁻¹
Базальт	0,0209	2,8	0,83	0,009	0,221
Глина (влажная)	0,0125	1,7	1,46	0,005	0,175
Доломит	0,0501	2,6	0,75	0,026	0,313
Габбро	0,0250	3,0	0,71	0,012	0,229
Гранит	0,0313	2,6	0,66	0,016	0,217
Щебень	0,0271	2,0	0,75	0,008	0,137
Известняк	0,0125	2,5	0,71	0,011	0,188
Мрамор	0,0229	2,7	0,87	0,010	0,234
Обсидиан	0,0125	2,4	0,71	0,007	0,146
Перидотит	0,0459	3,2	0,83	0,017	0,351
Пемза	0,0025	1,0	0,66	0,004	0,037
Кварцит	0,0501	2,7	0,71	0,026	0,309
Риолит	0,0229	2,5	0,66	0,014	0,196
Гравий	0,0250	2,1	0,83	0,014	0,209
Песок	0,0058	1,8	1,00	0,003	0,100
Песчаник, кварц	0,0501	2,5	0,79	0,013	0,225
Сerpентинит	0,0259 0,0263	2,4	0,96	0,013	0,263
Глина	0,0300 0,0175	2,3	0,71	0,008	0,142
Глинистый сланец	0,0125 0,0209	2,8	0,71	0,011	0,204
Сиенит	0,0321	2,2	0,96	0,009	0,196
Туф (спекшийся)	0,0183 0,0117	1,8	0,83	0,008	0,133
Вода	0,0054	1,0	4,22	0,001	0,154

Таблица 16. Коэффициенты излучения некоторых важнейших материалов для диапазона 8–14 мкм [244]

Материал	Коэффициент излучения
Кварц (агат)	0,712
Полевой шпат	0,870
Гранит	0,815
Гранит, шероховатая (зернистая) поверхность	0,898
Обсидиан	0,862
Обсидиан, поверхность с раковистым изломом	0,837
Базальт	0,904
Базальт, шероховатая поверхность, блестящая	0,934
Дунит	0,856
Дунит, шероховатая поверхность	0,892
Кварцевый песчаник, полированная поверхность	0,909
Кварцевый песчаник, шероховатая поверхность	0,935
Доломит, полированная поверхность	0,929
Доломит, шероховатая поверхность	0,958
Доломитовый щебень (обломки 0,5 см)	0,959
Песок, грубозернистый кварцевый	0,914
Песок, грубозернистый кварцевый, влажный	0,936
Песок, тонкозернистый кварцевый	0,928
Скальный грунт, сухой	0,966
Асфальт дорожного покрытия	0,956
Вода чистая	0,993
Вода с тонкой пленкой нефти	0,972
Лед	0,98
Растительность	> 0,97

ников, а также возможность компьютерной обработки ее результатов и представления данных в виде оптимизированных по контрастности изображений (гл. 5).

Количественная обработка данных многозональных съемок, в том числе и тепловыми сканерами и радиометрами, приобретает с каждым днем все большее значение. Уже сейчас дистанционное зондирование основывается на температурных особенностях почв, растительных сообществ или горных пород при решении оперативных задач мониторинга среды. Различные тепловые свойства горных пород (табл. 1а) и различные коэффициенты вторичного теплового излучения или коэффициенты эмиссии $\varepsilon(\lambda)$ (табл. 1б) приводят к разному их нагреванию днем и охлаждению ночью, что определяется по температурным контрастам в суточном ходе температур, который используют при дистанционном зондировании. На практике относительные различия в температуре поверхностей объектов наряду с другими фотогеологическими критериями используют для дешифрирования аэрокосмических тепловых сканерных снимков, на которых разница в радиационных температурах

объектов передается оттенками серого тона изображения. Так как на температуру поверхности объекта влияет комплексно очень большое количество процессов с переменными физическими параметрами (разд. 3.1), то, как правило, невозможно только по данным тепловых съемок получить количественные оценки петрографических различий близких по составу комплексов пород и почв. Но здесь важно подчеркнуть, что даже информация об относительном различии в радиационных температурах поверхности объектов может оказаться решающей при геологическом дешифрировании снимков, так как возможны дополнительные критерии оценки, которые нельзя получить съемками в видимом диапазоне электромагнитных волн (см. введение и примеры в разд. 6.4).

Примеры использования количественной обработки данных аэросъемок и космических тепловых съемок для изучения и картирования геологических объектов разных типов имеются в ряде работ [258, 234, 316, 140]. При известной величине теплопереноса (или тепловой инерции) и альбедо двух или более распознаваемых типов горных пород по числовой модели дневного (или ночного) хода температур оцениваются величины их температурных контрастов. Этим методом было установлено, что горные породы и другие природные объекты с одинаковым альбедо, но разной величиной температурной инерции имеют разный температурный профиль, т.е. суточное колебание температуры поверхности. При этом породы с высоким коэффициентом тепловой инерции испытывают незначительные колебания температуры поверхности в течение суток по сравнению с породами с низкими значениями температурной инерции. Эти последние показывают наибольшую разницу температур днем (около часа полудни) и ночью или ранним утром (незадолго до восхода солнца). Для горных пород с примерно одинаковой величиной коэффициента температурной инерции, но различной величиной альбедо наиболее сильные контрасты в радиационных температурах выступают несколько позднее – во второй половине дня, когда нивилируется утреннее сглаживание температур (разд. 6.4).

Величина альбедо горных пород (для районов, лишенных растительности и почвенного покрова или бедных растительностью) рассчитывается по снимкам, полученным в видимом диапазоне электромагнитных волн (0,4–0,7 мкм). Термический коэффициент, или коэффициент температурного переноса, рассчитывается по амплитудам суточного температурного профиля (ΔT) и по данным о величинах спектрального отражения объектов в видимом диапазоне. Расчеты значений ΔT для горной породы или группы пород при корреляции результатов тепловой съемки с референц-данными (т.е. калибровки измеренных величин по тарированному излучателю, установленному в самой сканирующей системе) позволяют опре-

делить те величины радиационных температур, которые будут при съемке регистрироваться сенсорами. По данным вышеуказанных исследований температурный коэффициент горных пород в большинстве случаев может служить характеризующим признаком для распознавания определенных типов горных пород по результатам тепловых аэрокосмических съемок. Но в этих случаях необходимо в первую очередь учитывать уже неоднократно упоминавшиеся факторы, образующие помехи при измерениях: топографический эффект (при дневных съемках), метеоусловия, прозрачность атмосферы и стояние Солнца для того, чтобы получить удовлетворительные результаты интерпретации тепловых съемок. Например, искажающее влияние топографического положения поверхности объекта выразится в том, что поверхности, расположенные на северных склонах, будут иметь более низкие температуры, чем на южных (для отрицательных форм рельефа, например для ущелий в горах, эффект будет обратный). При этом освещенные в течение дня поверхности будут иметь большие амплитуды температур, чем неосвещенные поверхности северных склонов. Малые контрасты температур введут в заблуждение исследователя-интерпретатора, не имеющего дополнительных сведений о рельефе района съемок. Из этого становится очевидной важность корреляции данных видимого и теплового диапазонов, а также введение поправок на

длины волны падающего потока энергии увеличивается доля (в процентах) мощности отраженного потока. Наиболее ярко выражена спектральная характеристика почв в красной части спектра, в ближнем, среднем и тепловом диапазонах инфракрасного излучения. Качественные и количественные различия спектральных характеристик разновидностей почв в этих диапазонах позволяют распознавать их и дешифрировать. При мультиспектральных съемках для распознавания и классификации почв в этих диапазонах для удобства полученные данные можно представить в виде контрастно улучшенного изображения, т.е. провести числовую обработку данных и получить ратфо-изображения (см. разд. 5.3.11).

На спектральное отражение, поглощение и излучение почв влияют существенно обусловленные и вещественно не обусловленные параметры, из которых прежде всего по значимости выделяются: минеральный состав, зернистость (или размер частиц), содержание соединений железа и органических соединений (гумуса), а также структура и выровненность поверхности почв. С точки зрения одновременного, повторного или фенологического дистанционного зондирования [170] вещественно обусловленные параметры могут быть представлены по мере их относительного постоянства и по изменениям выраженности, а также по взаимодействию так, как показано на схеме.

Постоянные (относительно) параметры

Минеральный состав (без соединений Fe)

Размер частиц (зерен)

Соединения Fe

Органическое вещество

Почвенный "матрикс"

Поверхностный "пигмент"

Переменные (относительно) параметры (ежегодно изменяющиеся)

Влажность почвы

Структура и неровности поверхности почв

Взаимодействие

Среди вещественно обусловленных параметров минеральный состав, определяющий спектральную характеристику почвы, занимает первое место. Именно свойствами отдельных минералов, влияющих на коэффициенты спектрального отражения и поглощения, определяются спектральная характеристика почвы и величина сигнала. Свойства некоторых минералов (кварца, полевых шпатов, карбонатов, слюд и т.д.) рассматривались нами в предыдущем разделе

топографию местности при анализе и интерпретации тепловых сканерных съемок, особенно в горной или холмистой местности.

3.3. Почвы

3.3.1. Отражательная и поглощательная способности почв.

В принципе почва отражает падающий на нее световой поток очень слабо [51, 222]. С увеличением

этой главы по опубликованным материалам [116–128].

Но на отражение и поглощение энергии падающего светового потока почвами существенно влияют не только их минеральный состав, но и соотношение песчаной и глинистой частей почвы, содержание окислов и гидроксидов железа, вид и количество органического вещества.

Очень большое влияние на соотношение отражения и поглощения энергии светового потока, по данным опубликованных исследований [34, 225, 281], оказывают структура верхнего слоя почвы и распределение в нем частиц (отдельных зерен или минеральных агрегатов) разных размеров [211]. Эти параметры связаны с минеральным составом и влияют на те свойства почвы, которые определяют процессы отражения и поглощения энергии на ее поверхности и, следовательно, величину отражения падающего светового потока (альбедо).

По мнению многих исследователей [34, 211, 225, 281, 170], можно считать доказанным, что размер зерен минералов в почве, т.е. частиц почвы, и их пространственное распределение (организация, текстура) в верхнем почвенном слое влияют на соотношение спектрального отражения и спектрального поглощения почв. Размерность и упорядоченность частиц связаны с минеральным составом и обуславливают структуру и свойства поверхности почвы и тем самым влияют на вид и интенсивность процессов отражения и поглощения и на отношение величины отраженного потока излучения к падающему потоку энергии (альбедо).

По мнению вышеупомянутых исследователей, доля отраженного потока энергии изменяется с изменением размера зерен, или частиц, почвы. Плотная упаковка тонкозернистых минералов в почве создает относительно ровные поверхности, которые отражают сильнее, чем грубые, шероховатые или неровные поверхности. Более крупные минералы или частицы почвы неправильной формы, наоборот, создают относительно сложную, неровную шероховатую поверхность почвы. На этих неровностях – в порах и межпоровом пространстве – возникает многократное отражение, что приводит к увеличению поглощения энергии падающего потока излучения и соответственно к уменьшению регистрируемой доли отраженного потока излучения. Это характерно как для целинных (невозделываемых) почв, так и в большей мере для окультуренных почв сельскохозяйственных районов. Здесь структуры и свойства поверхности почв зависят от вида их ежегодного использования [287]. В связи с этим можно ожидать, что поверхности глинистых или илистых, так же как тонкозернистых, почв будут неровными, если в этих почвах в засушливое время образовались провалы и структуры усыхания, которые соответственно влияют на процессы отражения и поглощения энергии солнечной радиации.

При сравнении данных лабораторных и полевых измерений [211] ожидалось, что измерения спектральной яркости или величины отражения ненарушенных (целинных) почв на местности и проб аналогичных почв в лаборатории можно будет сравнивать по величине. Так, интенсивность отражения песков на местности выше, чем почв с высоким содержанием глинистой или илистой фракции. Это становится очевидным даже на аэрофотоснимках, так как пески кажутся всегда светлее, чем глины и богатые глиноземом почвы. В лаборатории же пробы песка в спектре излучения от 0,45 до 2,5 мкм показали меньшую спектральную яркость, чем пробы, содержащие глинозем. Основываясь на разнице в спектральной яркости ненарушенных поверхностей почв, наблюдаемой при натурных и лабораторных измерениях, можно прийти к следующему. Сглаженные поверхности тонкозернистых глин в лаборатории отражают лучи сильнее, чем сглаженные, но сравнительно шероховатые поверхности песчаных почв. На местности поверхности песчаных почв в сравнении со структурой поверхности размытых и затем высохших глинистых и илистых почв выглядят более гладкими, выровненными. Поэтому пески отражают относительно сильнее, чем неровные поверхности глин и суглинков. Из этого примера очевидно, что обусловленные составом и окружающей средой параметры очень по-разному влияют на спектральные характеристики почв и соответственно их поверхностей. Эту взаимобусловленность и возможность сложения или вычитания вышеуказанных параметров необходимо учитывать при проведении измерений дистанционными методами.

Сильно влияют на соотношение отражения и поглощения и на цвет почв содержание в них и вид органического вещества и соединений железа. Свободные окислы железа и его гидроксиды в коротковолновой части видимого диапазона уменьшают, а в длинноволновой и ближней инфракрасной – увеличивают отражательную способность (спектральную яркость) почв. По наблюдениям Обухова и Орлова [222] диапазон 0,5–0,64 мкм имеет особое значение для распознавания Fe-содержащих (прежде всего гематита) почв. Стонер и Баумгарднер [286] установили сильное различие спектрального отражения в ближней и особенно в средних инфракрасных зонах, основанное на содержании железистых соединений в пробах почв, которые использовались для определения стандартной цветности (по Мунселлу) почв в видимом диапазоне. С увеличением содержания окислов железа (особенно гематита) уменьшается отражение. При этом сканером с каналами среднего инфракрасного диапазона регистрируется больший разброс значений радиационных температур для железосодержащих (в большей или меньшей степени) почв, особенно в тропических и субтропических климатических зонах, а также средиземномор-

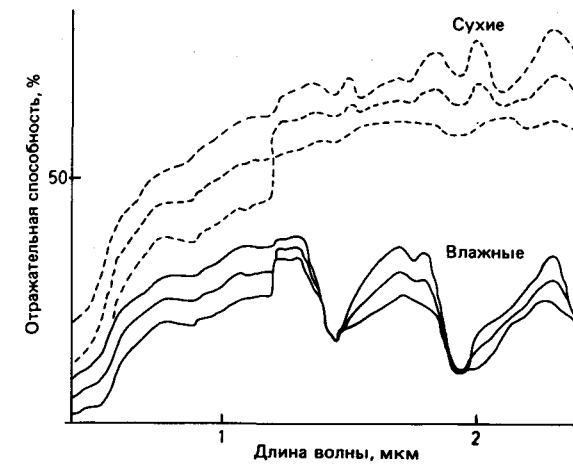


Рис. 16. Спектральная отражательная способность сухих и влажных суглинков в видимом, ближнем ИК и среднем ИК-диапазонах [186].

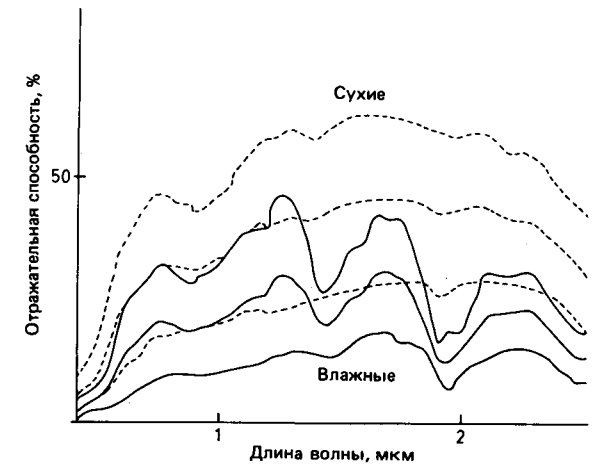


Рис. 17. Спектральная отражательная способность сухих и влажных песчаных почв [186].

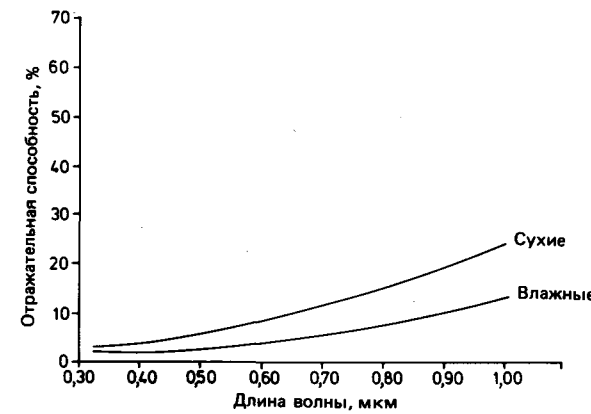


Рис. 18. Спектральная отражательная способность чернозема в видимом и ближнем ИК-диапазонах [51].

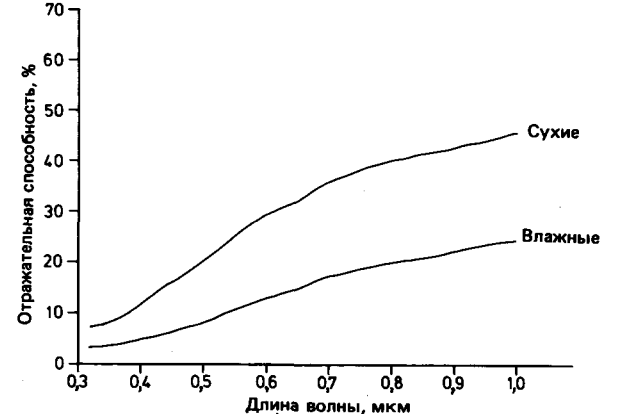


Рис. 19. Спектральная отражательная способность илистых почв, шт. Арканзас, в видимом и ближнем ИК-диапазонах [51].

ской климатической провинции (ср. разд. 3.2.1 и 3.2.2).

Уменьшенное содержание гумуса (особенно в пределах от 0 до 8%) также снижает интенсивность спектрального отражения почв в зоне более 0,6 мкм [328]. Но такое влияние гумуса может уменьшаться высоким содержанием глинистых минералов или глинозема. Содержанием органики, кроме того, определяется способность почв удерживать, накапливать и сохранять влажность. Влажность сама по себе воздействует на характер спектрального отражения (и спектрального излучения) на разных участках почвы (разд. 3.2.2.). Вид и фракция, а также ионный состав органического вещества в почвах существенно влияют на ее структуру и тем самым на силу ионного обмена в ней. Определение гумусовой фракции в

почвах имеет большое значение для оценки возможностей хозяйственного использования почв. Так как гумусовая составляющая почв влияет на их характеристики в некоторых спектральных каналах, то при компьютерной обработке данных мультиспектральных съемок почвенных участков с различным содержанием гумуса была сделана попытка выделить такие участки [18, 154]. Таким образом, была построена карта тестового района с пятью разновидностями (по содержанию гумуса от 1,5 до 7%) почв. Аналогичные исследования позднее провел Кордсен [55].

Сильное влияние на спектральные характеристики почвы в видимой и ближней инфракрасной частях оптического диапазона оказывает влажность, т.е. содержание в ней воды. С повышением влажности увеличивается спектральная яркость всех почв не-

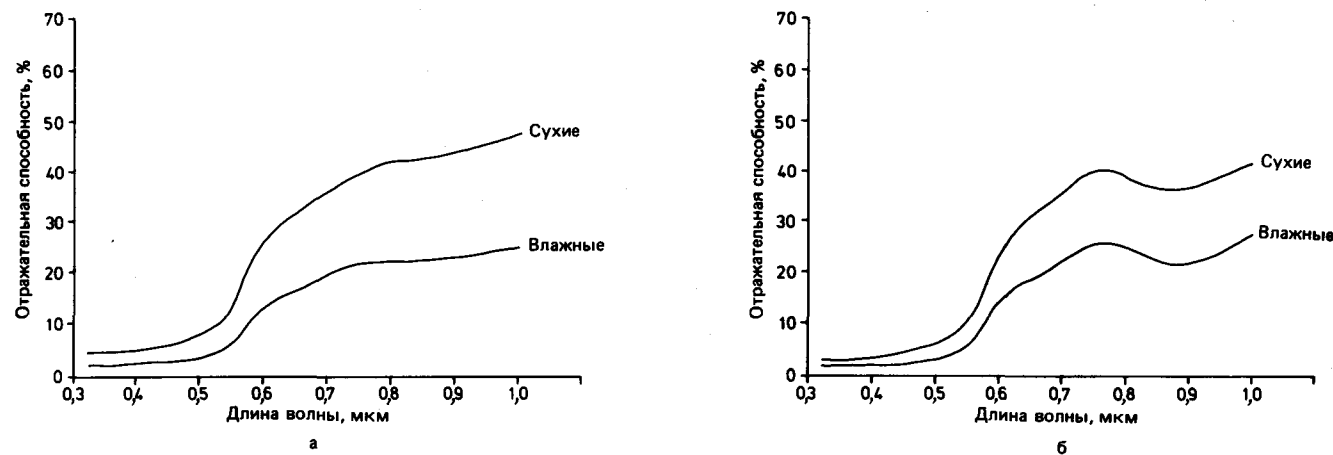


Рис. 20. Спектральная отражательная способность (а) красных кварцевых песков (Моньюмент-Валли, шт. Юта) и (б) латеритных почв (5 миль к северу от Шарлоттсвилла, шт. Виргиния) в видимом и ближнем ИК-диапазонах [51].

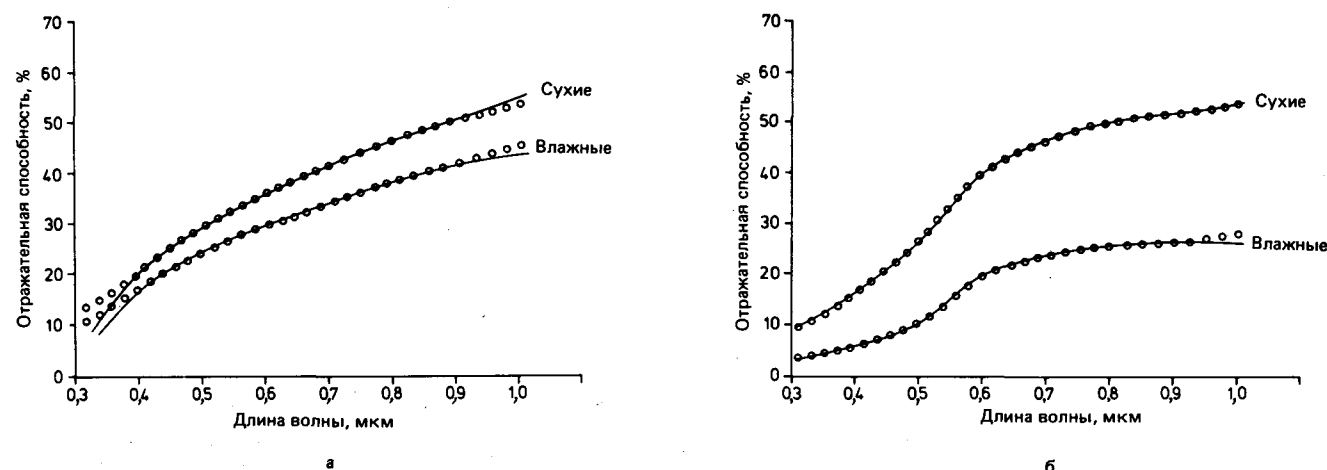


Рис. 21. Спектральная отражательная способность глинистых и песчаных почв в видимом и ближнем ИК-диапазонах [51].
а — глины, в 3 милях к востоку от Париса, шт. Миссури; б — пески, в 20 милях к северу от залива Кус, шт. Орегон.

зависимо от длины волны излучения (как это представлено на рис. 16–21) [34]. В сухих почвах пустоты между частицами почвы заполнены воздухом. Для отражения с поверхности сухих почв имеет значение коэффициент преломления на граничной поверхности воздух–частица. Увеличение влажности приводит к заполнению пор водой. Для отражательной способности поверхности влажной почвы важен показатель отражения на граничной поверхности вода–частица. Так как величина такого расчетного показателя на граничной поверхности вода–частица меньше, чем показателя поверхности воздух–частица, то доля отраженной энергии потока излучения с уменьшением содержания воды будет уменьшаться [112]. Влажные и мокрые почвы на многозональных изображениях всегда имеют более темные тона, чем аналогичные

сухие почвы. Эта взаимосвязь между содержанием воды в почве и ее спектральной яркостью используется в дистанционном зондировании. Участки сухих и влажных почв распознаются и по величине спектральной яркости. Из распределения сухих и влажных почв на местности можно по совокупности с другими критериями сделать выводы о свойствах нижнего почвенного слоя и его основания, или субстрата (пористости, проницаемости, прочности), и о возможности его инженерного использования, о его дренажировании, а также о содержании в нем грунтовых вод.

Влажность почвы в лаборатории можно определять по изменению ее спектральной яркости в полосах поглощения спектра около 1,4 и 1,9 мкм [328]. Так, на графиках изменения величины спектральной

яркости для мокрых почв эти полосы поглощения воды выражены резкими минимумами, а на аналогичных графиках для сухих почв минимумы только намечаются (рис. 16 и 17). В результате исследований было установлено, что на величину спектральной яркости влияют в первую очередь содержание гумуса (или органики), глинистой фракции, свободного железа, а также структура почвы. Был сделан вывод о том, что малое содержание воды в связанной форме (поровые воды в виде влажности) влияет на спектральную характеристику почвы, и на форму ее графика. Полосы поглощения энергии как связанной, так и несвязанной водой в диапазоне 1,44–1,9 мкм, могут быть использованы как характеристические только при лабораторных исследованиях, так как они совпадают с полосами поглощения солнечной энергии водяным паром атмосферы. Поэтому исследование влажности почв аэрокосмическими методами в этих зонах спектра остается в большой мере проблематичным [83].

Если изменения тональности изображения для отдельных типов почвы на аэрокосмических снимках связано со структурными и текстурными особенностями их поверхности, то исследования методом отношений, или частного [230], должны были выявить влияние, с одной стороны, структуры и, с другой — влажности почв на тональность фотообразов их поверхности при аэрокосмических съемках. С помощью постоянного тестового отношения каналов (красного к голубому) выявилась зависимость определенных тоновых отличий очень темных и светлых изображений участков почв от вариаций их влажности или структуры. Но количественной зависимости частных величин от влажности или структуры почв при этом установить не удалось. Это объясняется взаимоисключающим влиянием вышеперечисленных параметров на спектральные яркости поверхностей почв [328]. Еще следует упомянуть, что на влажность почвы сильно влияют метеорологические условия, а также некоторые другие параметры, не связанные с составом почвы: интенсивность солнечной радиации, ветер, осадки, величина испарения. Кроме того, влажность почв меняется в сельскохозяйственных районах в зависимости от обработки (пахота, боронование) и от величины дренажа, которая может быть различна для участков одной ландшафтной зоны. Эти вещества не обусловленные факторы обязательно учитывают при проведении дистанционных съемок.

К независимым от материала (или вещества) параметрам, которые определяют соотношения спектрального отражения и поглощения почвы, относятся: рельеф местности, топографическая позиция почвы, высота над уровнем моря, наклон поверхности почвы и ее ориентировка по отношению к Солнцу, вид и плотность растительности и всевозможные случайные факторы. Вариации этих параметров определяют, какое количество солнечной энергии

получит поверхность почвы в течение дня или определенного промежутка дневного времени.

Направление и наклон солнечных лучей к поверхности Земли меняются в течение дня и в зависимости от времени года; соответственно изменяются интенсивность потока солнечной энергии к поверхности Земли и величина спектрального сигнала почвы в определенной ландшафтной зоне. Наконец, ориентировка поверхности по отношению к съемочной аппаратуре, к сенсорам на борту самолета или спутника, и рассеяние света в атмосфере и на окружающих объектах, так же как и взаимодействие отраженного от поверхности почвы импульса потока энергии с атмосферой, оказывают свое влияние на величину спектрального сигнала, регистрируемого съемочной аппаратурой, и соответственно на яркость изображения объекта на аэрокосмическом снимке.

Рассмотрим результаты специальных фотометрических исследований спектральных характеристик 285 проб почвы из разных районов США [51]. Измерения проводились в лаборатории. Каждый раз измерялись спектральные яркости сухой и влажной пробы. Широта диапазона измерений составляла от 0,32 до 1 мкм, диаметр площадки измерения — около 3 см. Обработка методами математической статистики 160 графиков измерений (кривых спектрального отражения) показала, что по своей форме кривые разделяются на три основные группы по типам почв. Внутри этих групп графики спектрального отражения некоторых типов почв имеют общие тенденции, хотя интенсивность спектрального отражения и уровень мощности отраженного потока могут изменяться от одного типа почв к другому.

К первому типу [51] отнесены черноземы (рис. 18). Для графиков этого типа характерно, что наклон кривой от начала и до конца остается примерно одинаковым, хотя интенсивность спектрального отражения возрастает с длиной волны излучения. Вторым типом почв характеризуется довольно быстрым увеличением интенсивности отражения, особенно в интервале между 0,32 и 0,45 мкм, затем следует в характеризуемых частях спектра выполаживание при повышении положения кривой (рис. 19). Третий тип представлен двумя графиками интенсивности спектрального отражения красного известкового кварцевого песчаника и латеритов (рис. 20). На обоих графиках кривые интенсивности отражательной способности плавно поднимаются от ультрафиолетовой зоны спектра до 0,53 мкм, затем следует четкий перегиб и возрастание до 0,58 мкм, а далее не менее четкое выполаживание кривых. В интервале 0,62–0,74 мкм имеется заметное возрастание отражающей способности, после 0,74 мкм — ее некоторое снижение и далее возрастание интенсивности отражения с длиной волны. На некоторых других семействах кривых этого типа имеется локальный минимум примерно между 0,76 и 0,88 мкм, после которого наклон кривой

остается постоянным. Сравнение этого типа графиков с семейством кривых на рис. 16 выявляет общую тенденцию сходства их форм в интервале от 0,32 до 0,75 мкм, в первую очередь для сухих проб. Затем следует характерное снижение спектральной яркости в интервале от 0,76 до 0,88 мкм и новое возрастание ее в ближнем ИК-диапазоне. Это сравнение показывает, как важны спектральные съемки в узких зонах спектра в ближнем и, как уже упоминалось, в среднем инфракрасных диапазонах. На другом графике (рис. 20) кривые отражательной способности почв кварцевого песчаника и латерита различаются еще сильнее. Здесь же показаны характерные полосы поглощения глинистых минералов и слюд, которые описаны в разд. 3.2.2. В ультрафиолетовой и видимой частях спектра характеристики обоих видов почв едва различаются. Дифференциация их спектральных яркостей усиливается на числовых изображениях, если взять данные по нескольким зонам спектра. Численное выражение различия в положении (и конфигурации) кривых первого и второго типов можно получить, если пропорции интенсивности отражения, измеренные в зонах 0,76 и 0,50 мкм по графикам сухих и влажных почв обоих видов, выразить в виде разности первых производных. Полученное по 100 графикам второго типа минимальное значение отношения для сухих почв равно 1,2 и максимальное 2,8, соответственно среднее – 2,0. Из анализа графиков третьего типа (33 кривые) получено наименьшее значение 2,8 и наибольшее 7,3; среднее равно 4,6. Для разделения обоих типов спектральных кривых важно, что наименьшее значение для кривых третьего типа выше, чем наибольшее значение частного для семейства второго типа.

При анализе спектральных кривых влажных или мокрых проб наименьшее значение частного для второго типа равнялось 1,2, и наибольшее 3,7, а среднее 2,4. Для третьего типа эти значения соответственно равны 3,8; 8,2 и 5,3.

И опять, наименьшие величины отношений (частных) для третьего типа графиков выше, чем самые большие для второго типа. Однако эти основывающиеся на лабораторных измерениях величины нельзя прямо экстраполировать на полевые спектральные съемки почв или съемки с самолета (спутника). Они только показали интересное начало использования данных многозонального сканирования для картирования почв. Статистический анализ 200 спектральных кривых позволил предположить [51], что спектральные характеристики большого числа типов почв фиксируются при съемках ландшафтов в пяти интервалах длин волн, и, следовательно, характерные формы спектральных кривых всех почв могут быть получены из данных этих съемок в пяти «критических» каналах: 0,44; 0,54; 0,64; 0,74 и 0,86 мкм (рис. 22). Значения ближнего и среднего инфракрасных диапазонов для распознавания почв пояснены ранее (рис. 16 и 17).

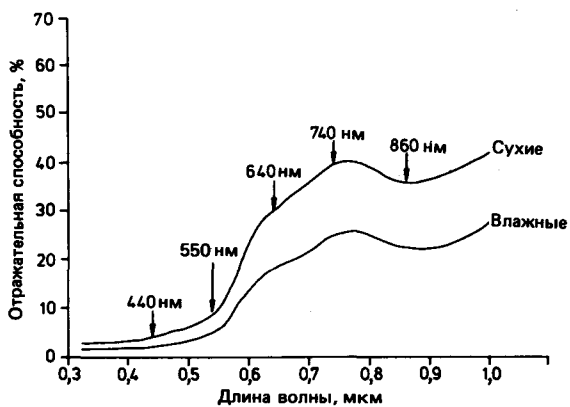


Рис. 22. Критические зоны спектра излучения для картирования почв (почвы шт. Виргиния) [51].

В общем этим показывается, что значение числовых (кодированных по частному) изображений ограничивается бивариантными случаями; ставится под сомнение простая статистика в экспериментах. Демонстрационную силу имеет только многовариантный дискриминантный анализ.

Например, специальными исследованиями было показано [155], что классификация почв на основе проведенных многозональных съемок едва ли возможна. При этом измерялись спектральные характеристики некоторых типов на четырех тестовых участках в шт. Индиана, США. Съемки проводились 12-канальным сканирующим спектрометром с высоты 1300 м. Данные съемки обрабатывались на компьютере методами кластерного анализа и отношений, или частных (методом вычитания производных). В задачу исследований входило выяснение зависимости измерений спектральных характеристик отдельных почв от их дренажных свойств (влажности), от доли в них гумуса и от цвета почв. Изменения этих параметров должны были быть введены в составленную для машинной обработки данных многозональной съемки программу, по которой осуществляется картирование почв. Результаты эксперимента для отдельных участков были положительными. Но возникло затруднение, как полученные для этих участков спектральные характеристики определенных типов почв ввести в качестве основы (или критерия) для машинного, автоматизированного картирования других районов, более удаленных от тестовых участков, т.е. экстраполировать результаты измерений на другие районы. К факторам, затрудняющим экстраполяцию, относятся: различия в положении Солнца (освещенности) при съемке отдельных тестовых участков, различия в выровненности поверхности однотипных почв на разных тестовых участках и различия во влажности и структуре почв. При этом подчеркивалось, что каждый из типов почв по своему определению, безусловно, обладает интервалом из-

менений свойств поверхности, часто отражающих способы возделывания или культивации почв. Поэтому заранее в качестве условия полагалось, что спектральные характеристики одинаковых типов почв будут варьировать. Действительно, на большом количестве почвенных проб было установлено [155], что спектральные характеристики почв одного типа могут меняться сильнее, чем характеристики почв двух разных типов. Несмотря на это, в большинстве случаев оказалось возможным участки с различными свойствами поверхности и состоянием почвы (структурой, влажностью) локализовать по данным многозональной съемки, ограничить их и формально классифицировать по спектральным характеристикам. Наоборот, как правило, оказалось невозможным идентифицировать выделенные по спектральным характеристикам и ограниченные на снимках участки, т.е. фотообразы почв, с определенными типами почв, а также по спектральным характеристикам распознать разновидности одного типа почв. Поэтому необходимо интегрально комбинировать данные спектральных съемок с разных расстояний – наземных, воздушных и космических – с результатами полевых исследований.

3.3.2. О собственном излучении почв. Спектральное излучение (эмиссия) почв в тепловом инфракрасном диапазоне определяется температурой их поверхности, соответственно колебаниями температуры в течение дня и ночи. При этом почвы с разной излучательной способностью имеют соответственно разную температуру излучения, которая может регистрироваться дистанционными методами. Здесь необходимо подчеркнуть, что температура почв не всегда соответствует температуре на ее поверхности, так как в большинстве случаев коэффициент излучения естественных поверхностей в тепловом диапазоне меньше, чем он на самом деле. Для того чтобы получить радиационные (тепловые) температуры объектов снимаемой местности, необходимо провести радиометрическую коррекцию.

На температурные характеристики почв влияет ряд параметров, как зависимых, так и не зависимых от свойств почвы. К зависимым параметрам относятся: цвет почвы; состав и объемная доля минералов в ее составе; размер частиц почвы; содержание органического вещества; пористость и соответственно проницаемость; влажность и соответственно водонасыщение. В зависимости от этих параметров меняются: альбедо (отношение отраженного потока солнечной энергии к поглощенному); удельная теплоемкость C ; теплопроводность λ ; температуропроводность a и теплоперенос P . Эти физические свойства определяют: тепловой поток в почве; теплообмен между почвой и пограничным слоем воздуха над ее поверхностью; амплитуду ежедневных температурных колебаний и в связи с этим и характеристику спект-

рального излучения и соответственно температуру излучения (радиационную температуру) почв. Различия в радиационных температурах почв и изменения их значений могут быть использованы для геологического дистанционного зондирования.

К параметрам, не связанным с природой объекта, но влияющим на температуру поверхности почв и их температурный профиль, относятся: интенсивность и состав спектра направленного потока солнечного излучения и рассеянного, диффузного свечения неба; топографическая позиция исследуемой поверхности почвы в ландшафте местности (рельеф, высота над уровнем моря), ее наклон; ориентировка по отношению к падению солнечных лучей; вид и густота растительности; дренаж и, прежде всего, метеорологические факторы, которые все без исключения в первую очередь влияют на возможность регистрации спектрального излучения (время выпадения осадков, количество их, ветер, дождливые и сухие периоды, туманообразование, микроклимат). В зависимости от колебаний всех этих параметров меняются дневные и годовые конечные величины испарения почвы, которые влияют на охлаждение поверхности почвы. Среди результатов некоторых ранних исследований заслуживают внимания проблемы тепловых свойств и спектральных характеристик почв [244, 245]. Нижеприведенные графики и их объяснение почти без изменений взяты из этих работ.

Особое значение для тепловых (температурных) характеристик почв имеет почвенный тепловой поток. Его значение входит вышеуказанными компонентами в уравнение теплового баланса и определяется тепловыми свойствами почвы, которые тоже обсуждались выше (разд. 2.3). В табл. 2 представлены тепловые свойства важнейших составных частей почвы при температуре 20 °С и давлении 1 бар. Из таблицы становится ясно, что главные компоненты почвы (кварцевый песок, глинистые минералы, органическое вещество, вода и воздух) имеют различные тепловые свойства. Так как тепловые свойства почвы скла-

Таблица 2. Тепловые свойства важнейших составных частей почвы [244]

Вещество	Удельная теплоемкость C , $\text{Дж} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	Теплопроводность λ , $\text{Дж} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Температуропроводность a , $10^{-3} \text{см}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Кварц	1,92	83	43
Минералы почвы (среднее значение)	1,92	29	15
Органическое вещество (среднее значение)	1,92	2,50	1,0
Вода	4,18	5,93	1,42
Воздух	0,0012	0,259	0,21
Лед (0 °С)	1,88	21	11,5

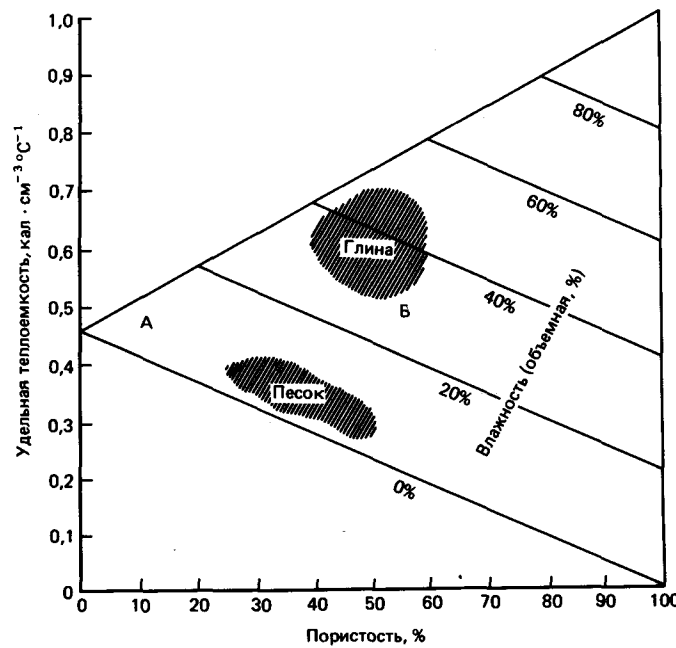


Рис. 23. Удельная теплоемкость почв и горных пород с различной пористостью и влажностью [244]. (1 кал = 4,1868 Дж).

дываются из термических свойств ее компонентов, вид связи и, конечно, содержание отдельных компонентов в почве в значительной мере определяют ее температурную характеристику. При этом температурные свойства почвы могут менять не только главные компоненты, но и другие частные взаимосвязанные физические параметры.

Собственная теплоемкость (коэффициент теплоемкости) C получается аддитивно из объемного содержания и коэффициентов удельной теплоемкости отдельных составных частей почвы. Соответствующие связи между удельной теплоемкостью, общим объемом пор и влажностью для проб почв и горных пород без органического вещества показаны на рис. 23. Основные области влажности и объема пор для песчаных и глинистых почв заштрихованы. Из рисунка видно, что удельная теплоемкость при заполненных воздухом порах уменьшается с увеличением объема пор, а при заполнении их водой (влажные почвы) увеличивается. Можно показать (рис. 23), что определенной удельной теплоемкостью, например $0,5 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ($2,09 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$), обладают разные типы почв. В нашем примере это водонасыщенный песчаник с пористостью 8% (точка А) и глины с объемом пор 50% и водонасыщенностью 27% (точка В).

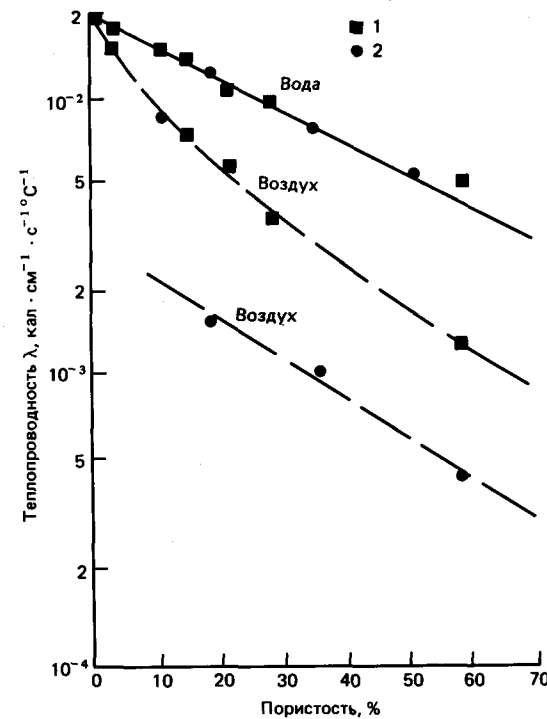


Рис. 24. Теплопроводность как функция пористости при установленных пределах температуры и заполнения пор [244]. 1 — песчаник; 2 — песок.

Теплопроводность (λ) почв определяется преобладающим составом минералов, размером зерен, их формой, объемным содержанием отдельных компонентов, степенью цементированности, плотностью грунта, структурой, пористостью и влажностью. График на рис. 24 показывает разницу между теплопроводностью песка и песчаника с водонасыщенными (заполненными водой) порами (верхняя кривая) и сухого песка (нижняя кривая). Теплопроводность уменьшается для всех трех видов материала с увеличением пористости. Графики, характеризующие водонасыщенные песок и песчаник, различаются слабо, а характеризующие сухой песок и песчаник — сильно.

Теплопроводность трех видов разных материалов (рис. 25) изменяется в зависимости от их влажности нелинейно. При небольшой влажности значение теплопроводности быстро возрастает, но при высокой влажности она увеличивается медленно. Тесная связь между влагонасыщенностью и теплопроводностью устанавливается только для какого-либо одного типа почв с постоянной пористостью (см. на рис. 25 кривую, характеризующую глины с постоянной пористостью до 42%). На теплопроводность торфа влияет его высокая пористость, прежде всего общее количество пор. В целом низкая теплопроводность торфа зависит от теплопроводности органического ве-

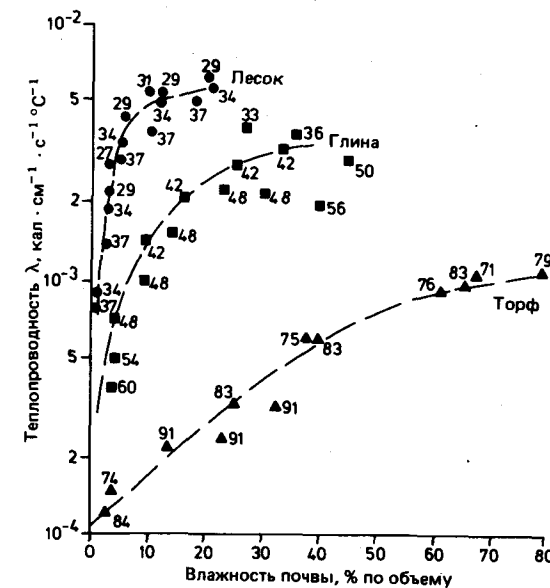


Рис. 25. Теплопроводность песка, глины и торфа как функция влажности почв. Цифры показывают общую пористость [244].

щества, которая имеет значение, среднее между теплопроводностью воды и воздуха.

Следующий график (рис. 26) показывает, что теплопроводность осадков с пористостью 36–38% очень незначительно возрастает, если повышается теплопроводность минералов [331]. Влияние минерального состава почв (соответственно термических свойств минералов) на ее теплопроводность меньше, чем влияние пористости и влагонасыщенности.

Амплитуда ежедневных температурных колебаний почв определяется теплопереносом. Как и для других тепловых свойств почв, в ежедневных колебаниях температуры заметную роль играют общий объем пор, содержание пустот и влажность. Из графика на рис. 27 видно, что теплоперенос с увеличением пористости уменьшается, причем для влажных песков и песчаников незначительно. Для песчаника и песка с сухими, заполненными воздухом порами уменьшение теплопереноса при увеличении пористости заметно возрастает. В целом при уменьшающемся теплопереносе амплитуда суточных колебаний температуры почв увеличивается. Добавим к этому, что теплоперенос почв рассчитывается как корень квадратный из произведения удельной теплоемкости и теплопроводности.

Теплоперенос непосредственно увеличивается с увеличением влажности почв (рис. 28). Из анализа графиков теплопереноса (рис. 27 и 28) выводится очевидная зависимость, которая выражается в следующем: только для влагонасыщенных горных пород или почв с незначительной (малой) пористостью

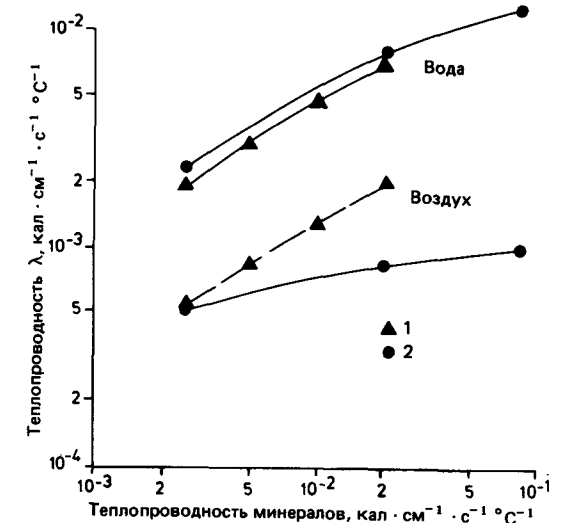


Рис. 26. Зависимость между теплопроводностью минералов и горных пород и почв, сложенных этими минералами [244]. 1 — горные породы; 2 — почвы.

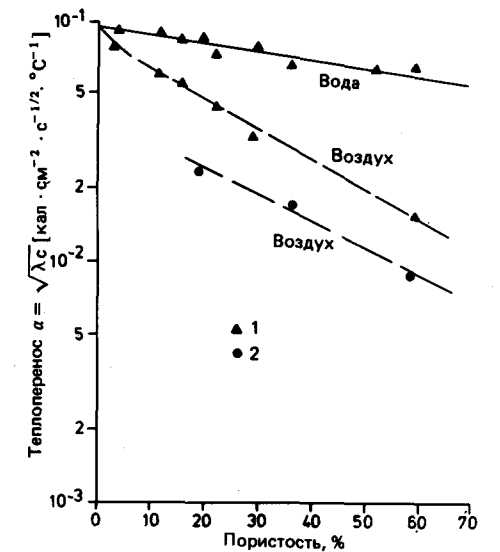


Рис. 27. Теплоперенос песка и песчаника как функция пористости (поры заполнены и пределы температур установлены) [244]. 1 — песчаник; 2 — песок.

можно делать выводы об их минеральном составе по данным тепловых съемок [245]. Во всех других случаях проявляется влияние пористости и влажности на температурные, соответственно излучательные, характеристики почв. Среди почв одного типа повышение теплопереноса с увеличением влажности наиболее четко выражено при небольшой влажности как

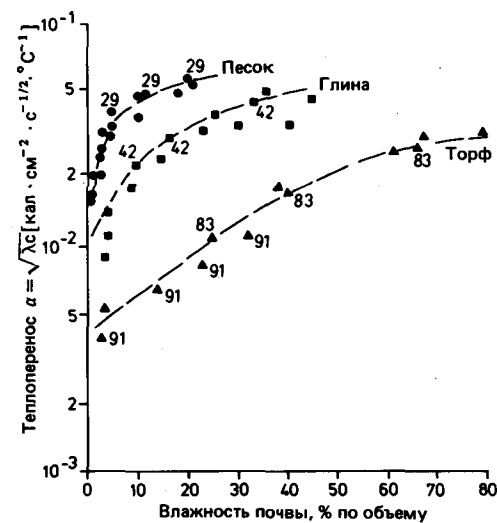


Рис. 28. Теплоперенос песка, глины и торфа как функция их влажности. Цифрами обозначено значение общей пористости [244].

результат сильных изменений температуры на поверхности сухих почв. Торф имеет меньшую величину теплопереноса, чем глины и песчанники. При определенных условиях тот же торф может иметь днем более высокую температуру поверхности, чем глины и песчанники. Постулат о том, что холодное сравнимо с влажным, а теплое с сухим, справедлив не в каждом случае.

Отношение амплитуд температуры различных почв меньше, чем отношение величин их теплопереноса [244, 245]. Повышенная температура поверхности означает сильный теплообмен между почвой и пограничным слоем воздуха и сильную эмиссию в тепловом инфракрасном диапазоне, т.е. сравнительно небольшой тепловой поток в почвах днем. Очень существенными в связи с этим оказываются свойства поверхности почвы и метеорологические условия.

Температура поверхности почв не всегда зависит от термических свойств верхнего слоя почвы [328]. До определенного предела играет роль отношение температур нижележащих слоев почвы или горной породы. Влияние нижних слоев почвы пренебрежимо мало тогда, когда мощность верхнего почвенного слоя больше, чем трехкратная величина глубины температурных колебаний (угасания температур). Иначе говоря, влияние нижних почвенных слоев приобретает значение тогда, когда мощность верхнего слоя почвы меньше, чем глубина температурных колебаний.

Глубина затухания температурных колебаний в почве $D = \sqrt{2K/\omega}$ определяется по коэффициенту теплопроводности почвы $K = \lambda/C$ и периоду ω . Зависимость температуропроводности и глубины затухания колебания температур показана на двух гра-

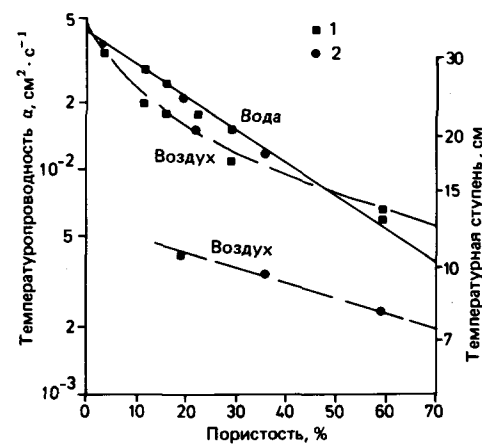


Рис. 29. Взаимосвязь температуропроводности, пористости и глубины затухания колебаний температуры (температурной ступени) в суточном ходе температур на примере песчанника и песка [244].
1 — песчанник; 2 — песок.

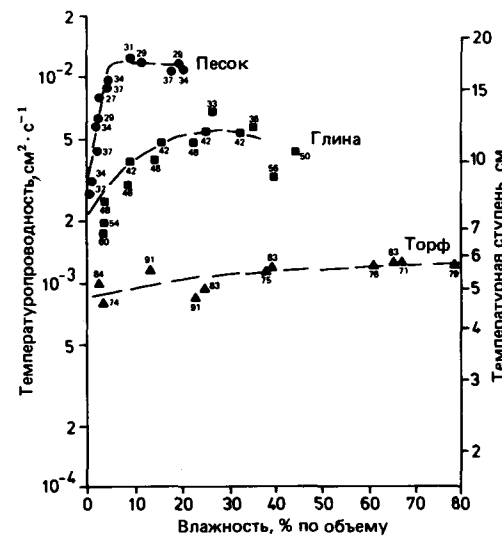


Рис. 30. Взаимосвязь температуропроводности, влажности и глубины затухания колебаний температуры в суточном ходе температур на примере песка, глины и торфа. Цифрами обозначено значение общей пористости [244].

фиках (рис. 29, 30), построенных для температурных колебаний с периодом 24 ч, т.е. для суточного температурного хода. В большинстве случаев величина глубины затухания меньше 15–20 см; ее значение больше 30 см возможно только для консолидированных, скальных горных пород с незначительной пористостью [244].

На одном из графиков (рис. 29) видно уменьше-

ние температуропроводности с увеличением пористости песка и песчанника в сухом и влагонасыщенном состоянии, т.е. с порами, заполненными воздухом, и с порами, заполненными водой. Как видно из сопоставления двух разных графиков (рис. 24 и 29), для песка и рыхлого песчанника с влагонасыщенными порами значения тепловых свойств почти одинаковы. Сухой песчанник имеет ненамного меньшую температуропроводность, которая при большой пористости может быть выше его температуропроводности во влагонасыщенном состоянии. Сухой рыхлый песок имеет существенно более низкие ее значения. График на рис. 30 характеризует зависимость температуропроводности от влажности почвы. Температуропроводность песка повышается с увеличением влагоудержания, при влагонасыщенности около 10% остается примерно одинаковой, а затем снова начинает возрастать. Итак, увеличивающаяся влажность почв только незначительно повышает температуропроводность, в то время как величина удельной теплоемкости почв линейно возрастает. У глины температуропроводность с увеличением влагонасыщенности изменяется не так сильно. Температуропроводность торфа, величина которой занимает промежуточное положение между ее величинами для глины и песка, возрастает при увеличении влажности очень незначительно. В принципе это указывает на влияние размера пор и их неразрывности на температуропроводность почв, так как они влияют на «главное сечение» водяной пленки. При очень малой влажности вода входит в щели между зернами песчанника, что приводит к поразительному увеличению теплопроводности и увеличению измеряемой температуры, в то время как увеличение удельной теплоемкости практически пренебрежимо мало.

Экспериментальные данные Квиля [244] о глубине затухания суточных температурных колебаний имеют значение для гидрогеологических изысканий как попытка сделать заключение по поверхностной температуре почвы о глубине залегания зеркала грунтовых вод.

Так, например, был проведен эксперимент по определению изменений радиационной температуры или величины излучения галечника в зависимости от уровня грунтовых вод [244]. Почвенные измерения проводились ясным безветренным днем инфракрасным радиометром два раза — в 10 ч 00 мин и в 12 ч 45 мин (рис. 31). Радиационная температура сухого галечника (при стоянии уровня грунтовых вод на 20 см ниже поверхности) была выше, чем влажного и мокрого галечника (уровень грунтовых вод — 0 см). Различия в их радиационных температурах определяется теплопереносом, который у сухого галечника ниже. По этой причине замеренная температура поверхности сухого галечника за период между двумя измерениями изменилась в два раза сильнее, чем мокрого галечника, а именно на 6 и 3°C. Более

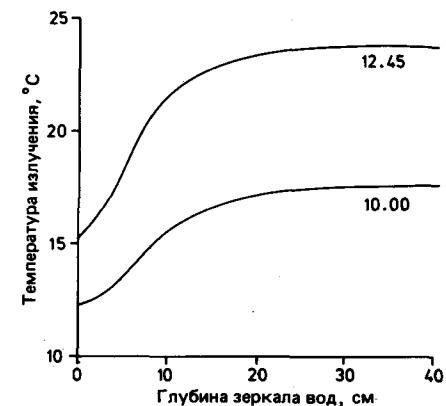


Рис. 31. Температура излучения и глубина зеркала грунтовых вод в галечниках при ясном небе в первой половине дня (10 ч 00 мин) и в полдень (12 ч 45 мин) [244]. Цифры на кривых — время суток.

сильное испарение с мокрых галечников дополнительно снижало величину температурных колебаний между этими двумя циклами измерений. Влиянием грунтовых вод на температуру поверхности галечников можно пренебречь, если зеркало грунтовых вод находится глубже 20 см от поверхности. Это выражается в незначительной глубине затухания температурных колебаний сухого галечника, для которого предполагались только очень слабые изменения температуры в основании почвенного слоя.

Рассмотрим результаты еще одного эксперимента [211], которые указывают на значение других факторов для съемки и почвоведческой расшифровки данных, получаемых тепловым сканером.

Теплоперенос в почве на глубину, иначе говоря, температурный ход в почвенном профиле, привнос и отдача тепла — процессы комплексные, так как температуропроводность и теплопроводность почв, как уже упоминалось выше, в общем определяются влажностью почвы. Но она тоже может изменяться со временем и по глубине. Следовательно, можно предположить, что летом температурные свойства почвы прежде всего будут определяться термическими свойствами верхнего слоя почвы, который может быть плохим или хорошим проводником тепла. Весной глинистые почвы в принципе холоднее песчанистых и песчаных почв, а осенью теплее, так как глинистые и песчаные почвы обладают различной температурной инерцией. В принципе здесь те же тенденции, что и при рассмотренных выше суточных колебаниях температуры, или суточном температурном ходе.

Особое внимание при выборе времени полета для тепловой сканерной съемки следует обращать на следующие факторы [211]. Днем изменения температуры почвы и теплообмен между почвой и околопочвенным слоем воздуха следуют изменениям мощности потока солнечного излучения. На восходе

и на заходе солнца теплообмен почти равный. После захода солнца тепловой поток в почве направлен вверх (см. рис. 56). Тепловой поток варьирует в зависимости от свойств почвы (как теплового аккумулятора), прежде всего от теплоемкости и теплопроводности. Для влажных почв с повышенной тепловой инерцией амплитуда дневных колебаний температур ниже, чем для сухих почв.

В годовом процессе теплообмена сильнейшая теплоотдача («съем тепла») в почве наблюдается весной и ранним летом, а также поздней осенью. Поэтому поздняя осень и ранняя зима скорее подходят для проведения тепловых сканерных съемок, если речь идет о съемке районов с различными свойствами почв или о качественной съемке твердого компонента почвы, так как в это время влажность почв более или менее одинакова на значительных площадях многих районов. Напротив, для местности, где однотипные почвы обнажены на значительных площадях, для получения информации о водном балансе района и условиях дренажа необходимо тепловые сканерные съемки проводить в сжатые сроки после наиболее интенсивного выпадения осадков. Различное высыхание лучше и хуже дренируемых участков, которые нередко возникают при весеннем потеплении, приводит к разнице температур на их поверхности и соответственно к различию радиационных температур, которые регистрируются тепловым сканером и могут быть использованы для выделения таких участков (лучше или хуже дренируемых) на тепловых изображениях местности, так называемых радиационных, или тепловых, снимках.

Предыдущие выводы неизбежно обращают наше внимание, с одной стороны, на комплексное влияние минерального состава, размера частиц, объема пор, цементации и влажности на температурные и излучательные характеристики почв и, с другой стороны, указывают на суточные и годовые изменения температур на поверхности почв, которые зависят от изменяющихся внешних условий. Так как температура и, следовательно, излучательная способность почв могут так сильно изменяться в пространстве и во времени, то не следует ожидать, что качественное обсуждение характеристик почв отснятой территории всегда возможно при обработке данных тепловой сканерной съемки. Конечно, на радиационных тепловых снимках легко выделить участки изображения с различной радиационной температурой. Качественное и в некоторых случаях количественное заключение о содержании твердых компонентов почвы, о различии влажности почв и об условиях дренирования в лучшем случае можно ожидать при сопоставимой обработке данных многозонального сканирования, т.е. таких данных, которые получены съемкой в разное время суток и года, периодически или при определенных внешних условиях. Здесь особое значение имеет качественное сопоставление суточных и

годовых колебаний температуры почвы. Суточные и годовые колебания представляют данные для определения теплопереноса почв, который, со своей стороны, сильно вещественно обусловлен. Тепловая инерция используется при этом как индикатор определенных свойств почвы: по ней судят о свойствах почвы. Для корреляции разновременных периодических результатов сканерных съемок, которые в большинстве случаев записываются на магнитную ленту, вводятся методы числовой записи и обработки данных. При этом необходимо использовать в комплексной обработке помимо данных тепловой съемки данные многозональной съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах и по мере возможности в первую очередь результаты съемок в среднем (отраженном) инфракрасном диапазоне. Корреляция температур поверхности, соответственно величин спектрального излучения и спектральных измерений в других спектральных диапазонах (по возможности одного времени съемки) может облегчить идентификацию определенных свойств почв и сделать надежной обработку. Автоматизированная обработка на компьютере по специальным программам результатов съемки районов с почвами одного или разных типов (соответственно свойствами почв) позволяет получить картину их распространения. Результаты таких исследований изложены в многочисленных работах [9, 17, 154, 155, 156, 199, 204, 209, 229, 286, 287, 308, 330].

3.4. Спектральные характеристики растительности

3.4.1. Введение. Значительная часть суши покрыта растительностью. Большей частью геологическое картирование и другие исследования вынужденно проводятся в районах, имеющих растительный покров. Часто в таких областях геологическое картирование просто невозможно провести без съемки и анализа региональных и локальных сообществ растительности. Для геологических аспектов имеют значение пространственные изменения в типе, составе и густоте, а также в высоте растительности, так как, прежде всего в районах, где отсутствует культурное земледелие, существует опытно установленная тесная зависимость между растительностью, почвенным профилем и геологией субстрата. Растительность в этом случае может служить прямым индикатором литофациальных и структурных разновидностей геологического субстрата или основания. Для постановки геологических проблем имеет значение даже локализация участков ландшафта, в которых растения находятся в неблагоприятных условиях, например поднявшегося или опустившегося уровня грунтовых вод, аномальной концентрации солей или металлов (в водоемах и сточных водах) или аномального соотношения их в профиле почвы, что может указывать на

расположение близ поверхности выходов окисленных сульфидных руд или других месторождений.

Различия в растительности вызывают конвективное движение воздуха, а на спектральных изображениях многозональных съемочных систем приводят к изменениям в зависимости от свойств растительности, тональности и текстуры образов. При геологическом дешифрировании панхроматических черно-белых и цветных аэрофотоснимков, а также цветных инфракрасных снимков работают почти всегда с относительными тоновыми и текстурными различиями соседних участков, покрытых растительностью. С введением многозональных способов съемки, которые предполагают одновременную съемку того же района в разных спектральных диапазонах, стало возможным по зависящим от длины волны излучения отражательным, поглощательным и тепловым характеристикам растений (прежде всего их сообществ) выделять луговые травы, группы кустарников или леса более точно, чем на черно-белых и даже на цветных инфракрасных аэрофотоснимках. В настоящее время их изучают с помощью числовых методов записи и обработки спектральных и многозональных снимков, которые представляют различия спектральных характеристик растительных сообществ в виде изображения с увеличенной контрастностью. Здесь в первую очередь интересны такие методы, которые позволяют корреляцию и комбинацию спектральных данных по двум или более каналам.

Для того чтобы выбрать для съемок закрытых растениями районов необходимые спектральные ка-

налы и по зарегистрированной датчиками спектральной интенсивности сделать вывод об однородности или смешанном видовом составе растительности или об аномальных условиях их произрастания, необходимо пользователю – интерпретатору данных дистанционного зондирования – иметь основные представления о физических и физиологических причинах различий спектральных характеристик растений и их сообществ. В первую очередь необходимо знать внешние факторы, из которых складывается взаимодействие падающего потока солнечного излучения и растения и которые влияют на спектральный сигнал растений или их сообществ. В последние годы в аспекте дистанционного зондирования спектральные характеристики растительности изучались многими рабочими группами как в лабораториях, так и на местности. Излагаемые ниже сведения почерпнуты из опубликованных результатов исследований [75, 76, 77, 112, 143, 137, 138, 211, 247].

3.4.2. Отражательные, поглощательные и пропускающие свойства листьев. Спектральные характеристики растений определяются в основном способностью их листья отражать, поглощать и пропускать солнечную энергию. Поверхность листа почти прозрачна для солнечного излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Только пренебрежимо малая часть потока солнечной энергии отражается от поверхности листьев. Солнечные лучи проходят через кутикулу и эпидермис внутрь листа (рис. 32). Здесь в мякоти листа (мезофилле) внутри основной ее ткани – паренхимы – на границе клеток

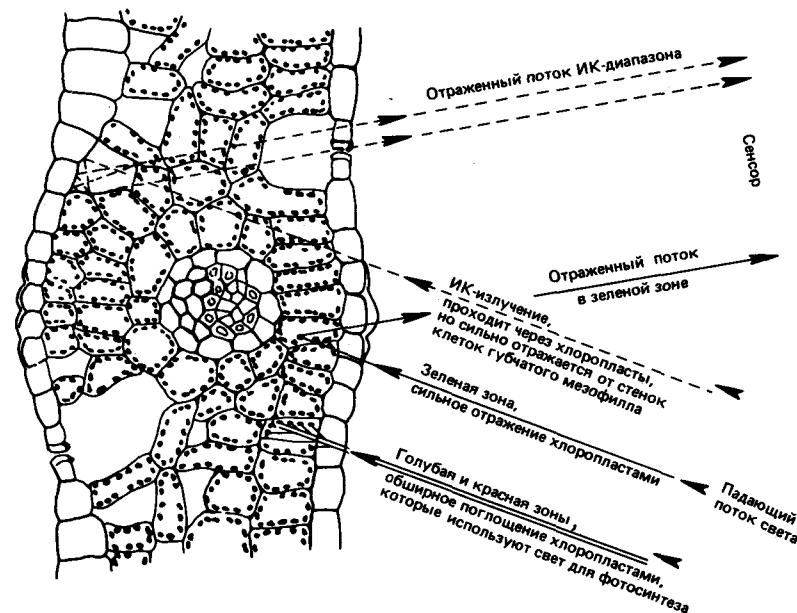


Рис. 32. Отражательная, поглощательная и пропускающая способности живого листа для падающего потока излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов [4].

двух ее слоев: многослойной плотной перенхимы, содержащей хлорофилл (так называемой хлоренхимы), и губчатой паренхимы, содержащей вакуоли воздуха (так называемой аэренхимы), — происходит такое взаимодействие потока солнечной энергии с тканью листа, которое определяет отражательные и абсорбционные (поглощательные) свойства листа того или иного вида растений. Обогащенная хлоропластами (несущими окраску) многослойная паренхима состоит из одного или более слоев перпендикулярных к поверхности листа клеток-ячеек. Это собственно ассимилирующая ткань листа. К ней присоединяется (примыкает) губчатая паренхима, которая характеризуется неравномерными, бедными хлоропластами клетками неправильной формы и большими межклетниками (пространство между клетками), заполненными воздухом. Нижняя сторона листа ограничена эпидермисом, в котором рассеяны многочисленные раскрывающиеся устьичные щели, которые сообщаются с межклетниками мезофилла. Благодаря этим щелевидным клеткам-каналам осуществляются испарение растений, их дыхание и питание, т.е. поглощение кислорода и выделение углекислого газа при дыхании, и поглощение двуокси углерода при питании.

У листьев некоторых растений такие устьичные щели находятся и на верхней стороне листа. В общем листья разных растений различаются размерами, формой, свойствами своей поверхности и структурой мезофилла.

Отражение, поглощение и пропускание падающих солнечных лучей зависят от длины волны света. Определенная часть падающего потока излучения поглощается листом, другая отражается, а часть проходит сквозь него.

Рассмотрим типичный энергетический спектр здоровых зеленых листьев в диапазоне излучения 0,4–2,6 мкм (рис. 33). В интервале длин волн 0,4–0,7 мкм световой поток проходит в мезофилл листа и в содержащую пигмент хлоренхиму, в которой поглощается (рис. 32). Поглощение солнечных лучей длиной около 0,45 мкм дает необходимую для фотосинтеза энергию. В первую очередь процесс фотосинтеза обеспечивается хлорофиллом и другими пигментами, содержащимися в мезофилле. Хлорофилл составляет в высших растениях наряду с каротином и ксантофиллом большую часть пигмента листа (до 65%). Он концентрируется в верхней части мякоти листа в многослойной паренхиме. В расположенной ниже губчатой паренхиме его содержание незначительно. Хлорофиллом поглощаются солнечные лучи в основном голубой (0,4–0,48 мкм) и красной (0,6–0,7 мкм) частей спектра. Зеленые лучи, наоборот, отражаются. Это оптическое взаимодействие обуславливает зеленый цвет свежей здоровой листовой и небольшой максимум в энергетическом спектре (см. кривую отражения на рис. 33).

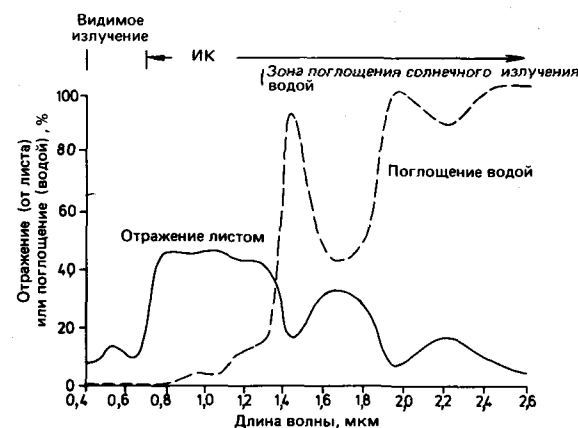


Рис. 33. Спектральная отражательная способность здоровых зеленых листьев и спектральная поглотительная способность воды [112].

В интервале длин волн 0,7–1,3 мкм большая часть потока солнечной энергии отражается от листа. В этом диапазоне отражение растениями наиболее сильно, величина его в зависимости от вида растительности составляет от 30 до 70% всей энергии падающего потока излучения [13]. В той части спектра, где кривая отражения имеет постоянно высокое положение, пигментарная система растения теряет свою способность поглощать фотоны. Поверхность листа и хлорофилл его мякоти прозрачны для инфракрасных лучей. В ближнем инфракрасном диапазоне отражательная способность листа определяется внутренней клеточной структурой его мягкой ткани. Важны число или количество, размер и форма клеток в мякоти листа, так как этими параметрами определяется число поверхностей и соответственно общая площадь, на которой совершаются процессы отражения и поглощения. При вхождении в мезофилл и при пропускании им инфракрасного излучения с длиной волны от 0,7 до 1,3 мкм стенки клеток мягкой ткани листа отражают и рассеивают поток излучения. Этот процесс совершается благодаря изменению коэффициента преломления на мембранах, стенках клеток и фотоплазме (хлоропластах). Уже многослойная паренхима имеет огромную площадь клеточных стенок, на которых происходит внутреннее отражение и рассеянные лучи могут вновь отражаться и преломляться. Процесс многократного отражения, преломления и поглощения энергии светового луча намного сильнее в губчатой паренхиме (аэренхиме), где коэффициенты преломления у заполненных воздухом межклеточных промежутков (1,0) и у собственно клеток целлюлозы, содержащих воду (1,4), заметно различаются. Подчеркнем, что именно количество, точнее общая площадь, граничных поверхностей воздух–стенка клетки, а не объем воздушного межклеточного пространства является

важнейшим параметром отражательной способности листа в ближнем инфракрасном диапазоне [143]. При этом многослойная паренхима влияет на внутреннее рассеяние инфракрасного излучения точно так же, как губчатая. Расположение воздушных межклетников не играет значительной роли, так как проникающее излучение после прохождения кутикулы, эпидермиса и хлоренхимы уже имеет диффузный характер. Многократно повторенные отражение и рассеяние света в мякоти листа являются причиной сильного отражения солнечного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

В более длинноволновой части инфракрасного диапазона 1,3–2,5 мкм кривая спектрального отражения здоровой зеленой листовой снова снижается (рис. 33). В этой части спектра поток солнечной энергии поглощается содержащей воду мягкой тканью листа. Кривая имеет два характерных минимума — полосы поглощения около 1,45 и 1,96 мкм. Сравнение спектральных характеристик [112] здоровой зеленой листовой и воды показало, что полосы поглощения спектра листа и чистой воды совпадают. Графики спектров листьев в этом интервале длин волн конформны графикам слоя воды такой же толщины (см. рис. 41). Изучение зависимости между содержанием воды и спектральным отражением на примере листьев маиса (рис. 34), показало, что падающий поток энергии при незначительной влажности листьев (в первую очередь в среднем отраженном диапазоне инфракрасного излучения) отражается наиболее сильно [115].

Выше рассмотренные закономерности распределения потока солнечной энергии в спектре растения проявляются как в отдельно взятом листе, так и в листе различных видов растений и спектральных характеристиках растительного покрова в целом. И для съемки, и для обработки спектральных данных

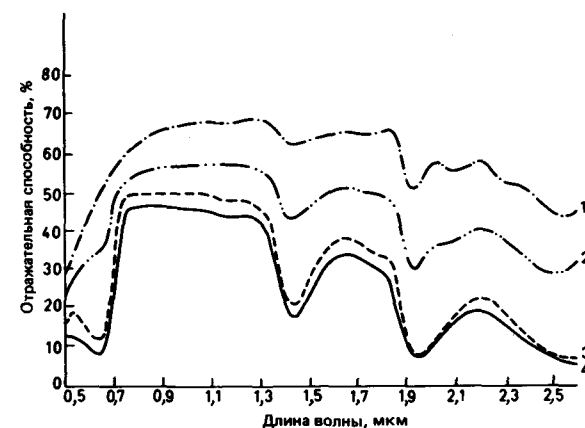


Рис. 34. Спектральная отражательная способность листьев с различным содержанием воды (кукурузные листья) [115]: 1 — <40%; 2 — 40–54%; 3 — 54–66%; 4 — >66%.

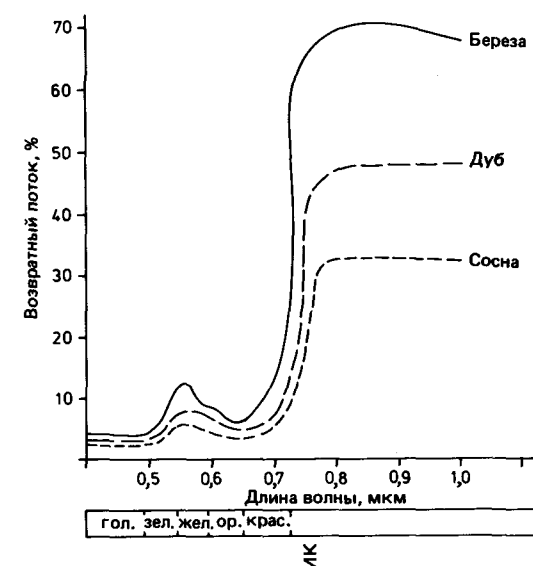


Рис. 35. Спектральная отражательная способность сосны, дуба и березы (по Бакстрёму и Виландеру, см. [40]).

дистанционного зондирования существенно то, что графики спектрального отражения отдельных типов растительности и различных растительных сообществ имеют свои особенности в определенном интервале длин волн как в положении пика спектра, так и в конфигурации кривой спектрального отражения (рис. 35). Эти характерные особенности спектрального отражения позволяют проводить дешифрирование разных видов растительности по данным дистанционного зондирования и в наиболее благоприятных случаях совместно с другими критериями (например, с текстурными особенностями изображения) отождествлять фотообразы растительности с тем или иным ее видом. Здесь, безусловно, необходимо напомнить, что составление карт землепользования, как правило, проводится на аэрофотоснимках крупного масштаба с высоким разрешением (предпочтительно на цветных инфракрасных спектральнональных фотоматериалах). Критериями для обработки в этом случае служат среди прочих кронаобразование и высота произрастания разных видов растений.

3.4.3. Влияние внешних факторов на спектральные характеристики растений. Развитие и физиологическое состояние растительности, или фитоценозов, определяются влиянием ряда внешних факторов. Важнейшие из них: тип почвы, образование почвенного профиля, характеристика питательных веществ в почве, характеристика вод (соответственно влажность почвы), морфология рельефа местности и топографическая позиция объекта, солнечная радиация, климатические условия и ежегодные изменения окружающей среды (фенология). Тип почвы и почвенный

профиль, питательные вещества и характеристика вод так же, как рельеф местности, в значительной мере определяются литофациальным составом и тектонической структурой геологического субстрата.

Растения реагируют на изменения окружающей среды изменениями содержания пигмента, структуры мезофилла, а также изменениями свойств поверхности листьев и влагосодержания в них. Такая реакция растений в соответствии со всем вышеизложенным всегда воздействует на свойства спектрального отражения и поглощения света их листвой и становится особенно очевидной, если экстремальным состоянием окружающей среды растения или их сообщества поставлены в неблагоприятные условия, например при поднимающемся или опускающемся уровне грунтовых вод, при сильной засухе, засолении почвы, высокой концентрации в ней металлов и при других загрязнениях ее или грунтовых вод. Такая взаимосвязь обнаруживается, например, при отмирании леса. В частности, известно, что размеры хлороза (пожелтение) различны на песчаных и известковых почвах (устное сообщение профессора Кенневега).

Рассмотрим, как долго могут оставаться растения здоровыми, если губчатая паренхима листа высыхает и поставляет все меньше влаги, чтобы компенсировать то количество, которое теряется в результате транспирации, т.е. дыхания и испарения листьями. Губчатая (ячеистая) структура мезофилла сохраняется. Но коль скоро растение теряет влагу при повреждении корневой системы, ему необходимо поглотить иным способом соответствующее количество воды. Невосполнение потери приведет к повреждению или заболеванию сосудистых тканей, по которым вода поступает в крону ствола, ветви или листву с ее губчатым мезофиллом. Следствием этого будет резкое падение отражательной способности листьев в ближнем инфракрасном излучении (рис. 36), которое можно обнаружить при аэросъемке на цветозональ-

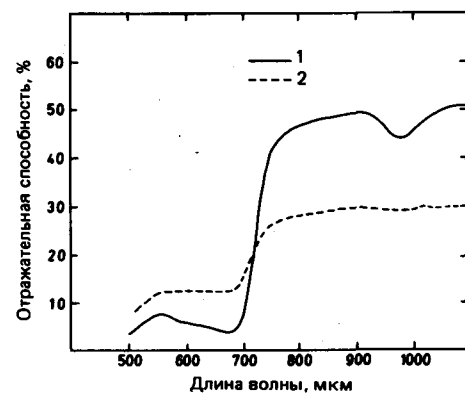


Рис. 36. Спектральная отражательная способность здоровых и поврежденных листьев сахарной свеклы [137]. 1 – здоровые; 2 – поврежденные.

ную инфракрасную пленку или при многозональной съемке в ближнем инфракрасном диапазоне. В этом случае заболевшие или специально поставленные в неблагоприятные внешние условия растения и их сообщества на цветозональных (т.е. цветных с добавлением ИК-диапазона) аэроснимках или на многозональных изображениях в диапазоне 0,7–1,3 мкм выделяются среди здоровых растений этого же вида темными оттенками серого тона или другого условного, например красного, цвета. На панхроматических аэрофотоснимках, которые делались одновременно с многозональной съемкой, напротив, неразличимы или очень слабо различимы оттенки серого тона между участками, соответствующими здоровой и угнетенной растительности, даже в том случае, когда на фотоаппарат устанавливался какой-либо фильтр [5]. Физиологический стресс у растения выявляется также по изменениям его спектральных характеристик в видимом диапазоне света, так как хлорофилл чувствительно реагирует на все изменения в обмене веществ и при неблагоприятных условиях вырождается. Как следствие происходит поглощение листом незначительной части светового потока в голубой и красной зонах спектра. В процентном выражении доля отраженного листом светового потока в видимом диапазоне возрастает (рис. 36). Поэтому на аэрофотоснимках в голубой и красной зонах угнетенная растительность оказывается более светлой, чем здоровые растения того же вида. Эта зависимость спектральных характеристик растений и фитоценозов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах от их физиологического состояния имеет большое значение для дистанционного зондирования, так как эта увеличивающаяся яркость используется как признак для аномального спектра растительности, который во многих случаях при интерпретации становится индикатором локальных или региональных заболеваний или угнетенности растений.

Рассмотрим спектральные характеристики растений, произрастающих на незагрязненных почвах и почвах с высокой концентрацией тяжелых металлов (рис. 37). В обоих примерах отражательная способность угнетенных растений намного сильнее, чем у здоровых деревьев, вероятно, вследствие изменения в строении хлоренхимы (см. рис. 40). Подобная зависимость установлена и при спектрометрировании растительности в районе сульфидной свинцово-цинко-медной минерализации [169]. Было обнаружено, что интенсивность отражения листвой белого дуба на почвах с высокой концентрацией тяжелых металлов по сравнению с деревьями на контрольных фоновых почвах повышается в интервалах 0,63–0,69 и 1,55–1,75 мкм. В качестве причин указываются особенности строения хлорофилла (сильное отражение в красной зоне) и изменение содержания воды в листьях, вызывающее сильное отражение в ближнем инфракрасном диапазоне (рис. 36). В интервале

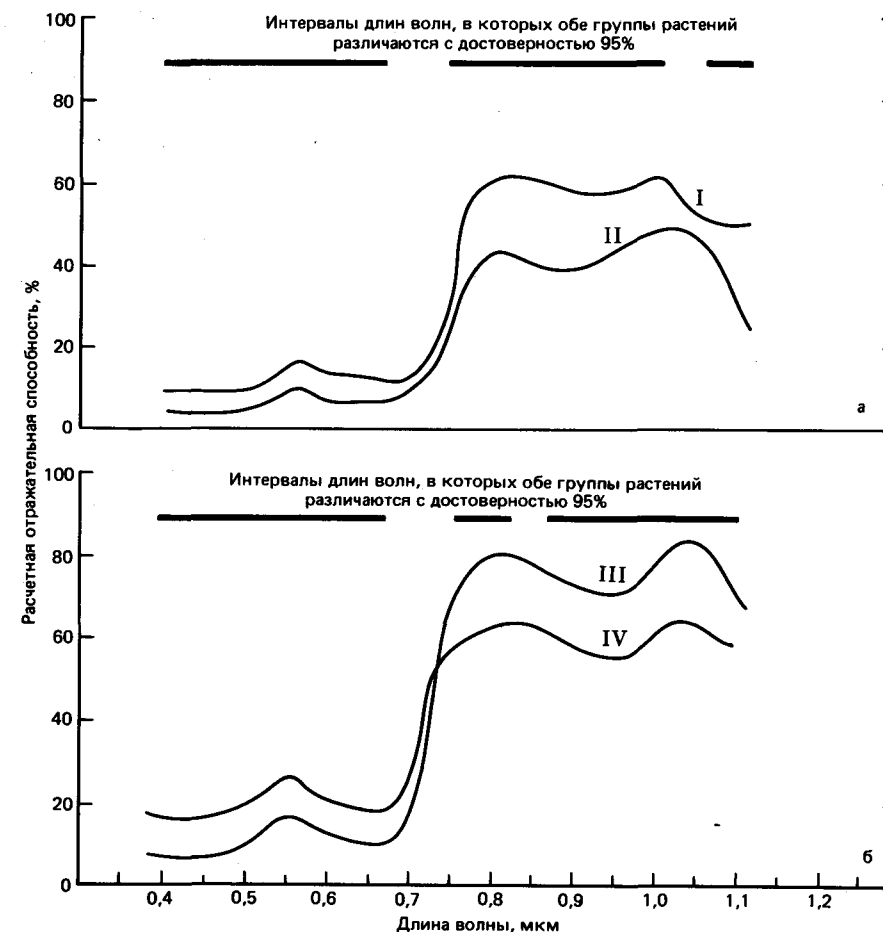


Рис. 37. Различия в отражательной способности красной и бальзамовой сосны на почвах с нормальным и повышенным содержанием металлов. Жирной линией обозначены спектральные зоны, важные для дистанционного зондирования (в соответствии с проспектом). (Перепечатано с согласия издательства из "Remote Sensing in Geology" by Siegal & Gillespie (eds.), 1980.)

а – бальзамовая сосна: I – аномальная группа (10 деревьев): $\text{Mo } 225 \text{ млн}^{-1}$, $\text{Cu } 7700 \text{ млн}^{-1}$ (в почве); II – контрольная группа (10 деревьев): $\text{Mo } 5 \text{ млн}^{-1}$, $\text{Cu } 7 \text{ млн}^{-1}$ (в почве); б – красная сосна: III – контрольная группа (9 деревьев): $\text{Mo } 6 \text{ млн}^{-1}$, $\text{Cu } 8 \text{ млн}^{-1}$ (в почве); IV – аномальная группа (15 деревьев): $\text{Mo } 975 \text{ млн}^{-1}$, $\text{Cu } 500 \text{ млн}^{-1}$ (в почве).

0,76–0,90 мкм различий в спектральной яркости угнетенных и нормальных деревьев не установлено. Из этих наблюдений авторы [169] делают вывод, что клеточная структура листьев, ответственная за отражение в самом ближнем инфракрасном диапазоне, не повреждена, или случайно поврежденные клетки оказались не охваченными измерениями в относительно широком диапазоне спектра. Эти наблюдения интересны еще и тем, что концентрация Zn и Mn в листве дубов примерно соответствует концентрации этих элементов в почве, а содержание Pb и Cu было даже выше их содержания в почве. Добавим, что не все популяции растений, произрастающих на переобогащенных тяжелыми металлами почвах в районах месторождений показывают высокую концентрацию металлов в ткани листа [342]. Было установлено, что

поглощение и количество поглощенных тяжелых металлов зависят от вида растения (т.е. существует селективное, избирательное поглощение металлов). При этом в хвое и ветвях вечнозеленых растений в общем концентрация металлов меньше, чем в листве и ветвях лиственных деревьев. В свете проблем дистанционного зондирования было установлено [169], что изменение спектральных характеристик листвы может быть прямо связано с относительным составом тяжелых металлов в почве, но не с содержанием металлов в листве. В более четко проведенном эксперименте выявлено [87], что концентрация металлов в почве может оказывать воздействие на хлоренхиму листа и содержание в листьях воды, не вызывая в них заметной концентрации металлов. Исходя из этого, авторы эксперимента пришли к выводу, что при

поисках руд в залесенной местности изменения спектрального отражения листвы растительного покрова могут служить надежным указанием на аномальную концентрацию металлов в почве и использоваться при геохимическом опробовании почв с целью разведки месторождений. Характерные различия в коэффициентах спектров яркостей растений на нормальной и минерализованной почве особенно выделяются при очевидном проявлении старения, т.е. при пожелтении листьев [169]. Так, например, повышенные концентрации Cu, Zn и Mo в некоторых видах растений обнаруживаются как в начале листообразования, так и во время цветения, а аномальные концентрации Ni, Pb, Cr, Co, Fe, Al, B и Mn появляются в листьях растений только незадолго до пожелтения осенью [56]. Кроме того, поглощение металлов в середине периода вегетации того или иного вида растений меняется и в определенное время мешает поглощению железа и других питательных веществ из почвы [87]. Геоботанические аномалии, вызванные тяжелыми металлами, локализуются даже на относительно грубых по разрешению изображениях мультиспектрального сканера «Лэндсат», на снимках, сделанных весной в апреле-мае [56]. Спектральные каналы многозонального сканера, снимающего в видимом и среднем (отраженном) инфракрасном диапазонах (как, например, установленные для тематического картирования на спутниках «Лэндсат-4 и -5» (камера ТМ-«Тематик-Маппер»), имеют лучшие предпосылки для локализации стрессовых фитоценозов, т.е. сообществ растений, находящихся на угнетенном состоянии. Как уже описывалось выше, изменения пигмента (хлорофилла) и содержания воды в листе могут вызывать значительные изменения ее спектрального отражения. Ка-

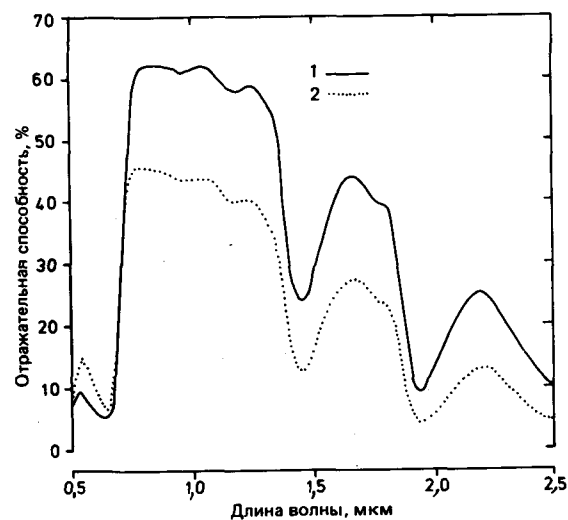


Рис. 38а. Различия в спектральной отражательной способности зрелых (1) и молодых (2) листьев [211].

мера ТМ поставляет соответствующие данные в каналах 3 (0,63–0,69 мкм) и 5 (0,155–1,75 мкм). К моменту установки этой камеры, конечно, еще не было известно, каков физический и химический механизм воздействия металлокомплексов на нормальное развитие растений. Но уже было известно, что зелено-красные (с малым содержанием хлорофилла) листья у растущего растения означают недоразвитость или старение, а также другие признаки ослабления его жизнедеятельности.

Растения, находящиеся в неблагоприятных условиях или больные, часто имеют более мелкие листья, чем здоровые растения того же вида. Поэтому уменьшаются число отражающих поверхностей листвы и толщина листового покрова. Добавим к этому, что при замедленном развитии растений и уменьшении количества листьев сокращаются регистрируемые сенсором теневые участки, так как увеличивается площадь не покрытых листвой поверхностей (стволы, ветви, участки почвы). Это те поверхности, которые в ближнем инфракрасном диапазоне имеют намного меньшую отражательную способность, чем листва. Поток энергии, отражающийся от таких поверхностей, количественно и качественно отличается от потока, отраженного здоровой и сильной растительностью, хотя интенсивность отражения от отдельных листьев может различаться не очень сильно [50, 143, 292].

Спектральные характеристики многих растений изменяются в течение периода вегетации (рис. 38а, 38б, 39). Для развития возможностей дистанционного зондирования при картировании растительности немаловажно, что различия спектральных характеристик определенных растений в одни сезоны года более четкие, чем в другие. Эти времена года больше

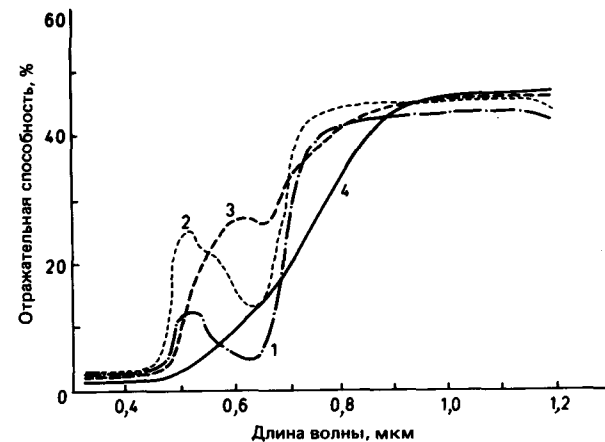


Рис. 38б. Изменения спектральной отражательной способности листьев в течение вегетационного периода. 1 — живые листья; 2, 3 — ранняя и средняя стадии развития листа (розовый, точнее желтый цвет листьев); 4 — отмершая, высохшая (коричневая) листва [142].

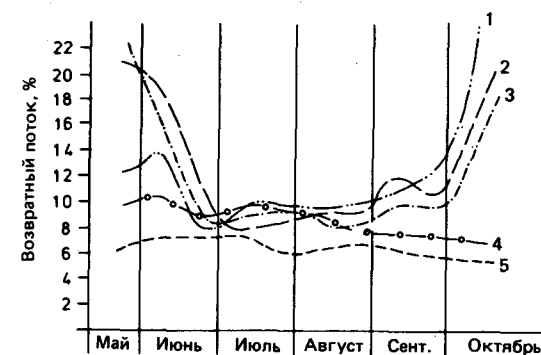


Рис. 39. Изменения отражательной способности различных деревьев в течение вегетационного периода. Отметим, что для прямостоящих матовых стволов эффект от солнечной радиации не на много сильнее и излучение отражается с небольшими колебаниями (по Бакстрему и Виландеру, см. [40]).

1 — осина; 2 — дуб; 3 — бук; 4 — сосна обыкновенная; 5 — сосна кедровая.

подходят для съемок, чем другие, в которые интенсивность отражения различными видами растений различается мало.

В целом изменения спектральных характеристик у лиственных деревьев в вегетационный период выражены более четко, чем у хвойных (рис. 39). Последние поглощают солнечную энергию в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах сильнее других растений. Для видимого, светового излучения это поглощение составляет около 95%, а для инфракрасного — примерно 65%. В процессе старения листвы происходят изменения ее пигментации, уменьшение содержания воды и в конечном итоге разрушение мезофилла. Благодаря распаду хлорофиллового пигмента снижается прежде всего поглощение светового потока в красной и отражение в зеленой частях спектра. В голубой части спектра абсорбция продолжается благодаря другим пигментам листа. В результате этих процессов листья приобретают осенью желтый или красный цвет. Благодаря обезвоживанию листьев в процессе старения и разрушению оболочек клеток мезофилла влажность листьев уменьшается, и солнечное излучение в ближнем инфракрасном диапазоне отражается сильнее.

3.4.4. Спектральные характеристики кустарниковых зарослей и сомкнутых крон деревьев. Предыдущие выводы основаны главным образом на результатах изучения спектральных характеристик или свойств отдельных листьев или их серий в лабораториях и на местности. Такое изучение, несомненно, важно, чтобы выяснить физические и физиологические причины соотношения отражения, поглощения и пропускания света растениями и выявить значение этих частных процессов во взаимодействии падающего потока солнечной энергии и листа. При этом

спектрометром измерялись отдельные листья, т.е. относительно малые поверхности. Спектральные свойства групп кустарника или деревьев в целом сопоставимы со спектральными характеристиками листвы того вида растений, из которого состоит эта группа кустарников или деревьев. Несмотря на это, спектральные кривые листьев измерявшихся видов не экстраполируются на спектральные характеристики кустарниковых зарослей или лесных площадей, которые в значительной мере состоят из индивидуумов одного вида. Существуют качественное и количественные различия. В процентном отношении интенсивность сигнала, отраженного от растительного покрова и регистрируемого установленным на самолете или спутнике приемником, намного меньше, чем интенсивность сигнала от листвы кустарника какого-либо вида, образующего снимаемую группу. Изменяющаяся позиция наблюдения (или съемки), случайная ориентировка листьев в кронах групп растений и переменная составляющая идущего снизу излучения, например от почвы, ослабляют спектр отраженного потока по сравнению со спектрами отдельных листьев, полученными в лаборатории или в контролируемых условиях тестового участка [143, 284]. В сплошном покрове широколиственных деревьев может отразиться в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне 3,5–35% потока солнечной энергии, в то время как соответствующая величина для одного дерева широколиственной породы может меняться от 10 до 50% [143, 284].

С другой стороны, во многих случаях верхние листья растительного покрова (в том числе и кроны) пропускают большую часть падающего потока ближнего инфракрасного излучения и только потом он отражается от нижних листьев кроны. Эта проникающая в нижний слой листвы часть инфракрасного потока излучения еще раз пройдет через верхний слой листьев в пазухе кроны и усилит отражательную способность растительного покрова в ближнем инфракрасном диапазоне по сравнению со спектральной яркостью единичных листьев того вида, кроны которых его образуют. В этом процессе очень существенна относительно высокая проницаемость листьев для инфракрасного излучения (см. рис. 41). Анализ математической модели прохождения потока солнечной радиации через сплошной растительный покров показал, что спектральное отражение и проницаемость покрова можно рассматривать как функцию от суммарной поверхности листьев, коэффициента абсорбции, коэффициента рассеяния и отражательной способности нижележащего субстрата [5]. Эти коэффициенты находятся в зависимости от геометрии растительного покрова и оптических свойств его листьев. Усиление отражения от сплошного покрова кроны в ближнем инфракрасном диапазоне многократно повторяющимся отражением или рассеянием от разно расположенных и разно ориентированных к потоку

энергии листьев увеличивает и без того сильное различие в спектральном отражении потока солнечной радиации в видимом и в ближнем инфракрасном диапазонах. Этим разрывом в интенсивности спектрального отражения, т.е. скачком спектральных яркостей, можно воспользоваться для определения изменений плотности или густоты растительного покрова и в лучшем случае для определений видового состава растений на изображениях со спутника «Лэндсат». Соотношение интенсивности отражения растительных сообществ между каналами 5 и 6 МСС-сканера изменяются в зависимости от плотности растительности. Если плотность растений увеличивается, то получается уменьшение спектральной яркости в канале 5 (0,6–0,7 мкм) вследствие сильного поглощения хлорофиллом и увеличение отражения кронами растений в канале 6 (0,7–0,8 мкм) из-за сильного рассеяния в этом интервале длин волн [247].

Проблема качественной и прежде всего количественной обработки спектральных данных о растительных сообществах заключается в том, что взаимодействие между потоком солнечного излучения и зарослями кустарника или лесом очень сложно. На спектральные характеристики отражения растительности, если это сплошной покров крон, влияют следующие факторы: отражательная способность и «прозрачность» (проницаемость) отдельных листьев растительного покрова; порядок размерности поверхности листьев, оцененный в целом в связи с этим взаимодействием; расположение листьев по отношению к общей поверхности растительного покрова и по вертикали, вдоль стволов, деревьев или кустарников; способность и характер отражения и пропускания потока излучения различными частями кроны и ствола; отражательные свойства подлеска на разных по высоте уровнях (кустарниковые заросли, травы, мхи, лиственный покров почвы, ее тип, состав, влажность, мощность, горные породы субстрата, наконец, общая влажность поверхности почвы); стояние Солнца (высота и азимут, меняющиеся в течение суток и года), а также направление и высота съемки [35]. Все эти факторы могут изменяться не только от одного района съемки к другому, но и в пределах одного снимка. Мешает изучению и классификации объектов прежде всего существование разных видов теней, что наблюдается даже в одинаковых условиях съемки, а тем более в разные периоды наблюдений. (Это относится и к аэрокосмическим съемкам.) Если к этому еще присовокупить ожидаемые ежегодные изменения спектральных характеристик растительного покрова в период вегетации, то, без всяких сомнений, составление видового каталога спектральных характеристик растительности или отождествление того или иного вида по спектральному сигналу представляет значительные трудности. Ведь даже в растениях одного вида может меняться характер их развития и физиологического состояния в зависи-

мости от климатической зональности Земли и микроклимата региона, особенно если эти различия относятся к освещенности солнцем в течение дня и отражаются на их развитии [262]. Из всего вышеизложенного опять приходим к выводу о преобладающей роли локальных факторов, таких, как положение на местности и освещенность и совпадение признаков одного вида с признаками других видов растительности.

Нельзя пренебрегать и спектральным эффектом тени как среди самого растительного покрова, так и под ним. Здесь может сыграть роль даже относительное потемнение. Например, если встречаются одинаковые участки тени в хвойных и лиственных лесах, то в ближнем инфракрасном диапазоне влияние теней на спектральную яркость хвойных лесов будет сильнее, чем лиственных, так как оптическая плотность тени хвойного леса из-за значительно меньшей прозрачности хвои для инфракрасного излучения ближнего диапазона намного больше, чем тени в лиственном лесу [252]. Относительная оптическая плотность тени (ее потемнение) различна для снимков разных спектральных каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Из-за относительно большого числа факторов, участвующих во взаимодействии потока солнечной энергии с растениями и формирующих исходящий от них спектральный сигнал, а также возможных изменений этого взаимодействия во времени и пространстве очень часто при выделении и распознавании растительных сообществ или групп растений, т.е. при дешифрировании их на аэрокосмических изображениях, используют только относительное различие спектральных яркостей (оптических плотностей), точнее оттенки серого тона на снимке. Идентификация или распознавание и отождествление выделенных видов кустарников или деревьев среди растительных сообществ возможны в общем только на аэрофотоснимках и сканерных изображениях с высоким пространственным разрешением по изменениям текстуры и тона, а на цветных и спектральных – цвета и тона, фотообразов, если спектральное разрешение съемочной системы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах соответствует поставленной задаче и имеются в распоряжении референц-данные, т.е. контрольные сведения по представительным тестовым участкам района съемок. В табл. 3 представлены необходимые для картирования растительности диапазоны длин волн и комбинации спектральных каналов сканера МСС.

Совсем новые возможности дистанционного зондирования лесных районов открылись с применением современной усовершенствованной аппаратуры. Так, Коллинз и др. [47, 50] разработали 500-канальный спектрорадиометр с высоким пространственным разрешением, которым можно проводить измерения очень узких зон очень малых изменений спектраль-

Таблица 3. Оптимальные каналы (мкм) многозональных сканеров для проведения дистанционных исследований в сельском и лесном хозяйстве [262]

Для изучения видового состава растительности			
Колуэлл и Шей Иринг и Гринсберг	Фу и др.	Хоффер и др.	
0,32–0,38	0,48–0,50	0,40–0,44	0,50–0,57
0,40–0,70	0,50–0,52	0,66–0,72	0,55–0,58
0,70–0,90	0,62–0,66	0,72–0,70	0,66–0,72
0,71–0,79	0,66–0,72		0,80–1,0
0,85–0,89	0,72–0,82		1,0 –1,4
1,5 –1,7	0,80–1,00		1,5 –1,8

Для оценки растительного покрова по Виноградову	Для определения состояний и степени повреждения (заболеваемости) растений по Бауэру и др.		
	Август	Сентябрь (N = 1000 м)	Сентябрь (N = 2000 м)
0,51–0,57	0,44–0,46	0,55–0,58	0,58–0,62
0,59–0,68	0,58–0,62	1,0 –1,4	0,66–0,72
0,72–0,90	1,0 –1,4	1,5 –1,8	1,0 –1,4
	1,5 –1,8	8,0 –14,0	1,5 –1,8

Для оценки гумусовой составляющей почв	Для разделения естественных растительных сообществ	
Баумгарднер и др.	Дрисколл	
0,55–0,58	0,478–0,508	
0,62–0,66	0,492–0,536	
0,66–0,72	0,514–0,558	
0,8–1,0	0,566–0,638	
	0,604–0,700	
	0,725–0,920	

ного отражения растительного покрова в видимом и инфракрасном, ближнем и среднем, диапазонах. До сих пор испытывался только самолетный вариант прибора, измеряющего в надир спектральное излучение растительного покрова вдоль линии оси полета. Огромное количество получаемых таким образом данных обрабатывается на ЭВМ по специально разработанной программе частотного анализа (анализ преобладающих частот).

В результате этих разработок появилась новая эффективная методика биогеографических измерений. С одной стороны, высокая чувствительность прибора позволяет по точно фиксированной позиции полос поглощения α -хлорофилла в спектре отраженного потока энергии определять популяции растений, ко-

торые находятся в неблагоприятных условиях жизнедеятельности.

С другой стороны, методика обработки данных на ЭВМ позволяет отфильтровать значительные фоновые изменения в спектрах отражения от массивов естественных лесов, т.е. те изменения спектральных характеристик, которые вызваны морфологией местности и прочими подобными факторами. Было установлено, что в спектрах зрелой растительности положение полос поглощения α -хлорофилла смещается в сторону увеличения длины волны почти на 0,2 мкм (рис. 40а). Физико-химический механизм этого смещения полос поглощения хлорофилла, вероятно, обуславливается какой-то формой природных соединений α -хлорофилла с различными пигментами и протенинами клеток живых растений. Агрегатные соединения α -хлорофилла образуют пигмент, способный поглощать длинноволновые фотоны, которые определяют полосы поглощения хлорофилла [47]. Этот «длинноволновый пигмент», характеристика спектрального отражения которого может быть измерена по позициям полос поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне, представляет собой критические компоненты в процессе фотосинтеза. Каждое биохимическое и физико-химическое нарушение состояния растений, влияющее на «длинноволновый пигмент», негативно сказывается на его развитии. При съемке растительных сообществ, предположительно находящихся в таких неблагоприятных условиях, отсутствие «длинноволнового пигмента» должно просигнализировать об этом, проявляясь в спектре хлорофилла сменой положения полос поглощения инфракрасного диапазона. Другая важная предпосылка таких измерений заключается в том, что положение инфракрасных полос поглощения в спектрах хлорофилла здоровых растений, даже разных типов, остается довольно строго фиксированным [47]. Специфические различия биохимических характеристик растений разного вида проявляются в положении полос поглощения хлорофилла в спектрах этих растений не так сильно, как стресс, который, например, обусловлен высокой концентрацией тяжелых металлов в почве. Более глубокое изучение этого вопроса показало, что положение вышеупомянутых полос поглощения в спектрах отраженного растением потока энергии является значительным индикатором неблагоприятности условий их существования. Критической зоной служит интервал 0,70–0,76 мкм. Это зона спектра, в которой изменение хлорофилла в листьях может быть измерено по изменениям длины волны спектрального отражения. Анализ данных выявляет скорее изменения в положении полос поглощения в длинноволновом интервале, чем энергию излучения в определенной спектральной зоне.

Приведенные графики (рис. 40) иллюстрируют положение полос поглощения α -хлорофилла в инфра-

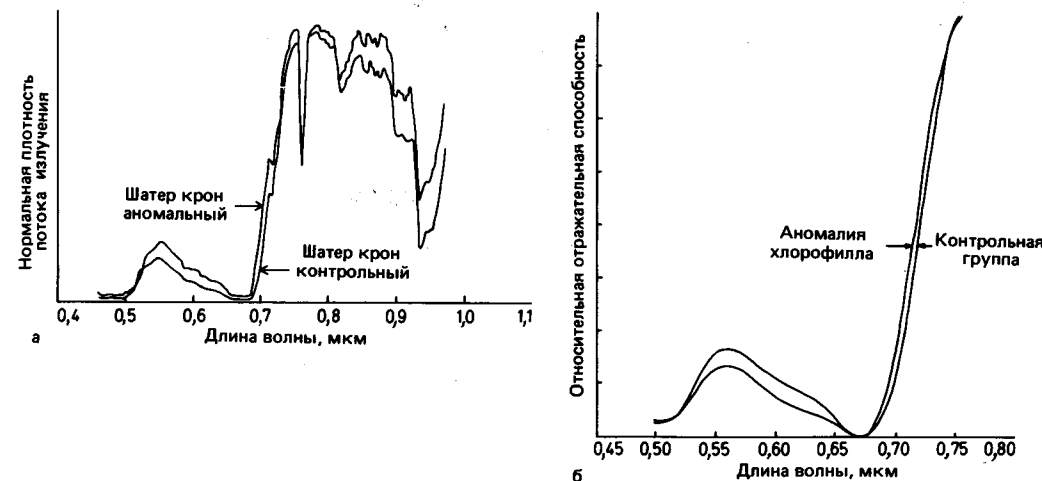


Рис. 40. Спектральная отражательная способность растительности на почвах с нормальным и повышенным содержанием меди. Особое внимание следует обратить на полосы поглощения ИК-излучения [50].

красном диапазоне для спектров растений, произрастающих в районах с нормальным и аномально высоким содержанием металлов в почве. На этих графиках наглядно представлено смещение кривых спектрального отражения (и соответственно полос поглощения хлорофилла) влево (Коллинз назвал его «голубым смещением»). В целом разработка Коллинзом и его сотрудниками изложенной методики дистанционного зондирования по оценке неблагоприятных зон развития растений в лесных районах [47, 50] представляет собой значительный прогресс, возможно даже рывок, в поисках и разведке месторождений в залесенных районах.

3.4.5. О температурных и излучательных характеристиках растений и растительных сообществ. Растения поглощают огромное количество энергии потока солнечной радиации, прежде всего в видимой части спектра (рис. 35) и излучают значительную часть полученной энергии в тепловом инфракрасном диапазоне. Этот процесс способствует сохранению энергии растений и их приспособлению к изменяющимся условиям окружающей среды в суточном и годовом циклах. Вместе с тем для излучения с длиной волны более 2 мкм листва обладает высокой абсорбционной способностью (рис. 41). Во всяком случае в этом спектральном диапазоне только относительно небольшой части потока солнечного излучения удастся достичь поверхности Земли.

Высокая излучательная способность листьев в тепловом инфракрасном диапазоне представляет интерес для дистанционного зондирования. В среднем величина излучательной способности листьев ϵ равна примерно 0,95–0,89 [262]. Она довольно высока и способствует эффективному выделению растениями потока энергии с длиной волн более 2 мкм. Это

излучение может регистрироваться в диапазонах от 3 до 5,5 мкм и от 8 до 14 мкм и представляется в виде изображений (см. рис. 214 и 220б). Величина потока энергии, которая регистрируется приемником, зависит от температуры листьев растения. Растительные сообщества, обладающие разной величиной температурного излучения, отличаются друг от друга на тепловых изображениях оттенками серого тона, яркость которых соответствует разным радиационным температурам. Разница в радиационных температурах может быть выражена не только в относительных величинах, но и в абсолютных значениях темпера-

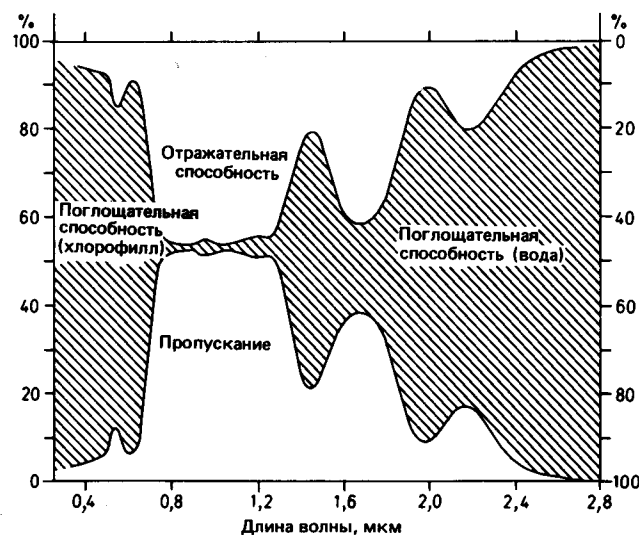


Рис. 41. Спектральная отражательная и пропускательная способности живых листьев и поглощательная способность хлорофилла и воды [112].

туры – кельвинах (К), если известна температура растений, от которых получен спектральный сигнал и во время съемки проводилась калибровка излучения.

Тепловая характеристика растений зависит от многих факторов: температуры листьев и изменяющейся в зависимости от нее излучательной способности в суточном и годовом цикле жизнедеятельности растения; интенсивности потока солнечной радиации, также меняющейся по времени суток и года; температуры и относительной влажности воздуха; метеословий; состояния атмосферы и скорости ветра; влажности почвы; содержания в ней питательных и минеральных веществ и величины испарения самого растения [247].

Важнейшую роль в сохранении растением энергии и его теплообмене, приспособленном к условиям окружающей среды, играет транспирация, т.е. выделение листьями водяного пара. Она регулирует температуру листьев. Вид испарения листьев определяется рядом параметров, зависящих от вида растения и от внешних условий его обитания. Наиболее важными параметрами растения, определяющими для него величину транспирации, являются: отношение произведения длины корней к длине побегов (так называемое отношение корень/побег), площадь общей поверхности листьев и структура листа. Эти параметры в свою очередь зависят от количества питательных веществ в почве, влажности почвы, т.е. таких параметров, которые сами зависят от геологического субстрата.

Среди параметров, определяющих транспирацию и температуру листьев растения в зависимости от внешних условий его произрастания, на первом месте стоит интенсивность потока солнечной радиации, так как многочисленные щелевидные клетки, через которые осуществляются дыхание и выделение водяного пара листьями, открываются и закрываются в течение дня под ее воздействием. От скорости, с какой водяной пар будет уходить в атмосферу благодаря диффузии, которая осуществляется через оболочки клеток эпидермиса, пропитывающиеся водой, зависит выравнивание давления пара.

Испарение в значительной мере зависит от влажности воздуха, от его температуры и перемещений (ветер, конвективные потоки). Относительная влажность воздуха контролирует порядок величины градиента давления пара между внешним и внутренним давлением. Чем выше градиент (меньше влажность воздуха), тем больше величина испарения. Температура влияет на величину испарения воздействуя на открытость щелевидных каналов листа и на градиент испарения. Повышение температуры приводит к повышению испарения. Движение воздуха увеличивает величину испарения, так как ветер уменьшает количество водяного пара вокруг листа в пограничном слое воздуха, чем последовательно повышает градиент плотности водяного пара между растением и

воздухом. Наконец, для содержания влаги в растении и его способности к испарению весьма существенно, сколько воды поглощают корни из почвы. Для испарения листьев должно подаваться корнями достаточное количество воды. Здесь сказываются вновь геологические (точнее, гидрогеологические) условия в обмене веществ. Функция транспирации заключается в охлаждении, препятствующем перегреву на солнце органов растения, и, кроме того, в переносе веществ под действием транспирационного тока в листе. Не до конца ясно, однако, как изменяются спектральные характеристики в заболевшем или поврежденном растении при изменении водного баланса.

Из вышеизложенного становится очевидным, что на тепловые характеристики растений влияют многие внешние параметры, при этом многостороннее значение имеют данные о геологическом субстрате. Кроме того, становится ясным, что температурное излучение определенного растения не всегда можно вывести только из физико-химического состояния растения; оно даже сильнее изменяется в связи с изменением окружающей среды. В тепловом излучении лугов (травянистых поверхностей), групп кустарника или лесов эффект от всех этих связанных и не связанных с отдельным растением факторов интегрируется. Съемки в тепловом инфракрасном диапазоне позволяют идентифицировать виды растений только в исключительных случаях, когда их результат корректируется калибровочными данными района съемки, т.е. проводятся соответствующие синхронные наземные измерения.

И все же, если имеются результаты синхронной многоканальной съемки в видимом и инфракрасных диапазонах, можно по относительным различиям в спектральных яркостях объектов различить залесенные и безлесные участки, участки, заросшие кустарником, и т.п.

3.5. О спектральных характеристиках вод озер, рек и морских побережий¹

3.5.1. Общие замечания. Для изучения современных процессов эрозии, транспортировки и аккумуляции рек, озер и морских прибрежных зон, а также в расширяющихся сейчас экологических исследованиях большое значение имеют понятия «твердый сток» и(или) «речная муть» поверхностных вод. Большой интерес приобретают: вынос и пространственное распределение речной мути в устьях рек; пространственное (по латерали и вертикали) распределение и транспортировка ее течениями и периодическими волнениями вдоль морских побережий; влияние процессов транспортировки твердого стока и осадконакопления на режим рек и прибрежных зон озер и морей.

¹ См. также «Аэрокосмические методы геологического изучения шельфа» (Л.: «Недра», 1985). – Прим. перев.

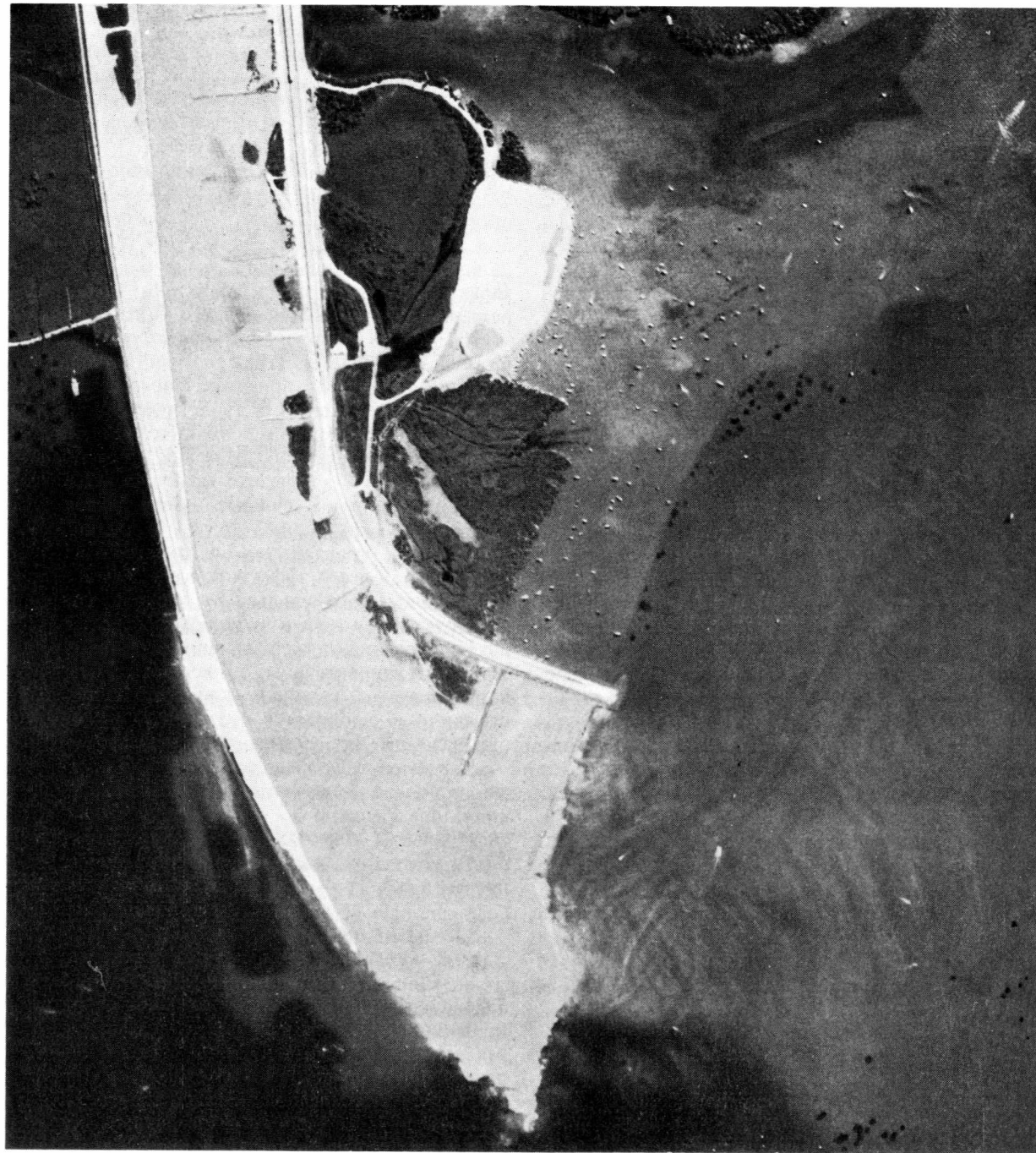


Рис. 42. Разница в серых тонах изображения показывает глубину воды и акватории чистой и мутной воды. (Фото WIZD, Heerbrugg, CH.)

Здесь вводится нестрогое понятие «толща воды», или «водное тело», с различной концентрацией речной мути или твердого стока. Наряду с определением концентрации речной мути или твердого стока в толще воды в некоторых случаях интересно также

определение их вида и состава, например для определения доли промышленного загрязнения вод. В прозрачных неглубоких водах побережий, кроме того, речь может идти об изучении рельефа, структуры и строения морского дна в прибрежной зоне.



Рис. 43. Разница в серых тонах изображения показывает разную глубину вод и структуру поверхности осадков в прибрежной зоне. Распределение осадков происходит в соответствии с направлением переносящих их течений параллельно береговой линии. (Аэрофотоснимок I. G. N.)

Уже давно было известно, что загрязненные речной мутью воды выделялись на панхроматических черно-белых аэроснимках очень светлыми оттенками среди темного серого тона участков чистой воды, а также что при прозрачности воды на мелководье структура разных глубин озерного или морского дна передается (воспроизводится) тональностью фотоизображения. На цветных аэрофотоснимках также выделялись участки светлой воды и водные тела, содержащие речную муть, зоны разной концентрации мутневых взвесей, а также разные по глубине участки мелководья с разными свойствами дна; различались они уже как по цветам, так и по их оттенкам на снимках (рис. 42 и 43).

Благодаря разнице в цветах и оттенках аэрофотоснимков отдельных водоемов и акваторий были получены данные о процессах рассеяния и поглощения солнечного света в воде. В качестве объектов были выбраны воды, в которых господствующее помутнение воды выражалось движением находящихся в ней в виде суспензии или растворов органических и неорганических примесей.

Каждое водное тело обладает присущим ему по-

лем излучения, зависящим от содержания в нем рассеивающей и поглощающей субстанции.

Если из лабораторных экспериментов на представительных пробах или по представительным промерам с судов в районе съемки (сделанных синхронно с аэрофотосъемкой) известна зависимость оптических параметров воды от органической и неорганической составляющих твердого стока, то по аэрокосмическим изображениям, принимая во внимание величину отклонений и исходя из определенных предпосылок, можно сделать выводы о виде компонентов и концентрации мутневой взвеси в воде [58, 59]. В работе Дёрффера [59] имеется математически обоснованный вывод для проведения фотографических съемок и оптико-электронного сканирования вод, для чего предлагается использовать соответствующие спектры поглощения в видимом (0,4–0,75 мкм) диапазоне электромагнитных волн (рис. 41).

Оптические процессы, которыми определяется спектральная характеристика водной поверхности или водного тела (некоторого объема воды), очень сложны (рис. 44). Эти процессы (зеркальное и диффузное отражение, рассеяние и поглощение) проис-

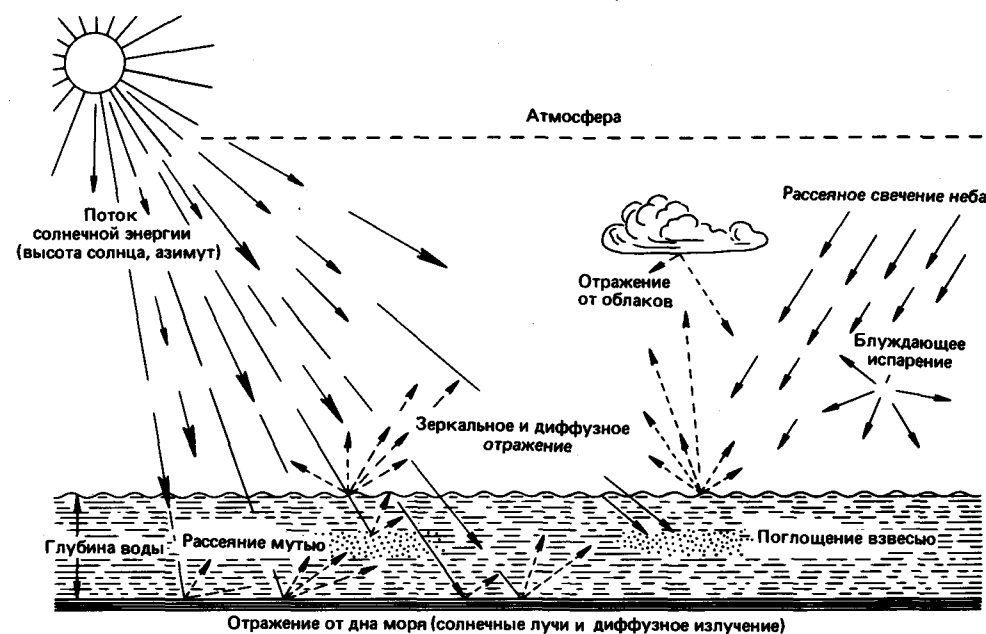


Рис. 44. Схематизированное представление о процессах отражения, поглощения и рассеяния, происходящих на границе вода-воздух и в воде.

ходят во многих слоях: в атмосфере, на поверхности воды, в воде, а при соответствующей глубине и прозрачности воды также на поверхности дна озера, реки или морской акватории. При этом часть светового потока, которая рассеивается водой или поверхностью дна водоема, на обратном пути к приемнику, установленному на самолете или спутнике, должна вновь пройти толщу воды и атмосферы. Этот возвращенный от слоя в толще воды, морского дна или поверхности водоема спектральный сигнал искажается новым рассеянием и поглощением в толще воды и атмосфере. Все это означает, что спектральные сигналы, имеющие значение для дистанционных методов, искажаются и ослабляются. К тому же на спектральный импульс оказывают воздействие сопутствующие процессы отражения от дна водоема, отражение направленного и рассеянного излучения на водной поверхности и рассеяние света в атмосфере. Поэтому прежде всего необходимы учет всех факторов, влияющих на определение спектральных характеристик водоемов, и количественная обработка данных с помощью вычислительной техники.

3.5.2. Влияние происходящих в атмосфере процессов и высоты стояния Солнца на спектральный сигнал толщи воды. Спектр достигшего водной поверхности прямого солнечного излучения уже рассматривался нами в разд. 2.2, где описывалось влияние атмосферы при прохождении потока солнечной энергии. Отмечалось, что весьма существенным оказался размер частиц аэрозоля. Частицы сильно изменяют вид

и концентрацию аэрозолей в атмосфере. Общий состав и составные части «морского» аэрозоля (над океанами) очень отличаются от типов «континентальных» атмосферных аэрозолей (над континентами). Аэрозоли над большими водными пространствами морей и океанов в принципе состоят только из двух компонентов: из капель воды и частиц соли, которые попадают в атмосферу благодаря испарению капель соленой воды, а также капель, включающих примешанные мелкие твердые частицы, которые перемещаются вследствие атмосферной циркуляции между океаном и континентом, откуда и приносятся пылевые частицы. Эти капли похожи на те, которые образуются над сушей, с той только разницей, что в них отсутствуют крупные частицы, которые выпадают с осадками. В прибрежных областях практически нет возможности разделить при количественной обработке данных типы аэрозолей на континентальные и океанические [15].

Решающее влияние имеют метеоусловия времени съемки. Они оказываются благоприятными тогда, когда отсутствует облачность и нет или почти нет паров в атмосфере. В этом случае прозрачность атмосферы максимальна. С увеличением содержания паров усиливаются процессы рассеяния солнечного света, прежде всего в коротковолновой части светового потока. Рассеянное излучение искажает и часто скрывает спектральный сигнал, идущий от воды. Нарушающие сигнал помехи возникают прежде всего в голубой и зеленой зонах спектра, т. е. в таких спектральных диапазонах, которые наиболее

важны для изучения цвета и глубины вод, содержания в них планктона, вида и концентрации растворов или суспензий органических и неорганических примесей. Способы корректировки сигнала можно применить только тогда, когда многоспектральная съемка вод проводится в очень узких спектральных каналах, а используемые для этого чувствительные элементы приемника излучения обладают не только соответствующим спектральным разрешением, но и не менее высоким радиометрическим.

Количество энергии, попадающей на поверхность воды, меняется в зависимости от высоты стояния Солнца. Стояние Солнца и пары в атмосфере определяют (вместе со спектром наклона поверхностных волн воды и изменениями по вертикали концентрации рассеивающих частиц в толще воды) геометрическую составляющую проникшего в толщу воды светового потока. Это оказывает важнейшее влияние на процессы рассеяния и поглощения в толще воды и тем самым на результирующий спектральный сигнал [58]. Крутой угол падения солнечных лучей более благоприятен для их проникновения в глубь воды. На спектральный сигнал, кроме того, влияют высота съемочного полета и угол измерения (съемки). Рассеянное излучение атмосферы уменьшает спектральный сигнал с увеличением высоты съемки. Для точного расчета интенсивности спектрального отражения толщи воды используются методы корреляции, которые обсуждаются в двух работах [91, 243].

Сканирование обычно осуществляется при угле измерения более широком, чем угол зрения объектива. При этом значительные различия угла сканирования и длины пути лучей сквозь атмосферу могут привести к ошибкам обработки вдоль направления сканирования. Здесь прежде всего при количественной обработке данных съемки, проведенной самолетным сканером, зависящее от длины волны излучения отражение, описываемое законом Френеля, на поверхности раздела вода-воздух может быть оценено с очень большими ошибками, так как интенсивность отраженного излучения на граничной поверхности сильно зависит от угла измерения. При многозональной сканерной съемке со спутников эти эффекты искажения незначительны из-за малого угла сканирования (речь идет только о спутниках серии «Лэндсат» и съемках вне тропической зоны при высоком стоянии Солнца).

3.5.3. Влияние оптических процессов, происходящих на поверхности раздела вода-воздух, на спектральные характеристики толщи воды. Из-за различных показателей преломления воды и воздуха часть светового потока на границе вода-воздух отражается в соответствии с законом Френеля [135] и преломляется (рис. 44). Интенсивность отражения на поверхности воды зависит от угла падения солнечных лучей, от атмосферной дымки и спектра наклона волн на по-

верхности воды, в значительной мере определяемого направлением и силой ветра.

Максимальная величина отражения (100%) бывает при заходе и восходе солнца при штилевой, безветренной погоде и гладкой водной поверхности; при высоте Солнца более 60° отражение уменьшается до 2,5%. Положением Солнца определяются сильно поляризованное рассеянное свечение атмосферной дымки и разное отражение на поверхности воды. Различный наклон волн при определенном угле может привести к отражению. В таком случае на воде возникают поля бликов, которые при измерениях следует безусловно исключать [58]. Локальные, не равномерно распределенные поля бликов встречаются и на изображениях с «Лэндсат», но только при очень большой высоте Солнца, например в тропиках. Благодаря вышеупомянутым эффектам на поверхности воды, воспроизводимые светлыми, яркими пятнами на сканерных изображениях водоемов и акваторий площади способны изменять обобщенный, интегральный, спектральный сигнал, идущий из толщи воды.

3.5.4. Процессы рассеяния и поглощения света, происходящие в толще воды. Происходящие в воде процессы поглощения и рассеяния потока солнечного излучения определяются оптическими параметрами воды и находящимися в ней в виде растворов или в виде взвеси органическими и неорганическими веществами — прежде всего разной взвешенной мутью и фитопланктоном [135, 59]. Вода, растворы и частицы имеют собственные коэффициенты поглощения и рассеяния. Они имеют тенденцию ослаблять направленное и диффузное излучение. Ослабление проходящего потока излучения выражается через коэффициент аттенуации (ослабления), определяющийся из суммы коэффициентов рассеяния и поглощения [200].

В чистой воде рассеяние и поглощение происходят только на уровне молекул и ионов. Поглощение a чистой водой (рис. 45) минимально для волн длиной около 0,47 мкм [58]. В диапазоне волн более 0,6 мкм оно очень сильно увеличивается. Рассеяние b с увеличением длины волны сильно уменьшается. Ослабление (аттенуация) k в длинноволновом диапазоне света почти не отличается от поглощения вследствие очень малого рассеяния (рис. 45).

Голубой цвет глубоких прозрачных вод возникает в результате сильного рассеяния в коротковолновой части светового потока молекулами воды. Так как вода содержит органические и неорганические примеси, происходят дополнительные побочные оптические процессы. Прозрачность и цвет воды изменяются.

Примеси в воде, которые влияют на направленный вверх от воды поток излучения, можно объединить в три группы [59]:

1. Желтое вещество (гели) — к нему относятся все

лучения и угла измерения [92]. Было изучено влияние различных концентраций мути (твердых частиц и геля) на глубину сигнала (при z_{90}) в устье Эльбы [54]. Лишь при незначительных концентрациях обоих видов примесей предпочтительна зеленая зона спектра. При этом, как показали исследования, глубина сигнала z_{90} ($\lambda = 0,65$ мкм) колеблется от 10 см (рыба черная камбала) до 1 м (пожарное судно «Эльба 1»).

Частицы геля поглощают коротковолновую часть светового потока. Поэтому глубина проникновения света в голубой части спектра снижается. В водах с высокой концентрацией частиц геля (типичных для прибрежных зон) по данным измерений в канале 4 (0,5–0,6 мкм) многозонального сканера спутника «Лэндсат» происходит сильное поглощение света [200]. Оценка твердого стока по снимкам таких прибрежноморских районов не представляет проблем. В красной части спектра, что особенно важно для разделения вод с разным составом твердого стока, желтое вещество почти не влияет на глубину сигнала, а поэтому и на сам спектральный сигнал (соответственно с уменьшающейся в этой спектральной зоне абсорбцией). С уменьшением концентрации твердых частиц в мути увеличивается доля желтого вещества в аттенуации и соответственно в сигнале. При небольших содержаниях твердого стока поглощение вследствие высокой относительной концентрации геля в этой зоне спектра незначительно.

Была исследована зависимость глубины проникновения излучения зеленой зоны спектра от твердого стока [322], и установлено, что глубина проникновения светового потока зависит не только от концентрации твердых частиц, но и от вида и размера находящихся в суспендированном виде частиц речной мути. Полевые измерения показали, что в определенных регионах глубина проникновения света может незначительно меняться, даже если мутность воды остается прежней. При различной обработке снимков «Лэндсат» (канал 5) и контрольных синхронных измерений с лодок было установлено, что яркость изображения на снимках красной спектральной зоны при измеренной мутности озер, рек и вод прибрежных зон океана определяется в большинстве случаев только верхним метровым слоем толщи воды.

Для чистых вод открытого океана глубина проникновения сигнала в диапазоне 0,5–0,6 мкм («Лэндсат», канал 4) составляет 15–18 мкм, а в диапазоне 0,6–0,7 мкм (канал 5) — только 3 м [200].

Данные о прозрачности вод и о глубине проникновения света в некоторых типах вод представлены в виде схемы на рис. 47. Из нее видно, что глубокий голубой чистый цвет морской воды возможен при прозрачности (светопрозрачности) более 90% на 1 м глубины. Мутные воды характеризуются светопрозрачностью около 10–20% на 1 м глубины. Они прозрачны самое большее до 2 м (по измерениям диском Секки). В слабо и сильно замутненных водах

прибрежной зоны, в устьях рек, бухтах и гаванях светопрозрачность воды колеблется от 70 до 20% на 1 м. Прозрачность воды (по глубине погружения диска Секки) меняется от 5 до 2 м. Итак, на рассмотренной схеме отражен разброс данных, с которым приходится считаться при проведении дистанционного зондирования озер, рек и морских побережий.

3.5.7. Зависимость спектрального сигнала от концентрации в воде различных примесей. На большинство вопросов геологической практики можно ответить уже при визуальном дешифрировании аэрокосмических снимков, например о границах чистых и замутненных вод, выносе и переносе твердого стока у морских побережий, седиментации и транспортировке осадков течениями. Как уже упоминалось выше (рис. 42 и 43), на аэрокосмических изображениях по цветовым и тоновым различиям выделяются толщи воды, несущие твердый сток и без него (структура, фронт, градиент). Такие в разной степени нагруженные твердым стоком воды можно отдешифрировать на снимках, сделанных наложением негативов и позитивов или методом эквиденсит (разд. 5.3.6 и 6.3.3). При соответствующей постановке работ, как это ни

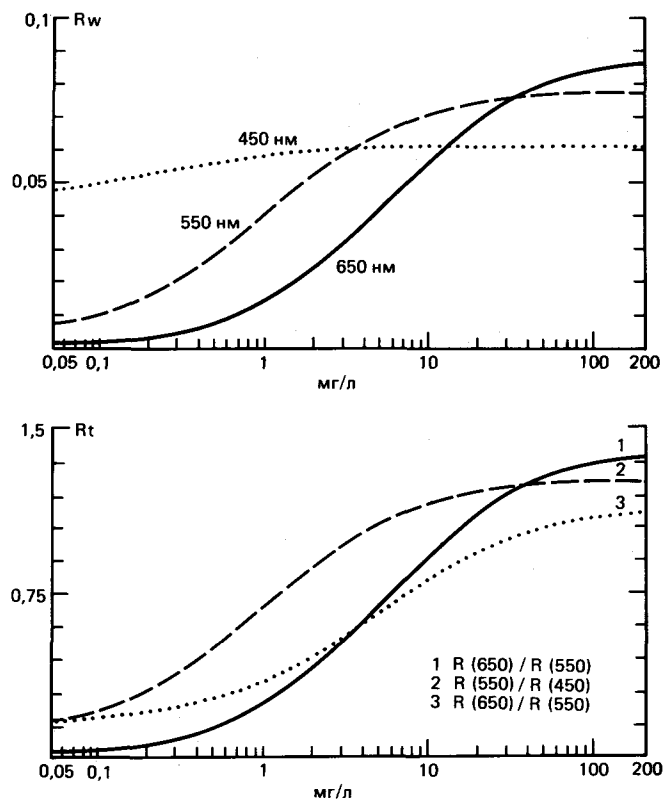


Рис. 48. Рассчитанное отражение R_w и спектральная яркость R_t для твердого стока, взвешенного в воде [59].

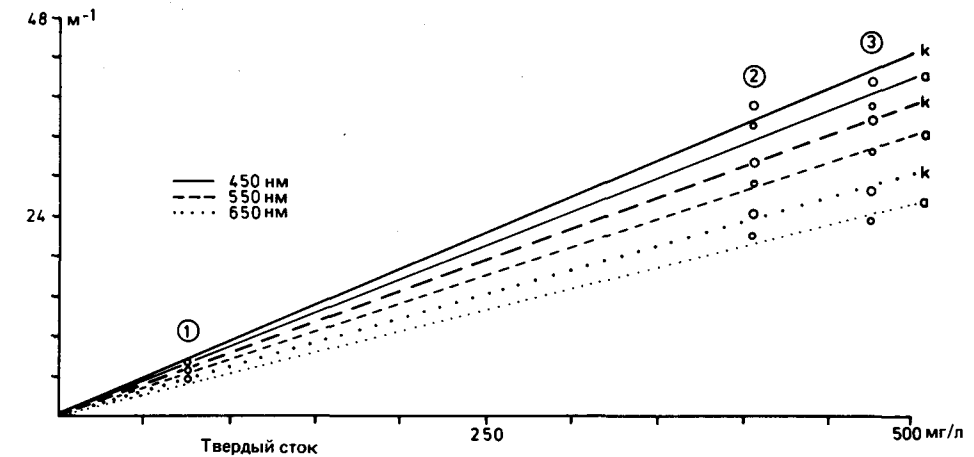


Рис. 49. Поглощение (a) и ослабление (k) в зависимости от концентрации твердого стока. Представленные точки характеризуют средние значения. Пробы отобраны в трех местах на берегах Эльбы: 1 — Штёрмюндунг, 2 — Брокдорф, 3 — Брунсбюттель. Измерения проводились в зеркальной кювете [59].

удивительно, можно определить в толще воды вид и концентрацию (мг/л) примесей, растворенных или находящихся в виде суспензии.

При настройке многозонального сканера как измерительного прибора [58] можно получить информацию о виде и концентрации примесей по спектрам эхо-сигналов от разных толщ воды, которые связаны в виде функции показателя отражения $R(\lambda)$ и спектрального соотношения $Rt = (\lambda_1/\lambda_2) = R(\lambda_1)/R(\lambda_2)$ (рис. 48). Правильное определение различных примесей и их концентраций основано на знании количественной зависимости между величиной сигнала и определенной концентрацией примесей. Прежде всего здесь важна зависимость коэффициентов рассеяния и поглощения от количества и состава примесей. Приблизительно эти зависимости можно рассчитать по сигналу, сформированному рассеянным свечением атмосферы [58]. Рассмотрим результаты исследований [14, 58, 59, 200, 202, 265, 322], связанных с оптическими процессами параметров, которые необходимы для определения примесей в приповерхностном слое по данным дистанционного зондирования.

Систематизированное изложение основных представлений и проблем дистанционного изучения примесей в приповерхностном слое воды сделано в работе Дёрффера [58], который приводит результаты экспериментальных исследований в эстуарии Эльбы [59].

Фишер [14] в своей монографии описывает результаты измерений твердого стока в водах океана, эксперименты на моделях, приводит расчет соответствующих математических моделей и комментирует их.

Концентрация групп примесей (геля, твердых частиц и фитопланктона) вызывает спектральное ослабление, или аттенуацию. Оно определяет глубину, на

которой формируется направленный вверх эхо-сигнал, регистрируемый на поверхности.

В своей публикации Дёрффер [59] описывает основные результаты пронумерованных экспериментов, которые ниже приведены в его же последовательности. Выводы Дёрффера строгие только для условий, описанных в разд. 5.3 его работы. Это — вертикальная гомогенность, диффузное облучение, коррекция ошибок из-за граничного слоя и атмосферы.

1. Если в воде содержится только оптически однородная субстанция, то можно определить ее присутствие и концентрацию (с помощью эмпирического алгоритма или инверсии уравнений переноса излучения, полученных опытным путем) по возвращенному потоку излучения (эхо-потоку), используя параметры, полученные опытным путем по показателю отражения лучей отдельных спектральных диапазонов или из соотношения спектрального отражения двух диапазонов.

2. Только при пониженной концентрации ее колебания вызывают существенное изменение сигнала. При высоких концентрациях изменение сигнала незначительно. Чтобы вывести абсолютные данные измерений, необходимо очень точно определить параметры поля излучения. Так как необходимая точность, как правило, не достигается, то можно считать по величине измеренного сигнала только область и порядок концентрации.

3. Измеренные значения параметров только тогда могут быть эквивалентны концентрации некоторых групп поглощающих и рассеивающих примесей, когда колебания концентрации других примесей происходят в незначительных пределах. Для вод эстуария Эльбы такое измерение можно было провести только для твердых частиц (твердого стока). В оценке его концентрации могли иметь значение параметр $R(\lambda =$

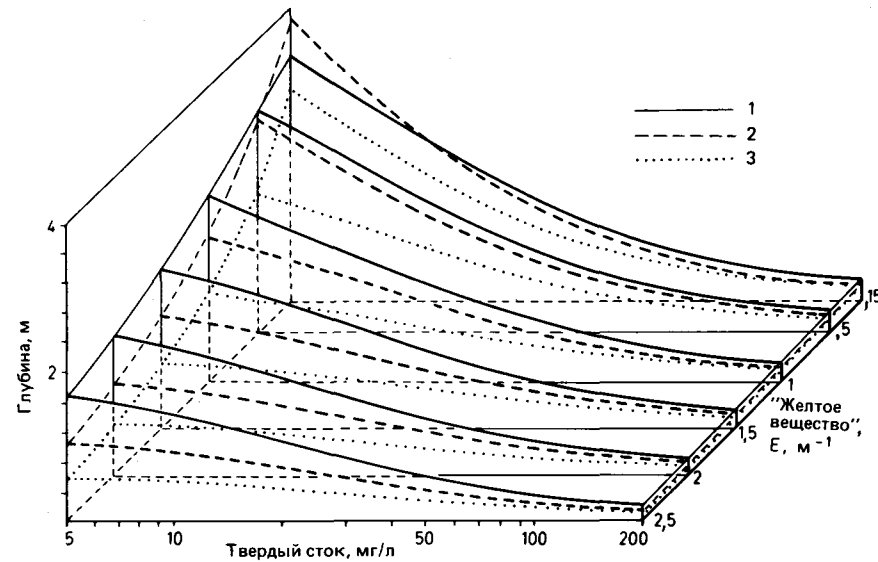


Рис. 50. Рассчитанная глубина сигнала в зависимости от концентраций твердого стока и желтого вещества. Рисунок дает представление о глубине, с которой на поверхность воды возвращается 99% энергии эхо-сигнала. В воде содержится также фитопланктон с концентрацией хлорофилла (скелетонема) 50 мг/л [59].
1 – 650 нм; 2 – 550 нм; 3 – 450 нм.

= 0,65 мкм) – в качестве независимого от колебаний концентрации планктона и геля (желтого вещества) и параметр $R_t(0,65 \text{ мкм}/0,55 \text{ мкм})$ – только при высоком отношении концентраций нерастворимых частиц мути и геля.

4. Только качественное распознавание групп примесей в смеси без определения их концентраций, как правило, невозможно, потому что эквивалент и концентрация трех различных групп примесей (геля, нерастворимых твердых частиц и фитопланктона) всегда вместе определяют поле яркости возвращенного потока излучения. Поэтому для определения некоторых субстанций (примесей) необходим к тому же спектральный анализ.

5. Спектральную глубину сигнала и глубину проникновения излучения можно рассчитать, если известны концентрации и коэффициенты всех поглощающих и всех рассеивающих субстанций. Они могут иметь смысл в предположении вертикальной однородности столба воды, если не принимать в расчет расслоенности вод океана. Вывод этих величин из поля яркости возвращенного излучения предполагает точное определение концентраций [59].

Достоверность определения вида встреченных примесей и их концентрации может быть сведена к минимуму, если примеси в столбе воды распределены равномерно, если дно моря расположено выше оптической глубины и его отражение влияет на спектральный сигнал и если в пределах района съемки концентрации примесей и их оптические коэффициенты изменчивы.

Из результатов изучения вод устья Эльбы [58]

следует, что дистанционное зондирование близповерхностных слоев воды невозможно без точного знания вида, области концентрации примесей, их распределения по составу и количеству в толще воды и оптических коэффициентов каждой из них.

На примере обработки сканерных изображений Гельголандской бухты в эстуарии Эльбы (каналы 5 и 4, соответственно 0,5–0,6 и 0,6–0,7 мкм), полученных со спутника «Лэндсат-2», была показана возможность изучения твердого стока, или мутевой взвеси [59]. Но так как во время полета не были проведены подспутниковые измерения с судна, о виде взвеси в ее водах нет информации. Есть доказательства, что оптическая плотность и соответственно разница оттенков (серого тона) на снимках с «Лэндсат» представляют фотообразы существующих полей взвеси, что следует из увеличения оптической плотности фотообразов Балтийского моря на разных снимках, которые соответственно передают постепенно уменьшающееся содержание взвеси. По опыту многих измерений *in situ* установлено, что мутевая взвесь в устье Эльбы состоит преимущественно из неорганических частиц. Количественная интерпретация основывалась на записанных на магнитную ленту данных об оптической плотности изображения в отдельных точках (пиксель-элементах). Обработка изображений проводилась по «Дибис-системе» (специально написанной программе в научно-исследовательской организации DFVLR, Оберпфaffenхоффен). Различные этапы обработки состояли из измерения отражения в каналах 4 и 5 многозонального сканера и построения по этим данным ратфо-изображения, т. е. числового

изображения по отношениям спектральных яркостей каналов 4 и 5. Все три изображения переводились (пересчитывались) на относительный состав мутевой взвеси одинаковым способом. На представленных в таком числовом виде отношениях яркостей каналов 4 и 5 и яркости изображения канала 5 отчетливо передали наиболее сильные зоны мутности. Такие же данные по каналу 4, наоборот, показали различия в зонах небольших концентраций примесей в относительно чистых водах. Расчет концентраций проводился по спектральным яркостям изображения канала 5 при предположении, что средняя концентрация гелей и фитопланктона постоянна. Были введены поправки на атмосферные условия во время съемки.

Для рассчитанных областей концентрации эквивалентные ступени хорошо коррелировались с концентрациями мутевой взвеси, полученными при более ранних съемках и измерениях на месте.

Сидор [289] на примере Верхнего озера изучал, как оптическая плотность черно-белого изображения озерных вод, сделанного со спутника «Лэндсат», передает изменения содержания вредных веществ и осадков в водах близ юго-восточного побережья. Он сравнивал данные измерений с лодки (в представительных пунктах) с изменениями оптической плотности (в сравнении со ступенями серого тона оптического клина), фиксирующими характерные воды на снимках. Результаты его исследований представлены в виде графика (рис. 51), который может иметь основополагающее значение в вопросах количественной обработки спектральных характеристик вод. Прежде всего график показывает, как изменяются отражательные свойства двух участков воды, содержащей осадки, в зависимости от длины волны падающего излучения. Оба типа вод – промышленно загрязненные воды гавани и воды озера, переносящие благодаря эрозии юго-восточного берега частицы красной глины, – отражают падающий солнечный свет в голубой и зеленой зоне сильнее, чем в красной и ближней инфракрасной зонах спектра. Поэтому на графике показано, что одинаковые концентрации (в мг/л) суспензий различных веществ на изображениях каналов 4, 5 и 6, полученных многозональным сканером спутника «Лэндсат», каждый раз могут быть почти идентичны по спектральным признакам. Положение обеих кривых на графике соответствует концентрации осадка до 3,2 мг/л. Различие спектральных характеристик обеих суспензий недостаточно для того, чтобы можно было определить разницу в их вещественном составе. Соответствующее определение может иметь значение для сравнения спектральных характеристик взвесей более высокой концентрации. Примерно в полосе перекрытия каналов 5 и 6 (около 0,6 мкм) кривые пересекаются. Здесь величины спектрального отражения разновидностей взвесей при одинаковой концентрации равны. Интенсивность отражения, т. е.

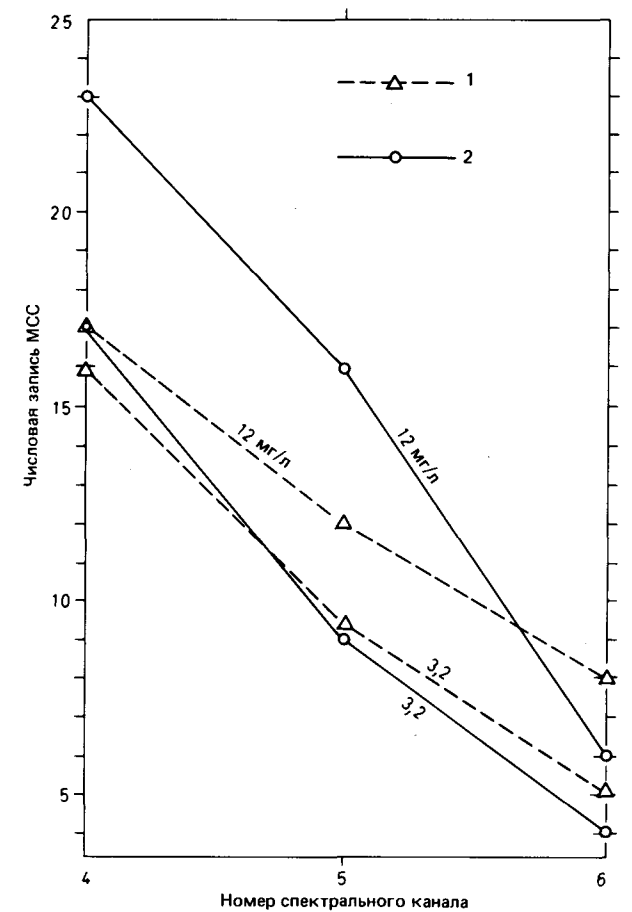


Рис. 51. Соотношение спектров отражения вод озера Верхнего при различном составе и разной концентрации твердого стока. По данным сканерных съемок с «Лэндсат» [289]. 1 – воды гавани с твердым стоком; 2 – мутные воды южного побережья.

яркость изображения канала 4, для обеих суспензий – вод озера с концентрацией 3,2 мг/л и загрязненных вод гавани с концентрацией 12 мг/л – так близко подходят друг к другу, что нет возможности различить тип и концентрацию мути в отснятой толще воды. Напротив, эта интенсивность очень четко в сравнении с предыдущими типами разделяет спектральные признаки вод побережья, имеющих высокую концентрацию глинистых частиц, на снимках канала 4. В канале 6 интенсивность отражения (оптическая плотность) четырех типов взвеси различается больше, если их спектральные сигналы хоть немного отличаются друг от друга. Эти схематические представления показывают, как проблематична и противоречива может быть корреляция данных спектральных съемок вод, переносящих осадки.

Проблематичность зависимости цвета воды и соответственно величины ее мутности от количества находящегося в ней во взвеси вещества подчеркива-

лась и другими исследователями [267]. Так, могут быть, например, взвешены в воде некие мелкие частицы темного материала, которые будут излучать часть нисходящего потока энергии так же, как большое число очень тонких белых частиц (при одинаковом их массовом содержании в мг/л). С другой стороны, встречающиеся в озерах речная муть и осадки имеют разные удельные спектральные свойства, которые можно использовать для их распознавания по данным дистанционного зондирования.

Более детальные исследования показали, что получение количественной и качественной информации о примесях в воде и их концентрациях возможно по результатам многозонального сканирования. Для этого необходимо иметь данные о доле в регистрируемом приемником потоке излучения от границы вода–воздух, от дна моря и из атмосферы. Опытным путем было установлено, что на точность определения возвратного реактивного рассеяния можно установить высокие требования, такие же как требования на методы фильтрации и коррекции шумов от обоих типов источников: отражения Френеля на границе вода–воздух и рассеяния атмосферы [58]. Дёрффер сформулировал эти требования для решения проблем, возникающих при многозональном сканировании:

а) Для выбора методов обработки необходимо изучить в районе исследований следующие параметры:

- вид рассеивающей и поглощающей субстанций и их объединение в генетически единые группы;
- вариации их оптических коэффициентов в зависимости от величин концентрации;
- встречающиеся в районе исследований повышения концентрации;
- преобладающее вертикальное разделение от поверхности до оптической глубины $kz = 2,3$ (k – коэффициент ослабления для излучения, z – глубина в метрах).

Во время полета необходимо регистрировать для коррекций величину шумов:

- высоту Солнца;
- облачность (влияние геометрии общего потока солнечного излучения и потока отраженного излучения на граничных поверхностях облаков);
- аэрозольную составляющую (модификацию атмосферного излучения);
- ветер (модификации спектров наклона волн на поверхности, неодинаково действующие на геометрию проникающего в воду потока излучения).

в) При установке многозонального сканера следует добиваться, чтобы показатель отражения $R(\lambda)$ определялся как можно точнее, причем по мере возможности следует избегать:

- угла измерения, при котором фиксируется прямо отраженный солнечный свет;
- больших углов наблюдения, при которых вели-

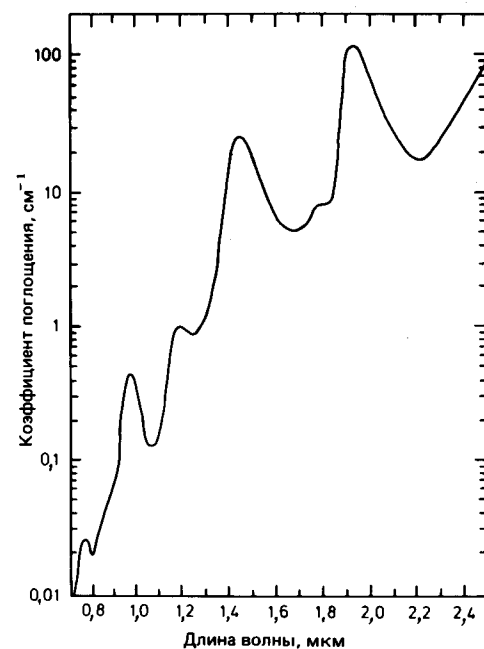


Рис. 52. Соотношение спектров поглощения чистых вод в инфракрасном диапазоне. (С разрешения издателя из [135].)

ка доля отраженного диффузного излучения и длин путь луча через атмосферу;

- неопределенных соотношений для излучения (совершается ли съемка при безоблачном небе или при сплошной облачности);
- высоких долей рассеянного излучения, которые уменьшают снижением высоты полета;
- при высотных полетах необходимо, кроме того, точное определение доли атмосферной дымки в сигнале [59].

3.5.8. Спектральные характеристики вод в инфракрасном излучении. В длинноволновой части оптического излучения поглощение потока солнечной энергии водой относительно быстро увеличивается (рис. 52). Глубина проникновения солнечных лучей с увеличением длины волны излучения уменьшается. Уже в ближнем инфракрасном диапазоне чистые воды озер, рек и морей почти полностью поглощают световой поток, и поэтому поверхность водоемов на инфракрасных узкоканальных аэрофотоснимках в черно-белом варианте оказывается черной. На узкозональные черно-белые инфракрасные пленки съемку обычно ведут при красном светофильтре, чтобы отфильтровать коротковолновую часть излучения и зарегистрировать его в диапазоне 0,7–0,9 мкм. На узкозональных аэрокосмических снимках, особенно тех, которые сняты в строго ограниченном интервале длин волн только ближнего инфракрасного диапазона, например на изображениях в каналах 6 (0,7–

0,8 мкм) и 7 (0,8–1,1 мкм), полученных с многозональных сканеров спутников «Лэндсат-1, -2 и -3», очень четко отделяются чистые или слабо замутненные воды озер, рек и прибрежных зон океанов (с черным цветом изображения) от более светлых, четко очерченных площадей, соответствующих участкам суши. Этот контраст изображения используется в картографии для уточнения конфигурации берегов рек, озер и морей, а также при съемках для определения размеров наводнений и паводков, слежения за ними и оценки возможных катастрофических последствий.

Сильно мутные воды с большим количеством осадка могут отражать только инфракрасное излучение ближнего диапазона. При этом доля инфракрасного излучения в проникающем световом потоке настолько сильно уменьшается, что в сильно загрязненной минеральными (и неминеральными) примесями воде, вероятно, только верхний 5-см слой может формировать спектральный сигнал, как, например, на изображениях, полученных со спутников «Лэндсат» в каналах 6 и 7.

В тепловом инфракрасном диапазоне (8–14 мкм) поведение воды аналогично поведению абсолютно черного тела, которое поглощает всю энергию падающего на него потока излучения и выделяет ее в зависимости от собственной температуры. Здесь, в температурном диапазоне инфракрасного излучения, излучательная способность воды наиболее сильна. Отраженное, а также рассеянное излучение, как, например, свечение неба, формируют только коротковолновую (до 3,5 мкм) часть возвращенного от поверхности Земли потока энергии. Сканерные съемки или радиометрические измерения с самолетов и спутников регистрируют в интервале 8–14 мкм только эмиттерное излучение воды, интенсивность которого зависит от ее температуры. Эта связь между испускаемым излучением и температурой воды используется в дистанционном зондировании для определения температуры рек, озер, прибрежных и открытых вод океанов. При этом воды озер или морей ведут себя как серое тело, спектральная излучательная способность которого известна, так что измерения спектрального излучения в определенных интервалах длин волн можно использовать для коррекции данных о температуре поверхности участков акваторий, над которыми проводится съемка. Для того чтобы можно было представить результаты обработки таких тепловых сканерных съемок, синхронно со съемкой должны регистрироваться референц-данные, т. е. проводиться измерения калиброванного излучения. Кроме того, спектро- и радиометрические съемки могут сопровождаться синхронными подспутниковыми из-

мерениями и калибровкой потока излучения с самолетов и судов. При обработке результатов измерений вторичного теплового излучения, полученных с помощью теплового сканера или радиометра, необходимо обратить внимание на то, что эти данные относятся только к самому верхнему слою толщи воды, потому что глубина проникновения инфракрасного излучения в диапазоне 8–14 мкм ничтожно мала. Практически измеряется только температура поверхности воды. Этот самый верхний, тончайший слой воды прилегает к поверхности раздела (или граничной поверхности) вода–воздух и поэтому подвергается воздействию метеорологических условий. Они не всегда создают в нем одинаковую температуру. Температурные различия в этом тончайшем слое, радиационную температуру которого получают измерениями с судов, могут достигать значений 1–2 К, но обычно меньше, примерно 0,5–1,0 К. Это различие температур – результат многофакторного процесса обмена энергией, который происходит между пограничным слоем воды и прилежащим к нему атмосферным слоем. Теплообмен между ними осуществляется как конвекцией, так и излучением, а, кроме того, вследствие испарения происходит охлаждение этого пограничного слоя воды. Есть решение модели такого теплообмена между водой и воздухом [262]. Прилегающий к поверхности раздела вода–воздух температурный слой воды постоянно нарушается ламинарным и турбулентным движением воды и воздуха. Здесь скрыта потенциальная возможность использования тепловых сканерных съемок для понимания процессов движения и перемешивания в толще воды. Возможности применения тепловых съемок для сопоставления тематических карт прежде всего зависят от температурного разрешения аппаратуры. При съемках равнинных областей (для их картографирования) тепловые и многозональные сканеры регистрируют перепад температур в 0,1 К. Абсолютная точность радиометров составляет в настоящее время 0,5 К.

Излученный водой спектральный сигнал ослабляется (в том же тепловом диапазоне) взаимодействием потока излучения с атмосферой под влиянием атмосферной эмиссии (разд. 2.1). Это имеет особое значение тогда, когда съемка или измерения в тепловом диапазоне проводятся со спутников. Здесь большую роль играет содержание паров воды в атмосфере. Одновременными измерениями вторичного теплового излучения в двух смежных каналах с приемом сигнала на общую антенну в окне прозрачности 10–13 мкм (например, со спутника NOAA 7 AVHRR) можно значительно улучшить атмосферную коррекцию.

4. МЕТОДЫ СЪЕМКИ И СЪЕМОЧНЫЕ ПЛАТФОРМЫ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

4.1. Фотографические методы

(Многозональная фотография, «Скайлэб»: камеры S 190A и S 190B, «Спейслэб»: Метрическая камера.)

Приведенные в предыдущих главах результаты исследований показывают, что спектральные характеристики горных пород, почв, растительности и вод зависят от длины волны падающего на них излучения, что определенные материалы и среды в специфических, часто типичных частях спектра сильно отражают или поглощают падающий на них поток энергии и что различия спектров отражения и поглощения разных материалов или одинаковых материалов, но в разном состоянии (например, сухом, влажном и т.п.) наиболее четко выражаются в определенных частях спектра. Поэтому в этих зонах от различных материалов и сред получают такие сигналы, которые можно использовать в дистанционном зондировании для дешифрирования, т.е. разделения и оконтуривания образов на аэрокосмических изображениях, и в наиболее благоприятных случаях для распознавания (не только образов, но и самих материалов). Очень важно, чтобы съемка местности (на которой осуществляются, например, картирование или другие исследования) проводилась в тех спектральных диапазонах, в которых характеристики спектрального отражения и поглощения оптического излучения представляющих интерес горных пород, почв, видов растительности и вод имеют максимальные различия.

Панхроматические аэрофотофильмы (черно-белые, снятые через желтый или оранжевый фильтр), полученные при стандартных аэрофотосъемочных полетах, фиксируют отраженный от объектов на местности световой поток в относительно широком диапазоне (примерно от 0,5 до 0,9 мкм). Применение к объективу аппарата светофильтров других цветов позволяет добиться того, что на пленку будет попадать световой поток только определенного, строго ограниченного интервала длин волн. Таким способом можно увеличить контрастность оттенков серого тона между различными образами объектов ландшафта

и тем самым усилить их дешифрируемость или различимость. Какие интервалы длин волн особенно подходят для контрастного представления определенных объектов ландшафта или состояний ландшафта, зависит от характера спектрального отражения материалов, которые как в районе съемок, так и на его аэрокосмических изображениях находятся рядом друг с другом. Это хорошо иллюстрируется примером многозональных фотографий шести штучков пород разного типа (рис. 53). Для того чтобы копии снимков штучков имели одинаковую яркость и степень ослабления фильтром, репродуцирование их проводилось вместе с оптическим клином. Нижняя половина оптического серого клина смонтирована с репродукционной шкалой цветов и поясняет их изменения в каждой из полученных спектральных зон.

Информативность снимков явно неодинакова. Первая группа фотографий (рис. 53, а) показывает, как выглядят отдельные типы пород, если их снять на черно-белую панхроматическую пленку без фильтра. Несмотря на известные различия пород по текстуре и цвету, например между темно-серой грауваккой и красно-коричневым биотитовым порфиритом и между красноватым, мясо-красным гранит-порфиром и матовым бледно-зеленым пропилитом, их едва можно отличить друг от друга, так как они оказались одинаковыми или очень похожими по серым фототонам. Интенсивность фототона пантеллерита — одной из разновидностей лав (матовая оливково-зеленая) — почти соответствует интенсивности тона гранит-порфира и пропилита. Только кварцевый порфир (светлый травяно-зеленый) выделяется среди остальных пород на снимках очень светлым тоном. Итак, несмотря на очень разный цвет самих штучков пяти типов пород, интенсивность их фототона на снимках почти одинакова. Относительное соотношение фототонов на снимках шести типов пород изменяется с применением сменных светофильтров: голубого, зеленого, красного и желтого — и заменой пленки на узкозональную черно-белую инфракрасную (с подстановкой красного светофильтра). Возможно повышение контрастов. Так, объекты, собственный цвет которых совпадает с цветом светофильтра, воспроизводятся

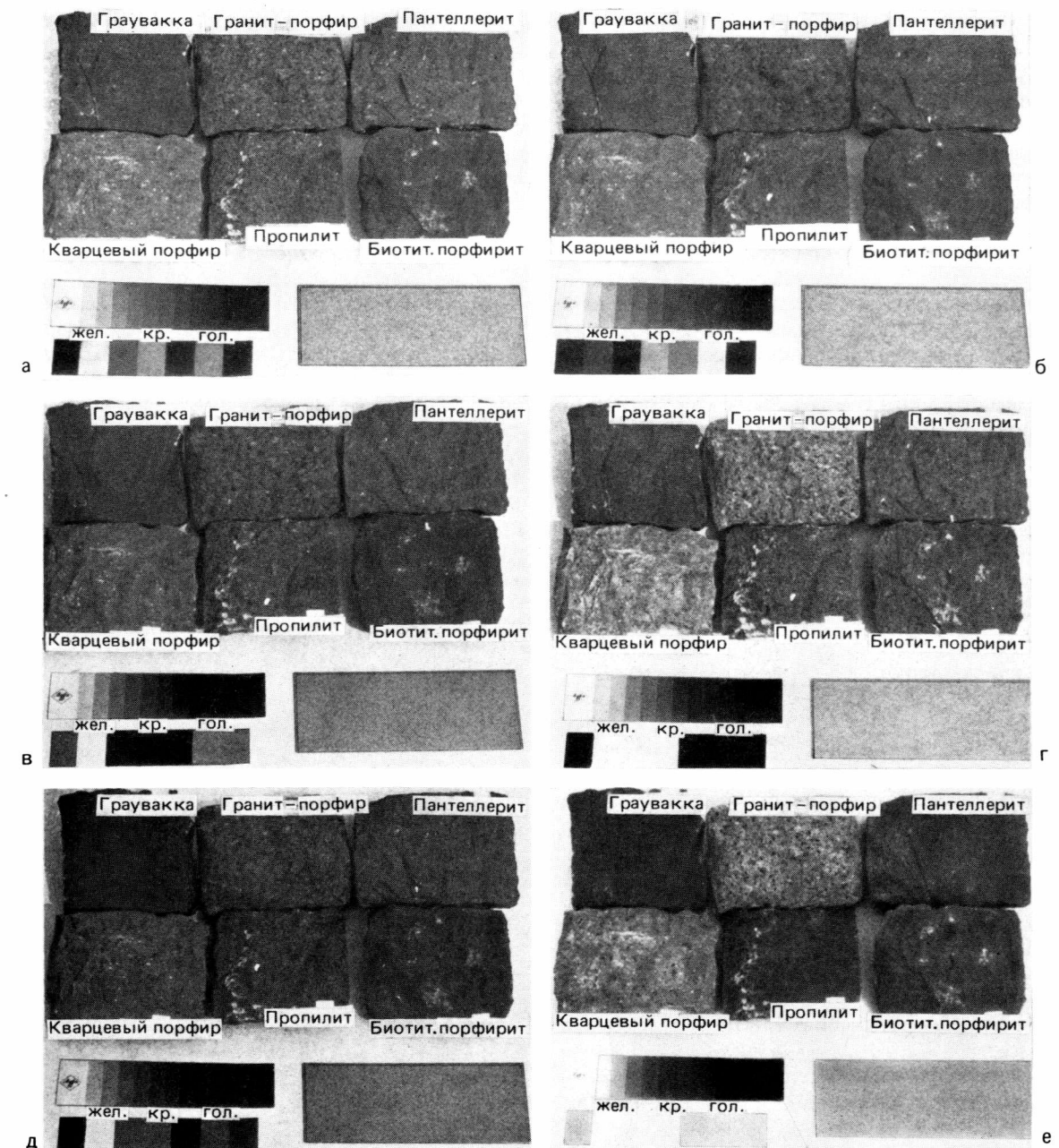


Рис. 53. Воспроизведение различных пород на фотоснимках, сделанных при различной комбинации фильтр/пленка. а — панхроматическая пленка, без фильтра; б — панхроматическая пленка, с голубым светофильтром; в — панхроматическая пленка, с зеленым светофильтром; г — та же пленка, с красным светофильтром; д — та же пленка, с желтым светофильтром; е — инфракрасная пленка, с красным светофильтром [95].

более светлыми, чем другие. Дополнительные цвета будут сильно погашены. Например, выделятся лучше других гранит-порфир и пропилит (рис. 53, г, е), причем лучше, чем на снимках остальных групп (рис. 53). Останутся одинаковыми только граувакка и биотитовый порфирит. Контраст между гранит-порфиром и

кварцевым порфиром лучше всего выражен только в одной группе (рис. 53, б). Наоборот, пантеллерит и биотитовый порфирит, почти идентичные на одной из серий фотографий (рис. 53, е), ясно различаются на двух других (рис. 53, в и д).

На этом примере становится ясным, что съемка в

выбранном, строго ограниченном спектральном диапазоне улучшает контрасты фототона, более информативна и скорее может дать зависящие от материала спектральные характеристики, чем фотографирование на панхроматическую пленку без фильтра. Чтобы лучше уловить спектральную специфику объектов ландшафта и использовать ее при дешифрировании, были разработаны методы многозональной фотосъемки.

В приведенном выше примере рассматривалась такая модель съемки, когда четыре фотокамеры синхронно снимают одни и те же объекты ландшафта. Отдельно подобранные для каждой камеры комбинации светофильтра с пленкой позволяют регистрировать отраженный от объектов световой поток в строго ограниченных зонах спектра. Чаше всего использовались такие комбинации светофильтров с пленкой, которые позволяли регистрировать фотокамерой свет только в голубой, зеленой, красной или инфракрасной зоне на черно-белую пленку в фотокамере. В этом случае каждый из снимков можно было рассматривать в качестве модели для дешифрирования узкозональных аэрофотоснимков местности. Возможны и

другие комбинации светофильтров с черно-белой, цветной и цветной инфракрасной пленками.

В другом эксперименте использовалась для съемки местности одна фотокамера с четырьмя объективами и со светофильтрами разного цвета на каждом из них (рис. 54). Для диапазона 0,44–0,925 мкм был выбран и поставлен светофильтр № 40, который пропускает на пленку световой поток в узкой, строго ограниченной части спектра. Таким образом, получились четыре узкозональных снимка одной местности.

Многозональной фотокамерой МКФ-6, используемой при съемках с космических кораблей «Союз» и изготовленной в ГДР на предприятии «Карл Цейс, Йена», можно получить шесть синхронных снимков в разных спектральных зонах (рис. 55). В ней смонтированы шесть объективов с узкозональными светофильтрами для диапазона 0,48–0,840 мкм и шесть кассет для пленки. Формат негатива 55 × 81 мм. Фильтры подобраны с таким расчетом, чтобы диапазоны проходящего светового потока не перекрывались. Шесть фильтров с разной светосилой, установленные на шести объективах камеры МКФ-6, обуславливают ее разное спектральное разрешение (или спектраль-



Рис. 54. Мультиспектральная камера, модель 10 (Prospekt Spektral Data).

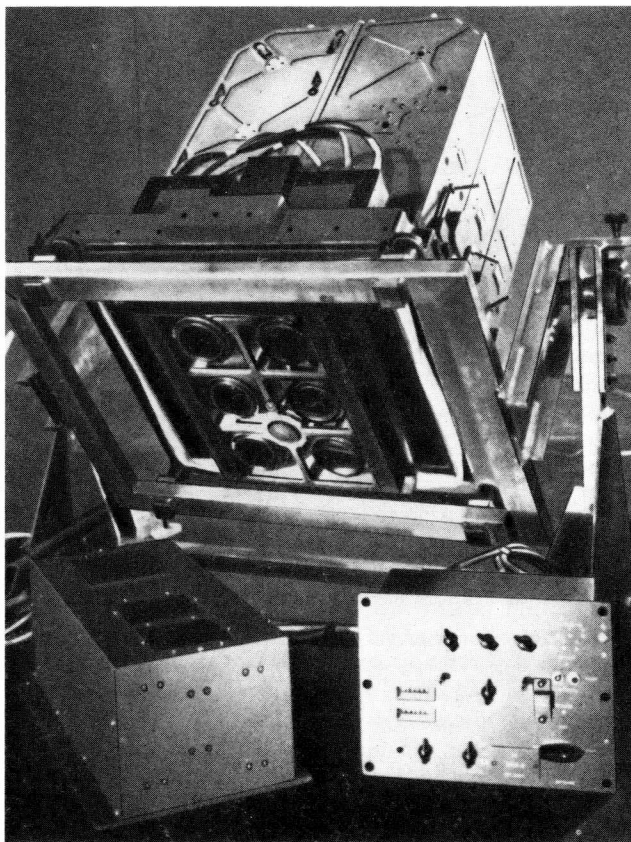


Рис. 55. Многозональная камера МКФ-6 для съемок в шести спектральных диапазонах. (Werkphoto Jenoptik, Jena GmbH.)

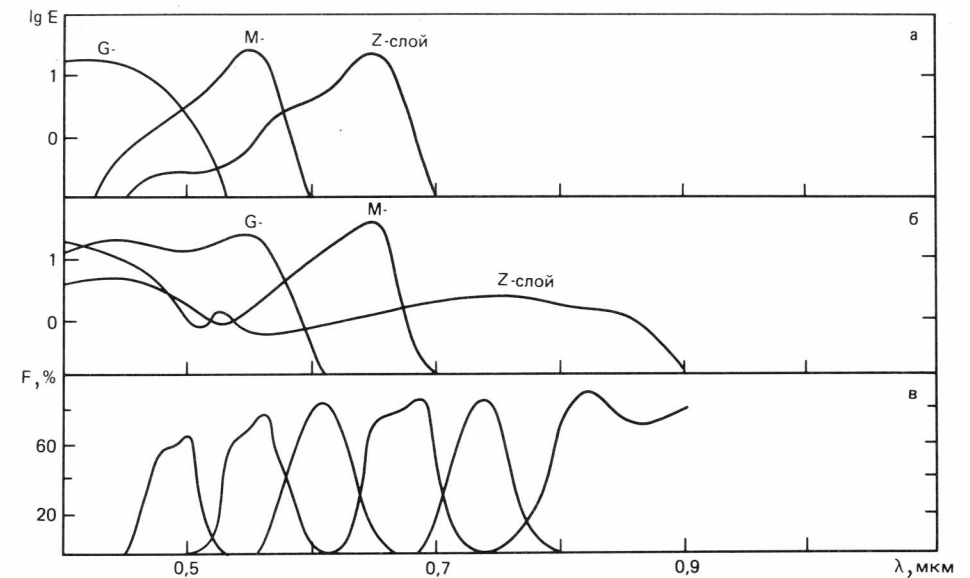


Рис. 56. Спектральная чувствительность (E) камеры МКФ-6 при зарядке цветной и цветной ИК-пленкой и светопроницаемость (F) при установке стандартных цветных фильтров камеры [32]: а – аэрофотосъемочная цветная пленка: G – желтый, M – бледно-красный, Z – васильково-голубой; б – аэрофотосъемочная ИК-цветная пленка; в – кривая светофильтров, МКФ-6М.

ную чувствительность) в этих выбранных зонах спектра, что иллюстрирует график (рис. 56) спектрального разрешения негатива на цветной (каналы 1–4) однотипной пленке и на цветной инфракрасной пленке (каналы 5, 6).

Для дешифрирования многозональных аэрокосмических снимков существуют различные проекторы, комбинирующие цвета, – так называемые мультиспектральные проекторы. Они предназначены для того, чтобы из трех (или четырех) узкозональных изображений одного объекта, снятых какой-либо многозональной фотокамерой и фотохимически обработанных до прозрачного диапозитива (или негатива), получить нормальное цветное или условно-цветное (или спектрально-цветное) изображение, в том числе и цветное ИК-изображение объекта, подбором соответствующих комбинаций светофильтров прибора. Например, на предприятии «Карл Цейс, Йена», создан мультиспектральный проектор MSP-4 (рис. 57) для визуальной обработки черно-белых зональных снимков, сделанных камерой МКФ-6. На нем можно установить до четырех дубль-диапозитивных (дубль-негативных или прозрачных позитивных) кадров и получить (с высоким геометрическим разрешением и небольшой ошибкой перекрытия) адекватное цветное или условно-цветное изображение местности в разных вариантах. Относительно малые черно-белые контрасты исходных кадров на нем можно превратить в значительное различие цветов – так называемый перепад цветов условно-цветного изображения.

Большие возможности комбинирования контрастов в проецируемом на экран изображении или комбинаций цветов, т.е. изменения информативности получаемого изображения, могут оказаться полезным средством для проведения тематического дешифрирования (например, для геологического картирования) материалов аэрокосмической съемки.

В качестве примера рассмотрим многозональные аэрофотоснимки (рис. 58). Эти три снимка одной и той же местности были сделаны во время специальных аэрофотосъемочных залетов, проведенных фирмой «Ганза-Люфтвайде, Мюнстер». Съемка осуществлялась на инфракрасную аэрофотопленку камерой «Цейс» (многозональная камера с фокусным расстоянием 8/2480 мм – MUK 8/24) с фильтрами: желто-оранжевым (0,55–0,62 мкм), темно-красным (0,61–0,722 мкм) и инфракрасным (0,7–0,92 мкм); масштаб снимков 1:7000. Сопоставлялись образы определенных объектов ландшафта (поля, кустарники, водоемы) по ряду из трех узкозональных снимков так, чтобы можно было узнать, каковы оптическая яркость фотообразов и их контрастность для разных объектов ландшафта. Соответственно характеристики объектов, зависящие от их состава, изменялись от снимка к снимку при общем увеличении контрастности изображения на инфракрасных снимках (правый в ряду снимков). Наибольшая выраженность контрастов (светлого и темного серого) проявилась: между водой и землей; между площадями, заросшими разными кустарниками; между сухой и сырой почвами.

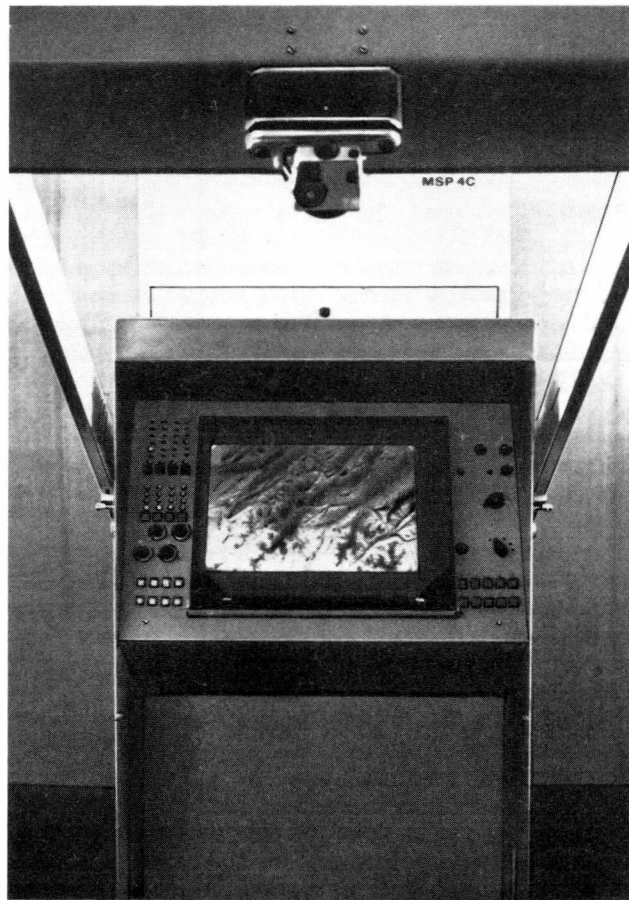


Рис. 57. Мультиспектральный проектор MSP 4C для воспроизведения условно-цветных изображений. (Werkphoto Jenoptik, Jena GmbH.)

Для землеведения первое многозональное фотографирование с пилотируемых космических кораблей было проведено экипажем корабля «Аполлон-9». В иллюминатор космического аппарата были вмонтированы четыре камеры Hasselblad 500EL (объектив «Цейс», стандартный, светосила 2,8, фокусное расстояние 80 мм, планарный), которые включались астронавтами вручную. Использовались четыре комбинации светофильтр–пленка: пленка «Панатомик-Х» с фильтром 25А (красный) и фильтром 58 (зеленый), пленка «Эктахром-ИК» с фильтром 15 и пленка «Инфрарот-Аэрографик» с фильтром 89В. Задачей этого эксперимента, имевшего код 5065, было проведение многозональной фотосъемки со спутников для оценки возможности решения геологических и разных других землеведческих задач.

Были сделаны снимки представительных типовых ландшафтов разных районов земного шара, выбранных экипажем.

В ходе эксперимента SO 65 были сделаны четыре спектрально-зональных снимка (рис. 59, а–г) одного участ-

ка, расположенного на юге горной системы Аппалачи. На них видно, что фотообраз снимаемой местности и контрастность образов определенных объектов ландшафта (т.е. информативность изображения) меняются в зависимости от зоны светопрозрачности при комбинации фильтр–пленка: зеленой (0,47–0,61 мкм), красной (0,59–0,72 мкм), ближней инфракрасной (0,68–0,89 мкм) и цветной спектрально-зональной (с ближней инфракрасной).

В 1973 и 1974 гг. во время предпринятых НАСА полетов космического корабля-лаборатории «Скайлэб» было проведено опробывание сенсоров (приемно-запоминающих и передающих автоматических телеметрических систем) для землеведения. Изучение возможностей использования камер и(или) систем высокого разрешения для тематического картирования и съемки состояний окружающей среды представляют наибольший интерес из всех работ, проводившихся в рамках проекта ЭРЭП (Earth Resources Experiment Package). Была установлена мультиспектральная съемочная система, состоящая из шести камер с идентичной оптикой (фокусное расстояние 15,2 см, относительная светосила 2,8–1,6). В каждой камере опробывалась своя комбинация фильтр–пленка (часть проекта под шифром S 190А). Кроме того, использовалась однолинзовая камера ЕТС (фокусное расстояние 45,7 см, диафрагма 4) названная «Земная поверхность» («Earth Terrain Camera»), которая была снабжена устройством компенсации перемещения космического аппарата (часть проекта S 190В.) Тестовые участки для сравнения одновременно снимали 13-канальным многозональным сканером и фотографическими системами (часть проекта S 192). Дополнительно микроволновой радиометр-скаттерометр и альтиметр поставляли данные для коррекции и корреляции остальных сенсорных данных, т.е. результатов съемок (S 193 и S 194).

Диаграмма на рис. 60 дает наглядное, но схематическое представление о спектральных диапазонах и об устройстве сенсоров, применявшихся в разных экспериментах. Перекрытие по площади снимков различных съемочных камер космической лаборатории «Скайлэб» и стандартных аэрофотоснимков показано на рис. 61.

Траектория полета космического корабля «Скайлэб» имеет наклон к экватору около 50°. Высота полета около 435 км. Время одного витка орбиты 93 мин. Все 5 суток орбитальная лаборатория «Скайлэб» находилась на одной орбите. При втором, третьем и четвертом полетах космического корабля «Скайлэб» было сделано более 35 тыс. фотоснимков тестовых районов в США, Южной Америке, Африке и Австралии, а также в некоторых южных областях Европы и Азии. При обработке фотоснимков, сделанных с космического корабля «Скайлэб», в 164 экспериментах участвовали 148 специалистов и рабочих групп из США и 19 других стран. Последний, 164-й

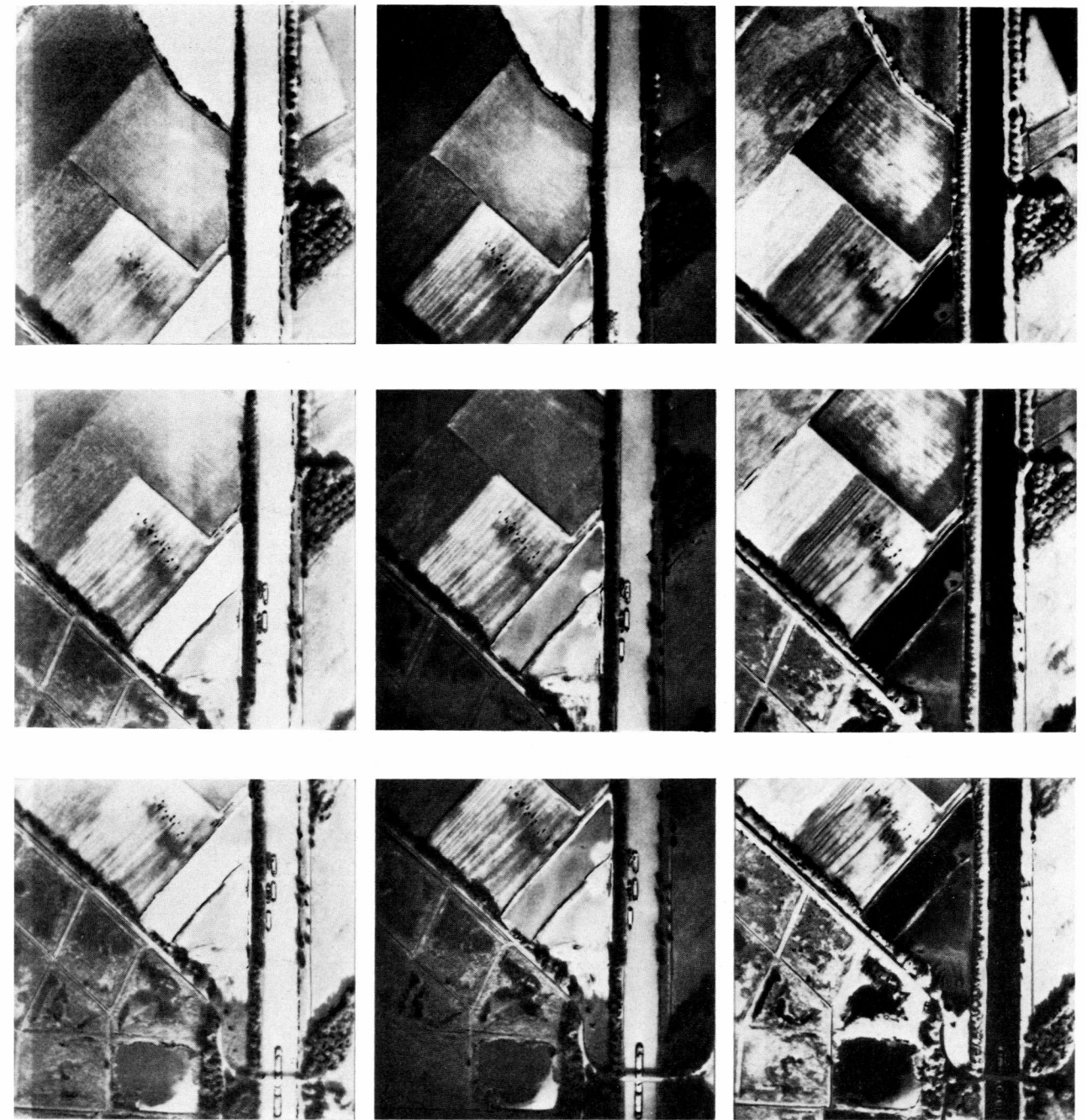


Рис. 58. Пример многозональных снимков. Мультиспектральная камера MUK 8/24; съемки – «Ганза-Люфтбольд, Мюнстер». Пленка – «Кодак ИК», фильтры – желто-оранжевый (550–620 нм), темно-красный (0,61–0,722 мкм) и ИК (700–920 нм). Примерный масштаб снимков 1:7000. (Freig. Reg. Präs., Munster 3892/72.)

эксперимент больше чем на треть был посвящен решению геологических и гидрогеологических задач. В остальных обсуждались возможности использования результатов съемок со «Скайлэб» для картографии, пространственной планировки, сельского и лес-

ного хозяйства, океанографии и метеорологии. В рамках отдельных экспериментов изучалась проблема обработки данных, прежде всего возможность классификации данных, полученных при многозональной фотосъемке.

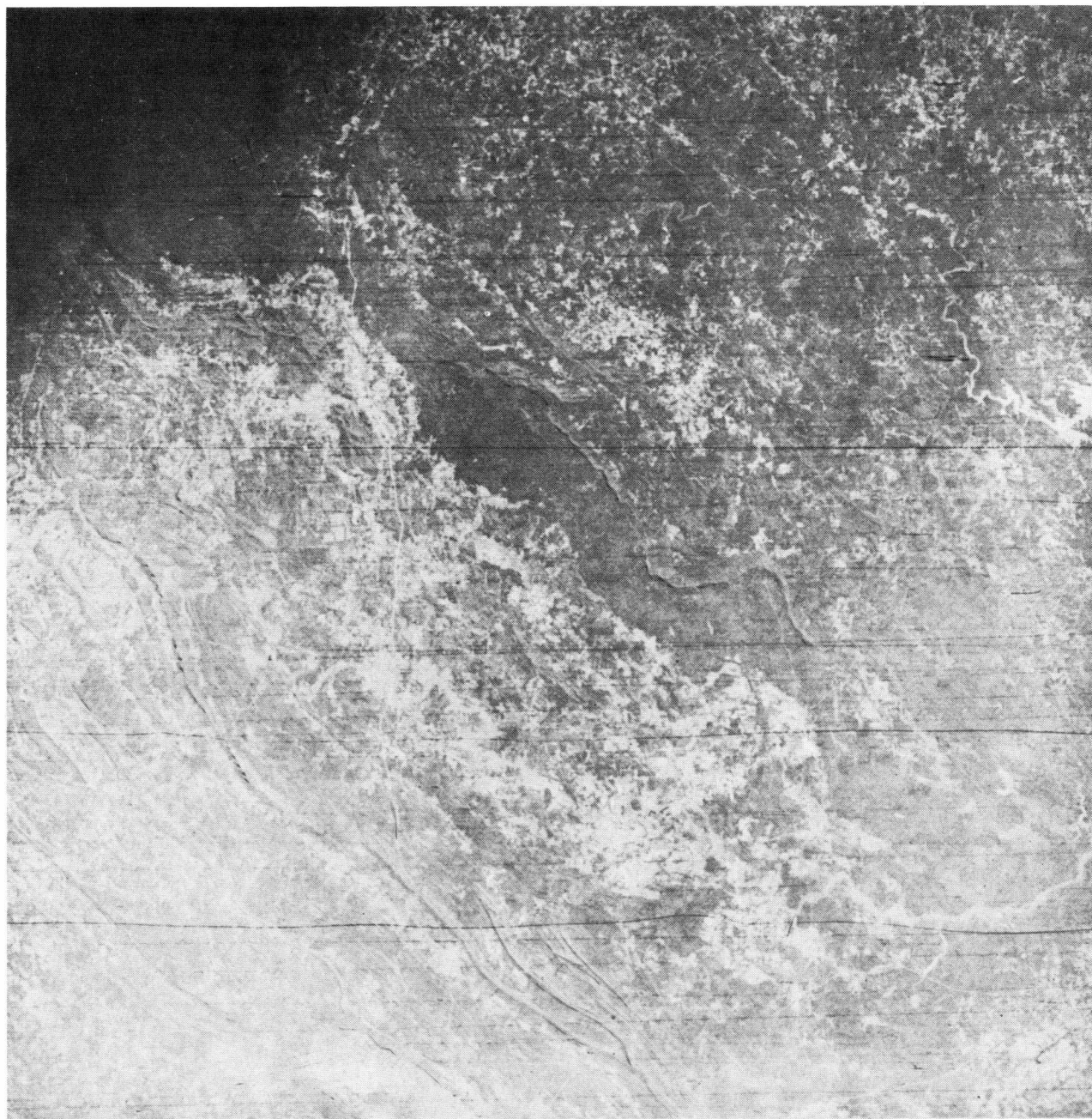


Рис. 59а–59г. Спектрозональные снимки одного и того же ландшафта в северо-восточной части Алабамы.
Рис. 59а. Зеленый (470–610 нм).

Результаты эксперимента обобщены в соответствующей сводной монографии-документе¹⁾, которую в принципе можно заказать и купить в США, так же как

¹ «Skylab EREP Investigations Summary», 1978. Ее можно заказать и купить по адресу: Superintendent of Documents, US Government Printing Office, Washington, D.C. 20402, USA (Stock No 033-000-00741-8).

и схемы районов земного шара, на которые имеются фотографические и нефотографические изображения из космоса, а также технические описания сенсорных систем (съемочных систем) и другая информация.

Многозональная камера-система S 190A может делать шесть синхронных снимков одной и той же местности в следующих спектральных зонах: 0,5–



Рис. 59б. Красный (590–720 нм) на пленке «Панатомик X».

0,6 мкм (позиция 6), 0,6–0,7 мкм (позиция 5), 0,7–0,8 мкм (позиция 1), 0,8–0,9 мкм (позиция 2), 0,4–0,7 мкм (позиция 4, цвет), 0,5–0,88 мкм (позиция 3, «ложный» цвет). В процессе съемки отдельная камера охватывает участок местности площадью примерно 163×163 км. Оригинальный масштаб кадра, полученного камерой S 190A, размером $2,2 \times 2,2$

дюйма ($5,58 \times 5,58$ см) и представляемого для рассылки как черно-белый дубль-негатив, диапозитив или цветной слайд, составляет примерно $1:2\,850\,000$ (рис. 62). Можно получить также увеличенные кадры: 1) размером $6,4 \times 6,4$ дюйма ($16,26 \times 16,26$ см) с масштабом $1:1\,000\,000$ —черно-белые дубль-негатив или диапозитив, отпечаток, цветной диапозитив или

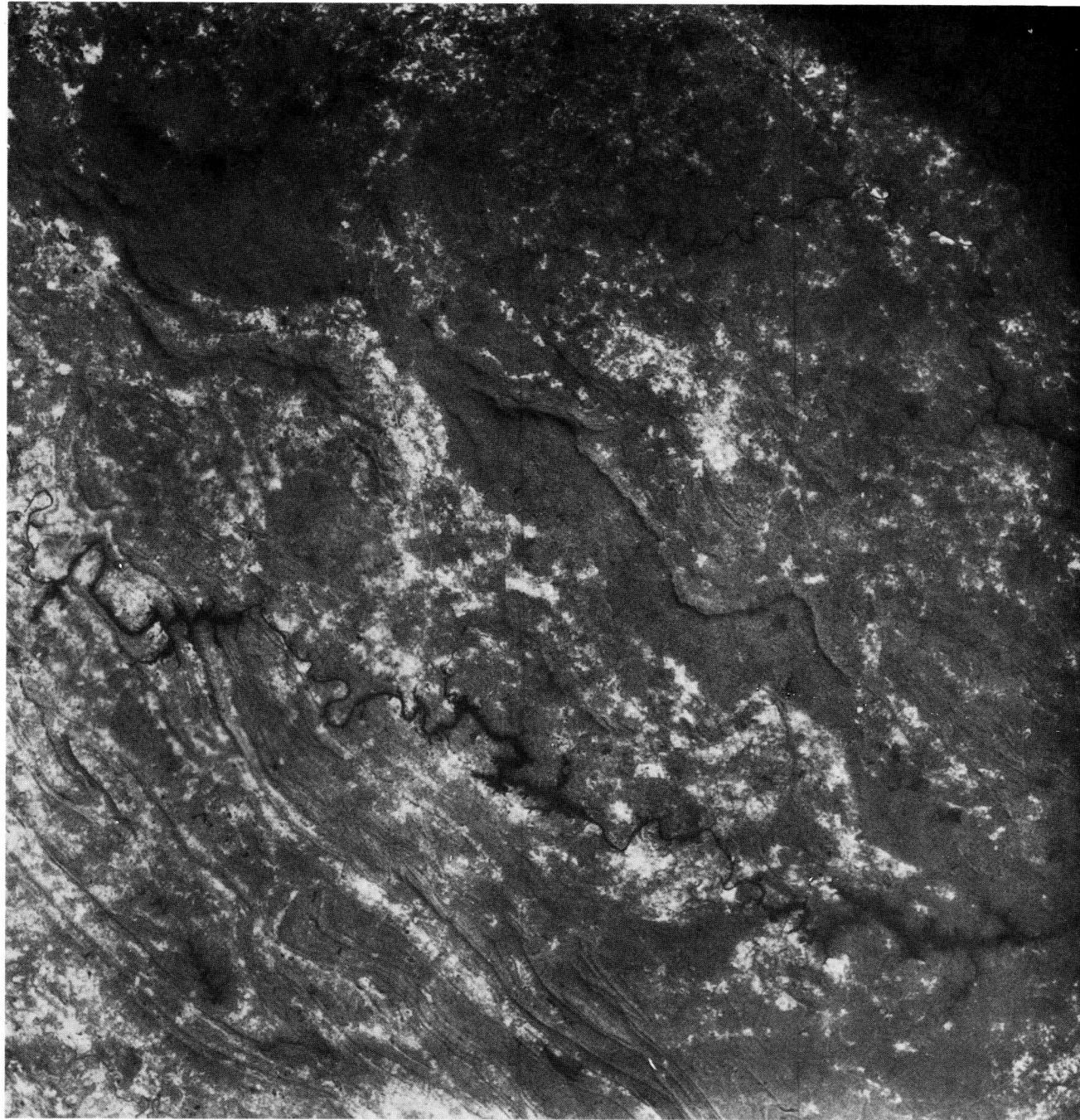


Рис. 59в. Ближний инфракрасный (680–890 нм) на пленке «Эктахром SW-IR».

отпечаток; 2) размером $12,8 \times 12,8$ дюйма ($32,51 \times 32,51$ см) с масштабом 1:500 000 – черно-белый диапозитив или отпечаток, цветной отпечаток. Пространственное разрешение узкозональных снимков – функция комбинации фильтр – пленка. Снимки позиций (зон) 1, 2 и 3 (на черно-белой или цветной инфракрасной пленке) имеют пространственное раз-

решение от 73 до 79 м. Для снимков позиции 4 и 6 (на цветной или черно-белой пленке высокого разрешения) имеют пространственное разрешение около 40–46 м, а позиции 5 (на черно-белой пленке высокого разрешения) – около 30–38 м. Итак, при большом площадном перекрытии снимки, сделанные камерой S 190A, имеют хорошее или очень хорошее простран-



Рис. 59г. На оригинальной условно-цветной пленке (ближний ИК). Масштаб снимков примерно 1:1 300 000 (NASA 9-26-3790 B, C, D).

ственное разрешение.

Камера «Земная поверхность» (S 190B) может снять площадь примерно 109×109 км в четырех вариантах сюжета: 1) в зоне 0,4–0,7 мкм без фильтра на цветную пленку высокого разрешения (разрешение на местности около 21 м); 2) в зоне 0,5–0,7 мкм с серым фильтром, снимающим голубую часть спек-

ра, на черно-белую пленку высокого разрешения (разрешение на местности около 17 м); 3) в зоне 0,5–0,8 мкм с фильтром № 12 на цветную инфракрасную пленку (разрешение на местности около 30 м); 4) или на цветную инфракрасную пленку (разрешение на местности около 23 м). Тиражируются копии оригинальных снимков размером $4,5 \times 4,5$ дюйма



Рис. 60. Каналы съемки установленных сенсоров при проведении экспедиции на «Скайлэб» в рамках проекта ЭРЭП (Earth Resources Experiment Package; по публикации НАСА).

(11,43 × 11,43 см) как черно-белые дубль-негативы или позитивы и цветные слайды. Их масштаб около 1:950 000. Увеличенные отпечатки снимков, сделанных камерой S 190B (цветные и черно-белые) можно получить в следующих форматах: 1) 8,6 × 8,6 дюйма (21,84 × 21,84 см), масштаб 1:500 000 (см. рис. 138); 2) 17,10 × 17,10 дюйма (43,43 × 43,43 см), масштаб 1:250 000; 3) 34,2 × 34,2 дюйма (86,86 × 86,86 см), масштаб 1:125 000. Снимки, сделанные со «Скайлэб» камерами S 190A и S 190B, получают через Центр данных ЭРОС¹). Индекс для заказа по каталогу данных «Скайлэб» содержит номер экипажа-экспедиции, номер пленки и номер кадра. При заказе снимков указывают нужный формат, разрешение и тип снимка: негатив, диапозитив, отпечаток. В случае, если неизвестен индекс, запросу может содействовать формуляр для заказа снимков, который имеет схему типов и координат районов проводившейся съемки.

При орбитальных полетах космического корабля многоразового использования «Колумбия» среди оборудования созданной в Европе бортовой научной лаборатории (STS-9-Missions) в октябре 1983 г. в первый раз был установлен новый фотографический сенсор — Метрическая камера (Metric-Camera), разработанный и созданный для землеведения в ФРГ под руководством проф. Конечны (Технический университет, Ганновер). Он представляет собой модификацию стандартной измерительной, т.е. фотограмметрической, фотокамеры для аэрофотосъемки «Цейс» РМК 30/23. Калиброванная (тарированная) фотограмметрическая Метрическая камера (МК) имеет фокусное расстояние 30,5 см и формат снимка 23 × 23 см. При высоте полета до 250 км снимок МК перекрывает площадь 190 × 190 км с пространственным разрешением до 21 × 21 м (размер минимальной различимой точки — пикселя — 8 × 8 м). Сменные кассеты для пленки позволяют во время съемки использовать разные фотопленки (черно-белую, цветную, спектрально-зональную). Снимки, сделанные МК, могут иметь перекры-

¹ NOAA — EROS Data Center, Sioux Falls, S. D.

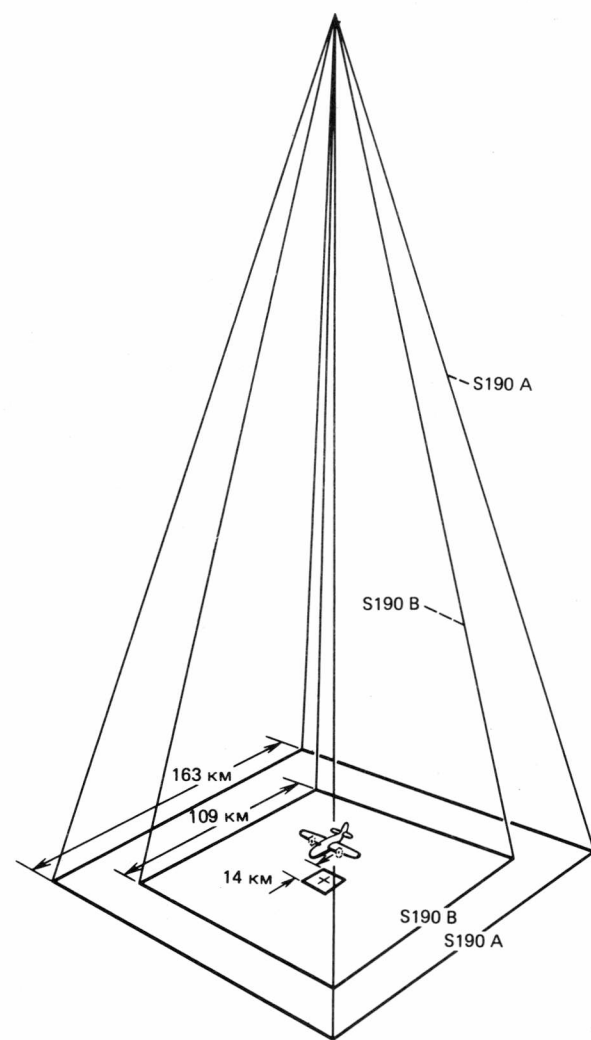


Рис. 61. Перекрытие по площади фотографических систем, установленных для проведения экспериментов на «Скайлэб»: S190A и S190B. Для сравнения приведено также площадное перекрытие стандартного аэрофотоснимка (по публикации НАСА).

тие в направлении полета от 60 до 80%. Возможна их стереоскопическая (фотограмметрическая) обработка. Предполагалось использование снимков этой камеры для составления топографических и тематических карт масштаба 1:50 000. Главная задача этой первой экспедиции заключалась в оценке возможностей использования крупномасштабных космических фотоснимков для составления карт крупного масштаба. Средствами навигации положение точки надиром могло определяться с точностью 5–10 м.

Снимки могли обрабатываться с помощью имеющихся на борту фотограмметрических приборов. Там же они могли быть превращены в штриховые карты или ортопланы. Последующее запланированное возвращение этой фотограмметрической камеры из око-

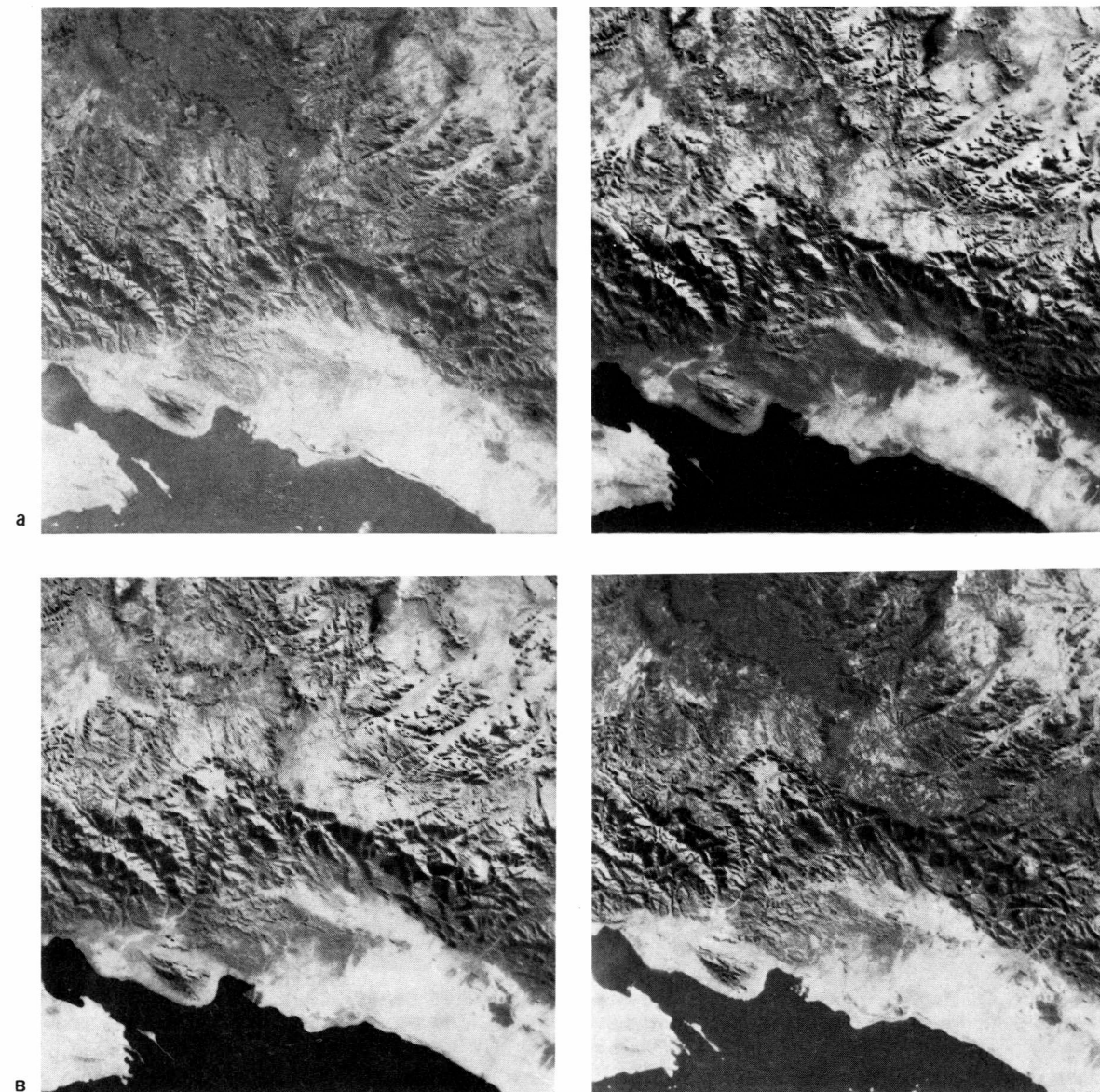


Рис. 62. Узкозональные снимки многозональной камерой на «Скайлэб» S190A. а — 0,5–0,6 мкм; б — 0,6–0,7 мкм; в — 0,7–0,8 мкм; г — 0,8–0,9 мкм. Формат оригинальный, площадное перекрытие 163 × 163 км, масштаб 1:2850 000 (НАСА).

лоземного пространства должно было бы способствовать значительному улучшению картографирования поверхности Земли.

Установка Метрической камеры 6 октября 1983 г. была первым этапом так называемой АТЛАС-программы, которая осуществлялась исследовательской организацией аэро- и космических полетов DFVLR из ФРГ. На более поздних стадиях доработанная МК неоднократно применялась при полетах космического корабля многоразового использования «Спейсшаттл». Этот новый вариант МК имел фокусное

расстояние 60 см и устройство компенсации полета. Подробное описание камеры и целевое назначение имеются в брошюре БМФТ и ДФВЛР (BMFT und der DFVLR, 1983), текст которой написан М. Шрёдером и Г. Конечны.

После первой установки снимки МК были включены в изданный каталог космических изображений ECA¹). Заказы на имеющиеся космические снимки можно направлять по адресу: EARTHNET, Program

¹ Европейская космическая ассоциация. — Прим. перев.

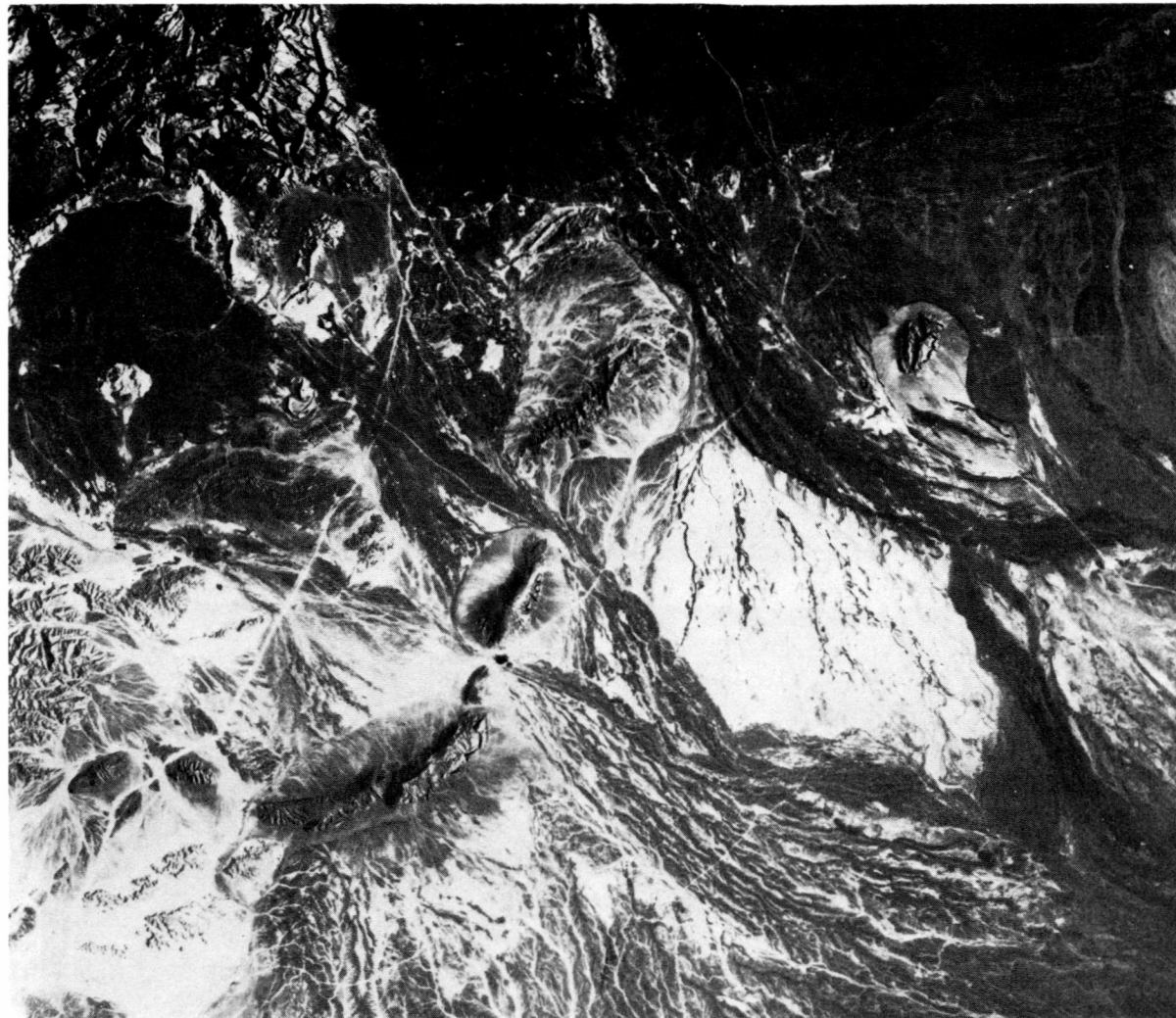


Рис. 63. Фрагмент снимка Метрической камерой территории центрального Омана. Разрешение на местности около 20 м. На снимке хорошо дешифрируются офиолиты, крутопадающие и складчатые осадочные толщи, грубообломочные образования различного генезиса и педименты у склонов. Масштаб приблизительно 1 : 800 000 (оригинальное изображение на цветной ИК-пленке ESA/Earthnet 01-518-13).

Office User Services, ESRIN, Via Gallileo Gallilei, I-00044 Frascati/Italy.

В качестве примера космического фотоснимка приведено сделанное Метрической камерой изображение центрального Омана (рис. 63). Координаты центра снимка примерно: 22,4° с. ш. и 057,6° в. д. Даже черно-белые копии цветного снимка имеют высокое пространственное разрешение (около 20 м). На них можно опознать дифференцированные образы геометрических объектов ландшафта и литофациальные единицы. В левом верхнем углу снимка различается часть горного хребта – антиклинали, сложенной смятыми юрскими осадочными толщами. Темные участки изображения в верхней части снимка – продолжение горного хребта, представленного останца-

ми перидотитов и габбро в толще меловых офиолитов. Почти по диагонали снимка (от его правого верхнего угла вниз) параллельно горному хребту простираются переслаивающиеся толщи кремнистых известняков и сланцев, известняков и глин. Большую часть снимка занимает четвертичный пролювий, который сносится временными потоками с ближайших гор. Хорошо распознаются на снимке отдельные пролювиальные шлейфы. Выделяются также хребты, сложенные останцами меловых известняков и доломитов.

Этот космический фотоснимок – часть серии снимков, сделанных с 60%-ным перекрытием четвертой модификацией Метрической камеры. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование этих снимков

под стереоскопом позволяет осуществить очень точное фотогеологическое картирование. Оригинальные фотоснимки могут быть увеличены до масштаба 1 : 100 000 без потери информации и служить, таким образом, очень точными материалами для картирования и ориентирования при региональных исследованиях.

4.2. Телевизионные методы

Телевизионные системы работают в тех же спектральных диапазонах электромагнитного излучения, что и фотографические системы (0,4–0,9 мкм), и с одинаковой геометрической закономерностью (центральной перспективой). Для дистанционного зондирования в основном используется камера Видеокон, которая фокусирует изображение объекта снимаемой местности на плоский светочувствительный экран. На нем изображение вычерчивается как рисунок зарядов и потом считывается развертывающимся электронным лучом. При этом экран как бы разрушается в единичных малых элементах, так называемых точках изображения. Величина яркости таких точек изображения преобразуется в соответствующую величину напряжения. Она кодируется по частоте и амплитуде, превращается в числовую запись импульса и передается со спутника на станцию приема на Земле. Принятую числовую запись со снятого телеизображения вновь преобразуют в соответствующие величины яркости элементов изображения, которые все вместе дают на экране изображение снимаемой местности. Для репродуцирования оно с экрана снимается на фотопленку. Считывание и формирование телевизионного изображения проходят по отдельным строкам. Поэтому на фотокопиях телевизионных аэрокосмических изображений очень часто видна строчная развертка их построения.

Телевизионные методы съемки имеют некоторые преимущества перед фотографическими. Во-первых, видеосигнал передается как величина напряжения, что допускает возможность дальнейших электронно-числовых преобразований. Во-вторых, при съемке изображение может быть сразу передано на Землю или записано на магнитную ленту и потом вызвано: передача изображения на станцию приема возможна с больших удалений от Земли. Эти свойства телевизионных систем в первую очередь были необходимы для установки их на беспилотных автоматических космических аппаратах, которые использовались для дистанционного излучения поверхности Земли и других планет. Поэтому телевизионные методы с 1960-х годов успешно использовались (в различных модификациях приемно-передаточных систем) для изучения поверхности Луны, Марса и спутников Юпитера («Рейнджер», «Маринер», «Викинг» и обзорные зонды НАСА). Установка телекамер на спутниках систем «Тирос-Есса», «Нимбус», «NOAA», «Метеосат» и

других для глобальных метеорологических наблюдений стала между тем оперативной формой таких исследований. Для проведения наблюдений с орбитальных и геостационарных метеорологических спутников имеет значение возможность постоянной замены изображения, т. е. съемочными системами можно получить изображение, вызвать его, записать на запоминающее устройство, через некоторое время провести сброс записи, и затем повторить цикл.

Простое оцифрование электрических сигналов телевизионной системы, иначе называемое аналого-цифровой обработкой, служит хорошей предпосылкой для компьютерной подготовки данных и последующей обработки как изображений, так и магнитных записей. Известным недостатком этих систем, установленных на метеорологических спутниках, является относительно плохое (малое) пространственное разрешение – от нескольких сотен метров до первых километров, меняющееся в зависимости от системы и высоты съемки, которая, как правило, ведется с высоты не менее нескольких сотен километров. Такое разрешение хорошо для решения глобальных проблем или проведения наблюдений за погодой и окружающей средой, но явно недостаточно для решения многих задач земледования, когда требуются телесистемы высокого разрешения.

Спутники для земледования, или ресурсные спутники, «Лэндсат-1» и «Лэндсат-2» имели на борту мультиспектральный сканер (МСС) и многозональную съемочную телесистему из трех возвратно-лучевых видеоконных камер РБВ (Return Beam Videcon Cameras – RBV) (рис. 64). Каждой камерой с высоты полета 917 км охватывалась площадь примерно 185 × 185 км. Эти три камеры РБВ включались синхронно и снимали поверхность Земли в трех спектральных зонах: голубой – зеленой 0,48–0,58 мкм, желтой – красной 0,58–0,68 мкм и красной – инфракрасной 0,69–0,83 мкм (рис. 65). Отдельные кадры трех камер РБВ могли быть совмещены и преобразованы в условно цветное изображение снимаемого сюжета. Участки поверхности Земли, снятые камерами РБВ (рис. 66), идентичны тем, которые одновременно снимались с борта спутников «Лэндсат-1 и -2» многозональным сканером МСС (разд. 4.3.3).

Пространственное разрешение телевизионных снимков камерой РБВ, т. е. пиксель-размер, примерно 20 м. Относительная точность определения координат центра снимка ± 55 м, электронное разрешение телеснимков РБВ вследствие ошибки перехода составляет ± 58 м. Геометрическая точность РБВ-снимков со спутников «Лэндсат-1 и -2» соответствует требованиям к точности топографических карт масштаба 1 : 500 000. С помощью трех или четырех контрольных триангуляционных пунктов на местности можно устранить ошибку в координатах снимков, сделанных системой РБВ [329]. Возможность опознания объектов на местности по этим телеснимкам

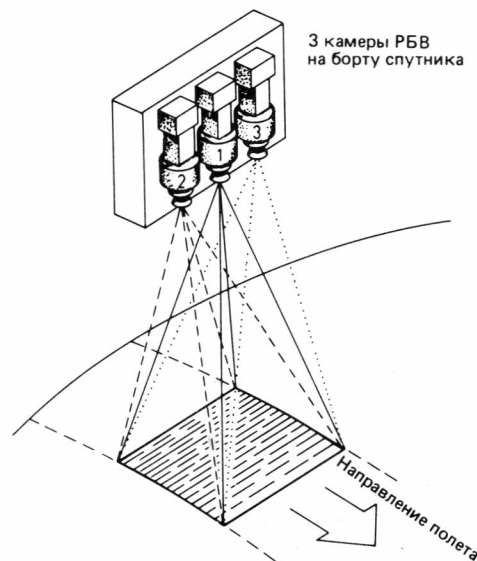


Рис. 64. Принцип съемки многозональной РБВ-системой спутников «Лэндсат-1 и -2» (по NASA Landsat Data Users Handbook). Общая площадь, которую покрывают три камеры в момент съемки, равна 185×185 км (100×100 морских миль).

зависит от размеров объектов, от контрастности сюжета, от ориентировки объектов ландшафта по отношению к центру снимка и от спектральной чувствительности отдельных телекамер системы РБВ [329].

Детекторы, преобразующие световой сигнал на борту спутника, оцифровывают его и посылают в точно заданное время на Землю, если спутник находится в зоне радиовидимости наземной приемной станции. В том случае, если спутник по времени находится вне зоны видимости станции приема на Земле, кодированные числовые данные записываются на две кассеты магнитной ленты, а при прохождении спутника в зоне видимости станции приема вызываются во всем объеме на Землю. Там они принимают

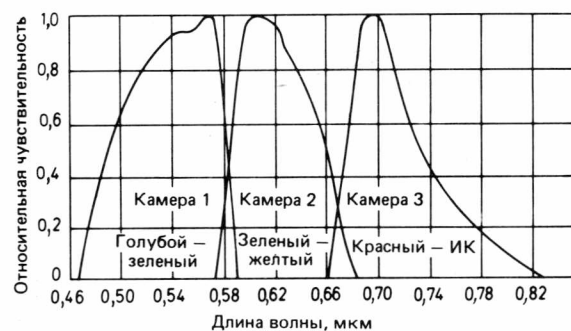


Рис. 65. Диапазоны съемки камерами системы РБВ на спутниках «Лэндсат-1 и -2» (NASA Landsat Data Users Handbook).

ся на запоминающее устройство (ЗУ) и впоследствии могут быть перекопированы с его экрана на фото-пленку в виде черно-белых негативов. С каждого одновременно снятого тремя камерами РБВ сюжета можно приобрести (в Центре данных ЭРОС) три кадра изображения в уже преобразованном ЭВМ виде: в виде радиометрически и геометрически исправленных негативов размером около 70 мм, а также прозрачных или непрозрачных (на бумаге) позитивов масштаба $1 : 500\,000$. В 1980 г. со спутников «Лэндсат-1» и «-2» было принято всего лишь около 1500 сюжетов в основном из-за технических неполадок. В это время с многозональных сканеров обоих спутников за то же время принято более 400 000 снимков ландшафтов тех же районов земного шара, которые снимались системой РБВ и в значительной мере в перекрывающихся спектральных диапазонах.

На «Лэндсат-3», запущенном в марте 1978 г., была смонтирована другая возвратно-лучевая видеоконная система РБВ. Она состояла из двух одинаковых камер РБВ, которые работали в спектральном диапазоне от 0,50 до 0,75 мкм. Эти две камеры были поставлены так, чтобы одновременно снимать два соседних участка местности размером 98×98 км с шириной перекрытия снимков по стороне до 14 км на местности. Обе камеры, таким образом, снимали одновременно участок поверхности Земли размером 183×98 км (рис. 67). В направлении полета РБВ-снимки, точнее, пара соседних снимков имела ширину перекрытия около 17 км на местности. Две соседние пары телеснимков, которые перекрывались кадром МСС регистрировались вместе с номером сюжета (кадра) сканера МСС как части кадра (или «субсцены») А, Б, В и Г (рис. 67). Разрешение на местности на телеизображениях, сделанных камерами РБВ со спутника «Лэндсат-3», составляет 30 м, что почти вдвое больше, чем на телеснимках, сделанных РБВ-системой на спутниках «Лэндсат-1 и -2», и на сканерных снимках, сделанных системой МСС «Лэндсат» (79×79 м, пиксель-размер, или разрешение на местности, 79×57 м)¹. Четыре телекадра системы РБВ одного сюжета системы МСС в виде негатива или позитива

¹ Принято определять разрешение фотоматериалов в линиях на 1 мм. Предел разрешения человеческого глаза 0,05 мм, т.е. на отрезке длиной 1 мм человек может различить 20 линий: 10 четких черных линий одинаковой ширины и 10 таких же интервалов между ними. Иногда считают только черные линии, тогда предел разрешения глаза равен 10 лин./мм. В некоторых случаях, в основном за рубежом, принято разрешение фотоматериалов определять по стороне наименьшего квадрата, не искажающегося при фотохимической кристаллизации бромистого серебра. Для телевизионных систем разрешение определяют по строке развертки и по вертикали, по размеру одного формирующего изображения элемента. Разрешением на местности (англ. IFOV—Instant Field of View) называют величину, обратно пропорциональную масштабу изображения и числу линий в 1 мм или стороне квадрата, переведенной, согласно масштабу изображения в метры.—Прим. перев.



Рис. 66. РБВ-снимок восточной части полуострова Пелопоннес (НАСА, «Лэндсат-1»). Масштаб около $1 : 1\,000\,000$ (NASA E-1010-08375).

масштаба $1 : 500\,000$ или увеличенные до масштабов $1 : 250\,000$ и $1 : 125\,000$ хранятся в Центре данных ЭРОС, США, имеются в виду кадры, которые откорректированы геометрически и радиометрически. Относительно высокое разрешение телеснимков, сделанных РБВ-системой спутника «Лэндсат-3», позволяет увеличить их до масштаба $1 : 100\,000$, что хорошо и

удобно при их интерпретации, в то время как изображения, полученные с многозонального сканера МСС, выдерживают при сохранении подобного качества увеличение лишь до масштаба $1 : 250\,000$. Недостатком РБВ-системы спутника «Лэндсат-3» является то, что телевизионные снимки местности можно получить только в широком спектральном диапазоне

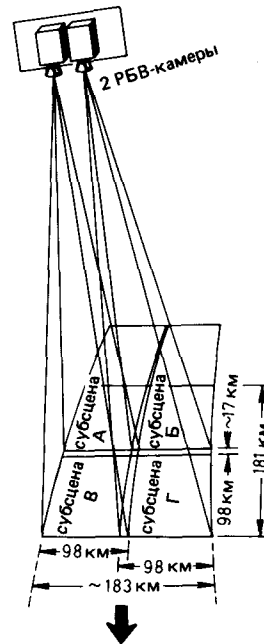


Рис. 67. Принцип съемки со спутника «Лэндсат-3» РБВ-камерами (NASA Landsat Data Users Handbook).

(0,50–0,75 мкм), т.е. во всем видимом диапазоне. Поэтому нельзя провести эффективную многозональную обработку данных, полученных телевизионной системой РБВ спутника «Лэндсат-3», и ее эффективные методы не используются. Иначе говоря, нельзя преобразовать два синхронных телеснимка этой системы в условно-цветное изображение, в какое преобразуются черно-белые негативы или позитивы кадров системы РБВ с предшествующих спутников «Лэндсат-1» и «-2».

Из-за неполного покрытия поверхности суши на Земле телевизионными снимками, полученными с РБВ-систем спутников «Лэндсат-1» и «-2» начиная с 1980 г., РБВ-системой спутника «Лэндсат-3» вновь была начата такая систематическая съемка всей поверхности континентов Земли. Первоначально предполагалось однократное покрытие суши снимками. Сохраняли в архиве только снимки хорошего качества при облачном покрове менее 30%. Съемки районов Северного полушария проводились с апреля по октябрь, во время высокого, точнее, наивысшего стояния Солнца. Соответственно районы в Южном полушарии снимались между ноябрем и мартом. Отснятые сюжеты были переведены в числовую запись, которая хранится в Центре данных ЭРОС, США, и может быть при необходимости переведена в фотопродукцию. Программа съемок должна завершиться по плану в 1983 г. Информацию об имеющихся сюжетах, снятых телесистемами РБВ спутников «Лэндсат», можно получить в ЭРОС-центре.

4.3. Сканерные методы

4.3.1. Введение. Внедряемые в возрастающем объеме в дистанционное зондирование сканерные методы имеют некоторые существенные преимущества перед аэрокосмической фотосъемкой. В то время как спектральный диапазон съемок фотографическими способами ограничен видимым и ближним инфракрасным излучением (0,4–0,9 мкм), сканерные методы предполагают съемку в широком диапазоне спектра солнечного излучения – от ультрафиолетового до теплового инфракрасного (0,3–14 мкм). Электромагнитное излучение, отраженное и (или) испускаемое объектами ландшафта, захватывается оптической системой сканера и фокусируется на детекторах. Они преобразуют попадающие на них лучи в электрический сигнал, который записывается на магнитную ленту (в аналоговом или числовом виде). Благодаря такому способу регистрации спектральные данные со сканеров поддаются воспроизведению, т.е. размножению. На фотографических материалах, как правило, сканерные данные не тиражируют. В варианте многозонального сканера (МСС) регистрируется собственное излучение объектов ландшафта одновременно во многих спектральных каналах (в большом диапазоне длин волн) на многополосной широкой магнитной ленте. Построчная (в несколько дорожек) запись снимаемого в разных спектральных диапазонах сюжета одновременно покрывает магнитную ленту, так как спектральное разложение излучения, идущего от ландшафтных объектов, происходит сразу после фильтрации его съемочной оптикой. При многозональном фотографировании проблема корреляции спектральных данных решается иначе – путем совмещения изображений, поскольку местность снимается при залете несколькими камерами или через несколько объективов одной многозональной камерой. Подобным же образом решается вопрос и при синхронных многозональных съемках двумя или тремя однотипными телекамерами.

Решающее значение для внедрения сканерных систем в дистанционное зондирование с космических аппаратов имело то, что спектральные данные, регистрируемые электронными устройствами во время съемки (реальное время), могли быть посланы на Землю в виде радиоволн, если спутник находился в зоне видимости станции приема или могли быть сброшены с магнитной ленты в виде блока данных, записанных тогда, когда спутник был вне видимости станции приема. Возможность записи (аналоговой или числовой) на магнитную ленту также была важнейшей предпосылкой для накопления огромного множества отснятых данных. Запись спектральных данных на магнитную ленту открыла, кроме того, новые многосторонние возможности подготовки, обработки (предварительной), представления и изготовления многозональных и мультитемпературных раз-

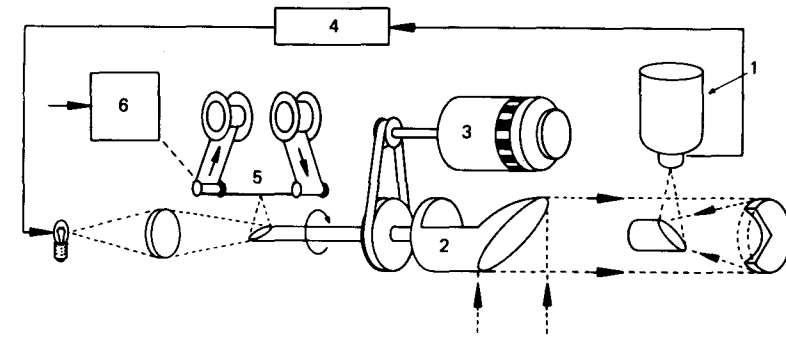


Рис. 68. Схема устройства теплового сканера [95].
1 – детектор с устройством охлаждения; 2 – сканирующее зеркало; 3 – мотор; 4 – усилитель; 5 – кинолента; 6 – устройство управления.

новременных изображений с помощью программ обработки их на ЭВМ. Различные представляемые программы обработки данных с помощью ЭВМ имели прежде всего целью (в рамках проекта или постановки вопроса) получить особенно интересные объекты ландшафта или особенно интересные состояния окружающей среды в форме четких, контрастных изображений. Наряду с этим объекты ландшафта или ландшафтные единицы с одинаковыми спектральными характеристиками должны выделяться из своего окружения, и их пространственное распространение на поверхности Земли должно представляться компьютерной распечаткой данных или в форме видеоизображения различных видов (гл. 5).

4.3.2. Тепловой и многозональный сканеры. (Устройство, принцип действия, параметры съемки оптико-механического сканера.) Устройство оптико-механического сканера поясним с помощью схемы теплового сканера (рис. 68). Эта съемочная система в полете принимает испускаемое объектами ландшафта инфракрасное излучение. Оно формирует запись изображения пролетаемой местности, в котором разные радиационные температуры (величины теплового излучения) объектов ландшафта и типов ландшафта, т.е. пространственное распределение температур, будут переданы в ступенях шкалы серого тона (рис. 70, 214 и 216).

Сканер состоит из трех частей (подсистем): оптико-механической, детекторного блока и записи изображения. Наклоненное под углом 45° вращающееся или качающееся зеркало сканера тестирует, т.е. получает сигнал с местности при полете в плоскости, перпендикулярной направлению полета (рис. 69). Размер захваченного сканерным зеркалом в момент съемки элемента ландшафта (элемента разрешения на местности) определяется угловым разрешением сканера и высотой полета. Благодаря непрерывно сменяющимся друг за другом моментальным полям зрения в процессе сканирования возникает строка. Благодаря движению вперед съемочной платформы (самолета

или спутника) сканерные строки следуют одна за другой. Так возникает сканерное изображение – в оригинале чаще всего шириной 70 мм растровое, построочное. Ширина снимаемой полосы местности зависит от угла качания зеркала сканера (угла сканирования) и высоты полета. Угол сканирования в большинстве случаев около 90° (± 45 от направления в нади́р) или 120° ($\pm 60^\circ$).

От сканирующего зеркала тепловой сигнал захваченного потока инфракрасного излучения через телескопическую систему линз и (или) призм фокусируется на детекторном экране, который чувствителен к длинноволновому инфракрасному излучению. Детектор преобразует попадающие в него импульсы ИК-излучения в электрические аналоговые сигналы так, что их интенсивность пропорциональна попадающим на него импульсам излучения и меняется в соответствии с интенсивностью попавшего сигнала. Для того чтобы достичь хорошей рабочей величины детектора,

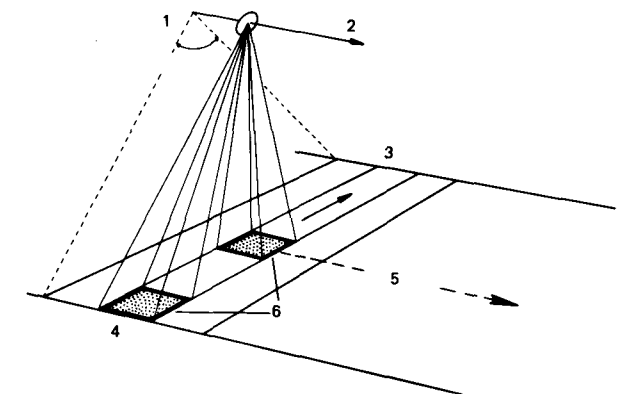


Рис. 69. Принцип съемки тепловым сканером ([95] с изменениями).
1 – угол сканирования, поле зрения (FOV) $\pm 45^\circ$ от направления в нади́р; 2 – на спектрометр; 3 – направление сканирования; 4 – ширина полосы сканирования; 5 – направление полета; 6 – участок местности в моментальном поле зрения сканера (IFOV) $2,5 \times 2,5$ мрад.

его нужно держать на очень небольших рабочих температурах, что достигается при помощи охлаждения. Идущий от детектора сигнал (электронно усиленный) направляется источником света, излучение которого отбрасывается зеркалом, бегающим синхронно со сканерным зеркалом, на перематывающуюся рядом киноленту (рис. 68). Скорость перематывания киноленты согласована с продвижением самолета вперед и его высотой. Этим достигается такое положение, что строка записи на киноленте соответствует строке сканирования (рис. 69). В возникающем построчном изображении разной интенсивностью серого тона воспроизводятся различия относительных температур соседних объектов местности (рис. 70). Объекты ландшафта или единицы ландшафта с более высокой температурой поверхности на тепловых сканерных изображениях выделяются светлым, а пониженной температурой – более темным серым тоном. В настоящее время интенсивность теплового излучения, измеренная тепловым сканером, большей частью записывается во время полета на магнитную ленту. Из записанных данных позднее на фильмозаписывающем приборе (устройство на базе мини-ЭВМ) изго-

товляют черно-белое построчное изображение снятой местности – негатив или позитив.

Многозональный сканер захватывает одновременно в нескольких интервалах длин волн интегральный поток электромагнитного излучения, состоящий из отдельных потоков разной интенсивности, которые исходят от объектов ландшафта или составляющих их элементов. Рассмотрим теперь схему устройства многозонального сканера (рис. 71), который регистрирует вторичный, отраженный от объектов на поверхности планеты поток солнечной энергии в нескольких спектральных каналах видимого и ближнего ИК-диапазонов. Этот интегральный световой поток, попадая на сканирующее зеркало, отражается им в плоскость фокуса оптической телескопической системы, на которую он, предварительно пройдя через линзы и (или) призмы, фокусируется диафрагмой, величина раскрытия которой определяет мгновенное поле зрения сканера. Благодаря этой диафрагме удается сформировать фазовые пучки когерентных световых волн из попавшего на сканер интегрального светового потока, который разлагается на призмах или линзах по спектру на монохроматические пучки

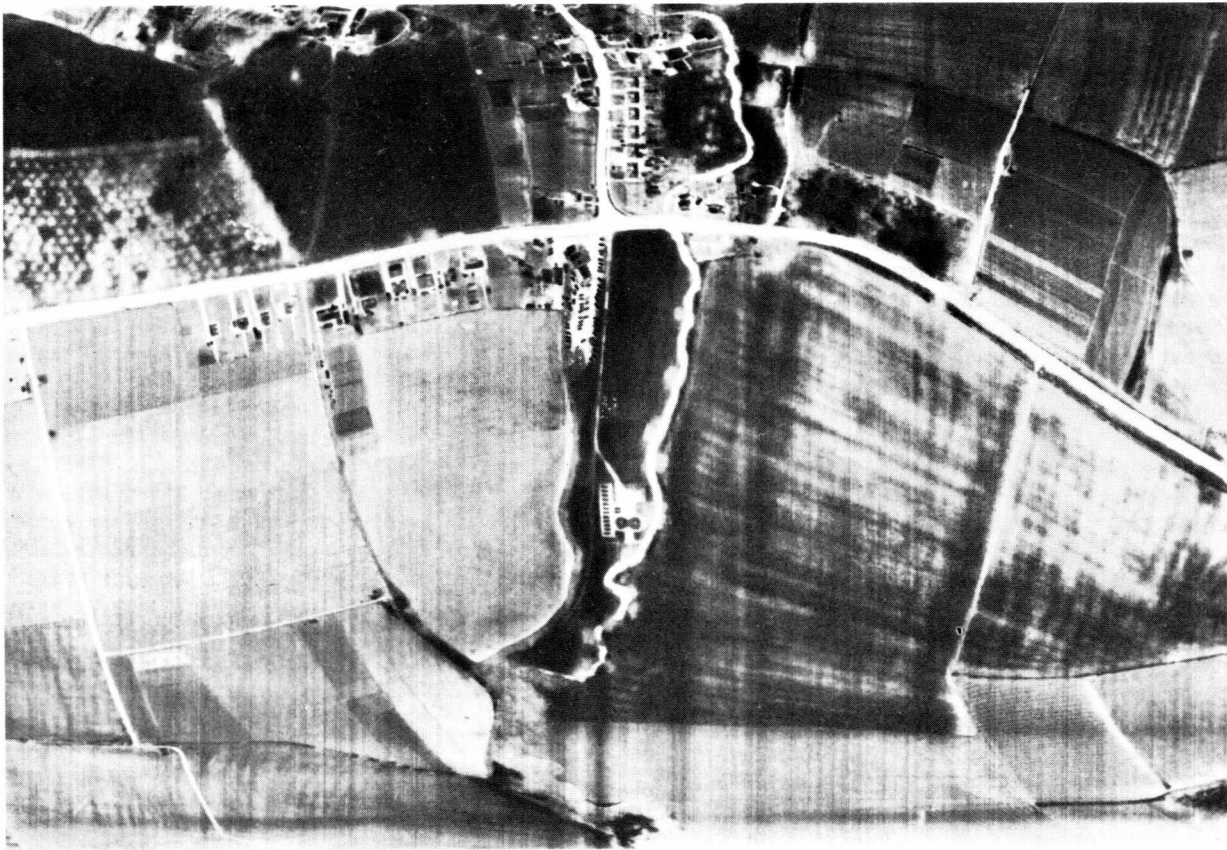


Рис. 70. Снимок тепловым сканером одного из ландшафтов Англии. Теплые объекты воспроизведены светлыми, а холодные – темными оттенками серого тона. Ночная съемка, май 1971 г. (Hawker Siddeley Dynamics Ltd.).

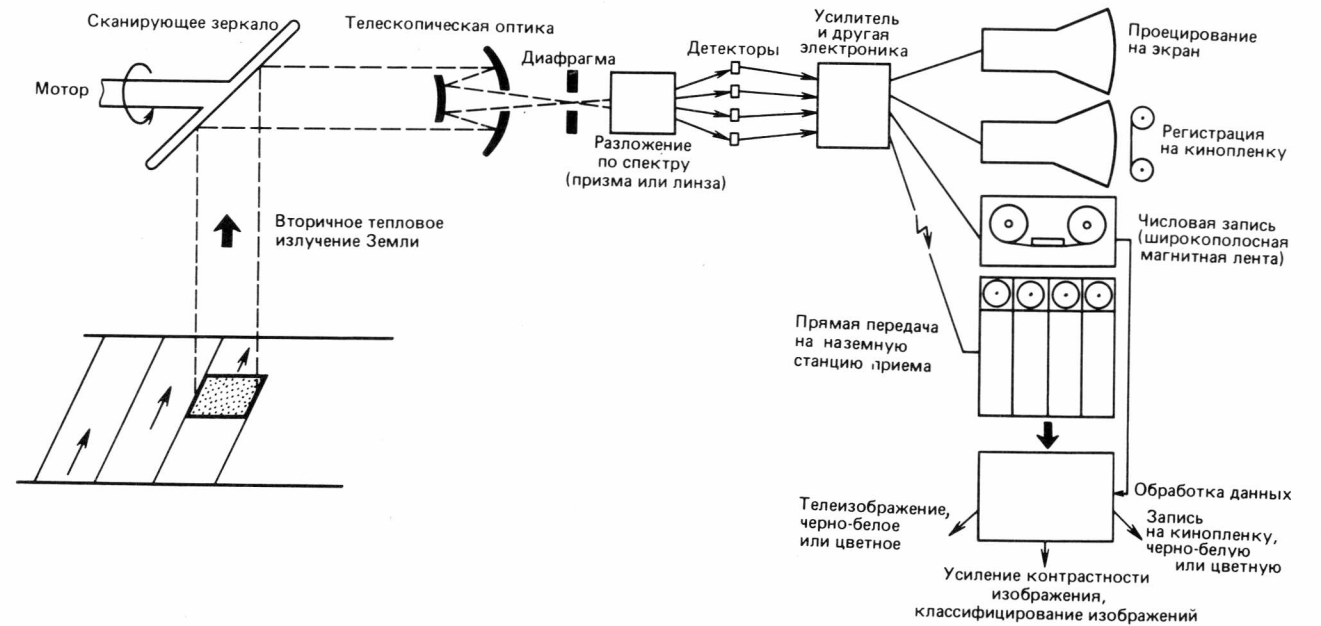


Рис. 71. Схема устройства и принцип действия мультиспектрального сканера (по Гюнтеру [95], с изменениями).

волн с определенной длиной волны излучения. Депрессионные, разлагающие, свойства¹⁾ установленных оптических призм или линз определяют число, позицию и ширину полосы спектральной зоны, в которой идет измерение. Преобразованный детектором, точнее, одной ячейкой детектора, сигнал пропорционален попадающему на него излучению и интегрален в определенном временном интервале. Его можно оцифровать, т.е. разделить по двоичному коду и записать в кодированном виде на магнитную ленту. Первичные данные с данными коррекции и точной отметкой реального времени, записанные на компьютеросовместимых стандартных магнитных лентах (CCTs – Computer Compatible Tapes), можно провести через фильмозаписывающее электронное устройство и получить на принтере черно-белое растровое изображение сюжета каждого спектрального канала (рис. 72), а также при числовой первичной обработке данных провести коррекцию, геометрическую и радиометрическую, результатов съемки, улучшить соотношение контрастности представления определенных сюжетов и, кроме того, использовать изображения для классификации спектральных характеристик объектов. Высококачественные спектральные измерения и обработка их результатов возможны, если детекторами сканера МСС вместе с идущим от поверхности Земли излучением регистрируется

также и референц-поток¹ калиброванного монохроматического излучения сканерной системы. Для этого его снимают с вращающегося сканерного зеркала в начале и в конце каждой строки сканирования или в других расчетных состояниях квазимонохроматического потока.

Если многозональный сканер МСС предназначен для регистрации во время полета интенсивности потока отраженного от поверхности излучения в оптическом диапазоне (примерно от 0,3 до 3,0 мкм) и при этом должен также регистрировать поток вторичного инфракрасного излучения в тепловом диапазоне (примерно от 3,5 до 14 мкм), то нужен общий поток излучения, идущий от поверхности Земли, разложить на длинноволновую и коротковолновую части, прежде чем начать регистрацию его в оптическом диапазоне. Разделение общего потока на оптическое и длинноволновое ИК-излучение достигается с помощью дихроического зеркала (селективного диска)²⁾, которое отклоняет длинноволновое ИК-излучение и пропускает более коротковолновую часть потока. Наконец, оставшаяся часть потока разлагается призмами, линзами или фильтрами телескопической системы сканера на узкие спектральные каналы, интенсивность излучения в которых, как уже описывалось, измеряется и преобразуется детекторами. Примерная схема устройства такого сканера приведена ниже (рис. 73).

Качество и возможность обработки сканерных

¹ Под депрессионными свойствами оптической системы понимают показатели преломления, пропускания и поглощения излучения ее призм и линз, которые разлагают световой поток на монохроматические лучи. – Прим. перев.

¹ Референц означает: «данные, приведенные к стандарту». – Прим. ред.

² Селективный абсорбционный фильтр. – Прим. перев.

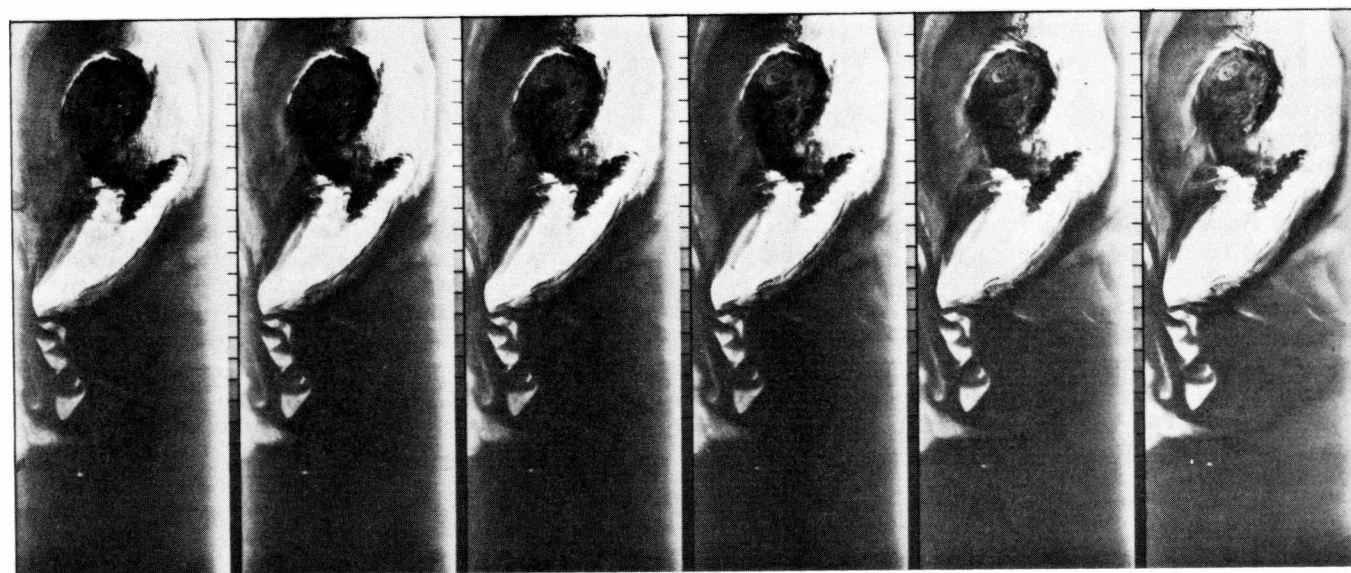
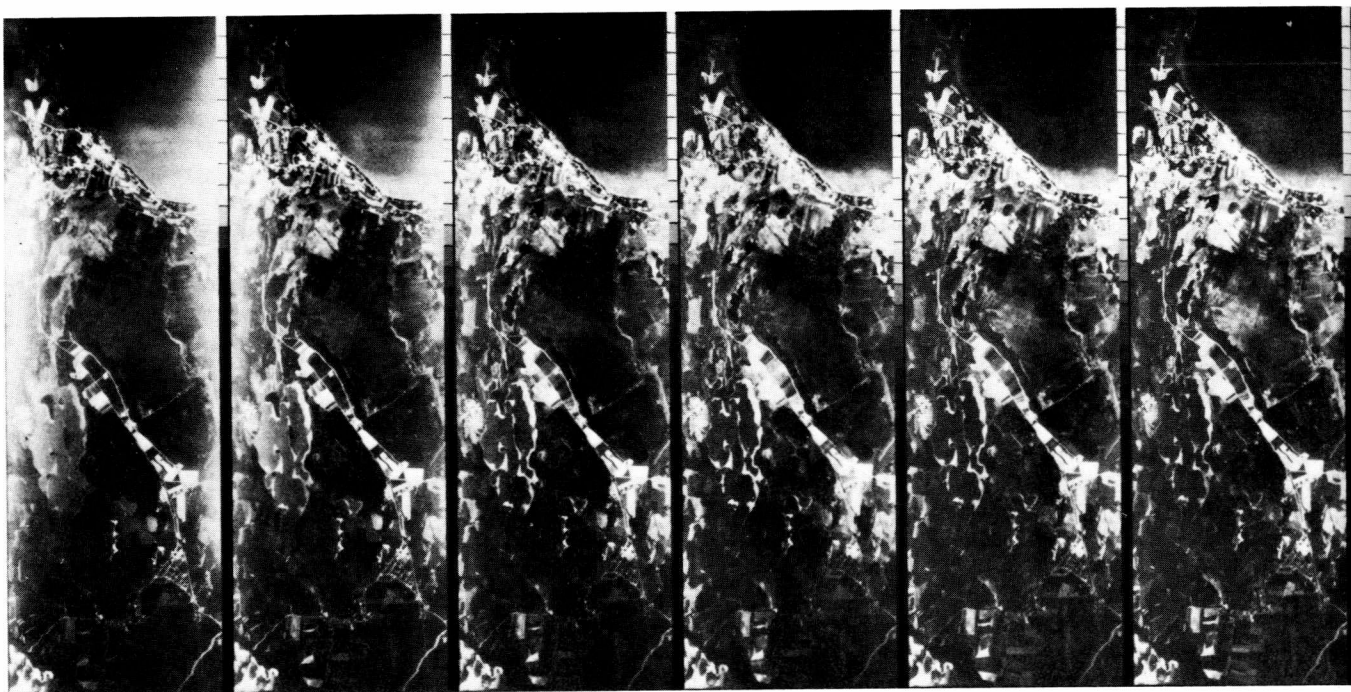
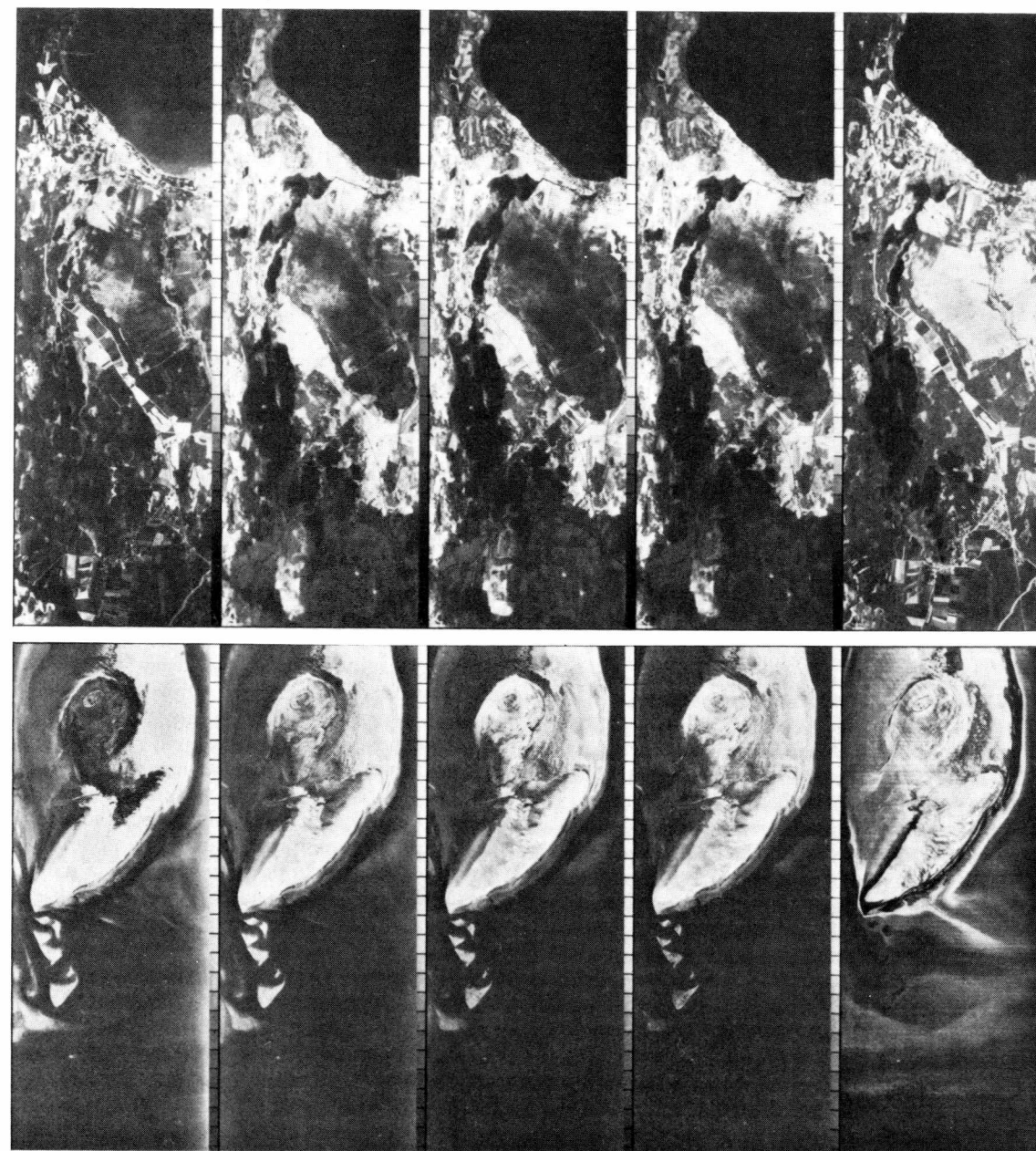


Рис. 72. Снимки разных диапазонов 11-канального многозонального сканера. Вверху – местность северо-восточнее Мюнхена; внизу – остров Шархёрн (Гельголандская бухта). Диапазоны каналов даны в табл. 4. (Снимки FMP, Freig. d. Reg. Obb. Nr. GS 300/7272, GS 300/7307.)

изображений определяются рядом параметров, одна часть которых связана с системой, а другая не зависит от нее. К зависящим от системы параметрам относятся: геометрическое разрешение; точность привязки и планарность изображения; спектральный канал, в ко-

тором получено изображение; спектральное разрешение и спектральная чувствительность, с которой можно регистрировать в отдельных каналах излучение, попавшее на зеркало сканера; и так называемая эффективная селективность, определяемая отношением



сигнал/шум. Для обработки и использования сканерных данных важны точность, с какой интенсивность потока излучения, захваченного сканером, записывалась на кинопленку или магнитную ленту, и синхронность совмещения с ним тарированного референц-излучения. Важнейшие, не зависящие от системы сканера параметры: высота съемки, позиция и положение в полете, т.е. курс, высота и ориентация съемочной платформы с установленной аппаратурой во время проведения съемки, а также состояние разделяющих объект и сенсор слоев атмосферы.

4.3.3. О пространственном разрешении сканерных изображений. Пространственное разрешение сканерных изображений определяется прежде всего двумя параметрами съемки: геометрической разрешающей способностью установленной сканерной системы и высотой носителя (самолета или космического аппарата, на которых она установлена) над поверхностью измерения или съемки, т.е. над поверхностью планеты.

Геометрическая разрешающая способность сканера задается либо как угловое разрешение в милли-

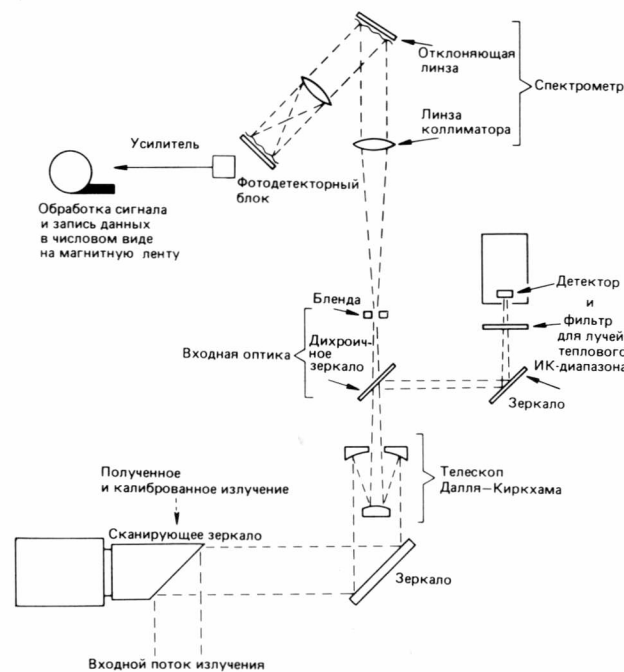


Рис. 73. Схема устройства многозонального сканера для съемок в видимом и тепловом инфракрасном диапазонах (DFVLR Publikation, Inst. f. Optoelektronik).

радианах (мрад), либо в зависимости от высоты полета, т.е. высоты съемки, как геометрическое разрешение на уровне поверхности Земли в метрах. Угловое разрешение в 1 мрад ($1 \text{ мрад} = 0,057^\circ$) означает, что сканером с высоты полета 1000 м в момент сканирования охватывается участок поверхности (элемент площади, или элемент разрешения) размером в надири $1 \times 1 \text{ м}$ (рис. 69). При высоте полета 3000 м соответствующий элемент площади имеет размер $3 \times 3 \text{ м}$. Пространственная разрешающая способность сканерных систем с заданным угловым разрешением связана как функция отношения¹ высоты полета к основанию.

Самолетные сканерные системы, применявшиеся в 1970-х годах, имели угловое разрешение от 1 до 3 мрад. Результирующее разрешение на местности определялось каждый раз из устанавливавшихся для угла сканирования и высоты полета. Сканеры на спутниках «Лэндсат-1», «-2» и «-3» из-за большой высоты орбиты имели незначительное угловое разрешение; в световом диапазоне этот угол был около 0,05 мрад. Поэтому при высоте полета 917 км их пространственная разрешающая способность была $79 \times 79 \text{ м}$. Это – размер участка ландшафта, который

¹ Стандартная формула определения разрешения съемочной аппаратуры: $R = H \operatorname{tg} \omega$, где R – разрешение на местности, H – высота полета, ω – угловое разрешение. – Прим. перев.

был «виден» каждому из 24 детекторов детекторного блока любого из этих мультиспектральных сканеров в момент сканирования и отраженное излучение с которого в момент сканирования принималось только одним детектором и преобразовывалось им в пропорциональный электрический сигнал.

Объекты ландшафта должны, как правило, быть больше, чем захваченный сканером, точнее детектором, пространственный элемент разрешения на местности, если он захвачен отдельно и его можно распознать на сканерном изображении. Как на аэрофотоснимках, так и на сканерных изображениях можно опознать каждый единичный объект, размеры которого находятся в пределах величины теоретического геометрического разрешения. Это важно для улиц, дорог, рек и не имеет смысла для линейных тектонических структур, таких, как разломы или трещинные зоны, выдержанные на большом протяжении. В последнем случае более существенным каждый раз оказывается контраст яркости встречающихся объектов по отношению к их окружению и к радиометрической динамической зоне сканера, но прежде всего важна также форма объектов ландшафта и присущая им геометрическая упорядоченность в районе съемки.

4.3.4. О геометрии изображения сканерных снимков. (Самолетный сканер, многозональный сканер спутника «Лэндсат».) Сканерные изображения имеют ряд геометрических особенностей, которые складываются из специфики съемки сканером во время полета, строчной формы обзора местности вращающимся или качающимся сканирующим зеркалом в плоскости, перпендикулярной направлению полета, и из последовательности строк сканирования в направлении полета. Сканерные снимки, ориентированные поперек направления полета, панорамы, а вдоль – имеют ортогональную геометрию изображения. Поэтому геометрия сканерных снимков прежде всего определяется следующими параметрами съемки: угловым разрешением и углом сканирования сканера, позицией и внешней ориентацией съемочной платформы во время съемки.

При относительно большом угле сканирования, типичном для самолетного сканера (90 или 120°), сканирующее зеркало захватывает снимаемую полосу местности под разными углами к надиру (± 45 или $\pm 60^\circ$). Запись данных в большинстве случаев приводится в постоянном приращении времени (машинное время), однако приращение полосы поверхности Земли вдоль строки с увеличением угла к надиру идет с ускорением обзора. Поэтому размер элементов изображения на местности с удалением от точки надир увеличивается. В этой связи моментальное поле зрения сканера, которое устанавливается его угловым разрешением, в крайних частях каждой строки сканирования больше, чем в ее центральной части. Соответственно растянута участки ландшафта больше



Рис. 74. Геометрическое искажение сканерных снимков.

на концах полосы сканирования, чем в ее центре. Так как зеркало сканера вращается или качается с постоянной частотой, а данные съемки на борту съемочной платформы регистрируются с постоянным линейным приращением времени, каждый элемент площади регистрируется в одинаковом интервале времени, хотя он меньше в зоне около точки надир и больше на концах этой полосы. В результате этого на сканерных снимках (рис. 74) очень заметно краевое сжатие изображения, которое схематически, как и другие типичные искажения сканерных снимков, показано на рис. 75. По диагонали к направлению полета линейные формы ландшафта искажаются S-образно, а вдоль и поперек простираются не изменяются. Итак, только вдоль направления полета, перпендикулярно растрам изображения, нет никаких линейных искажений снятых объектов.

Если результаты съемки во время залета записываются на магнитную ленту, что уже стало правилом, то можно ожидаемое по строке сканирования геометрическое изображение образов выправить результирующим различием масштаба вдоль строки, вводя соответствующие поправки в программу числовой обработки изображений. Для этого проводят геометрическую коррекцию результатов съемки на фильмозаписывающих приборах (электронных преобразователях магнитной записи в изображение на базе ЭВМ) при изготовлении фотонегативов отдельных кадров. В результате получается сканерное растровое изображение, которое не имеет геометрических искажений по всей ширине кадра. Поэтому при исследованиях обширных территорий и для синоптических наблюдений можно использовать мозаичный фотомонтаж самолетных сканерных снимков, который бу-

дет покрывать необходимую площадь поверхности Земли.

Многозональный сканер МСС первых трех спутников «Лэндсат» снимал поверхность Земли в других параметрах, чем самолетные варианты сканеров. Из-за большой высоты орбиты (около 717 км) он имел угловое разрешение 0,05 мрад и относительно малый угол сканирования – $11,6^\circ$. Поэтому вышеупомянутое сжатие изображения на концах строки сканирования было так мало, что им можно было пренебречь. Моментальное поле зрения одного элемента детектора сканера МСС ($79 \times 79 \text{ м}$) составляет строку сканирования практически без геометрических искажений. Форма и размеры снимаемых объектов ландшафта, как и их расположение один относительно другого внутри полосы сканирования поперек направления полета или вдоль полосы сканирования, не искажаются в процессе съемки и, таким образом,

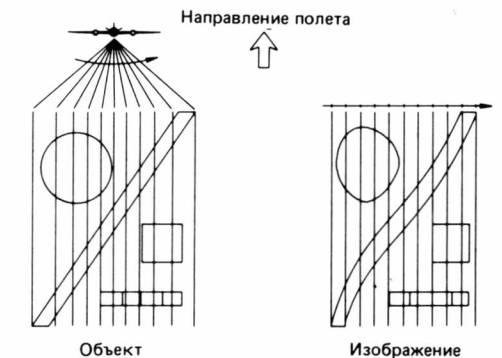


Рис. 75. Схематическое объяснение геометрических искажений на сканерных снимках [261].

остаются пропорциональными масштабу изображения в каждой его строке. Отдельные кадры сканерных снимков со спутников «Лэндсат», иногда называемых «Лэндсат-сценами», имеют поэтому характер ортогональной проекции, и в таком виде как стандартная продукция высылаются Центром данных в Сиу-Фолсе, США. Они соответствуют по точности привязки координат требованиям, предъявляемым к топографическим картам масштаба 1 : 500 000. Без предварительной коррекции искажений и с небольшими издержками из соседних снимков МСС «Лэндсат» можно монтировать мозаики – фотомонтажи растровых изображений больших регионов. Чтобы точность координат отдельных Лэндсат-сцен соответствовала повышенным требованиям, геометрию отдельных снимков со спутников «Лэндсат» с помощью наземных триангуляционных пунктов (не меньше четырех на один снимок) и соответствующей программы для ЭВМ можно перевести в геометрию соответствующей картографической проекции¹. С помощью сетки точек изображения и при наличии соответствующей программы числовой обработки данных может быть достигнуто совмещение разновременных снимков для одной и той же (одинаковой) полосы сканирования на местности.

Причиной геометрических искажений снимков со спутников «Лэндсат» могут быть, например, изменения угловой скорости сканирующего зеркала, или изменения внешней ориентировки космического аппарата в процессе съемки, а также искажения, вызванные вращением Земли в один цикл процесса сканирования, продолжающийся 28 с для сканеров, установленных на первых спутниках «Лэндсат». Эти искажения могут быть сняты соответствующими программами компьютерной обработки первичных данных в Центре данных, прежде чем потребитель получит изготовленную по результатам съемки со спутника «Лэндсат» заказанную им конечную продукцию – негатив, увеличенный отпечаток и т.п. В настоящее время даже числовая запись на магнитной, компьютеро-совместимой ленте CCTs (Computer Compatible Tar-

pes) содержит нововведенные необходимые геометрические коррективы.

При съемках самолетными сканерами не поддающиеся контролю движения самолета могут увеличить геометрическое искажение как в строке сканирования, так и в группе соседних строк. Вращение приводит к волнообразным искажениям на сканерном изображении. Из-за бокового ветра пилот иногда вынужден держать фюзеляж самолета во время съемочного залета под некоторым небольшим углом к направлению полета, чтобы ликвидировать боковой снос и выдержать направление съемки. В таких случаях геометрическое искажение проходит через все строки изображения. Чтобы избежать таких искажений снимков или уменьшить их по мере возможности, сканер (так же как и аэрофотосъемочную камеру), если позволяют технические возможности, монтируют на кольцевой подвеске¹, с помощью которой во время полета компенсируют боковой снос, уравнивая направление осей или азимутов полета и съемки.

Геометрические искажения снимка могут, наконец, возникнуть на сканерном изображении из-за временных изменений высоты полета и полетной скорости во время съемочного залета, а также «рыскания по курсу». Чтобы можно было обнаружить и выправить эффекты всех вышеописанных нарушений заданной геометрии изображения, необходимо вести во время полета наблюдение за положением съемочной платформы и ее внешней ориентировкой и регистрировать эти данные. Кроме того, необходимо следить за работой сканера, чтобы можно было учесть и исправить систематические ошибки. При полете ресурсных спутников «Лэндсат» контролировалась истинная орбита спутника в период съемки, а также регистрировались данные о внешней ориентировке космического аппарата в этот момент. Это делалось для того, чтобы при визуализированном представлении данных можно было внести нужные исправления. Кроме того, в период съемки регистрировали аппаратные, связанные со сканером и его работой параметры, чтобы можно было выявлять ошибки в его работе и ввести нужную коррекцию.

4.3.5. О спектральном разрешении и спектральной эффективности сканерных систем. Возможность сканера принимать и измерять интенсивность излучения в разных спектральных диапазонах устанавливается расчетом технических параметров сканерной системы. Часть из них определяется оптической системой, а именно: в скольких и в каких частях спектра может быть принято отраженное или вторичное тепловое излучение объектов ландшафта, т.е. определяется спектральное разрешение сканера. Вид и число детекторов важны для спектральной чувствительности и

¹ Аэрофотосъемочные камеры чаще имеют подвеску карданного типа, как морские компасы. – *Прим. перев.*

для динамической зоны сканерной системы (в соответствии с его радиометрическим разрешением). Качественные измерения могут быть проведены только тогда, когда они сопровождаются тарированием самой системы, а референц-данные записываются синхронно с данными измерений.

Простой вариант сканерной системы – тепловой сканер, на основе которого позднее был разработан и создан многозональный сканер МСС. В этом варианте теплового сканера поток длинноволнового ИК-излучения, идущий от объектов ландшафта на охваченном сканером элементе площади, фокусировался телескопической системой на детектор, который был чувствителен к тепловому длинноволновому ИК-излучению (8–14 мкм). Различаемые температуры излучения от охваченных в процессе сканирования объектов ландшафта воспроизводились на тепловых изображениях (радиационных снимках) ступенями серого тона, соответствующими по плотности определенному интервалу температур градуировочной шкалы сканера. Тепловой сканер вышеописанного типа называют одноканальным, так как схема его действия и технические параметры позволяют измерять интенсивность потока излучения только в каком-либо одном диапазоне электромагнитных волн, диапазоне, который обычно называют спектральным каналом или зоной измерения.

Температурное разрешение (наименьшее значение разницы регистрируемых температур) тепловых сканеров, как правило, намного меньше (т.е. хуже или больше по абсолютной величине), чем минимальная разница радиационных температур объектов (величин интенсивности потока излучения), и зависит от типа детекторов. Температурное разрешение современных тепловых сканеров около 0,1 К¹.

Тепловые сканеры могут быть и двухканальными, т.е. регистрирующими восходящий тепловой поток в двух частотных диапазонах. В одном из таких вариантов сканера использовались следующие интервалы длин волн: канал 1 – от 3,0 до 5,5 мкм и канал 2 от 8 до 14 мкм. Таким образом, была возможна регистрация как отраженного, так и эмиттерного потока инфракрасного излучения. Для этого необходимо было общий, восходящий от поверхности планеты, поток энергии, который захватывался сканирующим зеркалом, разделить в оптической системе сканера сначала на два потока, выделив только тепловое излучение, а затем уже это тепловое излучение вновь разделить, промодулировав его по фазе на два потока, каждый из которых попадает на соответствующий детектор. В противном случае они регистрировали бы энергию смешанного потока. Преобразование солнечной энергии в электрические импульсы здесь идет в двух отдельных блоках детекторов.

¹ Тепловые сканеры спутников 1960–1970-х гг. имели разрешение хуже 2 К. – *Прим. перев.*

В другом варианте такого же сканера в одном канале регистрировалось ИК-излучение оптического диапазона в интервалах длин волн 0,7–0,9, или 1,0–2,5, или 3,0–5,5 мкм, а во втором – вторичное тепловое в интервале, совпадающем с окном прозрачности атмосферы для длинноволнового теплового излучения (8–14 мкм). При таком способе съемки поток энергии, попадающий со сканирующего зеркала в оптическую систему сканера, сразу разделяют на два потока – коротковолновый (0,4–5,5 мкм) отраженный и длинноволновый (8–14 мкм) эмиттерный (рис. 73), которые направляют на два разных детекторных блока.

Многозональные сканеры, устанавливаемые для орбитальных измерений со спутников, как правило, имеют от четырех до двенадцати спектральных каналов. Интенсивность излучения в отдельных зонах спектра принимается специальными детекторами или, точнее, блоками детекторов, фассеты которых подобраны для оптимальной работы в режиме определенного интервала длин волн. Детекторы различаются по типу физических процессов, которые в них происходят и благодаря которым поток солнечной энергии, попадающий на них из окружающего пространства, преобразуется в электрический сигнал (измеряемый в вольтах). Подробное описание типов детекторов, принципа их действия и реакции на излучение определенных диапазонов (*англ. spectral response*) имеется в специальной литературе (например, в руководствах и справочниках по дистанционному зондированию).

В качестве примера многозональных сканеров укажем на самый известный из них – вариант мульти-спектрального сканера МСС, который был установлен на двух первых спутниках «Лэндсат» (см. рис. 80). Он регистрировал отраженный поток солнечной радиации в четырех спектральных диапазонах: канал 4 – от 0,5 до 0,6 мкм, канал 5 – от 0,6 до 0,7 мкм, канал 6 – от 0,7 до 0,8 мкм, канал 7 – от 0,8 до 1,1 мкм. Сканер МСС на спутнике «Лэндсат-3» был снабжен дополнительным каналом (канал 8), который благодаря двум дополнительным блокам детекторов измерял тепловое излучение во втором окне прозрачности атмосферы – в интервале длин волн от 10,4 до 12,6 мкм.

Узкоканальный сканер – бендикс-сканер M²S, технические характеристики которого приведены в табл. 4, является типичным примером многозональных сканеров для съемок с самолетов. Он имеет восемь каналов для видимого диапазона, два канала ближнего ИК-диапазона и один – теплового ИК-диапазона (табл. 4). Ширина каналов неодинакова, она изменяется в зависимости от диапазона излучения, так же как и спектральная чувствительность. О достоинствах этого сканера читатель может судить самостоятельно, сравнив разные кадры на рис. 72.

НАСА и другие ведомства США проводят эталон-

Таблица 4. Спектральные диапазоны и чувствительность многозонального бендикс-сканера M²S [309]

Угол раскрытия	100°
Компенсация вращения	± 10°
Скорость сканирования	10–100 качаний
Геометрическое разрешение	2,5·10 ^{–3} рад

Канал	λ _{ср} , мкм	Δλ, мкм	Чувствительность ¹⁾ , %
1	0,410	0,06	2,0
2	0,465	0,05	0,5
3	0,515	0,05	0,3
4	0,560	0,04	0,3
5	0,600	0,04	0,3
6	0,640	0,04	0,3
7	0,680	0,04	0,4
8	0,720	0,04	0,5
9	0,815	0,09	0,5
10	1,015	0,09	1,0
11	11,0	6,0	0,25 К

λ_{ср} – средняя длина волны; Δλ – ширина зоны.
¹⁾ При высоте стояния Солнца 45°.

ные тестовые залеты при спектральных съемках объектов ландшафта 24-канальным сканером. Диапазон измерений такой системы – от ультрафиолетового (УФ – 0,34 мкм) до теплового инфракрасного (ИК – 13 мкм). Наименьшая ширина зоны измерения – около 0,4 мкм, наибольшая – 1,0 мкм. Отраженное от объектов ландшафта излучение регистрируется с точностью от 0,05 до 1,2% (последнее при наибольшей мощности потока излучения), вторичное тепловое излучение – с точностью от 0,26 до 0,72 К.

Как это ни парадоксально, но съемки с помощью 24-канального сканера показали, что большое число спектральных каналов не является необходимым и достаточным условием для дистанционного зондирования и что оптимальные результаты сканерных съемок для выявления спектральных характеристик объектов не зависят от максимально возможного количества каналов. С одной стороны, большинство объектов ландшафта характеризуется такими отражательными и излучательными способностями и имеют такие спектральные характеристики, что их можно получить и при небольшом числе спектральных каналов сканера, если только правильно выбрать каналы. С другой стороны, увеличение числа спектральных каналов сканера ведет автоматически к увеличению количества данных до такого объема, что подготовка их к первичной обработке, сама первичная обработка и представление ее результатов для интерпретации находятся в очень невыгодных соотношениях с эффективностью и экономичностью самой спектрометрической съемки.

Основными вопросами, возникшими при разработке технического задания и внедрения многозональных сканеров, были вопрос выбора спектральных зон (интервалов длин электромагнитных волн), имеющих значение для постановки задач пользователя, и вопрос о том, в каких и скольких спектральных каналах проводить съемки. В табл. 5 показано, что отдельные группы пользователей предъявляли прямо противоположные, а не просто различные требования к ресурсным спутникам и что количество, ширина и положение каналов съемки в спектре электромагнитных волн различны. Эти неоднозначность и противоречивость наблюдались в требованиях, предъявляемых к многозональным сканерам и к периодичности съемок. Различны требования геологии, географии, сельского и лесного хозяйства, океанологии, пространственной планировки в строительстве и других отраслей науки и практики. Выдвигавшие их специалисты исходили из разных спектральных характеристик и размеров тех объектов, которые представляли интерес для данного направления науки или практики. Точно так же в требованиях к пространственному разрешению в первую очередь внимание обращалось на то, что с улучшением разрешения резко возрастет объем данных, и, как следствие, ожидалось, что это приведет к качественному скачку в исследованиях. Табл. 6 дает представление о существующих и планируемых съемочных системах для дистанционного зондирования (спектральные диапазоны, количество каналов и их параметры, пространственное разрешение).

Об оптимальном количестве спектральных каналов, широте их диапазона и положении в общем спектре электромагнитного излучения пользователь может, безусловно, судить только тогда, как это уже упоминалось, когда он четко представляет цель и задачу исследований, когда он в качестве предпосылки исследования имеет некоторые типовые спектральные характеристики объектов.

Итак, выраженность спектральных признаков объектов ландшафта и возможность их распознавания на фоне других объектов в значительной мере зависят от технических характеристик и выбора спектрального канала многозонального сканера, а именно: от его широты и частотного диапазона в общем спектре электромагнитного излучения, типа детектора и его спектральной эффективности и т. п. В принципе этим определяется возможность качественной (аналоговой) или количественной (числовой) обработки полученных результатов аэрокосмической съемки. При составлении программы исследования и технического задания на разработку многозонального сканера и обеспечивающей его аппаратуры обычно в первую очередь учитывают как технологические возможности создания новых детекторов и технические параметры имеющихся, так и те спектральные диапазоны, в которых особенности спектральных характеристик

Таблица 5. Обзор технических требований к системам съемки для землеведения со спутников [27]

Область применения	Разрешение на местности, м	Периодичность	Виды и диапазоны (каналы; длины волн, мкм) съемки	Геометрическая точность	Используемые масштабы
Геология Поиск месторождений	10–30		Панхроматические; каналы 6 и 7; 0,4–1,1; 1,55–1,67; 2,1–2,3; 10–12; SAR	± 1 пиксель	1: 50 000 1: 100 000 1: 250 000
Почвоведение	30	2–4 раза в год	Каналы 4–7; 0,4–1,1; 1,55–1,7; 10–12; SAR		1: 50 000 до 1: 200 000
Инвентаризация сельского хозяйства Оценка урожая	10–30	Через 7–9 сут круглый год	Панхроматические; каналы 4–7; 0,4–1,1; 1,55–1,7; 10–12; SAR	± 1 пиксель	1: 100 000 до 1: 250 000 1: 100 000 1: 50 000
Инвентаризация лесного хозяйства	10–30	4–10 раз в год	Панхроматические; каналы 4–7; 0,4–1,1; 1,55–1,7; 10–12; SAR	± 1 пиксель	1: 100 000
Гидрология	30–60	В зависимости от задачи	Канал 5; 0,3–0,9; 10–12	± 1 пиксель	1: 100 000 1: 250 000
Землепользование	30–100 20–30	4 раза за период вегетации	Панхроматические; каналы 4–7	± 1 пиксель	1: 250 000 1: 50 000
Планировка городов Планировка районов	10 10–30	1 раз в год 2–4 раза за год	0,4–1,1; 10–12; SAR		1: 25 000 1: 50 000
Океанография Наблюдение льдов Навигация у побережий	500–1000 10–100	2 раза в сутки	Канал 11; 0,3–0,9; 10–12; SAR + альтиметр, скаттерометр, пассивная микроволновая радиометрия	± 2 пикселя	1: 500 000 до 1: 100 000

SAR – радар с синтетической апертурой.

исследуемых объектов будут наиболее выражены и отличимы среди прочих среднестатистических величин. Существенны также контраст зависящих от длины волн излучения оптических и(или) тепловых свойств объекта и величина и контрастность фоновых значений тех же свойств окружающих его объектов ландшафта, которые также могут быть лучше всего выражены именно в выбранном и заданном для съемки интервале длин волн (рис. 6 и 7). Например, очень часто в одном и том же узком интервале различные типы почв и горных пород, граница воды и суши бывают наиболее отчетливо выражены. Влияние частотной широты (узости) спектрального канала на захват и силу выраженности спектрального потока показано на графике и диаграмме рис. 76. На верхнем графике показана кривая спектральной яркости

типичного живого зеленого листа, которая характеризуется определенными, четко выраженными полосами поглощения и резкими переходами от поглощения к отражению примерно в полосе 0,7 мкм. Позиция (т. е. средняя длина волны) спектрального канала и величина интервала длин волн будут иметь влияние хотя бы потому, что типичные, зависящие от длины световой волны свойства отражения листа могут быть отдельно приняты при съемке и использованы для аналоговой или числовой обработки или же (при большей ширине спектрального диапазона) они будут замаскированы («запечатаны») типичными признаками листа. Гистограмма (рис. 76) показывает результаты измерения данных при широте диапазона 0,1 мкм (пунктир) и при широте 0,2 мкм (сплошная линия). Очевидно, что измерение данных с меньшей

Таблица 6. Землеведческие спутники и установленная и планируемая для установки на них съемочная аппаратура [26, 27]

	УФ, мкм	Видим.	ИК, мкм	Микроволны	X	C	S	L
Длина волны	0,2	0,4	0,7 0,9 1,1	3,0 5,0 8 10 12 14	0,5 0,7 1,0	2,0 3,0 5,0 7,0 10 15 20 30		
LANDSAT 1/2 1972/75		Канал 3 0,475–0,83 мкм (40 м)	Разрешение на местности					
		Канал 4 0,5–1,1 мкм (80 м)						
SKYLAB 1972/73/74		Канал 4 0,4–0,9 мкм (15 или 30 м)						
		Канал 12 0,41–2,35 мкм	80 м	10,2–12,5 мкм				
METEOSAT 1,2 1977/81		0,5–0,9 мкм (2500 м)	5,1–7,0 мкм	10,5–12,5 мкм (5000 м)				
HCMM 1978		0,55–1,1 мкм (500 м)		10,5–12,5 мкм (500 м)				
LANDSAT 3 1978		Канал 1 0,5–0,75 мкм (40 м)	Канал 4 0,5–1,1 мкм (75 м)	10,5–12,5 мкм (240 м)				
NIMBUS-7 1978		Канал 5 0,433–0,80 мкм (800 м)	10,5–12,5 мкм (600 м)	Канал 4 10,69–3,70 ГГц (20–60 км)				
SEASAT-1 1978		0,52–0,70 мкм (2000–5000 м)	MS-IR-радиометр 10,5–12,5 мкм (2000–5000 м)	8 м MR Канал 5 6,6–37,66 ГГц (16–100 км) (25 м)				
SIR A 1981								L-Канал (40 м)
SPACELAB 1 1983		Метрическая камера (~ 20 м)		2 частоты MW-скаттерометр				
LANDSAT 4+4' 1982/84		(30 м) ТМ* 0,5–1,1 мкм	10,4–12,5 мкм (120 м)	*ТМ Канал 7 0,45–0,52; 0,52–0,60 мкм (30 м) 0,63–0,69; 0,76–0,90 мкм 1,55–1,75; 2,08–2,35 мкм				
		MSS Канал 4 (80 м)						
MOMS 01 1983 MOMS 01A 1984		Канал 2 0,575–0,625 мкм (20 м) 0,825–0,975 мкм						
SIR B 1984								L-Канал (40 м)
SPOT 1985		Канал 3 0,5–0,9 мкм (20 м) Канал 1 (10 м)						
ERS-1 1986								C-Канал (30 или 100 м)
STEREO-MOMS 1986			(10–20 м)					
MOMS 02 1986 (?)		Канал 4 между 0,575 и 2,35 мкм (20 м)						

широтой диапазона отразит типичные изменения, определяющиеся длиной волны излучения, на спектральной кривой листа более подробно, чем более широкий диапазон спектральных измерений. Если результаты измерения в очень узком спектральном канале слабо выражены на фоне других спектральных

характеристик, полученных во время съемочного полета, то, исходя из вышеизложенного, можно предположить, что этот интервал длин волн для спектрального канала либо был неправильно выбран, т.е. выбран для той части спектра излучения, в которой характерные признаки исследуемого объекта слабо

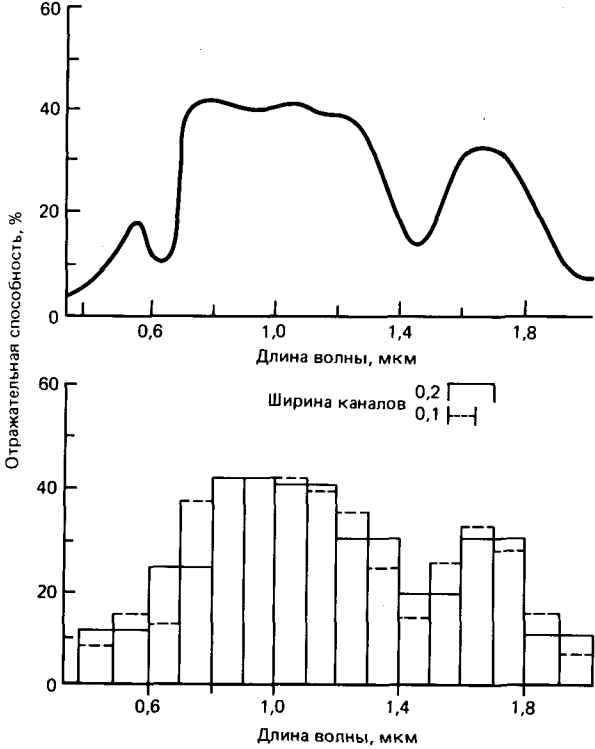


Рис. 76. График спектральной отражательной способности типичного листа (вверху) и тот же спектр, записанный с помощью многоканального сканера МСС при ширине каналов 0,2 и 0,1 мкм (внизу) [262].

различимы, либо этот узкоканальный спектральный канал попал в ту небольшую критическую часть спектра, в которой специфические для объекта признаки выражены очень четко, но контрасты спектральных характеристик других наблюдаемых объектов (горных пород, почв, растений, вод) тоже велики.

4.3.6. О радиометрической калибровке сканерных данных. Скачкообразные резкие без промежуточных оттенков переходы от одного фототона к другому на черно-белых или цветных изображениях, так называемые ступени тона и цвета на традиционных аэроснимках, зависят прежде всего от тех фотоматериалов, которые были использованы в самом процессе съемки, а также в последующих процессах обработки и репродуцирования фотоизображения. Кроме того, как уже указывалось выше, тональность фотообраза объекта ландшафта на таком снимке, как правило, остается непередаваемой при репродуцировании. Оттенками серого цвета или сочетаниями цветов и их тональностью на тепловых снимках передаются только относительные различия в спектральных характеристиках объектов. Радиационные снимки (точнее,

тепловые изображения) не дают количественных радиометрических данных о спектральной отражательной способности объектов ландшафта даже в тех особых случаях, когда фотоизображение радиометрически калибруется в соответствии с оптическим клином, т.е. шкалой проработки оптической плотности серого тона фотоизображения, и это соответствие по мере возможности сохраняется при последующих фотопроцессах изготовления негатива и отпечатка, а также дальнейшего их репродуцирования. Интенсивность спектрального потока энергии, преобразованная детекторами сканера в электрический сигнал-аналог, может быть радиометрически откалибрована, если она в процессе сканирования сопоставляется с интенсивностью излучения референц-источника калибровки сигнала, т.е. тестируется, по референц-источнику сигнала, и только после этого испытания сигнал регистрируется. Для отраженного потока излучения (0,4–1,1 мкм) в качестве такого равномерного по интенсивности излучения источника могут быть использованы любой искусственный источник монохроматического света, например вольфрам-галогенная лампа, или рассеянное излучение Солнца (свечение атмосферы), которое по системе волоконной оптики¹ вводится на сканирующее зеркало (рис. 73). При тепловых сканерных съемках, например съемках ландшафта в среднем ИК-диапазоне (8–14 мкм), используют в качестве референц-источника черное тело с известной температурой. Итак, при съемках с самолета с помощью бендикс-сканера (разд. 4.3.5) используют два калиброванных источника температур – черные тела с температурой – 10 и + 40 °С. Радиометрическая коррекция делает возможной воспроизводимую количественную регистрацию интенсивности излучения.

Референц-данные можно получить также с помощью ИК-радиометра, которым измеряется эмиттерное ИК-излучение объектов ландшафта по профилю вдоль линии залета, например в диапазоне от 8 до 13 мкм или от 10,2 до 12,2 мкм. Эти радиометрические данные количественны и воспроизводимы, так как радиометр одновременно с тепловым излучением объектов регистрирует и калиброванное излучение установленного в нем черного тела с определенной температурой. Инфракрасные радиометры имеют температурное разрешение около 0,5 К, их угловое разрешение в общем меньше, чем угловое разрешение современных сканеров, и не превышает 7 мрад (при высоте полета 1000 м – разрешение на местности 7 м).

Предпосылками для последующей интерпретации результатов тепловой сканерной съемки являются наблюдения и измерения ландшафта в районе съемок до и во время съемочных залетов. Метеоусловия,

¹ В волоконной оптике используются в качестве световодов пучки из стекловолокна. – Прим. перев.

морфология и свойства поверхности района (залеженность, горные породы, состав и влажность почв) – параметры, которые влияют на температурные характеристики объектов. Эти параметры необходимо измерять по меньшей мере в рамках так называемых подспутниковых экспериментов, чтобы получить отправные данные для оценки тех температурных контрастов, с которыми можно встретиться во время проведения тепловой сканерной съемки этого региона. Выше, в разд. 2.2.2. и 3.3.2, а также в разд. 3.5.8, было рассмотрено значение параметров, зависящих от материала объекта и параметров, связанных с окружающей средой, – параметров, от которых зависят температурные характеристики природных объектов.

4.3.7. Сбор, накопление и последующая числовая компьютерная обработка результатов спектральных сканерных съемок. Электрический импульс – сигнал, снимаемый на выходе с детектора каждого из спектральных каналов многозонального сканера, – усиливается и наконец вместе с тарированными референц-сигналом и функциональными данными (время, виток, высота, кадр и т.п.) сканера записывается на магнитную ленту в аналоговом или числовом виде. Запись принятой сканирующим зеркалом интенсивности излучения осуществляется раздельно, но синхронно с каждого светодиода (или блока светодиодов) каждого спектрального канала. В варианте 11-канального самолетного бендикс-сканера M²S с элементов детектора записывается 11 импульсов (11 спектральных признаков). Большие динамические диапазоны современных сканеров позволяют записывать различия спектральной интенсивности излучения дифференцировано, по многоступенчатой шкале интенсивности. Так, данные спектральной съемки по каналам 4, 5 и 6 сканера МСС спутника «Лэндсат» записываются на магнитную ленту по шкале из 128 ступеней (кодирование по 7 бит), а данные 11-канального самолетного бендикс-сканера – в объеме 256 ступеней (кодирование по 8 бит). При этом яркость каждого пиксель-элемента меняется в пределах от 0 (для черного) до максимального значения 128 или 256 (для белого). Запись на магнитную ленту дает ряд существенных преимуществ по сравнению с записью на фотопленку. Малый динамический диапазон (фотографическая широта) фотопленок приводит при прямой записи на них к потерям радиометрических данных. Кроме того, серые тона фотоизображения, как уже упоминалось выше, передают информацию только об относительных различиях в спектральных характеристиках соседних объектов. И наконец, результаты спектральной съемки, записанные на фотопленку, не репродуцируемы, так как их нельзя размножить без искажений, связанных с особенностями фотохимических процессов, фотоматериалов и создания изображений на них, которые практически

невозможно учесть. Напротив, запись данных на магнитные носители информации, как и сама техника съемки, предполагает не только качественную, но и количественную их регистрацию (сбор и первичную обработку) и воспроизводимость. Речь идет о возможности геометрической и радиометрической коррекции и фильтрации шумов и о записи на магнитных носителях как для получения контрольной видеoinформации, так и для последующей обработки результатов съемки по многочисленным программам, составленным для компьютерной обработки и представления данных (см. гл. 5).

4.4. Спутники типа «Лэндсат» для изучения Земли

4.4.1. Введение. Автоматические спутники «Лэндсат» (первоначально названные ERTS – Earth Resources Technology Satellite) предназначены для изучения природных ресурсов Земли или решения проблем земледелия в широком понимании этого слова. Первый из пяти спутников этой серии стартовал с территории США в июле 1972 г. Он был запущен не столько для того, чтобы снять за время орбитального полета Землю, сколько для того, чтобы своими многозональными и периодически повторяемыми долговременными съемками собрать пригодный для компьютерной обработки материал для решения вопросов сельского и лесного хозяйства, геологического картирования и поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, пространственного планирования территорий и океанографии. Сенсорные системы первых трех спутников: многоканальная телевизионная система РБВ и многозональный сканер МСС – не были только экспериментальными моделями для внедрения в сферу деятельности какой-либо одной дисциплины. Решения о выборе спектральных каналов и пространственном разрешении сенсоров последовали после предварительных съемок и исследований. Они отчасти учитывали различные интересы и требования отдельных дисциплин и групп пользователей, или потребителей, информации. Эти решения были компромиссными и отражали основные точки зрения на отношения между пользователями – покупателями информации. Следствием этого явилась концепция космического права. Интерпретаторы и пользователи многозональных съемок очень быстро поняли полезность их для тематического картирования – составления тематических карт и изучения состояний окружающей среды [157].

Сенсоры первых трех спутников «Лэндсат» до конца 1983 г. сняли более 1,3 млн. сюжетов различных ландшафтов. Каждый снимок покрывал участок поверхности Земли площадью 185 × 185 км и был сделан соответственно в 3 или 4 каналах. При этом «Лэндсат-2» снял 615 720 МСС-сцен и 2916 РБВ-сцен, а «Лэндсат-3» – 324 655 МСС-сцен и 296 990 РБВ-

сцен¹. Сканерной съемкой были охвачены почти все ландшафтные зоны и области Земли, частично даже в многократном перекрытии разными по времени съемками (так называемыми мультитемпоральными, т.е. периодически повторяющимися съемками одного и того же сюжета). Хотя первый из спутников «Лэндсат» имел, как и его полет, экспериментальный характер, съемки (прежде всего сканерные) давали уже стандартную информацию, т.е. сами снимки были уже стандартной информацией. Они очень широко использовались для разработки основных положений в мелкомасштабном картировании для мониторинга среды и современных динамических процессов на поверхности Земли – извержений вулканов, землетрясений, цунами, выпадения и таяния снега, вегетации растений и т.п. Для этого имелось много оснований. С одной стороны, «синоптическое перекрытие», т.е. перекрытие больших площадей, относительная точность привязки и высокое пространственное разрешение снимков с «Лэндсат» представляли актуальный материал для составления мелкомасштабных карт, прежде всего малоизученных районов Земли, и играли очень важную роль в съемках местности для пространственного планирования территорий и землепользования (как для эффективного использования, так и для дальнейшего изучения природных ресурсов хорошо известных районов). С другой стороны, снимки «Лэндсат» давали возможность проведения наблюдений и интерпретации очень больших регионов. Это была информация нового вида об очень больших площадях поверхности Земли, которая не зависела от условностей традиционных методов исследований. Земля на снимках «Лэндсат», конечно, выглядела по-новому. Это было важно для геологических оценок, прежде всего региональных литофациальных различий: «Лэндсат»-снимки или составленные из отдельных снимков мозаики (фотопланы и фотокарты) дали в первую очередь возможность получения однотипной информации и такой же однотипной интерпретации для отдельных геологов-пользователей или небольших рабочих групп при геологическом изучении структур областей, картирование которых традиционными методами требовало в лучшем случае многолетних (часто даже десятилетиями) работ. Очень важным при этом оказалось то, что на отдельных небольших участках можно было провести исследования на базе современных научных представлений и, используя полученные критерии, обработать весь массив снимков. Прежде региональные мелкомасштабные геологические карты составлялись на основе сопоставления локальных наблюдений и данных отдельных съемочных групп. Их составление часто представляло затруднения по разным причи-

нам. Одна из них – это известная тенденциозность представлений и взглядов исследователей, преследовавших различные цели и подходивших соответственно с разными критериями к принципам составления карт, поэтому карты составлялись с различной точностью. Наконец, интенсивному использованию данных съемок со спутников «Лэндсат» благоприятствовала их относительно доступная цена, особенно для многозональных и мультитемпоральных снимков на большие территории.

4.4.2. Орбита, сбор данных и перекрытие по площади съемочных систем спутников «Лэндсат». Спутники «Лэндсат» облетают Землю на высоте 917 км почти по круговой орбите, угол наклона которой к плоскости экватора примерно 99° (рис. 77). Эти околополярные, почти совпадающие с направлением меридианов Земли орбиты солнечносинхронны. Спутник при своем обращении вокруг Земли с периодом 103 мин пересекает плоскость экватора на ее освещенной Солнцем стороне 14 раз в сутки примерно в 9 ч 30 мин местного (поясного) времени. Последующие витки орбиты с равной периодичностью проходят над одной и той же точкой на поверхности планеты. Это, с одной стороны, позволяет снимать одни и те же участки поверхности Земли при одинаковых или мало изменяющихся условиях освещенности, а с другой стороны, позволяет использовать при компьютерной обработке как мультитемпоральные снимки, так и снимки разных сезонов, сделанные в изменяющихся со временем года условиях освещенности (высокого стояния Солнца летом и низкого зимой). При низкой высоте Солнца над горизонтом могут, например, выделиться такие особенности рельефа, которые будут иметь значение при структурно-геологическом картировании по снимкам со спутников «Лэндсат».

При восходящей на север или на юг орбите спутника многозональный сканер снимает полосу шириной 185 км на поверхности Земли непрерывно или на отдельных протяженных отрезках (рис. 78, орбита N, день M). Вследствие вращения Земли и наклона орбиты спутника полоса съемки (точнее, точка подспутникового надира) смещается к западу при каждом последующем витке орбиты на 2875 км по экватору и на 2100 км по северной широте 40° (рис. 78, орбита N + 1, день M). На следующий день, через 14 витков, орбита спутника проходит почти над исходной полосой съемки предыдущего дня. Но каждая 15-я полоса съемки, или 15-й виток орбиты, смещается к западу относительно начальной на 159 км (рис. 79, виток 15-й, второй день 2-й). Через 18 дней, т.е. после 251-го витка, спутник снимает в то же время суток первую, исходную полосу на поверхности Земли, т.е. находится в то же самое время над той же точкой, что и в первый день съемки. Витки вновь повторяются, а полосы съемки перекрываются. Начинается новый

¹ Для перевода в кадры необходимо число сцен или сюжетов умножить на 3 или 4 (по числу каналов РБВ или МСС). – *Прим. перев.*

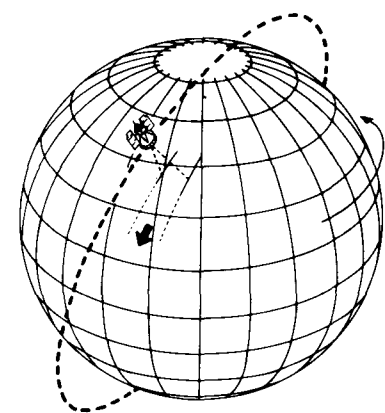


Рис. 77. Орбита спутников «Лэндсат-1»–«Лэндсат-5» (NASA Landsat Data Users Handbook).

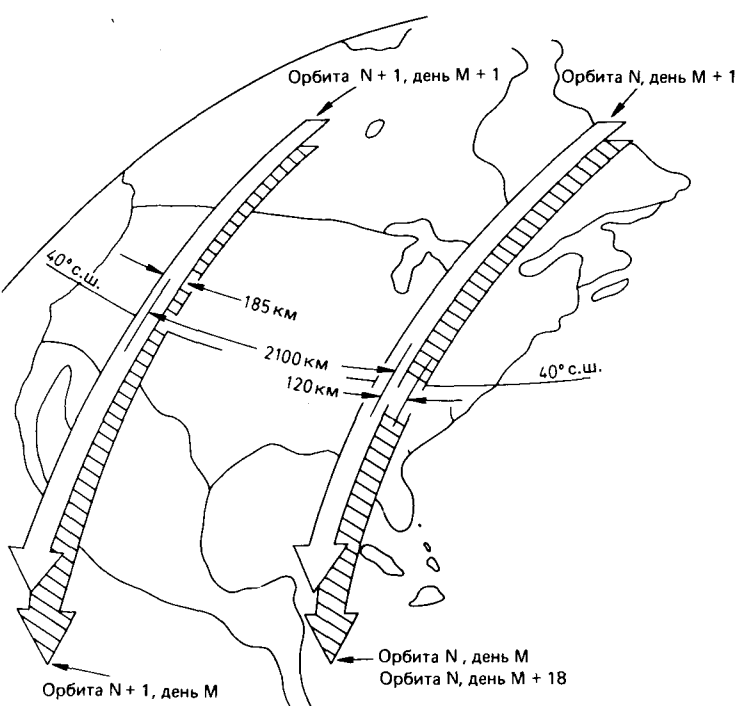


Рис. 78. Направления полос съемки первых трех спутников «Лэндсат» (NASA Landsat Data Users Handbook).

цикл съемки. Таким образом, за один 18-дневный цикл съемки сенсоры первых трех спутников «Лэндсат» охватывал и всю поверхность Земли, кроме приполярных районов выше 81°. С выбором лучших погодных условий над нужными регионами сканерные съемки могут быть повторены через 18 сут. Коррекцией орбиты некоторых спутников может быть достигнута более высокая повторяемость съемки. Так, первые два спутника «Лэндсат» имели цик-

личность съемки 9 дней, т.е. через 9 сут. спутник проходил над одним и тем же местом поверхности Земли. Орбиты «Лэндсат-2» и -3» были так же смещены на 9 дней, но так, чтобы потенциальная повторяемость съемки была 9-дневной. Иначе, через 9 дней съемку одной и той же местности проводил то «Лэндсат-2», то «Лэндсат-3». Такая высокая периодичность съемок обеспечивает хороший мониторинг динамических процессов на поверхности Земли.

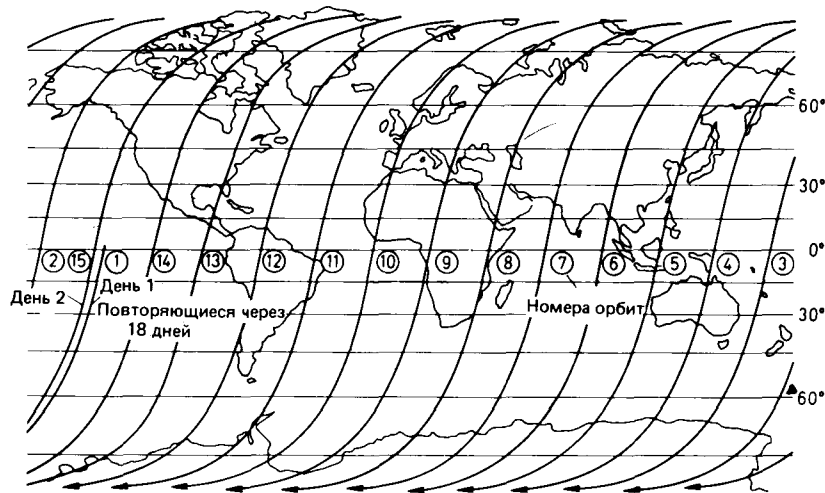


Рис. 79. Типовые проекции орбит первых трех спутников «Лэндсат» на поверхность Земли (NASA Landsat Data Users Handbook).

Как показано на рис. 78, соседние полосы съемки перекрываются съемками последующих дней. На широте экватора перекрытие по стороне снимков из соседних полос составит около 14%, более полное (около 80%) перекрытие – в приполярных областях. Такие снимки из перекрывающихся по стороне соседних витков съемки могут быть стереоскопичны. Отчетливо выраженный стереоэффект получается прежде всего на снимках ландшафтов с сильно расчлененным рельефом. Возможность стереоскопического рассмотрения ландшафта уменьшается при увеличении перекрытия в высоких широтах, так как угол стереоскопического зрения у стереоскопов очень мал. В направлении полета (по витку) снимки одного ряда перекрывают друг друга на 10% (по нижнему и верхнему краям). Иначе говоря, снимки со спутников «Лэндсат» имеют 10%-ное перекрытие в ряду. Такими полосами шириной 185 км выполнены многозональные съемки сканерными системами МСС всех пяти спутников «Лэндсат» и телевизионной системой РБВ первых двух спутников, причем каждый снимок («Лэндсат-сцена») покрывал площадь 185 × 185 км.

4.4.3. Многозональный сканер МСС спутников «Лэндсат-1, -2 и -3». (Принцип съемки, передача и регистрация данных.) Спутники «Лэндсат-1» и «Лэндсат-2» имели идентичную бортовую систему сенсоров: три телекамеры РБВ, образующие трехканальную телевизионную систему РБВ и четырехканальный многозональный сканер. Система РБВ первых двух спутников «Лэндсат» и ее модификация на спутнике «Лэндсат-3» описаны в разд. 4.2. Выше мы уже неоднократно касались в той или иной мере результатов установки системы многозонального сканирования на спутниках «Лэндсат». Остались нерассмотренными только общие технические параметры многозонального сканера и принцип его действия (рис. 80). Как и при оптико-механическом сканировании линейными (строчными) сканерами, зеркало сканера МСС во время полета сканирует Землю вертикально, строго в надир, поперек направления полета спутника. При угле сканирования 11,56° с высоты 917 км сканирующим зеркалом охватывается на поверхности Земли полоса шириной 185 км. Отраженный от Земли световой поток фокусируется в процессе сканирования на блок-матрице из шести рядов детекторов. Каждый из них при такой высоте съемки имеет моментальное поле зрения (IFOV) размером 79 × 79 м, что соответствует угловому разрешению сканера 0,086 мрад. Таким образом, из каждого колебания зеркала выстраивается строка, изображающая участок поверхности Земли шириной 79 м и длиной 185 км. Для этого частота колебаний зеркала синхронизировала со скоростью полета спутника (примерно 6457 км/с). Благодаря этому из создающихся шести строк сканирования каждый раз формируется шесть строк изображения без пропусков, а в конечном итоге

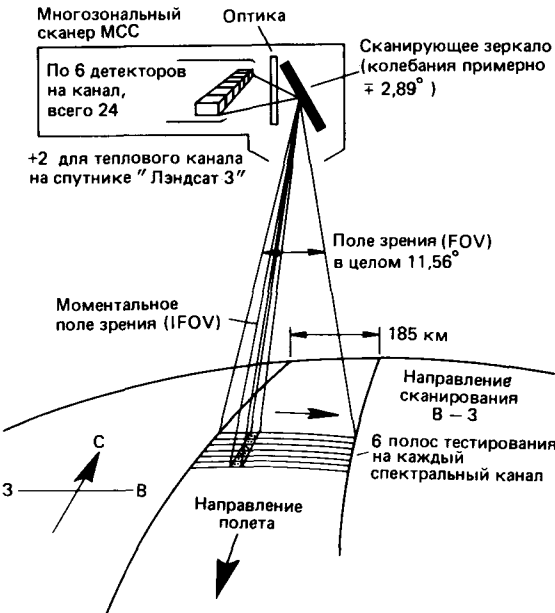


Рис. 80. Принцип съемки многозональными сканерами первых трех спутников «Лэндсат» (NASA Landsat Data Users Handbook).

получается растровое изображение – снимок МСС. Световой поток на пути от сканирующего зеркала к детектору пропускают через фильтры, т.е. модулируют. В результате он разделяется по длине волн излучения на четыре спектральных диапазона: зеленую зону, от 0,5 до 0,6 мкм (канал 4), красную зону, от 0,6 до 0,7 мкм (канал 5) и ближние ИК-зоны – от 0,7 до 0,8 мкм (канал 6) и от 0,8 до 1,1 мкм (канал 7). От выбора этих каналов зависит выбор рядов детекторов, которые реагируют только на излучение определенной частоты. Электрический сигнал детектора согласуется на выходе с контрольными измерениями в рабочем органе сенсора, т.е. калибруется, и коррелируется с внешней ориентировкой спутника по отношению к Земле. Если спутник находится вне зоны видимости наземной станции приема, то данные съемки могут быть записаны во время полета на магнитную ленту и позднее вызваны, «сброшены», по команде с Земли. В системе съемок или мониторинга спутниками «Лэндсат» бортовая запись данных оказывается наиболее слабым звеном. Во-первых, возможность записи ограничена емкостью находящихся на борту кассет с магнитной лентой – две кассеты на 30 мин времени, т.е. на 72 сцены. Кроме того, время эксплуатации магнитной ленты в кассете при современном уровне техники и условиях орбитального полета ограничено и составляет 500 ч. На первых трех спутниках «Лэндсат» возможность записи была строго ограничена еще и потому, что технология изготовления магнитных лент не исключала нарушений, которые могли приводить к сбою данных.

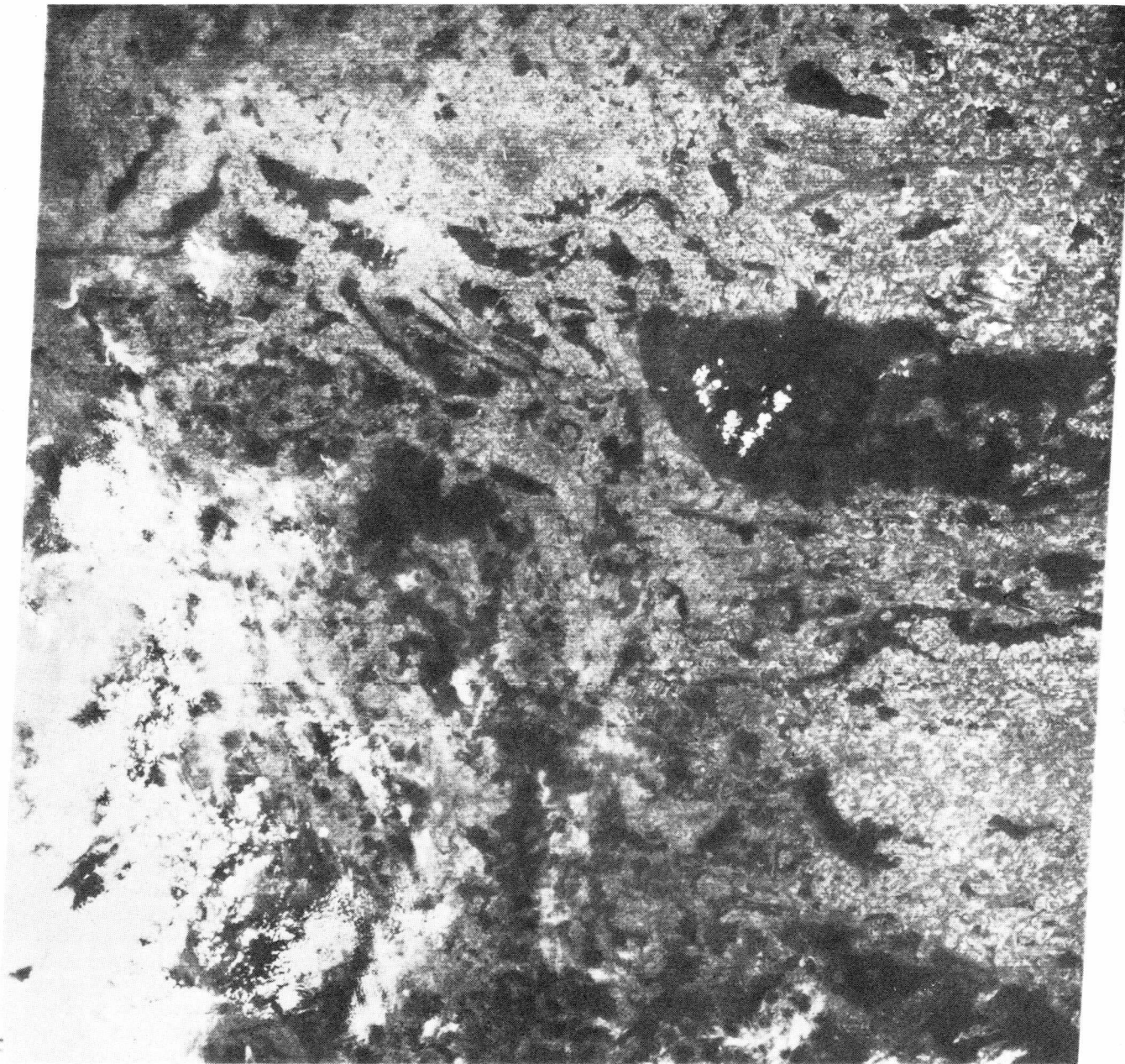


Рис. 81а–81г. Примеры сканерных «Лэндсат-снимков» — четыре перекрывающих друг друга узкозональных снимка на один и тот же участок местности (185×185 км), справа сверху — Гарц. Масштаб примерно 1:1 000 000 (NASA E-1401-09475).
Рис. 81а. Канал 4: зеленый (0,5–0,6 мкм).

Принятые со спутника данные на наземной станции приема прежде всего записываются на магнитную ленту с высоким спектральным разрешением (HDDT: High Density Digital Tape). Потом, после геометрической и радиометрической коррекции записи, данные переписываются в числовом коде на компьютерсовместимую ленту (CCTs) или фотографируются на фотопленку.

Стандартная продукция МСС-съемок — это черно-белые, откорректированные по системе сканерные изображения, так называемые «Лэндсат-сцены», или «Лэндсат-снимки». Для каждого спектрального канала, в котором работал многозональный сканер, установленный на спутнике «Лэндсат», изготавливают свой снимок (рис. 81). Различия в сером тоне одних и тех же объектов на снимках в разных спектральных

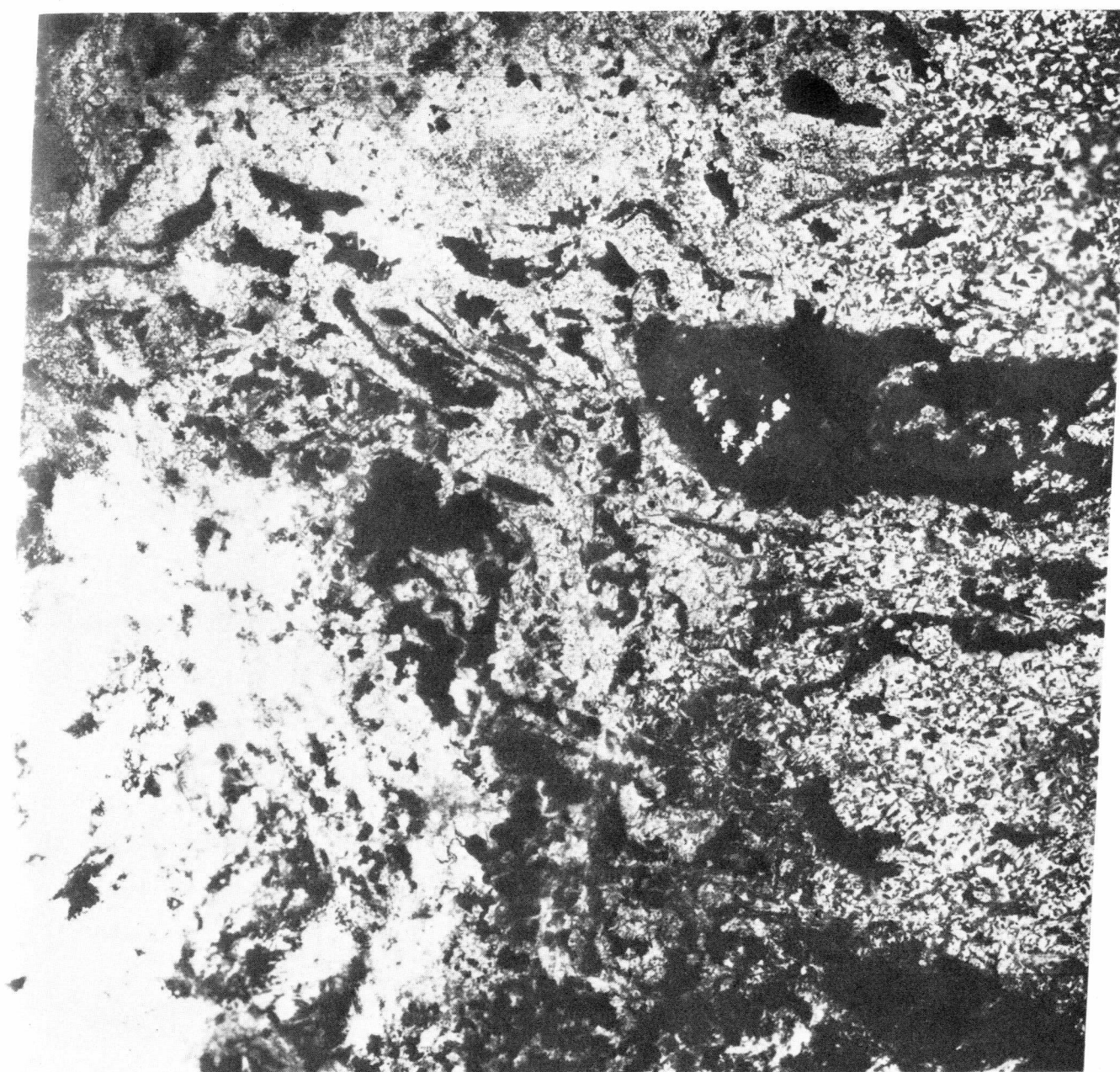


Рис. 81б. Канал 5: красный (0,6–0,7 мкм).

зонах передают разницу отражательной способности снимаемых объектов ландшафта, которые наиболее четко видны при сравнении снимков каналов 4 и 7.

При комбинировании спектральных данных по трем разным каналам сканера МСС, чаще всего — это каналы 4, 5 и 7, получают так называемое условно-цветное изображение, или цветную композицию. Это условно-цветное изображение переснимают на цвет-

ную ИК-пленку. На ней растительность воспроизводится красным цветом, вода и густо поросшие почвы или города — темно-голубым до черного. Хотя цветные композиции составляются по той же информации, которая записана для каждого из трех каналов, в итоге получаются преобразованные данные, менее четко и менее контрастно, чем оригинальные негативы или позитивы, передающие, несмотря на цвет,

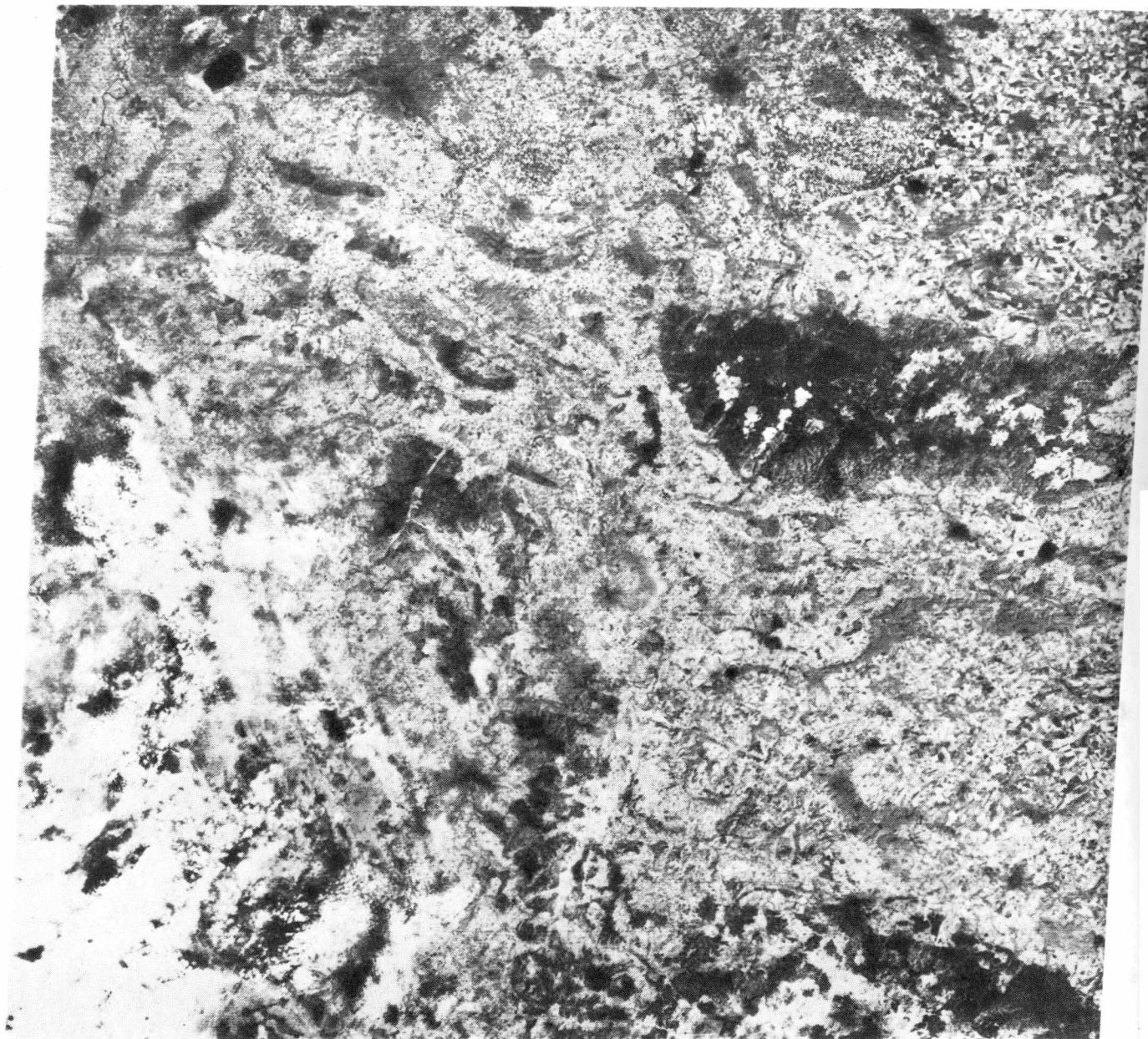


Рис. 81в. Канал 6: ближний ИК (0,7-0,8 мкм).

исходную информацию (содержание снимка)¹. Поэтому обработка цветных композиций, также называемых условно-цветными или ложно-цветными сним-

¹ При составлении цветных композиций контуры различных объектов на трех исходных снимках совмещаются с очень большой точностью, но не идеально. От этого границы объектов несколько расплываются и приобретают определенную ширину или толщину контура, что снижает информативность условно-цветного изображения при точных картосоставительских работах. — *Прим. перев.*

ками, не позволяет получить необходимую дополнительную информацию, имеющую большое значение для геологического картирования и мониторинга окружающей среды.

Материалы сканерных съемок со спутников «Лэндсат» в различных видах могут быть заказаны в центрах данных в США и некоторых других странах. Выходная продукция для потребителя в таких центрах подразделяется на фотографическую (оригинальное изображение — позитив, негатив, отпечаток, увели-

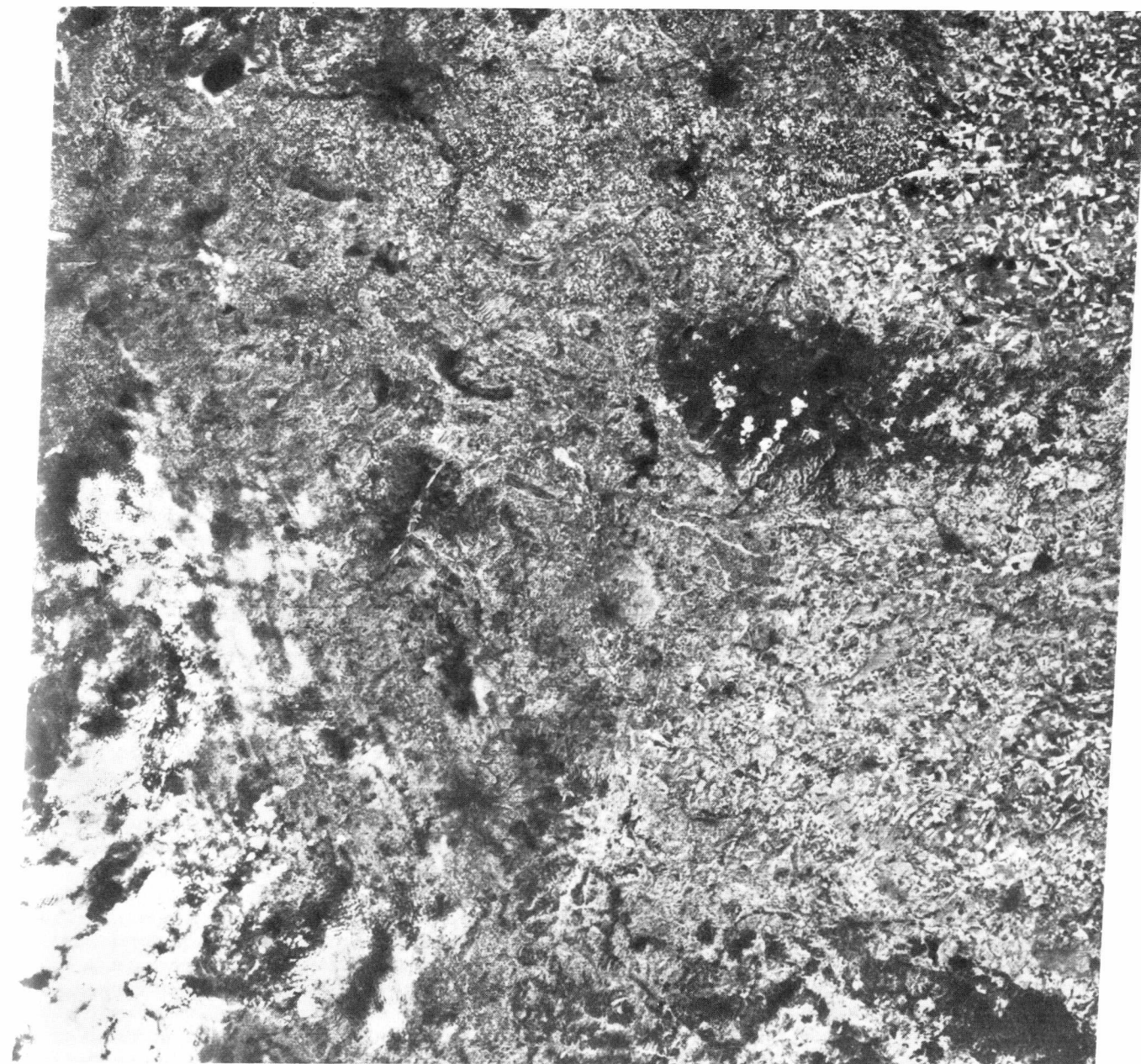


Рис. 81г. Канал 7: ближний ИК (0,8-1,1 мкм).

ченные отпечатки и монтажи снимков) и на компьютеровоспроизводимую запись на ленте ССТs, которая предназначена для передачи, числовой обработки и автоматизированного дешифрования информации (для последней цели можно использовать «Лэндсат-снимки» путем их считывания и дальнейшей числовой обработки).

С трех РБВ-камер телевизионных систем спутников «Лэндсат-1» и «Лэндсат-2» получали спектрозо-

нальные снимки, которые перекрывали каждым кадром квадрат на поверхности Земли площадью 185×185 км (рис. 65). Если одновременно работали сенсорные системы РБВ и МСС, то они обе снимали один и тот же сюжет. Для некоторых районов имеются такие нередко повторяющиеся по сюжету дубли РБВ- и МСС-снимков. Их особенно много для территории США.

На спутнике «Лэндсат-3» число телекамер РБВ в

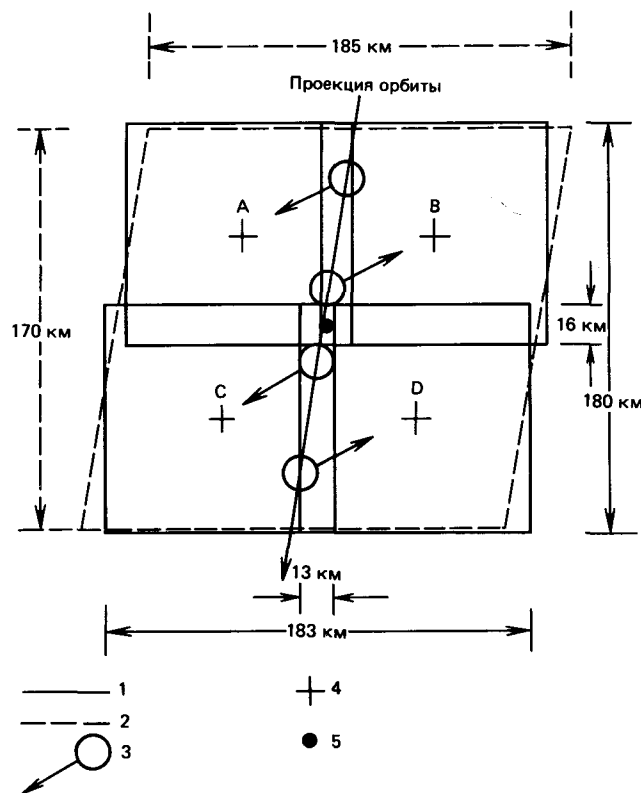


Рис. 82. Площадное перекрытие МСС- и РБВ-снимков со спутника «Лэндсат-3» (NASA Landsat Data Users Handbook). 1 – РБВ-кадр; 2 – МСС-кадр; 3 – позиция спутника при включении РБВ-камер; 4 – центры РБВ-кадров; 5 – расчетное положение центра снимка МСС на WRS-индекс-карте (орбита/ряд). Без масштаба; все данные расчетные.

системе было уменьшено до двух. Они снимали площади 98×98 км каждая по обе стороны от линии полета. На рис. 82 показан принцип этой съемки. Четыре РБВ-сцены перекрывают площадь одного сканерного снимка МСС.

4.4.3.1. Масштаб изображения, точность привязки, пространственное разрешение, спектральное разрешение и радиометрическая точность МСС-снимков со спутников «Лэндсат». Черно-белые фотокопии МСС-сцен (негатив или позитив на фотопленке) поставляются Центром данных ЭРОС или другими региональными центрами данных пользователям чаще всего в масштабе 1:1 000 000. Кроме того, могут быть изготовлены увеличенные фотодокументы – отпечатки на фотобумаге в масштабах 1:500 000 и 1:250 000.

Искажения рельефа смещением точек изображения на снимках со спутников «Лэндсат» так малы, что отдельные МСС-снимки, которые поставляются центрами данных или воспроизводятся с записей на

ленте ССТs, сразу могут быть использованы для геологического картирования как карта или картографическая основа, но не для регионов с сильно расчлененным рельефом. Относительная точность привязки по полю фотоотпечатка, изготовленного на фотобумаге с синтетической основой часто бывает лучше, чем на картах того же масштаба, бумага которых «ползет» (неравномерно растягивается и сжимается) от влажности и температуры воздуха (иногда более чем на миллиметры).

Фотографическое репродуцирование сюжетов МСС-снимков, их впечатывание или приводка¹ на существующие листы карты, например в плоской азимутальной проекции Ламберта, для вышеуказанных масштабов, как правило, не представляет трудностей. Точность привязки при приводке отдельных снимков какого-либо канала на листы топокарт в мировой системе разграфки трапеций (1976 г.) составляет 50–100 м. В принципе при приводке таких топокарт допустимой считается ошибка 150–300 м. Для цветных композиций (условно-цветных снимков) возможная ошибка при впечатывании изображений составляет 150 м. Так как трансформация изображения имеет очень высокую точность, то геометрические искажения отдельных МСС-снимков могут быть исправлены, как минимум, по четырем точкам – наземным пунктам триангуляции – и использованы в качестве топоосновы для составления карт. При приводке листов карт стандартной разграфки трапеций величина допустимой ошибки точности координат колеблется от 125 до 150 м.

Тематическое дешифрование МСС-снимков проводят по увеличенным прозрачным и непрозрачным позитивам, а также по отпечаткам на фотобумаге в масштабах от 1:1 000 000 до 1:250 000. Хорошее качество оригинальных негативов допускает их увеличение даже в 10 раз, до масштаба 1:100 000.

Трансформированное на специальных приборах до такого масштаба изображение может быть использовано как для сопоставления с существующими картами, так и в качестве основ – фотосхем – при проведении полевых исследований (для ориентировки и нанесения точек наблюдений). Собственно картирование – прослеживание интересующих границ объектов – на увеличенных до такого масштаба изображениях не имеет смысла, так как предельные элементы изображения (пиксель-точки²), из которых формируется сканерное изображение, становятся больше растра изображения и вместе с растровой (строчной) фактурой сканерного изображения маскирует содержание сюжета. Иначе говоря, при увеличении сним-

¹ Приводка – полиграфический термин, означающий совмещение в одно изображение двух и более клише. – Прим. перев.

² В фотографии их принято называть величиной зерна изображения. – Прим. перев.

ков до такого масштаба границы контуров объектов расплываются и структура скрывает его содержание.

Разрешение на местности (79×79 м) единичных «Лэндсат-сцен» (отдельных кадров в одном спектральном диапазоне), сделанных сканером МСС, определяется мгновенным полем зрения детектора системы МСС. Теоретически расчетное разрешение на местности 80 м. На распознаваемость объектов на снимках со спутника «Лэндсат» многозональным сканером влияют атмосферные условия в момент съемки и полученная контрастность изображения. Контрастность изображения зависит от качества оригинального негатива¹, но на нее также влияют последующие процессы воссоздания и копирования при размножении снимков. Качество негативов, изготавливаемых и распространяемых даже ЭРОС-центром, не всегда одинаково. При изготовлении различных копий (например, увеличенных отпечатков) необходимо постоянно обращать внимание на контрастность и плотность серых тонов изображения, их дифференциацию².

В каждом конкретном случае пространственное разрешение на снимке изменяется в зависимости от «закрытости» объекта или ландшафта и свойств его поверхности, а также от формы, размеров и прежде всего от контрастности отдельных объектов по их спектральным яркостям среди других объектов данного ландшафта. При самых лучших соотношениях распознаются (дешифрируются) даже такие объекты, размеры которых меньше 80 м, т. е. предельного теоретического разрешения на местности для МСС-снимков (улицы, русла рек, протяженные линии разрывных нарушений).

Для корреляции широты спектральных каналов и точности, с которой отраженный от поверхности Земли световой поток принимается многозональным сканером, поток фокусируется в сканере на радиометр, т. е. калибруется. Поле зрения сканера сделано узким для того, чтобы общий световой поток при такой высоте полета был при съемке почти вертикальным, состоящим из почти параллельных лучей. С одной стороны, этим сводят к возможному минимуму атмосферные помехи на пути светового потока, а с другой стороны, спектральные сигналы одинаковых объектов при приблизительно равных условиях съемки со всей площади снимка $34\,000\text{ км}^2$ становятся тем фактом, который имеет значение прежде всего при автоматической классификации объектов по их спектральным характеристикам. Перекрываемость кадров в четырех спектральных каналах и прием спектральной интенсивности по ширине динамичес-

¹ Оригинальные негативы в любом центре данных изготавливаются по стандарту, т. е. 75×75 мм (разд. 4.1). – Прим. перев.

² При изготовлении фотокопий в них впечатывается с оригинальных негативов оптический клин с 14 ступенями оттенков серого тона, т. е. грациями плотности изображения. – Прим. перев.

кой зоны открывают возможности многовариантной обработки изображений на ЭВМ, прежде всего первичной числовой обработки для улучшения контрастности и дифференцированности образов наиболее интересных для исследователя объектов, для уменьшения контраста между освещенными и затененными участками, например склонами с разной экспозицией, классификации и идентификации образов.

Сканер МСС имеет высокое спектральное разрешение. Он регистрирует спектральную интенсивность излучения в каналах 4, 5, 6 по шкале из 128 значений, а в канале 7 по шкале интенсивности из 64 ступеней. Эта градуировка происходит в то время, когда амплитуда выходного аналогового электрического сигнала детектора считывается с постоянного, точно измеренного расстояния электронным устройством, переводится им в числовую форму и регистрируется. Затем сигнал передается в числовом виде на наземную станцию приема и (или) может быть записан числовым кодом на магнитную ленту. Время, за которое происходит эта дискретизация, так называемый семплинг аналогового сигнала, соответствует на местности расстоянию 57 м в направлении сканирования. В результате этой процедуры каждая полоса сканирования разбивается на 3240 элементов изображения (пикселей) размером 57×79 м. Каждой такой ячейке изображения присвоено число, которое соответствует интенсивности излучения упорядоченного по полосе сканирования элемента ландшафта величиной 57×79 м (рис. 84). Так как местность одновременно снимается в четырех зонах спектра, каждому пикселю присвоены четыре числовых значения интен-

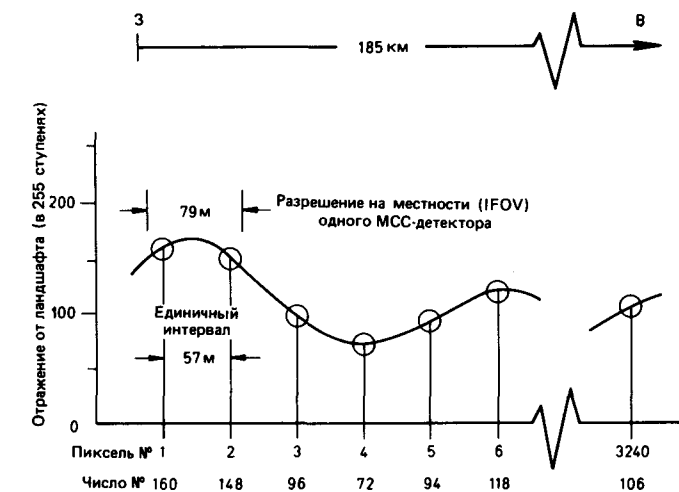


Рис. 83. Кривая отражения ландшафта вдоль линии сканирования. Каждый детектор системы МСС линиями по 79 м воспроизводит кривую отражения, которая складывается из отрезков по 57 м на местности, для того чтобы получился определенный числовой индекс (по величине яркости изображения). ("Remote Sensing-Principles and Interpretation" by F. F. Sabins, 1978.)

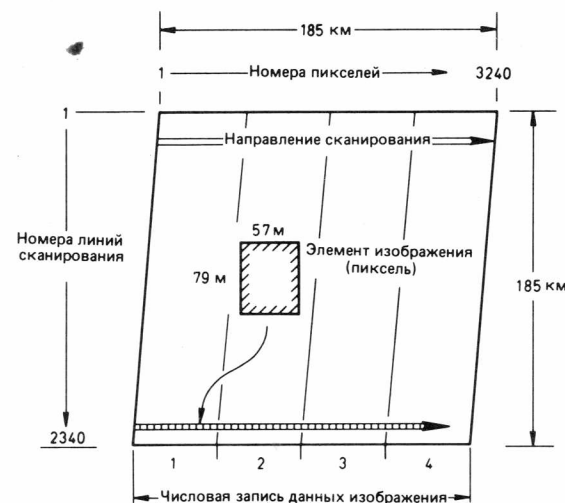


Рис. 84. Построение «Лэндсат-МСС-кадра» из пиксель-элементов и линий сканирования. ("Remote Sensing-Principles and Interpretation" by F. F. Sabins, 1978.)

сивности излучения в указанных зонах спектра.

Из этого принципа регистрации данных получают так называемое эффективное мгновенное поле зрения сканера (EIFOV). Его величина спектральной яркости излучения соответствует величине интегрального излучения, попадающего в мгновенное поле зрения сканера. Характеризуя пространственное разрешение сканерных изображений, мы подчеркнули, что необходимы, как минимум, два пиксель-элемента изображения, чтобы можно было по данным сканерной съемки выделить и распознать объект. Поэтому разрешение на местности снимков «Лэндсат» на практике варьирует от 100 до 250 м. Каждый из таких снимков состоит из 2340 строк по 3240 элементов в каждой строке. Кроме того, каждый кадр многозонального сканера состоит также из 30 000 000 отдельных единичных точек. Поэтому для передачи данных со спутников «Лэндсат» на Землю нужно устройство для вывода информации с быстродействием 15 Мбит/с. Передача данных съемки и калибровочных данных проводится в дециметровом диапазоне (2200–2300 МГц).

4.4.3.2. Характеристика сканерных «Лэндсат-снимков» и их приобретение. Каждый МСС-кадр имеет по краям изображения служебную информацию: географическую привязку снимка, дату съемки, определенную характеристику снимка и регистрационные данные (рис. 85).

По всем четырем сторонам снимка нанесены с интервалом 30 мин координатные отметки снимаемой местности. Кроме того, по его углам сделана маркировка, которую можно использовать при преобразовании или совмещении изображений в разных спектральных диапазонах. Крестами показаны грани-

цы соответствующей кадру трапеции масштаба 1:1 000 000 в стандарте мировой разграфки листов топокарт. На нижнем краю снимка нанесены (рис. 85):

- 1 – дата съемки (день, месяц, год);
- 2 – координаты центра снимка (С) в градусах и минутах;
- 3 – координаты точки надира (N) в градусах и минутах;
- 4 – тип сенсора и спектральный канал: МСС – многозональный сканер и обозначение его спектрального канала (4–7); при съемке телевизионными РБВ-системами – система обратного луча и обозначение ее спектрального канала (1–3); D – режим непосредственного приема; R – режим бортовой записи на запоминающее устройство и сброс данных;

5 – высота Солнца в градусах и азимут в градусах от истинного севера, считая по часовой стрелке;

6 – азимут направления полета (в градусах), номер витка. Код наземной станции приема (например, G – Goldstone, California, A – Alaska);

7 – цифра 1 означает существование полного комплекта изображения. N или A – копия сформирована по нормальной или специальной технологии; R или D – предполагаемые расчетные или точные координаты центра снимка; 1 или 2 – сигнал построения изображения, линейный или сжатый; H или L – высокое или низкое усиление сигнала, только для каналов 4 и 5;

8 – организация, разработавшая проект и осуществляющая съемку (NASA) и код проекта (ERTS);

9 – каталоговый, опознавательный номер отдельного снимка МСС. Он включает: E – ключевой индекс (номер модели в серии спутников «Лэндсат»); 2199 – число суток полета; 09372 – гринвичское время съемки с точностью до десятков секунд; 09 – часы, 37 – минуты, 2 – секунды, 5 – номер канала приема данных (1–3 для РБВ, 4–7 [8] для МСС); 02 – номер воспроизведения оригинальной записи (повторение записи при параллельном воспроизведении записи калиброванного сигнала), т.е. номер бланка калибровки данных.

В существующей сети наземных станций приема данных некоторые из них выполняют функции региональных центров сбора информации (рис. 86). В этих региональных центрах данных можно приобрести материалы съемок спутниками «Лэндсат». Главный из них – это ЭРОС-центр (EROS-Data-Center of US Geological Survey) Геологической службы США, который с 1982 г. перешел в ведение службы NOAA, National Earth Satellite Service, Sioux Falls, US. Он расположен в Сиу-Фолсе, США, но связан почти со всеми районами земного шара.

ЭРОС-центр располагает точной по времени информацией о состоянии окружающей среды и поверхности Земли в зонах непосредственной видимости американскими наземными станциями приема, а так-

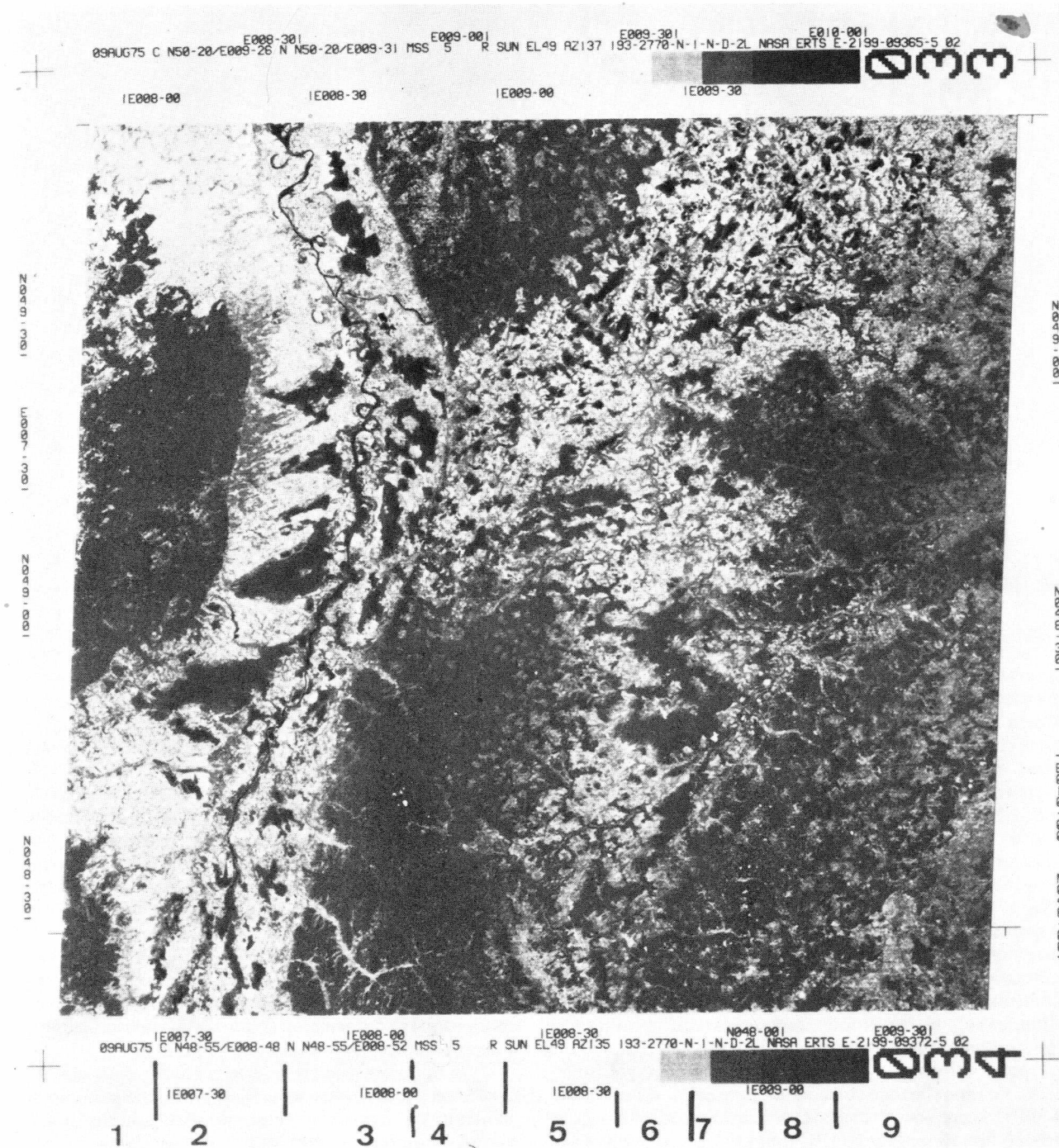


Рис. 85. По краям «Лэндсат-снимка» впечатаны данные: дата съемки (1), географическая позиция снимка (2 и 3), тип сенсора и его спектральный канал (4), высота Солнца на момент съемки (5) и регистрационный номер снимка. Дальнейшие разъяснения в тексте.

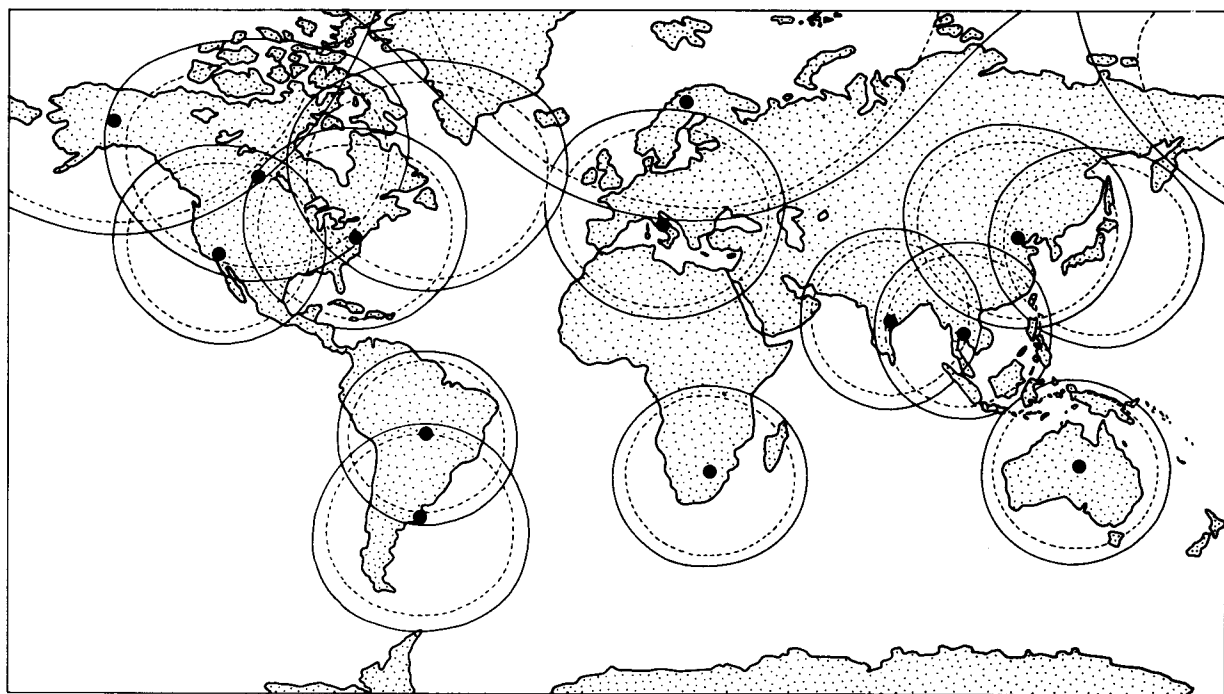


Рис. 86. Местоположение и зоны действия наземных станций приема данных со спутников «Лэндсат» (по публикации NOAA).

же в других регионах, данные по которым сначала записываются запоминающим устройством на борту спутника, а затем «сбрасываются» по команде с Земли на станцию приема. ЭРОС-центр посылает на борт спутника программу съемок и команды включения и выключения аппаратуры. Кроме того, он ведет коррекцию орбиты спутника. Станции вне территории США принимают (каждая в своей зоне видимости) информацию по сигналам точного времени на свои антенны. Для Европы и Средиземноморского региона в ведении Общеввропейской организации ESA в Фучино, Италия, имеется свой центр сбора информации, который осуществляет прием, предварительную обработку, распределение и хранение материалов съемок ресурсными спутниками Земли. Хранение и распределение информации со спутников «Лэндсат», полученной европейскими станциями приема данных (Фучино в Италии и Кируна в северной Швеции), осуществляется подразделением ESA, которое расположено в Фраскати близ Рима. В ФРГ материалы съемок со спутников «Лэндсат» можно приобрести в NOPC при DFVLR в Оберпфaffenхофене (8031, Oberpfaffenhofen, Post Weßling, Telex 5274203).

Для заказа нужного кадра необходимо прежде всего указать его порядковый номер в каталоге (см. на рис. 85), т.е. уточнить, в каких спектральных зонах должны быть выданы данные. Очевидно, что не во всех случаях есть необходимость заказывать сним-

ки (в виде фотопродукции или магнитной записи) по всем четырем каналам сканера МСС. Так, например, для геологического картирования и составления фотомонтажей (фотосхем) или мозаик снимков, как правило, достаточно иметь данные по двум каналам – 5 и 7.

Первый шаг в обработке «Лэндсат-снимков» – это выбор изображения нужного района самого хорошего качества и определение центра снимка или точки надира в момент съемки. Для этой цели выпущены каталоги всех снятых с первых трех спутников «Лэндсат» сюжетов по всей поверхности Земли. Магнитная запись данных для каталога обновлялась четыре раза в год. Существуют каталог снимков территории США (US Standard Catalogue), каталог для всей остальной территории суши: континентов, островов и прибрежных зон океанов (Non-US Standard Catalogue) и специальные региональные каталоги.

Для определения географического положения каждого снимка при заказе используют специально разработанную для этой цели систему индексации или систему запроса данных (Landsat Worldwide Reference System, сокращенно WRS). Она представляет собой бланковые карты с нанесенными на них расчетными положениями центров каждого снимка (так называемого номинального центра сцены) для всех возможных сканерных снимков вдоль всех (251) витков орбиты, с которых снимается вся поверхность Земли за один цикл 18 сут. В промежутках между центрами от

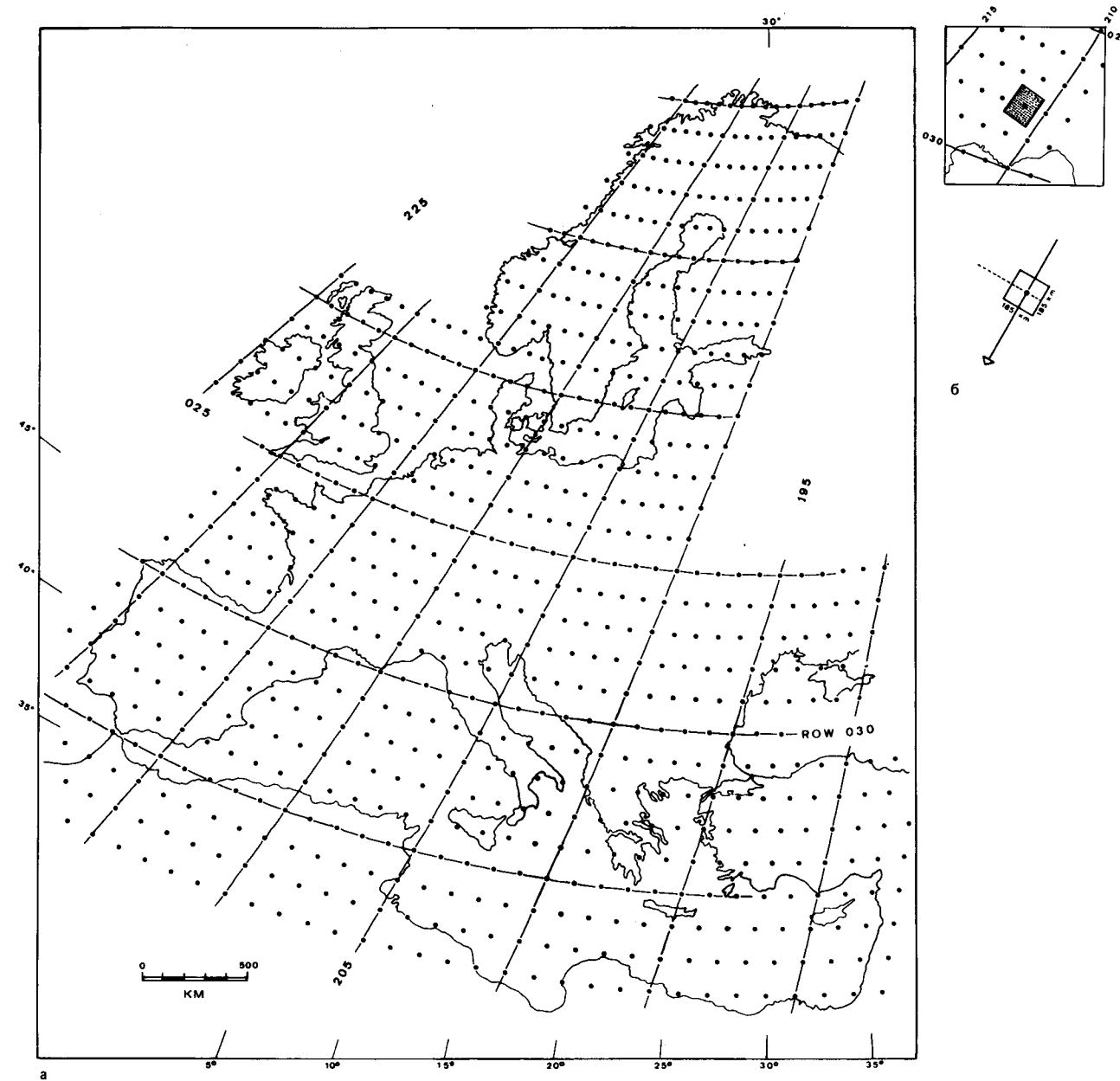


Рис. 87. Фрагмент карты снимков «Лэндсат» для Центральной Европы (Landsat Worldwide Reference Systems – WRS). Точки указывают расчетное положение центров «Лэндсат-снимков» («Лэндсат-1, -2 и -3»). Положение снимка определяется по ряду (row) и витку (path) (NOAA 1983). Дальнейшие пояснения в тексте.

полосов проведенны лучи, которые можно использовать для определения площади снимка. Географическая привязка центра снимка получается из номера витка орбиты полета в направлении с севера на юг (path), и номера ряда последовательности снимков с востока на запад (row). Вся оригинальная информация о съемках с ресурсных спутников и разработка

систем хранения и поиска ее, так же как и первичной обработки, принадлежит ЭРОС-центру.

Кроме вышеуказанных имеются дополнительные карты-индексы (Nominal Scene Landsat Coverage Index Sheets) сети снимков для следующих регионов (в скобках дано их условное обозначение): Евразии (WRS-1), Северной Америки (WRS-2), Южной Амери-

ки (WRS-3), Африки (WRS-4), Океании (WRS-5), Антарктиды (WRS-6) и Северного Ледовитого океана (WRS-7). Фрагмент такой карты по состоянию на 1982 г. показан на рис. 87, а. В оригинале центры снимков маркированы дополнительными символами, характеризующими размер облачного покрова над Землей в момент съемки, т. е. закрытость территории облаками для каждого из снимков. Для геологического дешифрирования и мониторинга среды надо выбирать снимки без облаков. Такие же снимки используются для составления мозаик (фотокарт). Допускается закрытость территории облаками от 10 до 30%, особенно в тех случаях, когда на данный регион есть снимки, полученные в разное время. В новое издание карт-индексов 1983 г. дополнительно включены данные о перекрытии снимками РБВ отдельных районов съемки (рис. 87, б).

Центры снимков, полученных с первых трех спутников «Лэндсат», почти совпадают с номинальными центрами сцен. Поэтому, имея определенный «патроу номер» (номер витка и ряда), ЭРОС-центр может изготовить заказанный снимок – копию сцены МСС или РБВ, которая для данного района будет обладать наиболее хорошим изображением сюжета съемки, т. е. провести выборку по качеству и условиям съемки. Если потенциальный потребитель информации не имеет возможности воспользоваться каталогом для заказа, то он может направить в ЭРОС-центр формуляр заказа, в котором должны быть указаны угловые точки (координаты углов) нужного ему региона, на который он заказывает снимки. В ЭРОС-центре имеется специальная компьютерная программа определения географических координат – программа поиска, содержащая все исходные данные по всем снимкам, полученным со спутников «Лэндсат». Вводом указанных заказчиком данных в программу находят необходимую информацию. Эта программа (Geographie Computer Research Program) кроме географических координат снимка и времени съемки каждой сцены содержит сведения и о качестве снимков. Паспорт каждого кадра имеет служебные обозначения по соответствующему коду.

Паспорт или машинная распечатка имеют значение только для выбора нужных снимков из всего массива имеющейся на данный район информации, например для мониторинга окружающей среды. Во всех остальных случаях, хотя и необходима возможность подбора снимков хорошего качества, но в меньшем объеме. При этом нужно учитывать, что каждый из разновременных снимков по-своему воспроизводит соотношение объектов ландшафта, и поэтому каждый снимок разных каналов отличается по информативности от другого так же, как и снимки, сделанные в разное время. Обобщенная информация о районе, таким образом, в принципе может быть получена только по сумме тестового (частичного) картирования и дешифрирования и анализа разноре-

менных снимков «Лэндсат» для изучаемого района. Высокая точность топографической привязки снимков «Лэндсат» и связанная с этим распознаваемость объектов на местности, как правило, позволяют быстро и эффективно проводить картирование по ним. Сопоставление разновременных снимков со спутников «Лэндсат», так же как и сопоставление «Лэндсат-снимков» и радарных космических снимков САР (SAR), в принципе возможно при проведении (или после него) их геометрической и радиометрической коррекции, т. е. коррекции выходных данных по программе числовой компьютерной обработки информации.

4.4.4. Спутники «Лэндсат-4» и «Лэндсат-5». (Характеристика орбиты, перекрытие снимков, съемочные системы.) Летом 1982 г. был запущен первый из спутников второго, оперативного, по концепции НАСА, поколения – спутник «Лэндсат-4». Он был оснащен двумя системами сканирования: уже опробованной на первых трех спутниках мультиспектральной системой МСС, несколько модифицированной, и вновь разработанной, более совершенной системой сканера ТМ (Thematic Mapper – тематический картограф). По сравнению со сканерами системы «Лэндсат-МСС» этот сканер имеет улучшенное спектральное и пространственное разрешение и высокую радиометрическую чувствительность. Обе системы сканеров оптико-механические по своей конструкции, но сканирование сканером ТМ ведется по семи каналам. Приведенные характеристики и возможности сканера ТМ даны нами в соответствии с проспектом НАСА (NASA Landsat Data Users Notes, July 23, 1982):

Спектральный канал 1 (0,45–0,52 мкм).

Предназначен для изучения прибрежных вод океанов, морей и озер, так как световые волны этой длины проходят в глубь воды. Кроме того, в этом спектральном диапазоне открываются хорошие возможности по определению лиственных и хвойных пород деревьев и почв, обнаженных и закрытых растительным покровом.

Спектральный канал 2 (0,52–0,60 мкм).

Предназначен для определения жизнеспособности растений (пик излучения, отраженного зеленой, около 0,55 мкм).

Спектральный канал 3 (0,63–0,69 мкм).

В этом интервале длин волн находится полоса поглощения света хлорофиллом. Смещение этой полосы по спектру может быть использовано для определения видового состава растений.

Спектральный канал 4 (0,76–0,90 мкм).

Наиболее эффективен при определении состава биомассы в прибрежных водах и конфигурации береговых линий водоемов.

Спектральный канал 5 (1,55–1,75 мкм).

Предназначен для определения содержания воды в растениях и почвах. Позволяет наиболее эффективно

разделить облачный и снежный покровы. Кроме того, наиболее оптимален при геологическом картировании, определении запасов минерального сырья и при мониторинге окружающей среды, так как волны длиной около 1,6 мкм наиболее сильно отражаются от большинства горных пород [87].

Спектральный канал 6 (10,40–12,50 мкм).

Предназначен для выявления локализации угнетенных сообществ растений (фитоценозов), находящихся в условиях стресса, для разделения почв по влажности и для тепловых съемок (разделения площадей поверхности Земли по температурам и тепловому потоку).

Спектральный канал 7 (2,08–2,35 мкм).

В этом диапазоне, по-видимому, открывается особая возможность распознавания горных пород по их спектральным характеристикам, так как диапазон 2,0–2,5 мкм содержит узкие характерные полосы поглощения, которые очень важны при определении минералов групп слоистых силикатов и карбонатов (разд. 3.2.1). Канал 7 специально был выбран для составления прогнозных карт минерального сырья, тогда как остальные каналы сканера ТМ подбирались в основном для оценки состояний окружающей среды, ее мониторинга и картирования растительных сообществ.

Радиометрическая спектральная чувствительность сканера ТМ заведомо выше, чем сканера «Лэндсат-МСС», так как его (ТМ) каналы уже (меньше ширина диапазона) и предельное разрешение на местности (пиксель-элемент) лучше, чем сканера «Лэндсат-МСС». С увеличением спектрального разрешения повышаются ширина динамической зоны, а соответственно и число градаций яркости при приеме спектральной интенсивности сигнала – от 64 до 128 и от 128 до 256. Повышенное радиометрическое разрешение системы сканера ТМ предполагает прием даже малых колебаний величин спектральной яркости объектов в заданных каналах съемки. В связи с этим открывается возможность дифференцировать спектральные данные и их взаимосвязь в пределах одного канала сканирования.

Рассмотрим принцип сканирования системы ТМ (рис. 88). Ряды детекторов каналов с первого по четвертый расположены в плоскости фокуса оптической системы съемки. Каждый спектральный канал воздействует на 16 детекторов, а канал 6 (тепловой ИК-диапазон) – на 4 детектора. Следовательно, каждое качание сканирующего зеркала сопровождается записью (разверткой) по 16 рядам детекторов (в каналах 1–5) и соответственно по четырем рядам в канале 6. Развертка изображения производится при качании зеркала вперед (с запада на восток) и назад (с востока на запад). Внутренняя калибровка сигнала в сканере ТМ позволяет контролировать работу детекторов. Вследствие этого становится возможной радиометрическая коррекция сигналов

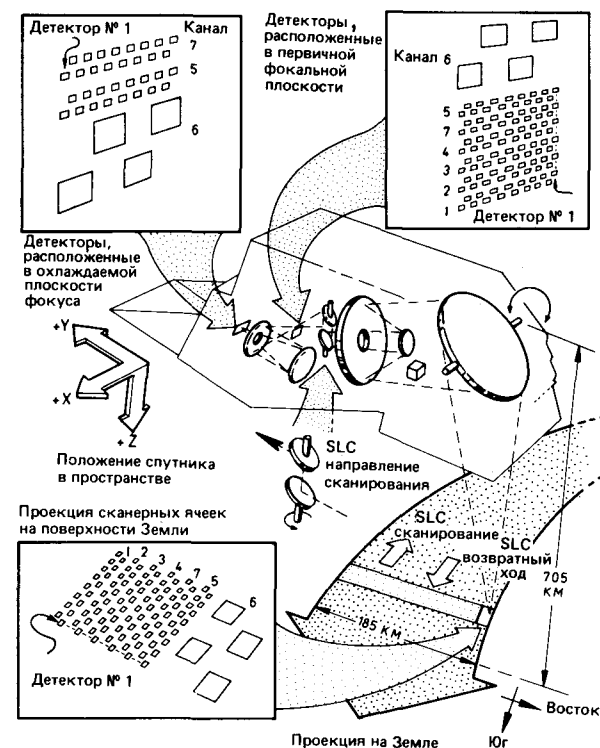


Рис. 88. Принципиальная схема устройства и съемки сканером ТМ (Thematic Mapper – Тематический картограф). Ряды детекторов расположены в первичной плоскости фокуса оптической системы. Слева внизу – проекция детекторного ряда на поверхность Земли. В первичной фокальной плоскости расположено 16 детекторов (без охлаждения) спектральных каналов 1–4 (SiO_2 -детекторы). Слева вверх – охлаждаемые детекторы спектральных каналов 5–7, соответственно по 16 детекторов на канал, работают от спектрального фильтра-диска, который установлен в первичной плоскости фокуса. Для каналов 5 и 7 вводятся InSb-детекторы, а для канала 6 – HgCdTe-детекторы (Manual of Remote Sensing, 2nd ed.).

как в процессе формирования изображения, так и при их числовой обработке. Первичная числовая обработка данных по спектральным каналам (кодирование по 8 бит) транслируется на Землю в информационном потоке 84,9 Мбит/с на частоте X-диапазона (8–11 ГГц).

Описание технического устройства и принципа действия сканера ТМ, так же как и принцип передачи информации на Землю и ее обработки, заимствованы из «Руководства по дистанционному зондированию» (Manual of Remote Sensing, 2nd ed., 1983).

Спектральные каналы сканера МСС на спутнике «Лэндсат-4» аналогичны сканерам этого типа на предшествующих спутниках «Лэндсат», но, к сожалению, имеют иную нумерацию или другое наименование. Прежние каналы 4–7 названы каналами 1–4. Разрешение на местности сканера МСС 4 оказалось неожиданно хуже (82×82 м) при более низкой орби-

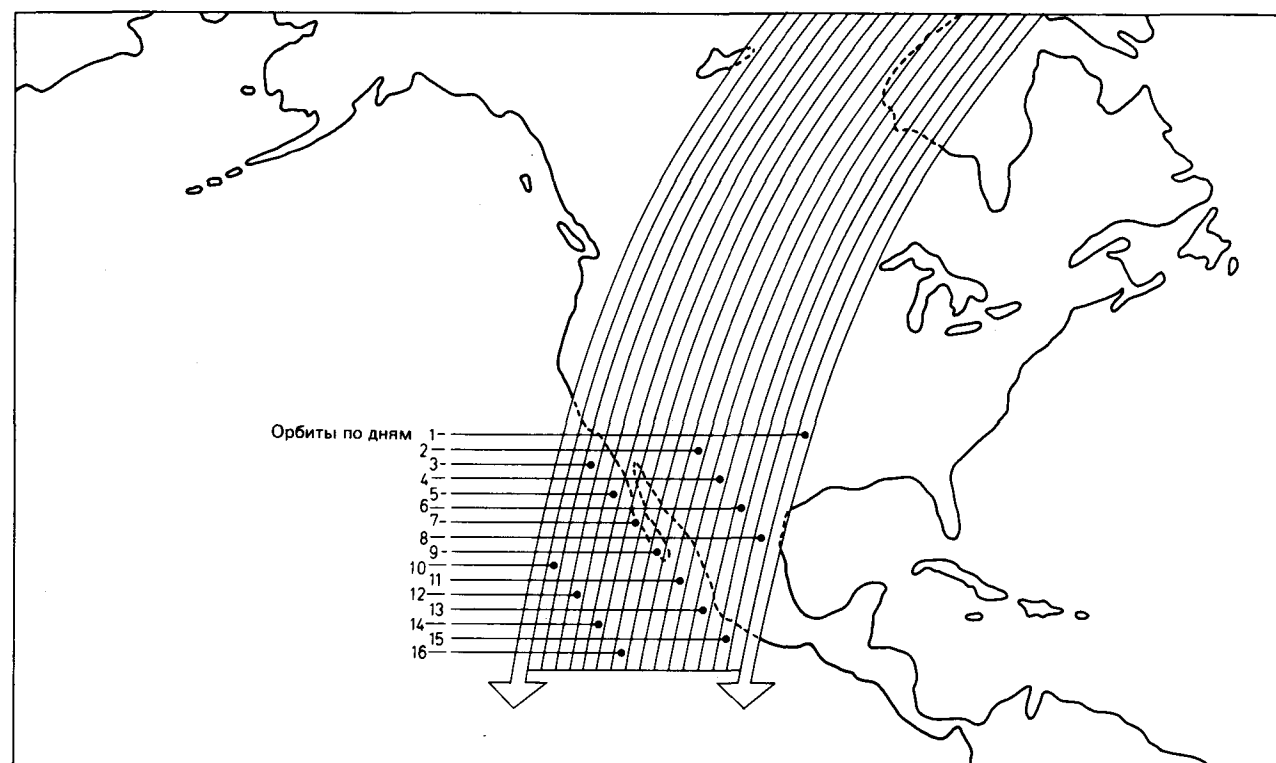


Рис. 89. Орбиты «Лэндсат-4» [56]. (Следует отметить, что все технические параметры для «Лэндсат-4» действительны и для стартовавшего в феврале 1985 г. спутника «Лэндсат-5».) Смещающиеся на запад орбиты (полосы съемки) оказываются рядом через 7 сут полета.

те, чем у сканеров, установленных на первых спутниках (79 × 79 м).

Орбита спутника «Лэндсат-4» имеет наклон к плоскости экватора Земли $98,2^\circ$ при высоте $H = 705$ км (для первых трех спутников этой серии $H = 917$ км). Время обращения по орбите 99 мин. При восходящей (с юга на север) орбите спутник «Лэндсат-4» пересекает плоскость экватора Земли в 9 ч 45 мин местного времени. Оно примерно совпадает с временем съемок первыми тремя спутниками «Лэндсат». Съемочный цикл четвертого спутника 16 дней; за это время он может полностью отснять всю поверхность Земли.

Более низкая орбита для спутника «Лэндсат-4» была выбрана только для того, чтобы получить разрешение сканера ТМ на местности, равное 30 м. Но снижение орбиты привело к изменениям в последовательности рядов съемки (и соответственно снимков) и, следовательно, в перекрытии сенсорами обзора поверхности Земли по сравнению с первыми тремя спутниками этой серии (рис. 87 и 90). Для «Лэндсат-4» каждая последующая полоса съемки смещается на запад и возвращается к западной границе первой полосы только через 7 сут (рис. 89). Иначе говоря, повторные снимки соседних рядов получаются только с интервалом 7 сут. Схема съемки Земли этим

спутником характерна тем, что два соседних витка орбиты отстоят по экватору Земли друг от друга на 2752 км (при смещении на запад). Этот интервал между двумя витками (соответственно полосами съемки) снимается за 16 сут после чего цикл съемки возобновляется.

Ширина полосы захвата обоими сканерами (МСС и ТМ) составляет 185 км. Пространственное разрешение сканера ТМ соответствует разрешению на местности 30×30 м, т. е. оно вдвое выше, чем для сканера МСС 4. К сожалению, канал 6 теплового ИК-диапазона сканера ТМ имеет разрешение на местности 120 м.

На экваторе снимки соседних рядов, снятых со спутника «Лэндсат-4», перекрываются по стороне на 7,6%. От экватора к полюсам Земли перекрытие снимков в соседних рядах увеличивается в отличие от постоянной величины перекрытия по стороне, принятой при аэросъемках.

За 16-сут цикл спутник «Лэндсат-4» покрывает всю поверхность Земли рядами снимков с 233 витков. Поэтому систему определения центров снимков (рис. 87 и разд. 4.4.3.2), рассчитанную на 18-сут цикл съемки первыми тремя спутниками «Лэндсат», применять для заказа снимков, полученных с «Лэндсат-4», не имеет смысла, и для него рассчитана новая

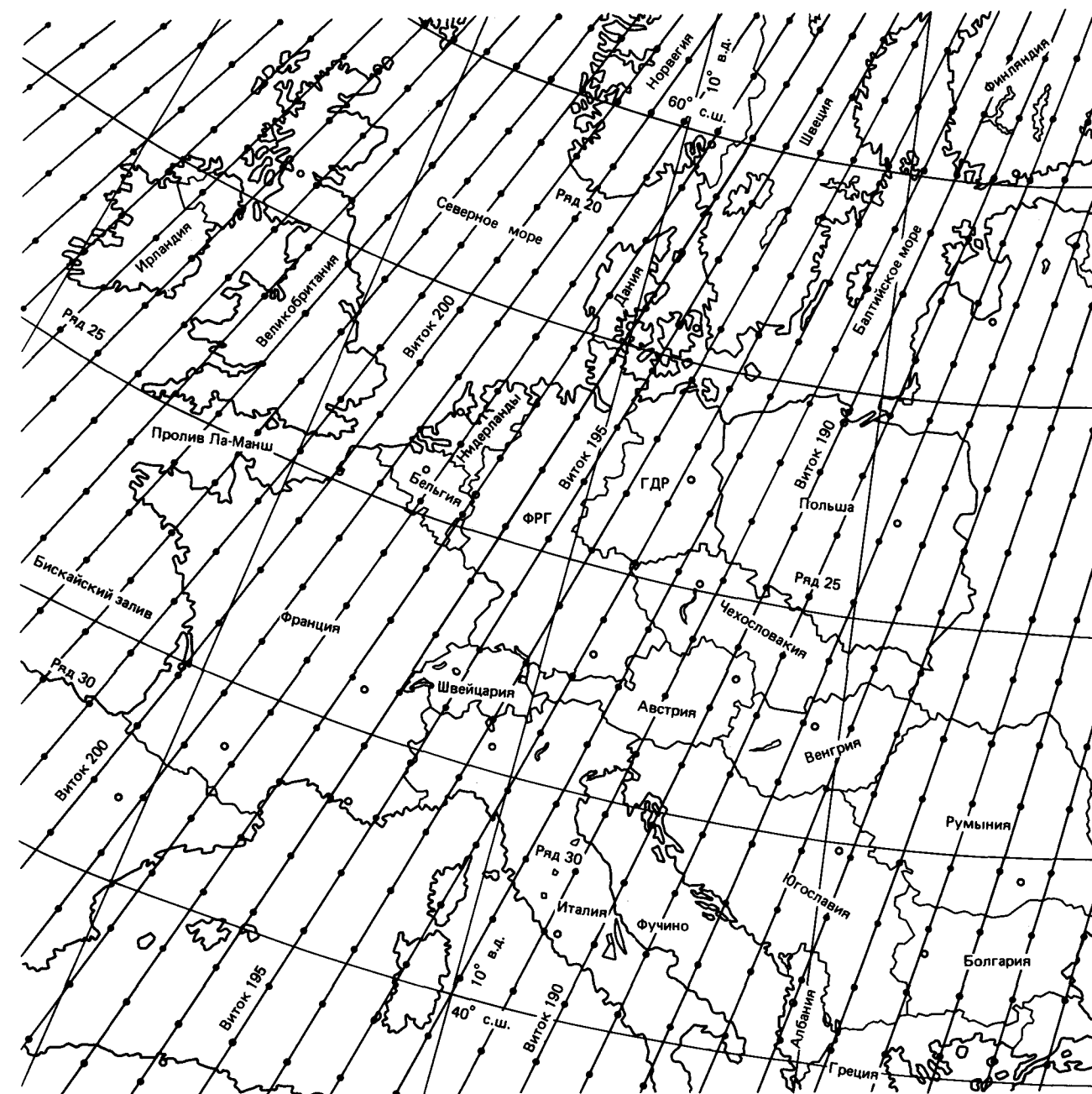


Рис. 90. Фрагмент «Индекс-карты» для снимков МСС и ТМ со спутника «Лэндсат-4», лист 4. Показаны расчетные центры снимков (Earthnet 1983).

система пат-роу, которая состоит из 233 витков (дорожек или колонн), пронумерованных с востока на запад от 001 до 233. При этом виток 001 пересекает экватор по $64,95^\circ$ з. д. Число рядов остается прежним. Они расположены так, что ряд 60 по восходящей орбите совпадает с экватором.

К концу 1983 г. были составлены все 26 листов

«Индекс-карты» системы 4-WRS для «Лэндсат-4» (см. рис. 94). Каждый ее лист представляет собой стандартную авианавигационную карту масштаба $1:10\,000\,000$ с впечатанной в нее информацией по колоннам и рядам снимков. На обратной стороне каждого листа указаны соответствующие индексы в системе 4-WRS для первых трех спутников «Лэндсат».

Нумерация «Индекс-карт» для снимков сканерами ТМ и МСС-4 следующая: 2—Северная Америка, 4—Европа и Азия, 5—Центральная и Восточная Азия, 12—Аравия и Индия, 16—Южная Африка, 18—Центральная и Южная Америка. Данные съемок сканером ТМ предоставляются потребителю в виде фотографической продукции разного формата и в виде кодированной записи на магнитной ленте.

На снимках Долины Смерти в Калифорнии, сделанном сканером ТМ, видны солончаки, которые пересекают весь снимок по диагонали (рис. 91а). Эти солончаки вместе с солончаками в соседних долинах—межгорных впадинах—отчетливо выделяются на снимке ярким фототонем. В некоторых соседних долинах по характерным признакам узнаются участки культурного землепользования, которые, так же как и детали мезорельефа (и даже микроформ рельефа) этого региона, хорошо распознаются при высоком разрешении на местности этого снимка (30×30 м). Мощные шлейфы обломочных отложений и пролювиальных конусов подчеркивают нижние части склонов, переходящие в долинный ярус рельефа. Видны древние, частично эродированные и закрепленные осыпи и подвижные колювиальные шлейфы. По оттенкам фототона и рисунку микро- и мезоформ рельефа дешифрируются на этом снимке разные осадочные и вулканогенные комплексы отложений, а также комплекс гранитоидов (см. соответствующее описание геологии региона в отчете Геологической службы США—U.S.G.S. Prof. Paper 494A). В верхней (северной) части снимка опознается крупный разлом юго-восточного—северо-западного простирания, выраженный на снимке соответствующей линейной упорядоченностью элементов ландшафта. Горная цепь западнее Долины Смерти рассечена многочисленными линейными высокими порядков—зонами трещин и второстепенных, локальных, разломов, которые дешифрируются по параллельности возникших вдоль них тектонических долин.

Другой снимок, сделанный тем же сканером ТМ, относится к антиклинорию Арденн в центре Западной Европы (рис. 91б). Сложенная в основном слоистыми толщами кембрия—нижнего девона, отчетливо дешифрируется на снимке западная периклиналь Арденнского антиклинория. Она выражена темным фототонем в центре левой (западной) части снимка. Севернее центриклинально замыкаются комплексы отложений среднего—верхнего девона южного крыла Динантского синклинория, смятые в специфические полуоткрытые складки-флексуры. На юге крыло Арденнского антиклинория дискордантно перекрывается осадочными толщами юры, запад-северо-западного простирания, которые на изображении очень четко опознаются по фототону и полочастому рисунку рельефа. Высокое пространственное разрешение и широта динамической зоны сканера ТМ позволяют очень точно разделять по фотообразам комплексы

отложений и мезо-, и микроформы рельефа. Информативность снимков разных каналов сканера ТМ различна. Фотообразы снятого ландшафта из-за этого не остаются постоянными (ср. рис. 91б—92). Отметим, что сканеры типа ТМ, установленные на спутниках «Лэндсат-4» и «-5», впервые дали снимки с космических высот в ближнем ИК-диапазоне в двух каналах: 1,55–1,75 мкм (ТМ-канал 5) и 2,08–2,35 мкм (ТМ-канал 7), которые после проведения соответствующих экспериментов с самолетов были признаны специалистами наиболее эффективными для картирования по космическим съемкам различных почв и комплексов горных пород.

Проанализируем информативность ТМ-снимков в разных спектральных диапазонах. Снимки самого ближнего ИК-диапазона (0,76–0,90 мкм, канал 4) по своей информативности близки или тождественны мелкомасштабным аэрофотоснимкам с высоким разрешением. На них лучше всего и прежде всего дешифрируются сельскохозяйственные угодья и прочие культурные элементы ландшафта, а также площади лесной и кустарниковой растительности. Несколько хуже на естественных ландшафтах без сплошного покрова леса или растительности других типов выделяется литостратиграфическое разнообразие геологического субстрата и—разные его структурные формы. В отдельных случаях структуры дешифрируются даже по небольшим фрагментам, а иногда только как совокупность структурных форм, образующих структурные пояса или зоны. В ближнем ИК-диапазоне (2,08–2,35 мкм, ТМ-канал 7) отражение светового потока растительностью значительно меньше, т.е. больше поглощение света, и маскирующий эффект деталей культурного ландшафта (прежде всего, возделываемых сельскохозяйственных земель и лесопосадок) может нейтрализоваться. При слабой вариации тонов на изображении проступают образы каналов мелиоративной системы. На снимках сканера ТМ в каналах 5 и 7 границы литологических разностей горных пород и сложенные ими структурные формы дешифрируются, как правило, лучше, чем на снимках ТМ в канале 4. Одинаково хорошо во всех трех каналах различаются линейные элементы, которые штрихами подчеркивают зоны разрывов и трещин. Но на снимке в канале 4 (рис. 92, а) рисунок возделываемых земель сильно мешает восприятию геологического содержания информации, сливаясь местами с узкими разломами и выдержанными по простиранию зонами трещиноватости (рис. 91б и 92, б).

При сравнении информативности полученного из космоса изображения (рис. 91б) и соответствующей ему территориально части «Геологической карты Бельгии» масштаба 1:500 000, лист 8 (Atlas de Belgique, Planche 8, Inst. Geographique Militaire) становится очевидным, что взаимосвязь некоторых тектонических структур в пространстве и границы литостратиграфических комплексов отложений различаются и



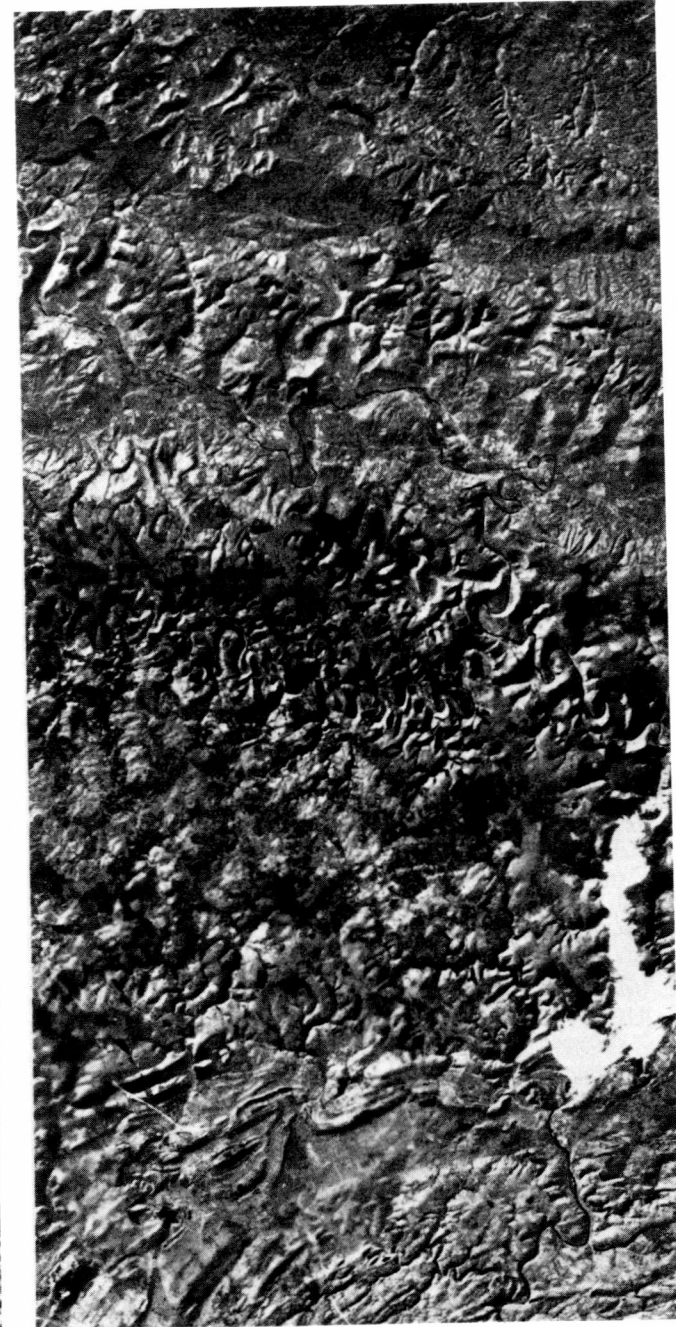
Рис. 91а. Снимок со сканера ТМ Долины Смерти и прилегающих районов, Калифорния. Масштаб приблизительно 1:1 000 000. Черно-белое воспроизведение «Echtfarbild-Simulation» сделано по данным ТМ-каналов 1, 2 и 3 Р. Хайдном (R. Haydn, ZGF, München). Оригинальные данные NOAA. Пояснения см. в тексте.



Рис. 91б. Фрагмент снимка ТМ района Арденн. Диапазон съемки 1,55–1,75 мкм (ТМ-канал 5). Масштаб снимка 1 : 500 000 (NASA/ESRIN TM 4 5, 198 25, 4, 23.1.83). В верхней части снимка распознаются специфические складчатые среднедевонские слоистые толщи Динантского синклинория. В центре справа (запад) узкая, в основном темная, полоса, соответствующая Арденнскому синклинорию, сложенному разновозрастными слоистыми толщами кембрия и нижнего девона. На юге они дискордантно перекрываются сериями мезозойских осадков (лейас–мел), простирающихся в Парижский бассейн. Пояснения см. в тексте.



а



б

Рис. 92. Фрагмент изображенного на рис. 91а района Арденн. а – спектральный диапазон 0,76–0,90 мкм, ТМ-канал 4; б – 2,08–2,35 мкм, ТМ-канал 7. Обратите внимание на воспроизведение одинаковых участков местности, соответственно одинаковых ландшафтов и объектов на изображения канала 3. Масштаб 1 : 500 000.

передаются снимком точнее, чем картой. Следовательно, возможны ревизия, исправления и дополнения карты по материалам космических съемок сканером ТМ.

Этими примерами раскрывается эффективность использования снимков высокого пространственного разрешения, получаемых сканером ТМ для обновления и составления мелкомасштабных геологических (и не только геологических) карт не только в малоизученных регионах, но даже в регионах с хорошей степенью геологической изученности.

Наряду со строго регламентированным, традиционным, геологическим дешифрированием фоторепродукций многозональных ТМ-снимков применение числовой обработки изображений на компьютерах дает особые возможности их оптимизации для дешифрирования.

До недавнего времени снимки сканера ТМ существовали в очень ограниченном количестве. Поэтому опыт их обработки для изучения природной среды космическими средствами, в том числе и геологии, очень небольшой, ограничен всего несколькими годами. Но уже первые опыты по дешифрированию данных, полученных сканером ТМ, показали, что его установка на спутниках открыла новый этап в тематической картографии поверхности Земли.

Информация о предоставляемых видах продукции по съемкам сканером ТМ и ее стоимости уже доведена до сведения пользователей и имеется в неоднократно упомянутом ЭРОС-центре (Сиу-Фолс, США), а для европейских потребителей на территории Европы – в Службе всемирной сети пользователей (Earthnet User Services) в Италии¹. Служба имеет в своем распоряжении четыре листа информационной карты, так называемой «Индекс-карты», составленных только для «Лэндсат-4», по которым и следует заказывать необходимую информацию, полученную с помощью сканеров ТМ и МСС-4. Качество отдельных ТМ-снимков можно определить по синхронным кадрам того же сюжета, полученным сканером МСС. Они предоставляются Службой всемирной сети пользователей по очень невысокой стоимости. Снимки сканера ТМ рассылаются центрами данных в масштабе оригинального негатива 1:1 000 000 (полный кадр – full scene) или как части кадра в масштабе 1:500 000 (четверть кадра – quarter scene). Формат прозрачного негатива/позитива и соответственно копий на фотобумаге 24 × 24 см.

¹ Ее адрес: Earthnet User Services, Via Galileo Galilei, C. P. 64,00044 Frascati (Rome) Italy.

4.5. Приемники зарядовой связи (МОМС, СПОТ)

(Принципы и параметры съемок электронно-оптическими сканерами.)

На спутниках «Лэндсат-1 и -3», предназначенных для исследования природных ресурсов, были испытаны возможности применения многозональных съемочных систем МСС и РБВ для картирования поверхности Земли, оценки состояния землепользования и слежения за динамическими процессами. Результаты тематической обработки данных (прежде всего съемок МСС) были в основном положительными. Однако вскоре от различных групп исследователей стали поступать требования о введении дополнительных спектральных каналов для решения специальных задач, об изменении их положения и ширины. Оказалось также желательным улучшить пространственное разрешение и повысить точность определения координат. Часть этих усовершенствований съемочной системы была реализована на аппаратуре ТМ спутника «Лэндсат-4», которая имеет семь каналов, частично с более узкими спектральными зонами, в том числе и в длинноволновой части инфракрасного диапазона. Разрешение на местности было улучшено с 57×79 м на МСС до 30×30 м на ТМ. Были подняты спектральная чувствительность и динамические характеристики датчиков (разд. 4.4.4).

Необходимость улучшения пространственного разрешения и точности так же, как и спектральной чувствительности в узких зонах спектра поставили очень высокие требования перед системой МСС и прежде всего перед механической ее частью (сканирующее зеркало). В условиях оперативного использования ресурсного спутника в течение 10 лет и более самым слабым местом сканерной системы на нем являются механически движущиеся части. С тем чтобы повысить пространственное разрешение, точность, спектральную чувствительность и сузить спектральные каналы, для проектируемых ресурсных спутников была разработана новая многозональная съемочная система, так называемый приемник зарядовой связи – ПЗС (англ. – pushbroom-scanner) или CCD (Charged-Coupled-Device Technology).

В этом типе съемочной системы многие тысячи детекторов света – приемников зарядовой связи – образуют ряды («линейки»), ориентированные перпендикулярно направлению полета. Для каждого спектрального канала предназначается один ряд детекторов, которые последовательно один за другим включаются в действие связующим их устройством зарядовой связи. Ряды приемников излучения располагаются в фокальной плоскости оптической системы, проецирующей на них изображение земной поверхности (рис. 93, 94). Поступательное движение спутника обеспечивает развертку изображения по оси

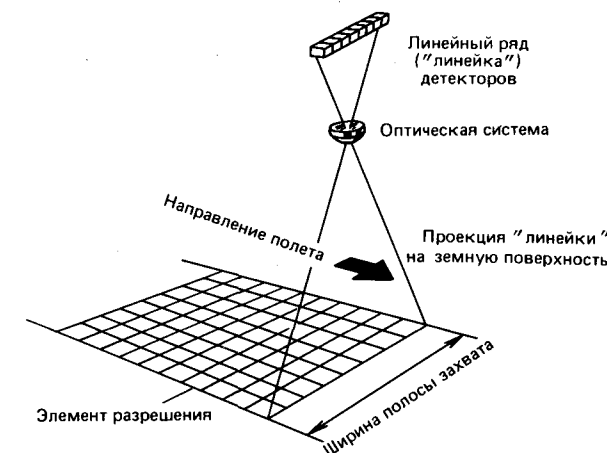


Рис. 93. Принципиальная схема съемки прибором зарядовой связи.

х. Развертка изображения в направлении, перпендикулярном траектории, производится по оси у последовательным электронным включением детекторов. Каждый ряд детекторов опрашивается с временным интервалом, позволяющим осуществить непрерывный переход от одной полосы сканирования к другой. При этом исходящие от каждого детектора аналоговые сигналы суммируются за некоторый малый промежуток времени, что обуславливает определенную ширину элемента разрешения на местности. Высокая геометрическая точность изображения поперек направления полета задается точностью расположения каждого детектора на линейке. Взаимосвязь между действием соседних линеек приемников, чувствительных к разным диапазонам излу-

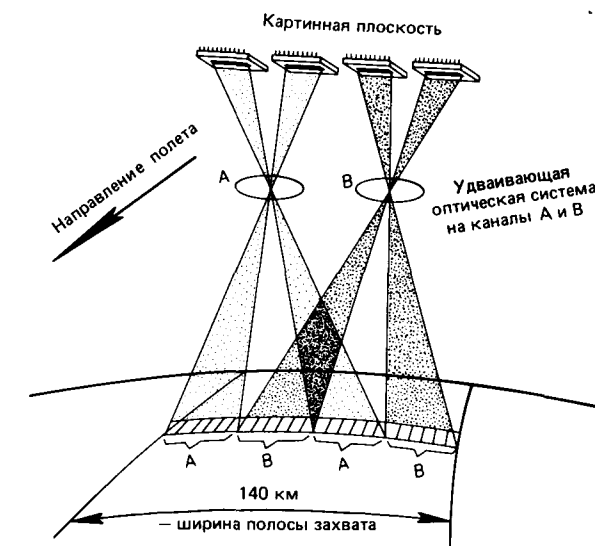


Рис. 94а. Принцип съемки аппаратуры МОМС (из проекта фирмы MBB/ZGF, Мюнхен).

чения, делает возможной также точную регистрацию многозональных съемочных данных и корреляцию данных одного спектрального канала с другим [62].

Первым устройством ПЗС в ФРГ была разработанный фирмой «Мессершмидт – Бёльков – Блом» (MBB/ZGF) модулированный оптоэлектронный мультиспектральный сканер (МОМС), испытанный в космическом полете в июне 1983 г. на корабле типа «шаттл» по программе STS-7. Принцип работы МОМС схематически показан на рис. 94а. Подача одной строки изображения производится на один или несколько отрезков линейки датчиков одновременно, что требует применения в МОМС удваивающей оптики для каждого спектрального канала.

Оптико-электронный сканер типа ПЗС работает без механически движущихся частей с максимальным энергетическим выходом. В каждом отдельном датчике зарядовой связи возбуждается электрический заряд, пропорциональный яркости света, поступающего от одного элемента разрешения на земной поверхности. Последовательности электрических сигналов считываются сериями, преобразуются в цифровую форму и записываются на магнитную ленту с высокой плотностью записи. Система МОМС имеет 4 «линейки» по 1728 датчиков, т.е. 6912 элементов изображения. Чтобы построить картинку без зияний и накладок, скорость сканирования задается скоростью перемещения корабля по орбите.

В первом варианте (МОМС-01) сканер имел два канала: первый $-0,6 \pm 0,025$ мкм и второй $-0,9 \pm 0,075$ мкм. При высоте орбиты 250 км съемка осуществлялась в полосе шириной 140 км. Разрешение на местности составляло 20 м, радиометрическое разрешение – 128 ступеней.

При первом испытательном полете в июне 1983 г. были сняты лишь некоторые важные для анализа природных ресурсов участки Земли. При наклоне орбиты $28,5^\circ$ они располагались между 30° с.ш. и 30° ю.ш. На рис. 94б приведен фрагмент одного из первых снимков МОМС, полученного в июне 1983 г. на 37-м витке полета корабля «шаттл» STS-7. Он охватывает прибрежную часть Анд на границе Перу и Чили. Оригинал снимка цветной. Ложноцветное изображение, полученное двухканальной экспериментальной системой МОМС, построено с помощью комплексной цветовой обработки, проявившей в более яркой цветовой форме разницу между яркостью в обоих каналах. В такой цветовой передаче районы, покрытые растительностью, имеют красный цвет. Высокое пространственное разрешение системы МОМС-01 способствует полному воспроизведению природных условий снимаемой местности. На рис. 94в показана часть другого снимка региона Анд.

Во второй раз аппаратура МОМС (МОМС-01А) была применена в январе 1984 г. при полете корабля «шаттл» STS-11; она имела те же характеристики, что



Рис. 94б. Фрагмент одного из первых снимков МОМС, полученный с космического корабля «Колумбия» 20 июня 1983 г. Изображенный на снимке участок располагается в районе Арики, Чили, в краевой части Анд. Разрешение на местности 20×20 м. Изображение получено Р. Хайдном (ZGF, Мюнхен) на установке для обработки снимков. Линии сканирования на снимке располагаются вертикально, направление полета горизонтальное. Изображение не подвергалось геометрической и радиометрической коррекции. Масштаб около 1:1 000 000.

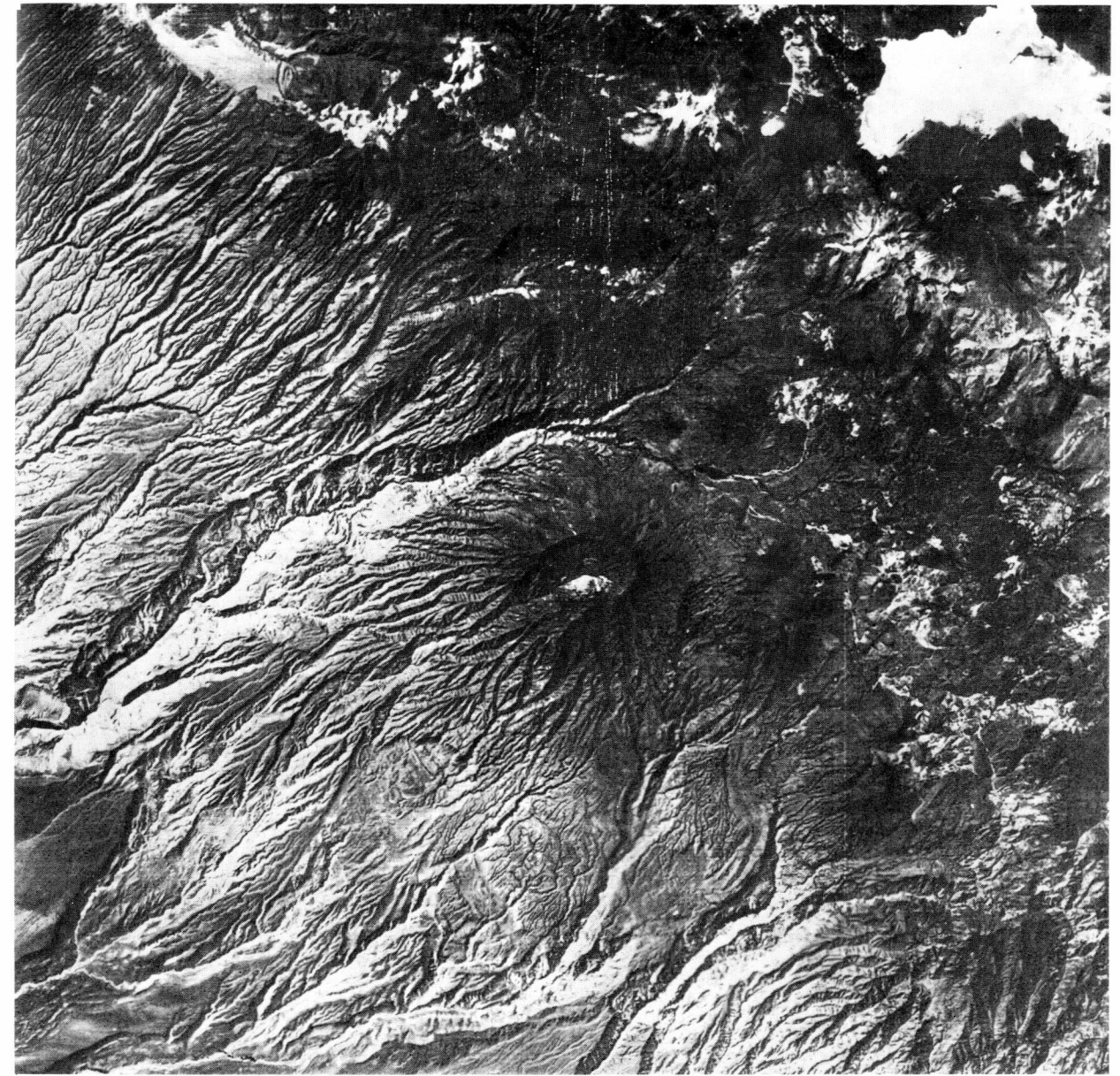
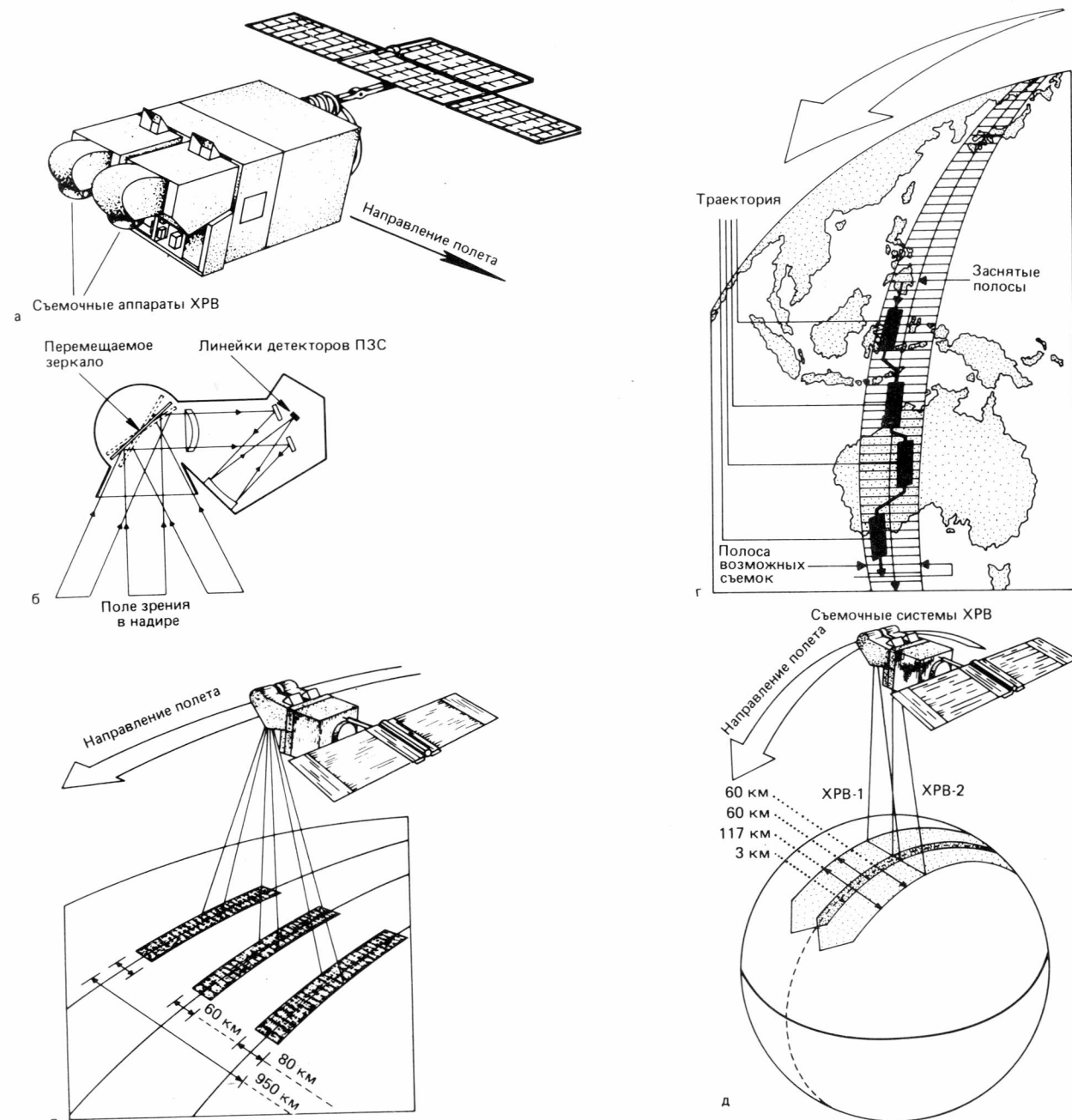


Рис. 94в. Фрагмент снимка МОМС пограничного района Боливии и Чили (обработка Р. Хайдна, ZGF, Мюнхен). Масштаб около 1:1 000 000.

и МОМС-01. Первые эксперименты с аппаратурой МОМС и их результаты были описаны Бодехтелем и др. в 1983 г. [29].

На 1986 г. планировалось испытание панхроматической системы Стерео-МОМС. С помощью двух установленных наклонно (вперед и назад относительно направления полета) модулей и одного модуля, ориентированного в надир, предполагалось получить разрешение по высоте 15 м при разрешении в плане 10 м.

Также на 1986 г. предусматривалось применение усовершенствованной аппаратуры МОМС-02, имеющей четыре спектральных канала: первый $0,6 \pm 0,025$ мкм, второй $0,9 \pm 0,075$ мкм, третий $1,6 \pm 0,1$ мкм и четвертый $2,2 \pm 0,1$ мкм. Как было неоднократно показано ранее, снимки в зонах 1,6 и 2,2 мкм представляют особый интерес для идентификации почв и горных пород. В конце 1980-х гг. аппаратура МОМС будет иметь дополнительно еще один инфракрасный тепловой канал.



Система MOMS имеет модульную конструкцию. Оптимальная для каждого направления тематических исследований комплектация системы может быть достигнута путем замены модулей, чувствительных к разным зонам спектра и соответствующих им оптических систем. Модульное построение блоков датчиков со своими периферийными устройствами допускает большое число комбинаций. Такая концепция позволяет без затруднений сочетать, к примеру, узко- и широкополосные, высоко- и низкоразрешающие

каналы, причем гарантируется поэлементная корреляция данных между каналами. Таким образом, обеспечиваются разнообразные возможности системы MOMS для тематического картирования и мониторинга в средних и крупных масштабах (от 1:250 000 до 1:50 000). Предусматривается применение этой системы как на пилотируемых космических кораблях, так и на оперативных ресурсных спутниках. Система MOMS, согласно информации фирмы MBV/ZGF и по сообщению Бодехтеля и др. [29], повысит воз-

можности картирования с целью изучения литологии горных пород, тектоники, поисков месторождений полезных ископаемых, растительности, почв и т. п.

Франция планировала на 1985 г. запуск съемочной системы ПЗС по программе СПОТ (System probatoire d'Observation de la Terre). В первых запусках СПОТ будет оснащаться двумя идентичными сканирующими съемочными устройствами высокого разрешения в видимом диапазоне ХРВ (High Resolution Visible) двумя устройствами магнитной записи и аппаратурой для передачи данных. Рис. 95,а показывает схему спутника СПОТ с двумя съемочными устройствами. Высота полета спутника колеблется от 815 до 829 км. Наклонение орбиты к плоскости экватора $98,7^\circ$, пе-

риод обращения 101 мин. Экватор пересекается нисходящей с севера на юг орбитой около 10 ч 30 мин местного времени.

Съемочные аппараты ХРВ могут по приказу с Земли осуществлять съемку в многозональном или панхроматическом варианте. В последнем случае съемка производится в диапазоне 0,51–0,73 мкм. Пространственное разрешение сканера в надире (величина пикселя) на панхроматических снимках достигает 10×10 м. В многозональном варианте аппараты ХРВ работают в трех диапазонах: 0,50–0,59, 0,61–0,68 и 0,79–0,89 мкм. По материалам съемок в этих трех каналах могут быть получены цветные или ложноцветные изображения. Разрешение на местности многозональных снимков составляет 20×20 м.

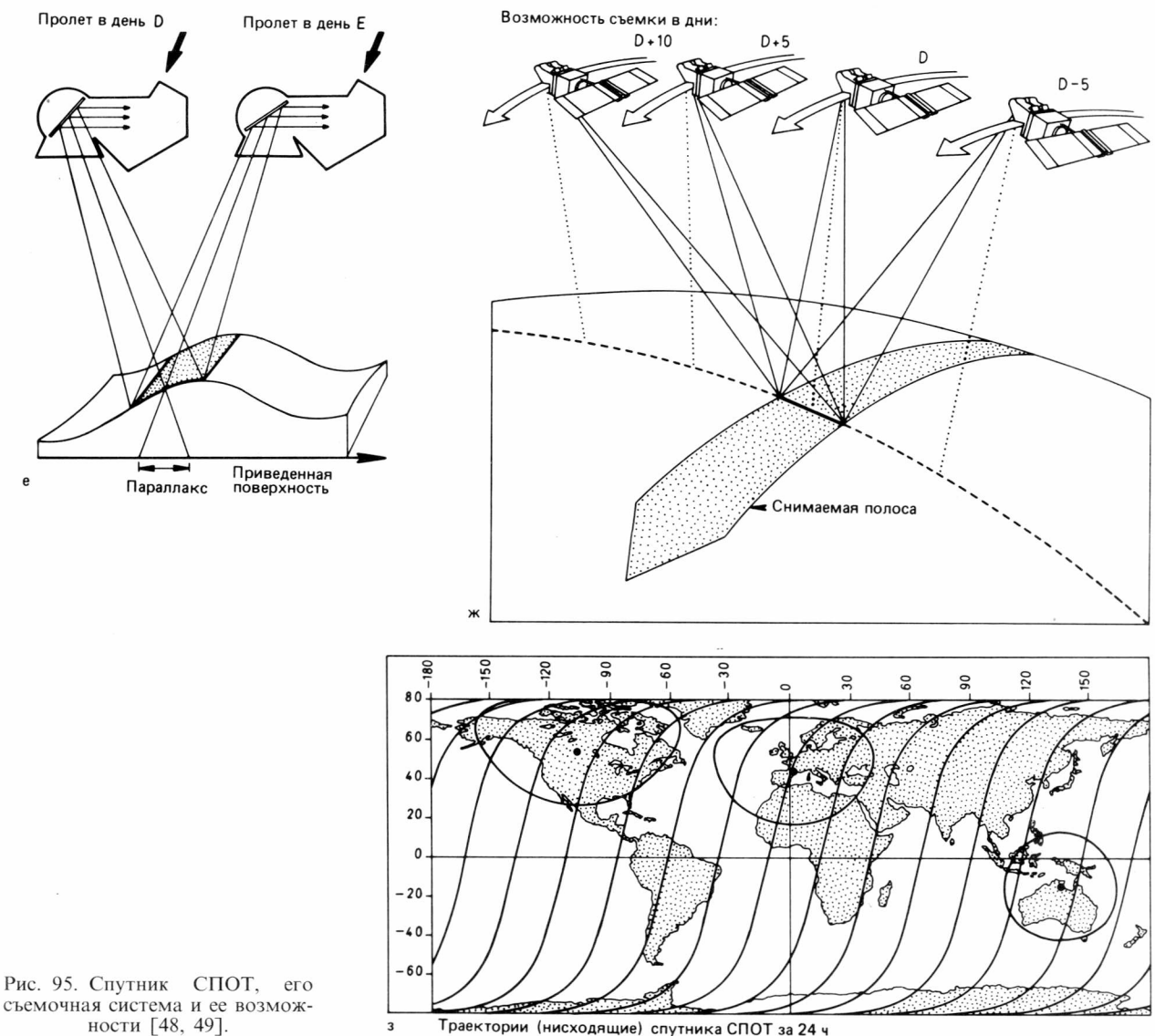


Рис. 95. Спутник СПОТ, его съемочная система и ее возможности [48, 49].

Как показывает рис. 95, б, излучение, отраженное земной поверхностью, через наклонное зеркало и оптическую систему достигает линеек детекторов, расположенных в фокальной плоскости оптической системы. Панхроматический и многозональный модули состоят соответственно из 6000 или 3000 детекторов на линию сканирования. По приказу со станции управления или согласно программе, заложенной в управляющую ЭВМ, зеркало в каждом съемочном аппарате отклоняется на 27° в ту или другую сторону от направления надира перпендикулярно траектории. Это приводит к тому, что съемки могут осуществляться в полосе шириной до 475 мкм в обе стороны от траектории, как это видно на рис. 95, в. Ширина захватываемой каждым из аппаратов ХРВ полосы изменяется от 60 км в надири до 80 км при максимальном отклонении зеркала от надира. Находящаяся на борту спутника ЭВМ может изменять по заданной программе угол отклонения зеркала каждого из съемочных аппаратов, так же как и вид съемки (панхроматическая или многозональная). Рис. 95, г демонстрирует различные возможности съемки в течение одного витка.

Оба съемочных аппарата могут быть настроены на съемку соседних участков поверхности (рис. 95, д). В этом случае общая ширина снимаемой полосы составляет 117 км с надири в ее центре при перекрытии 3 км.

Изменение отклонения зеркала аппарата ХРВ позволяет, как это показано на рис. 95, а, осуществлять стереоскопическую съемку избранного участка. Стереоскопическое перекрытие достигается тем, что этот участок снимается с двух разных витков под разными углами зрения. Возможности съемочного аппарата ХРВ позволяют также сокращать временной интервал между съемками одной и той же сцены. Соответственно параметрам орбиты при установке аппарата в надири один и тот же участок местности может быть снова заснят через 26 сут, так как спутник именно через такой промежуток времени проходит над одним и тем же участком. Внутри 26-сут периода интересующий нас участок может быть заснят до 7 раз в том случае, если он лежит в близэкваториальной области, и до 11 раз, если он расположен близ широты 45° . Рис. 95, ж показывает пример повторных съемок одного и того же участка с интервалом 5 сут с различных орбит с помощью изменения угла съемки.

Даты съемки указываются на снимках СПОТ. Каждая сцена (кадр) покрывает участок местности величиной 60 км в направлении полета и от 60 до 80 км в поперечном направлении в зависимости от вида съемки. По краям кадра располагаются координатные марки. Перед выдачей съемочной продукции (черно-белых или цветных отпечатков) потребителям данные съемок проходят различные коррекции: радиометрические, компенсирующие систематические

погрешности оптической и телеметрической систем и калибровочные свойства детекторов, и геометрические — за счет отклонений направления и угла съемки, колебаний спутника, вращения и кривизны Земли. Для улучшения качества изображения применяются различные способы цифровой обработки.

Информация о программе СПОТ и возможностях применения снимков (покрытие территории, характер снимков, цены и т. д.) предоставляется Национальным центром космических исследований: Centre National d'Etudes Spatiales, Centre Spatial de Toulouse, 18, Avenue Edouard-Belin, F-31055, Toulouse Cedex.

4.6. Программа картирования теплового потока (НСММ)

В начале 1978 г. НАСА был запущен спутник НСММ (Heat Capacity Mapping Mission). С помощью этого экспериментального спутника были осуществлены измерения температур больших участков поверхности для геологических, сельскохозяйственных, экологических, гидрогеологических и климатологических целей. Спутник облетает Землю на высоте 620 км при наклонении орбиты $97,6^\circ$. На нем находится двухканальный радиометр, получающий широкозахватные снимки в видимой зоне спектра (0,5–1,1 мкм) и в тепловом инфракрасном диапазоне (10,5–12,5 мкм). Датчик одновременно принимает и соответственно измеряет как отраженное, так и возбужденное тепловое излучение.

Поле зрения радиометра смещается механически в пределах угла сканирования, равного 60° , что соответствует ширине снимаемой полосы 720 км. Пространственное разрешение снимков НСММ в области надира составляет 600 м для теплового канала и 500 м для видимой области спектра. Совмещение снимков обоих спектральных каналов достигается с точностью 0,2 элемента разрешения или лучше.

Параметры орбиты спутника НСММ позволяют проводить повторные наблюдения дневных температур прежде всего в области средних широт, где спутник осуществляет измерения максимальных и минимальных температур поверхности выбранного участка (около 13 ч 30 мин и 2 ч 30 мин местного времени). Это время оптимально для фиксации временных и пространственных температурных контрастов различных образований на земной поверхности. Инфракрасные тепловые снимки НСММ могут быть использованы для изучения региональных особенностей распределения амплитуд дневных колебаний температуры поверхности. Они также могут применяться для определения кажущихся тепловых свойств (прежде всего тепловой инерции) образований, слагающих поверхность или располагающихся непосредственно под ней.

В течение пятимесячного эксперимента НСММ были получены данные по многим районам Северной

Америки, Европы и Австралии. Между прочим, было установлено, в какой мере данные о тепловых свойствах горных пород и почв могут быть использованы для их идентификации, для определения угнетения в растительных сообществах, для изучения пространственных и временных изменений влажности и для предупреждения затоплений местности талыми снеговыми водами.

4.7. Радиолокационная съемка

4.7.1. Общие положения. Свое первое применение радиолокация нашла в военной разведке для определения положения кораблей и самолетов и для измерения расстояний. Позднее она была применена в океанографии для наблюдений за поверхностью моря и в метеорологии для наблюдения за погодой. В дистанционном зондировании природных ресурсов радиолокацию начали использовать лишь после того, как были разработаны радиолокационные системы получения изображений, устанавливаемые на самолетах.

Радиолокационная съемка, применяемая в исследованиях поверхности с 1970-х гг. со все большим успехом, существенно отличается от описанной выше аэрофотографической и сканерной съемки как технической съемки, так и геометрическими и информационными особенностями получаемых изображений. Датчики аэрофотографической и сканерной съемки пассивно воспринимают отраженное от земной поверхности солнечное или же ее собственное тепловое излучение. В применяемых для дистанционного зондирования радиолокационных станциях бокового обзора (РЛСБО) используется, напротив, съемка в активном режиме. Эти системы «освещают» снимаемую территорию сами. Во время полета антенна, установленная вдоль продольной оси са-

молета, посылает в перпендикулярном к полету направлении на земную поверхность высокочастотные импульсы с диаграммой излучения, имеющей форму узкого лепестка. Отраженные от облучаемой земной поверхности или объектов на ней сигналы принимаются антенной, преобразуются в видеосигналы и записываются на фотографическую пленку или же в цифровой форме на магнитную ленту (рис. 96 и 97). Интенсивность отраженного от поверхности или предметов радиосигнала передается на радиолокационном (РЛ) снимке градициями фототона и фоторисунком изображения. Для тематической интерпретации РЛ-снимков важны изменения интенсивности и характера радиосигнала в зависимости от структуры поверхности и вещественного состава природных объектов (почв, растений, горных пород, воды).

Установлено, что характер взаимодействия зондирующего электромагнитного излучения с поверхностью и природными объектами определяется длиной волны, ее поляризацией и углом падения. Это должен учитывать интерпретатор при тематическом анализе РЛ-снимков [278].

В дистанционном зондировании применяются два типа радиолокационных систем: съемочные радиолокационные системы с реальной апертурой антенны (РЛСБО, или некогерентные системы; SLAR — в английской терминологии) и съемочные радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны (SAR — в английской терминологии, РЛСА — в русской — см. разд. 4.7.3 и 4.7.4). Последние системы основаны на волновых фазовых (когерентных) эффектах. Радиолокационные системы с реальной апертурой относительно просты и не требуют сложной обработки данных при построении изображения. Применение их ограничивается относительно невысоким пространственным разрешением.

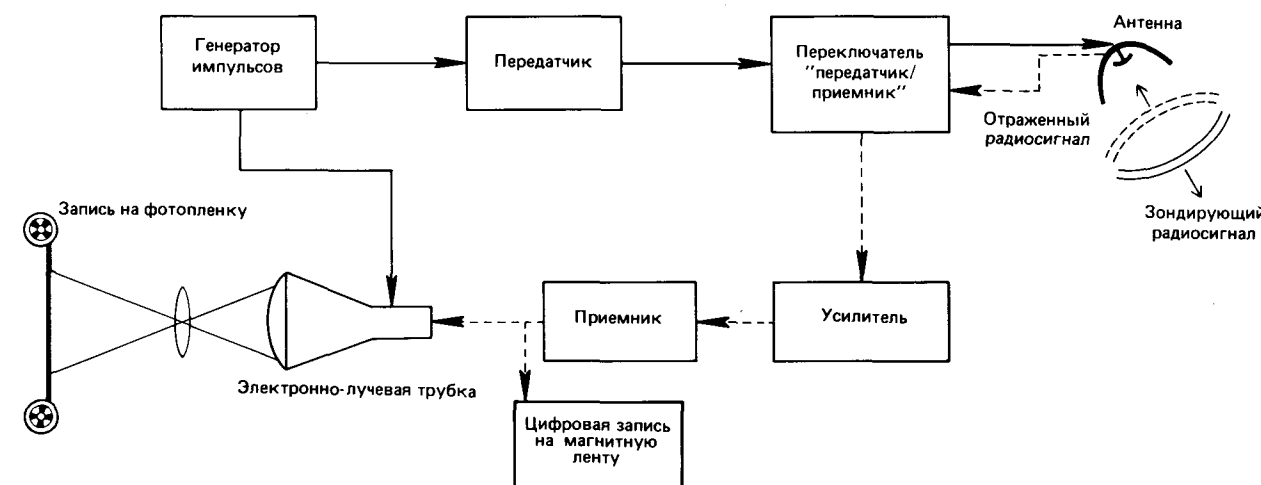


Рис. 96. Схема устройства и работы радиолокатора бокового обзора ([95], с изменениями).

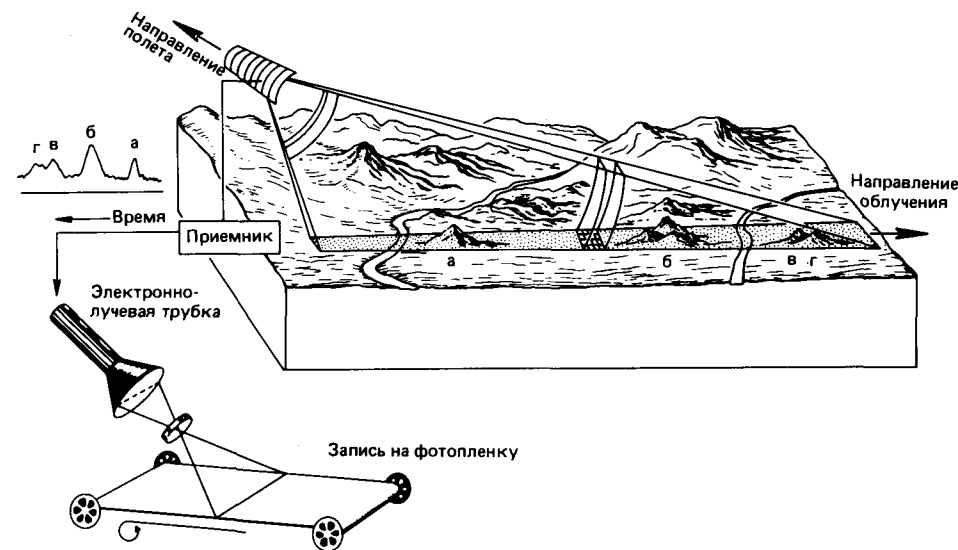


Рис. 97. Схема работы радиолокатора бокового обзора (по данным Вестингауза, 1967, с изменениями).

Системы с синтезированной апертурой позволяют получить высокое пространственное разрешение независимо от расстояния между антенной и объектом. Однако получение и обработка данных более сложны, поэтому применение систем с синтезированной апертурой обходится дороже.

Работа радиолокационных съемочных станций не зависит от условий естественной освещенности. Кроме того, при длине волны более 2 см РЛ-съемка не зависит от погодных условий. Облака, дождь, туман, делающие невозможными фотографические и сканерные съемки, полностью прозрачны для электромагнитного излучения с длиной волны более 2 см. Для РЛ-съемки облака, дождь и турбулентные движения в атмосфере порождают лишь так называемые фазовые погрешности и особенно влияют на радиолокационные аппараты с синтезированной апертурой, обуславливая нерезкие («расфокусированные») снимки. Таким образом, относительная независимость от погодных условий дает РЛ-съемке существенные преимущества перед фотографическими и сканерными съемками. РЛ-съемка становится решающим методом изучения и картирования поверхности в тех районах, которые значительную часть года покрыты дымкой или облаками. Это прежде всего тропические зоны с их густыми дождевыми лесами, в которых топографические съемки и тематическое картографирование вплоть до появления РЛ-съемок оказывались невозможными или проводились в очень тяжелых условиях. В этих до сих пор еще слабо изученных районах РЛ-съемки являются ныне важнейшим средством при исследовании природных ресурсов — нефти, газа, руд и др. С этой целью с начала 1970-х гг. были проведены обширные радиолокационные съемки в Центральной и Южной Америке, в тропическом поя-

се Африки, в Индонезии, в районах Филиппин и Австралии. Большая часть этих съемок проводилась в рамках проектов развития поисков месторождений.

Результатами РЛ-съемок являются прежде всего радиолокационные мозаичные мелкомасштабные изображения (фотосхемы), смонтированные из отдельных полос. Откорректированные радиолокационные мозаики для многих заснятых районов представляли собой первые картографические материалы удовлетворительной точности. Они послужили удобной основой для картирования и анализа тектонической структуры. Кроме того, РЛ-снимки и фотосхемы хорошего разрешения, передающие особенности рельефа, помогают опознавать и разграничивать литофациальные единицы по характеру рельефа и растительности, отражаемому фототонном и фоторисунком снимков. Правда, определение литофациального состава без полученных ранее данных по исследуемой территории или хотя бы ограниченного объема сопутствующих наземных исследований остается во многом проблематичным. Это связано с тем, что интенсивность и характер отраженного микроволнового излучения, передаваемые фототонном РЛ-снимков, зависят как от вещественного состава отражающей поверхности, так и от условий проведения съемок и от локальных условий объекта — поверхностной влажности, растительности и др. Интерпретатор радиолокационных снимков должен знать кроме принципов радиолокационной съемки и геометрических особенностей изображения также и параметры, которые влияют на отражение радиолокационного сигнала от поверхности объектов.

4.7.2. Параметры радиолокационной съемки.

4.7.2.1. Введение. Волновое взаимодействие между

падающим зондирующим радиолучом и поверхностью объекта съемки определяется со стороны съемочной системы такими параметрами, как длина волны, поляризация и угол встречи радиолуча с поверхностью объекта. Результаты проведенных к настоящему времени экспериментов показывают, что для каждого из возможных тематических применений радиолокационной съемки эти параметры должны быть оптимизированы применительно к требованиям каждой тематической задачи. Отсюда следует, что пользователь должен участвовать в планировании РЛ-съемки. Так, например, он должен принимать во внимание, что технологические расходы сильно возрастают с ростом частоты, т. е. с уменьшением длины волны, на которой проводится съемка.

4.7.2.2. Наиболее употребительные длины волн радиолокационных систем. Используемые в народнохозяйственных целях РЛСБО работают преимущественно в диапазоне ультракоротких длин волн, от 0,8 до 30 см. Для дистанционного зондирования предназначаются радиолокационные системы, работающие в так называемых Ка-, Х- и L-диапазонах. Эти кодовые обозначения, применяемые со времен второй мировой войны, соответствуют следующим интервалам длин волн: Ка-диапазон — 0,8–1,1 см, Х-диапазон — 2,4–3,8 см и L-диапазон — 15–30 см.

Длина волны определяет проникающую способность ультракоротковолнового излучения. Способность ультракоротких волн проникать в вещество или проходить через него повышается с увеличением длины волны излучаемого антенной сигнала. Таким образом, излучение в Ка-диапазоне с длиной волны 0,8 см имеет существенно меньшую проникающую способность, чем излучение в L-диапазоне с длиной волны 25 см. Кроме того, способность радиолокационного излучения проникать в почву, горные породы, растительность и воду зависит также и от ряда других параметров, которые рассматриваются в следующих разделах (прежде всего от угла визирования, структуры поверхности и ее диэлектрических свойств). С целью приближенной оценки проникающую способность можно приравнять к половине длины волны. Для L-диапазона она, таким образом, составит около 12 см.

4.7.2.3. Поляризация. Направление колебаний в импульсе, посылаемом направленной антенной радиолокационной системы, может быть ориентированным, в частности вертикальным (В) или горизонтальным (Г). В этом случае говорят о соответственно В- или Г-поляризованном сигнале. При встрече с земной поверхностью поляризованный сигнал отражается от поверхности почвы, горных пород, растительности или воды. Часть отраженного сигнала имеет ту же поляризацию, что и излученный, и антенна радиолокационной системы соответственно

принимает однородно поляризованный сигнал (так называемые ГГ- или ВВ-формы).

Другая часть падающего сигнала вследствие множественных отражений и фазовых переходов на поверхности объекта подвергается деполяризации, и колебания в отраженном сигнале происходят в самых различных направлениях. Наиболее сильная деполяризация сигнала происходит на участках местности, покрытых растительностью. Сабинз [37] объясняет ее множественными отражениями падающего луча от листьев, ветвей и сучьев. Особенно ярко это явление наблюдается для относительно коротковолнового радиолокационного излучения в Ка- и Х-диапазонах. С тем чтобы принимать деполяризованный сигнал, отраженный поверхностью, радиолокационная система кроме основной передающей антенны, принимающей отраженный сигнал с однородной поляризацией, оборудуется дополнительной антенной для приема излучения с так называемой поперечной поляризацией. Таким образом можно производить РЛ-съемки ГВ- или ВГ-типа. При ГВ-типе передающая антенна посылает сигнал с горизонтальной поляризацией, а приемная антенна принимает вертикально поляризованное радиоэхо. При регистрации поперечно поляризованного сигнала радиолокационные снимки получаются в более широком динамическом диапазоне. Сопоставление их информативности с информативностью снимков в однородно поляризованных лучах показывает, что первые несут дополнительную информацию, особенно в областях, покрытых растительностью, и изображения растительных сообществ различных типов оказываются на них существенно более дифференцированными. Кроме того, они обладают заметно более высокой контрастностью.

4.7.2.4. Угол обзора. Угол падения радиолуча на земную поверхность, отсчитываемый от вертикали из точки наблюдения (дополнительный к нему угол называется углом места), имеет решающее влияние на взаимодействие между поверхностью и падающим радиосигналом (рис. 98). Если поверхность рельефа обращена к антенне, то большая часть мощности падающего луча отражается в направлении антенны. Если излучение падает перпендикулярно рельефу, то коэффициент отражения максимален. Соответственно наклону и ориентировке по направлению к антенне склоны, обращенные к траектории полета, на РЛ-снимке передаются светлыми до очень светлых оттенками фототона. Площадки, наклоненные в направлении от антенны, отражают к ней гораздо меньше энергии. Они передаются на РЛ-снимке серым или темным фототонном. Так же выглядит и водная поверхность, являющаяся по отношению к длине волн радиолокационных станций Х- и L-диапазонов совершенно гладкой. Она передается очень темным фототонном (рис. 99). Площадки, наклоненные от антенны под углами большими, чем угол визирования,

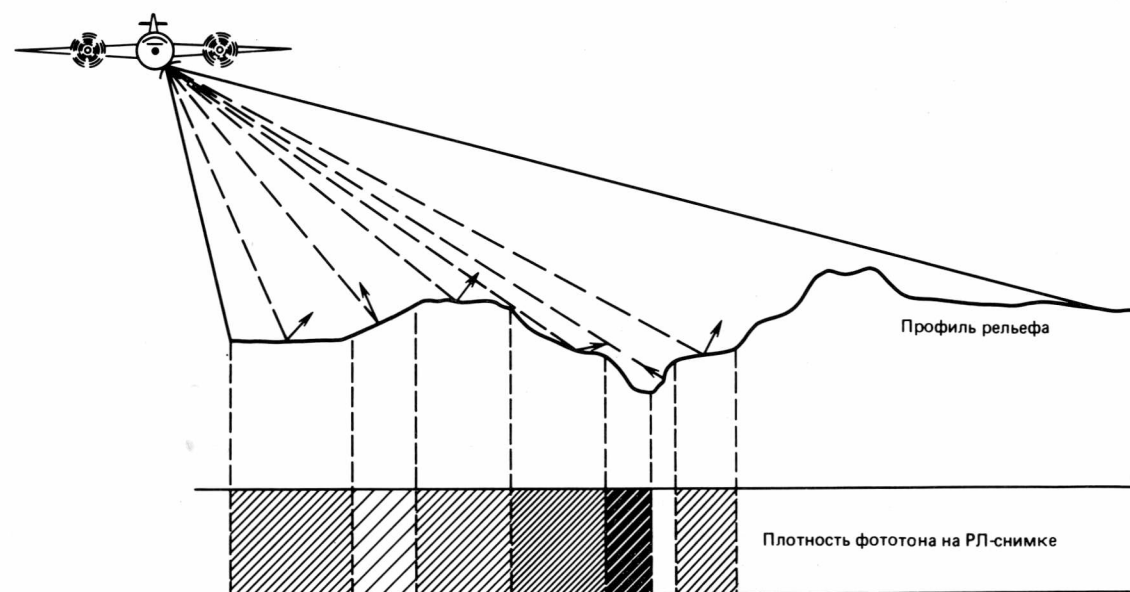


Рис. 98. Зависимость фототона РЛ-снимка от наклона и ориентации склона как аналогов освещенности [95].

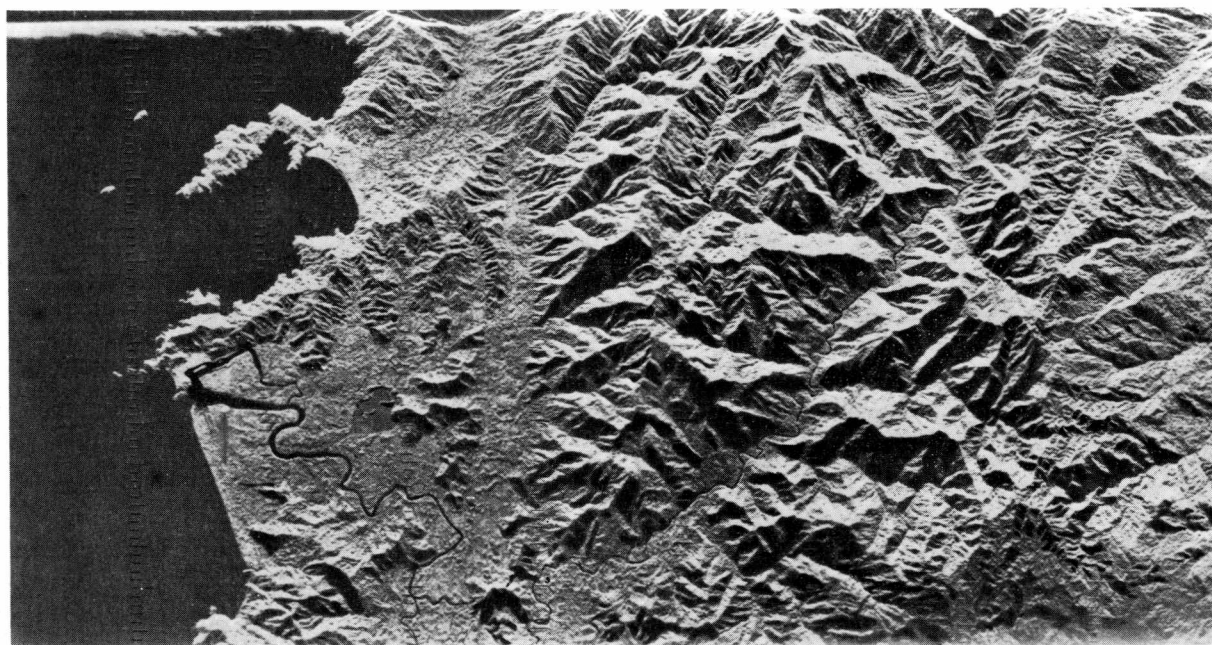


Рис. 99. Передача различных ландшафтных единиц на РЛ-снимке. Радиотени позволяют определить направление облучения при залете.

вовсе не облучаются радиоизлучением. Соответственно они не могут его отразить и получают на РЛ-снимке, абсолютно черный фототон. Они называются радиотенями. Размер радиотеней зависит, с одной стороны, от высоты полета и высоты объекта, а с другой — от соотношения между углом визиро-

вания и расстоянием от облучаемого участка местности до траектории полета. Как показано на рис. 113а и 113б, длина радиотеней увеличивается по мере удаления от траектории полета.

Различия фототона РЛ-снимка, обусловленные морфологией рельефа, прекрасно передают характер

снимаемой местности (рис. 99). Это облегчает ее опознание и интерпретацию, обуславливая картирование литофациальных единиц, которые определяют значительную часть особенностей рельефа, его морфологического расчленения — преимущественно его мелкую структуру. Рельефная передача картируемого района позволяет также выявлять крутопадающие разрывы (разломы, трещины, зоны трещиноватости), которым соответствуют линейные или криволинейные элементы ландшафта (ср. рис. 226 и 229). На РЛ-снимках, полученных при полого падающем излучении, особенно хорошо передаются даже мелкие литологически или структурно обусловленные элементы рельефа, особенно в том случае, если они ориентированы параллельно траектории и тем самым перпендикулярно направлению облучения. Таким образом, элементы рельефа, ориентированные параллельно траектории, подчеркиваются на радиолокационных снимках, а тектонические и геоморфологические структурные элементы, ориентированные параллельно радиолучу, наоборот, подавляются. Поэтому на выявление строения снимаемой местности и геологическую информативность снимков и монтируемых из снимков радиолокационных мозаик (фото-схем) решающее влияние оказывает направление залета. С тем чтобы оптимально передавать на РЛ-снимках структуры определенного направления, направление облучения (обзора) местности во время полета должно быть перпендикулярно простиранию структур. При соблюдении этого требования на РЛ-снимках часто отражаются структуры, которые нельзя опознать на аэрофотоснимках. Для наиболее полной передачи характера местности и картирования литофациальных и структурных единиц наиболее целесообразно производить залеты в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При повторных залетах необходимо также следить за тем, чтобы участки местности, которые при первом залете были засняты издали, во втором залете располагались вблизи от трассы залета и наоборот. Следовательно, один и тот же ландшафт может быть по-разному отражен на РЛ-снимках различных направлений залетов.

Итак, радиолокационные залеты картируемой территории следует осуществлять в оптимальном направлении по отношению к простиранию картируемых структур и геологических подразделений, которое избирается при планировании съемок. В этом заключено еще одно преимущество РЛ-съемки по сравнению со съемкой в видимом диапазоне длин волн, которая полностью зависит от условий естественной освещенности.

4.7.2.5. Взаимодействие между радиоволнами и естественными поверхностями. 4.7.2.5.1. Общие положения. Происходящие на естественных поверхностях отражение и рассеяние радиоволн, а также

их проникновение в вещество объекта съемки определяются прежде всего шероховатостью поверхности и диэлектрическими свойствами облучаемых материалов (почв, горных пород, растений, воды). Решающую роль играет также ориентировка поверхности объекта или местности по отношению к падающему радиолучу (угол визирования). К тому же процессы взаимодействия (отражение, дифракция, поверхностное и объемное рассеивание) радиолокационного излучения, падающего на один и тот же объект или поверхность, меняются в зависимости от длины волны. Эти зависимости следует учитывать при планировании радиолокационной съемки и при тематической интерпретации РЛ-снимков.

4.7.2.5.2. К статистической природе радиосигнала. Физические параметры съемочных радиолокационных установок характеризуются частотой, поляризацией и углом облучения. Перечисленные в разд. 4.7.2.5.1 параметры обуславливают величину отраженной мощности (P_r), получаемой от объекта. Путем сравнения ее с величиной излученной мощности (P_t) можно определить рассеивающие свойства наблюдаемого объекта. Эти особенности взаимодействия обычно описываются коэффициентом рассеивания σ .

Между величиной σ и отношением излученной и принятой мощностей существует следующая зависимость («радиолокационное уравнение»):

$$\sigma = \frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{G_t}{4\pi R^2} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^{-1} \cdot A_r^{-1},$$

где первый фактор означает соотношение излученной и принятой мощностей; второй фактор — обратную величину энергии, излученной антенной с коэффициентом G_t на объект, расположенный на удалении R ; третий фактор — обратную величину коэффициента затухания на пути от объекта к антенне и последний фактор — обратную величину эффективной поверхности приемной антенны.

Приходящее от каждой облучаемой площадки радиозо (ср. рис. 103) составляется, как правило, из обратного рассеяния на многих центрах, каждый из которых характеризуется своим коэффициентом рассеяния σ_i . Коэффициенты рассеяния отдельных рассеивающих центров, располагающихся на облучаемой площадке, суммируются их общим живым сечением σ_T .

Общее живое сечение коэффициентов рассеяния σ_T одного элемента разрешения представляет собой статистическую величину. Установлено, что характеристики рассеяния природных поверхностей одного и того же типа достаточно изменчивы. Так, например, при съемке свежей пашни в пределах одного элемента разрешения неминуемо варьирует величина комков почвы, высота гребней пахоты, так же как и влажность почвы. Поэтому внутри поля или облучаемой

радиолокационной системой площадки комбинируются центры рассеяния с различными свойствами. Свежая пашня принадлежит, таким образом, к статистическим рассеивателям и живое сечение коэффициентов рассеяния σ_T одной площадки пашни является статистической величиной. Чтобы аналитически определить характеристический коэффициент σ_T для объекта «пашня», следует независимо установить показатели в разных ее точках. То же относится и к поверхности горных пород, которые в пределах одного элемента разрешения радиолокационной съемки могут вследствие выветривания и тектонических преобразований иметь весьма различные свойства.

Зачастую условия внутри одной единицы поверхности могут быть весьма сложными. Так, например, внутри площадки (элемента разрешения), покрытой растительностью, встречаются растения различных видов и различных размеров, распределенные к тому же с различной густотой и с разновеликими промежутками между группами растений, где выступает поверхность почвы или горных пород. Приходящее от таких площадок радиоэхо представляет собой смешанный сигнал от различных центров рассеяния. Различные рассеивающие свойства частей отражающей площадки описываются лишь общим коэффициентом рассеяния площадки σ_T .

РЛ-снимки, получаемые с помощью радиолокационных систем с синтезированной апертурой, имеют тонкие и мелкие изменения фототона. Это явление (англ. speckle – крапчатость) обусловлено когерентностью радиолокационного сигнала и интерференцией отражений, исходящих от многочисленных центров рассеяния, располагающихся в пределах одной площадки. Фазы и амплитуды отраженных одним элементом разрешения сигналов к тому же несколько изменяются от импульса к импульсу. Отсюда варьирует и общее отражение пикселя. Его значение, следовательно, отлочно от постоянного отражения отдельных рассеивателей, суммированного в центр пикселя. При изменении угла облучения и его азимута изменяется и характер происходящей внутри пикселя интерференции, а с ним и интегрированное отражение пикселя. Вариации крапчатости колеблются в пределах 20 дБ. Эти существенные вариации могут быть, согласно [294], сведены до 2 дБ путем объединения значений, полученных при разных углах облучения. Крапчатость мешает интерпретации РЛ-снимков.

4.7.2.5.3. Диффузное и зеркальное отражение. Соотношение между длиной волны падающего излучения и размерами неровностей поверхности определяет диффузность или зеркальность отражения. В общем можно принять, что если шероховатости поверхности почвы, горных пород или растительности существенно меньше, чем длина волны зондирующего излучения, то оно может быть

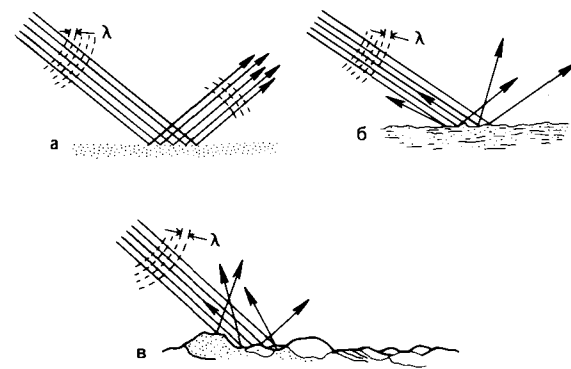


Рис. 100. Зеркальное и диффузное отражение радиолучей: а – от гладкой поверхности; б – от среднешероховатой поверхности; в – от сильношероховатой поверхности. λ – длина волны падающего радиоизлучения [250].

зеркально отражено в сторону от излучателя, причем угол отражения лучей будет равен углу падения. Облучаемая поверхность в этом случае воспринимается как гладкая и действует как зеркальный отражатель. Если же величина неровностей облучаемой поверхности примерно одинакова или заметно больше, чем длина волны радиолокационного сигнала, то поверхность действует как диффузный отражатель (ср. рис. 100 и 101). В экстремальном случае падающее излучение будет отражено равномерно во всех направлениях. От природных поверхностей обычно определенная часть падающей мощности радиоизлучения отражается диффузно, а другая часть – зеркально.

4.7.2.5.4. Рассеяние на шероховатых поверхностях. Характер неровностей поверхности в значительной мере определяется структурными особенностями материала. Для растительности это величина, форма, ориентация и пространственное расположение листьев, хвои, сучьев; для почв – величина, распределение и ориентация частиц; для горных пород – величина, распределение и ориентация минералов, образующих породу, а также предопределенные тектонической структурой или выветриванием текстурные особенности микрорельефа. Для водных поверхностей важны высота волн и расстояния между ними, ориентация гребней волн и полос пены на них.

Для отражения радиоволн решающее значение имеют поперечные к радиолучу и наклоненные к источнику излучения неровности поверхности, которые облучаются в момент съемки и отражают падающее радиоизлучение. По данным Сабинза [37], поперечный разрез неровностей поверхности состоит из вертикальной и горизонтальной составляющих и характеризуется определенным пространственным распределением элементов микрорельефа, а также определенными геометрическими особенностями строения индивидуальных материальных компонентов

поверхности (листьев, сучьев, частиц почвы и горной породы). Им же установлено, что неровности важнейших природных поверхностей вследствие сложных особенностей их геометрии могут быть описаны математически лишь приблизительно. Основную роль для большинства поверхностей играют ориентированные поперечно к радиолучу возвышения высотой порядка первых сантиметров. Кроме того, следует различать поверхности гладкие, средней шероховатости и шероховатые, при этом важно, чтобы это разделение производилось относительно длины волны зондирующего радиосигнала. Так, например, поверхности, которые по отношению к длине волн Ка-диапазона (3 см) являются шероховатыми, по отношению к длине волн L-диапазона (25 см) гладкие. Зависимость процессов отражения от длины волны и

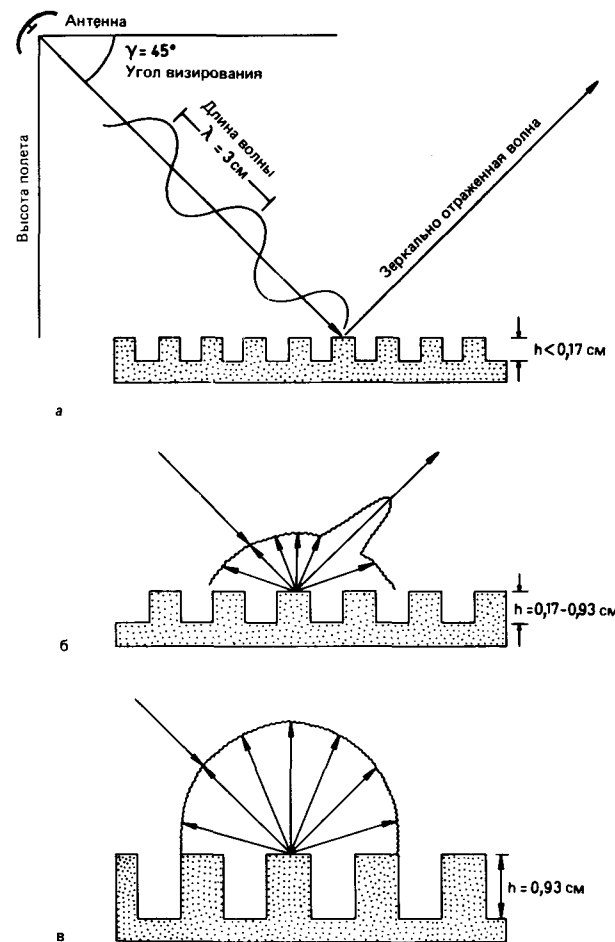


Рис. 101. Модель отражения и рассеяния на поверхностях различной степени шероховатости для радиоволн длиной 3 см [37].

а – гладкая поверхность с зеркальным отражением, радиоэхо отсутствует; б – поверхность средней шероховатости, среднее радиоэхо; в – шероховатая поверхность с диффузным рассеянием, сильное радиоэхо.

величины неровностей поверхности схематически показана на рис. 101, составленном для угла падения 45° и длины волны 3 см.

Если радиолокационный сигнал падает под малым или средним углом на горизонтальную поверхность, которая по соотношению высоты неровностей и длины волны падающего излучения может быть описана как гладкая, то большая часть энергии сигнала отражается прочь от антенны, в направлении облучения. Соответствующие поверхности на радиолокационном снимке получают темно-серый до черного фототон. Лишь при крутом угле падения и небольшом расстоянии от надира антенна радиолокационной системы может получить значительную часть отраженного от гладких поверхностей излучения [37, 272].

Рис. 102 показывает влияние угла падения и высоты неровностей поверхности на коэффициент рассеяния σ влажной почвы. С помощью микроволновой системы (1–18 ГГц), смонтированной на автомобиле, были исследованы [16] поля с одинаковой влажностью, но с различной величиной неровностей почвы. При использовании наиболее длинных волн, что способствует зеркальному отражению (L-диапазон, рис. 102, а), коэффициент рассеяния оказался очень чувствительным к углу падения в области, близкой к надиру, в то время как для полей с шероховатой поверхностью изменения угла падения почти не влияли на коэффициент рассеяния. При угле падения 5° влияние шероховатости поверхности на коэффициент рассеяния оказалось минимальным. Если длина волны падающего излучения уменьшается (рис. 102, б, 102, в), то все поля действуют как шероховатые поверхности, в том числе и относительно гладкие. Поэтому точки пересечения кривых для всех пяти типов полей смещаются в направлении больших углов падения. В X-диапазоне точка пересечения располагается около 10° . В этом случае комбинация угла падения и длины волны оказывается при данной влажности независимой от шероховатости поверхности. Отсюда даются [16] следующие оптимальные параметры для дистанционного зондирования влажных почв: длина волны 6–7 см, угол падения $7\text{--}17^\circ$ от надира, поляризация – ГГ (цитировано по [270]).

При интерпретации РЛ-снимков необходимо помнить, что отношение неровностей поверхности и длины волны зондирующего излучения для поверхностей, состоящих из различных материалов, может быть одинаковым. Такой пример описан Парри и др. в Канаде [228]. Река меандрирует в широкой пологой долине среди травянистых лугов. Как поверхность воды, так и поверхность прилегающих к ней лугов по отношению к длине волны радиолокационного сигнала (25 см) оказываются гладкими, зеркально отражающими. В этом случае не имеется контраста в отражающих свойствах таких различных материалов,

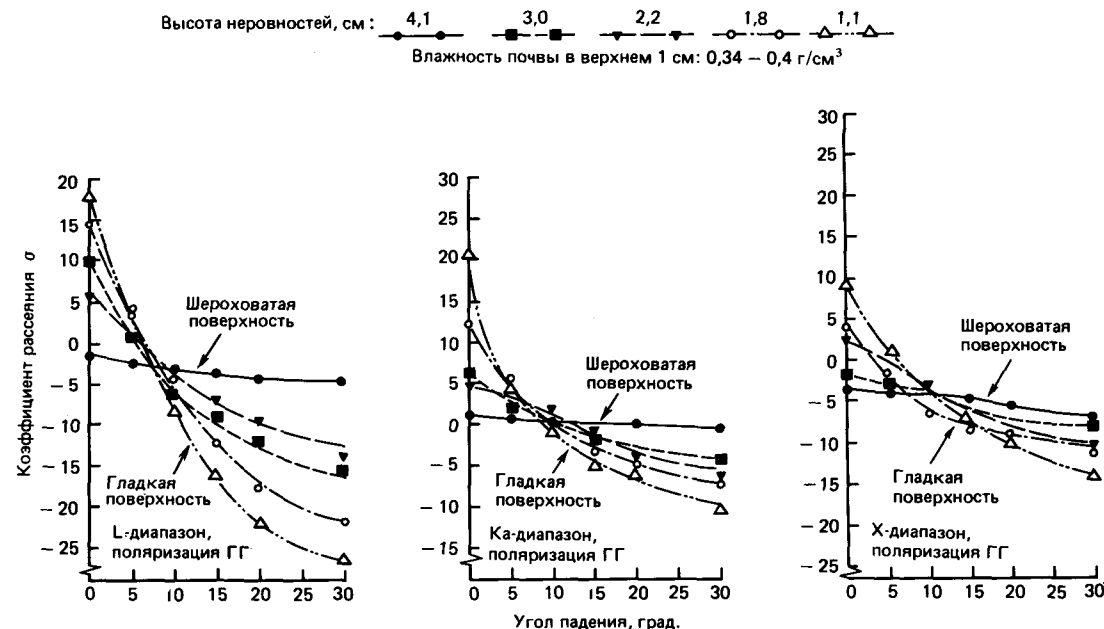


Рис. 102. Коэффициенты рассеяния влажной почвы как функция шероховатости поверхности и угла падения. Коэффициент описывает рассеяние энергии радиолуча на поверхности местности в направлении радиолокационной станции [16].

как вода и трава, и на РЛ-снимках в L-диапазоне реку невозможно отличить от прилегающих лугов. По отношению к длине волны Ka-диапазона (3 см), напротив, отмечаются существенные различия в неровностях поверхностей воды, песка и луговой растительности. Соответственно оказывается различной интенсивность радиоэха, отраженного этими материалами в направлении радиолокационной антенны (особенно при ГГ-поляризации). Это показывает, что при залетах важно выбирать такую длину волны, которая может обеспечить дифференциацию на снимках интересующих исследователя объектов.

При этом поляризация также играет существенную роль. По данным Парри и др. [228], одинаково поляризованный сигнал (например, ГГ) представляет собой преимущественно результат процессов отражения от поверхности — продукт поверхностной шероховатости (микрорельефа облучаемой поверхности). Перекрестно поляризованный сигнал (ГВ), являющийся результатом деполяризации падающего сигнала, обусловлен, с одной стороны, множественными отражениями в области поверхности и, с другой — объемным рассеиванием на подповерхностных неоднородностях вещества мишени.

Более подробное рассмотрение количественных связей между радиолокационным сигналом и неровностями естественных поверхностей можно найти в работах [263, 264, 37, 272].

4.7.2.5.5. Диэлектрические свойства мишени. Кроме неровностей поверхности существ-

венное влияние на отражающие свойства почв, горных пород, растительности и воды оказывают их диэлектрические свойства, поскольку именно они определяют характер распространения электромагнитных волн в этих материалах. Отражающие свойства материалов являются функцией их комплексной диэлектрической постоянной, суммирующей их электропроводность и магнитную проницаемость. Применительно к длинам волн, используемых радиолокацией, диэлектрическая постоянная сухих почв и горных пород располагается приблизительно между значениями 3 и 8. Эти величины недостаточны, чтобы обусловить заметную разницу отражающих свойств и соответственно заметные различия в фототоне сухих почв и горных пород. Для воды значение диэлектрической постоянной составляет около 80. Отсюда легко установить, какое влияние оказывает присутствие воды в породах и почвах на их диэлектрические постоянные и на их отражающие свойства. Согласно данным Сабинза [37], комплексная диэлектрическая постоянная почв и горных пород имеет почти линейную зависимость от их увлажнения. Различия в отражающих свойствах сухих и влажных пород и почв позволяют различать и разграничивать их на РЛ-снимках. Почвы и породы с высоким содержанием воды действуют как хорошие отражатели. Поэтому они передаются на РЛ-снимках светлым фототонем, в то время как сухим породам и почвам как плохим отражателям соответствует темный фототон. На этом основании почвы и горные породы одного и того же типа или с одинаковым характером шеро-

ховатости поверхности, но с различной влажностью могут быть опознаны на РЛ-снимках и отделены друг от друга.

Следует еще отметить, что диэлектрические свойства воды находятся в зависимости от длины волны излучения и поэтому диэлектрические свойства влажной почвы одного и того же типа варьируют в зависимости от длины волны. Так, почвы одного и того же типа (соответственно одинаковой шероховатости), но различной влажности лучше различаются на РЛ-снимках в длинноволновом L-диапазоне (длина волны 25 см), чем в коротковолновом Ka-диапазоне (длина волны 0,8 см). С другой стороны, комплексная диэлектрическая постоянная зависит также и от вида почв, причем различия в диэлектрических свойствах почв с повышением их влажности проявляются отчетливее. Более подробное обсуждение взаимодействия между микроволновым излучением и почвами различной влажности можно найти в работах [187, 218, 314, 272].

Согласно данным лабораторных исследований [272], значения диэлектрической постоянной возрастают в зависимости от влажности почвы сперва относительно медленно, но за определенным значением заметно быстрее. Эта двойная линейная зависимость диэлектрической постоянной от влажности почвы привела Шмугге и др. [272] к выводу о разном поведении воды в почве. Если почва содержит небольшое количество воды, то последняя тесно связывается с частицами почвы. В этих условиях молекулы воды не могут свободно двигаться, и диэлектрические свойства связанной воды приближаются к свойствам льда. Если же слой воды вокруг частиц почвы будет более толстым, то связь воды с ними ослабевает и молекулы воды начинают вести себя, как и в жидкой воде. Этим и объясняется относительно быстрое изменение диэлектрических свойств почв с возрастанием их влажности. Переход от одного состояния к другому зависит от структуры почвы и от величины ее частиц [312]. Важным параметром в этой связи являются также количество и объем пор (пористость) почв и горных пород.

4.7.2.5.6. Объемное рассеяние. Если длина радиоволны, применяемой для дистанционного зондирования, соизмерима с размерами листьев, хвои, сучьев, стволов естественной или сельскохозяйственной растительности, то имеют место интенсивное отражение и рассеяние радиоизлучения внутри растительного покрова, а также множественные отражения и объемное рассеяние между растительным покровом и подстилающей поверхностью. Это приводит к возрастанию коэффициента рассеяния σ_T (см. разд. 4.7.2.5.3). Интенсивность объемного рассеяния изменяется в зависимости от поляризации падающего радиолокационного излучения, а также в зависимости от объема участвующей в процессе рассеяния расти-

тельной массы, количества растений и их частей. Как уже упоминалось, процессы отражения в растительном покрове приводят к деполяризации падающего сигнала. Если объем стволов и сучьев больше, чем объем листьев, хвои и кустов, то процессы рассеяния на стволах и сучьях более значительны для длинноволнового излучения. Соответственно рассеяние листьями, кустами и другой низкорослой растительностью более значительно для коротких волн. В объемном рассеянии в случае низкорослой или нерегулярной по высоте растительности участвует также и поверхность почвы или горных пород.

Если радиолокационный сигнал проникает в сухую почву, то в области его проникновения происходит объемное рассеяние проникающих микроволн за счет множественного рассеяния на диэлектрических неоднородностях вещества мишени, которое оказывает влияние как на интенсивность (амплитуду), так и на вид (поляризацию) рассеиваемого в направлении антенны излучения. Таким образом, множественное рассеяние внутри верхней части почвенного слоя также оказывает деполяризующее действие на отраженный радиолокационный сигнал.

4.7.2.5.7. Проникающая способность. Глубина проникновения микроволн зависит, с одной стороны, от соотношения между длиной волны падающего сигнала и неровностями облучаемой поверхности и, с другой — от значения комплексной диэлектрической постоянной материала мишени. Неровности поверхности определяют вид и интенсивность происходящих на ней процессов отражения (зеркальное или диффузное отражение, множественное рассеяние). Кроме того, они определяют, какая часть мощности падающего сигнала может проникнуть в глубь облучаемого объекта (почвы, породы, растительности, воды, льда). Насколько глубоко энергия падающего радиолокационного сигнала может проникнуть в мишень и какая ее часть вновь достигнет земной поверхности, зависит от длины волны падающего сигнала и от комплексной диэлектрической постоянной облучаемой мишени, прежде всего от ее электропроводности.

Как правило, проникающая способность микроволн возрастает с ростом длины волны. Сигналы коротковолновых радиолокационных систем (Ka- и X-диапазонов) по проникающей способности уступают сигналам радиолокационных систем, работающих на длинных волнах (L- или R-диапазоны с длиной волн соответственно 15–30 и 30–100 см).

С другой стороны, глубина проникновения радиоволн уменьшается с увеличением диэлектрической постоянной вещества облучаемой мишени. Поэтому радиолокационные сигналы проникают глубже в сухую почву, чем во влажную, и именно поэтому отражающая способность сухой почвы всегда ниже, чем влажной почвы.

В качестве грубой оценки проникающей способности обычно принимается, что она составляет половину длины волны. В очень сухой песчаной почве волны L-диапазона могут проникать на первые метры [11]. Примеры проникающей способности радиолокационных сигналов L-диапазона (длина волны 23,5 см) показаны на рис. 239 и 242. Во влажной почве глубина проникновения существенно ниже, чем предполагаемая этим правилом.

Микроволновое излучение в X-диапазоне, чаще всего используемое при региональном радиолокационном зондировании, имеет обычно весьма ограниченную проникающую способность в почвах и особенно в горных породах. То же относится и к проникающей способности этого микроволнового излучения на покрытых растительностью участках, особенно в тех случаях, когда она представлена кустарником или лесом. Компоненты строения густого лесного или кустарникового покрова (листья, хвоя, сучья, ветки, стволы) в основном имеют размеры в пределах сантиметров и дециметров. Состоящая из этих компонентов поверхность крон деревьев и кустарников является поэтому весьма неровной относительно длины волны падающего излучения, что обеспечивает диффузное его рассеяние. Та часть энергии падающих сигналов, которая проникает под поверхность крон в промежутки между растениями или ветками, испытывает там множественные отражения и рассеивается во все стороны. Это в общем относится и к энергии сигналов радиолокационных систем, действующих в L-диапазоне. Следует отметить, что глубокому проникновению радиолучей Ka- и X-диапазонов препятствует также относительно высокое содержание влаги в растениях и соответствующая этому их высокая электропроводность.

Если на радиолокационных снимках районов, покрытых густыми лесами, можно все же опознавать и картировать гидрографическую сеть, различия в литологическом строении и тектонические структуры, то это связано прежде всего с тем, что морфология поверхности крон хорошо передается на РЛ-снимках благодаря относительно пологому углу визирования с радиолокационной станции. Решающим для возможности геологической интерпретации обстоятельством является то, что поверхность крон деревьев оглаживает все малые и большие неровности рельефа, передавая информацию о них. Многие детали радиолокационных отражений от растительности, затрудняющие передачу рельефа местности на РЛ-снимке, эффективно подавляются вследствие мелкого масштаба радиолокационных снимков и прежде всего вследствие того, что преобладающие размеры крон существенно меньше, чем пространственное разрешение региональных РЛ-съемок (от 10×10 до 25×25 м). Изменения фототона поверхности лесного покрова, так же как величина и распределение радиотеней в лесных районах, связаны, кроме того, и с

положением снимаемого участка по отношению к радиолокационной антенне. Таким образом, фототональные различия РЛ-снимков отражают морфологию поверхности верхушек растительности. Причиной различий фоторисунка лесных районов на РЛ-снимках являются различия в распределении по площади групп деревьев и различных их родов. Эти различия фоторисунка вершинной поверхности частично обусловлены также структурой микро-рельефа местности, т.е. подошвы леса, которая содержит в себе геологическую информацию.

4.7.3. Радиолокационные съемочные системы с реальной апертурой. 4.7.3.1. *Компоновка, процесс съемки, построение и масштаб снимков.* Построение и способ работы радиолокационной станции бокового обзора показаны схематически на рис. 96, 97 и 103.

В радиолокационной системе генератор производит электрические импульсы, которые преобразуются передатчиком в высокочастотные радиолокационные зондирующие сигналы, излучаемые направленной антенной во время полета самолета на подстилающую поверхность в направлении, перпендикулярном траектории полета. Посланный с антенны в виде луча сигнал характеризуется длиной волны, направлением колебаний (поляризацией) и длительностью импульса (рис. 103). Величина облучаемой в каждый момент полета площади (пространственный элемент разрешения) определяется в поперечном к полету направлении или в направлении облучения длительностью импульса, а в направлении полета (азимутальное направление) — шириной диаграммы направленности и физической длиной антенны (ее апертурой) L. Располагающаяся в пределах элемента разрешения материальная поверхность отражает зондирующее радиолокационное излучение диффузно или зеркально и направляет большую или меньшую часть падающей энергии обратно в направлении антенны.

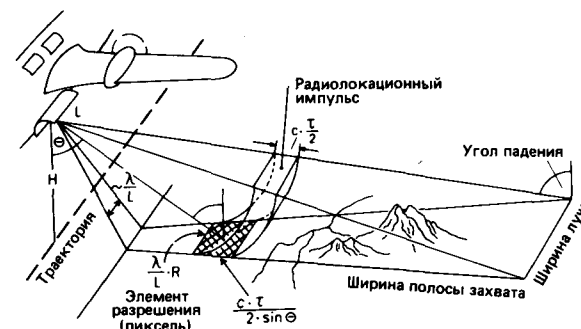


Рис. 103. Принципы и параметры радиолокационных систем с реальной апертурой (по [197], с изменениями). c — скорость света; τ — длительность импульса; λ — длина волны; L — длина антенны; R — наклонная дальность; θ — угол визирования (угол места).

Радиозохо, приходящее от объектов поверхности, принимается антенной, усиливается в приемнике и преобразуется в видеосигнал (рис. 96). Интенсивность видеосигнала модулирует яркость луча на экране электронно-лучевой трубки. В соответствии со временем пробега зондирующего радиосигнала (туда) и его радиозоха (обратно) электронный луч в трубке смещается вдоль линии развертки. Сперва на антенну приходят радиолокационные отражения от объектов, расположенных вблизи от антенны (объект a на рис. 97), затем — радиозохо от объектов, расположенных далее (b и v на рис. 97). Пространственное соседство объектов, расположенных в полосе съемки, вызывает при изображении ее результатов на электронно-лучевой трубке временное соседство их эхосигналов. Путь и яркость электронного луча на экране катодной трубки с помощью оптической системы записываются на фотографической пленке, которая протягивается мимо трубки со скоростью, пропорциональной скорости полета. На пленке объекты соответственно их положению на местности вновь располагаются рядом друг с другом. Для решения количественных задач обработки радиолокационных съемок в последнее время вместо фотозаписи используется цифровая запись результатов съемки: отраженный и усиленный в приемнике сигнал преобразуется в цифровую форму и записывается на магнитную ленту. Скорость протяжки магнитной ленты также пропорциональна скорости полета.

Расстояние между объектами на РЛ-снимке (пропорциональное расстоянию на поверхности Земли) при описанном виде регистрации съемочных данных

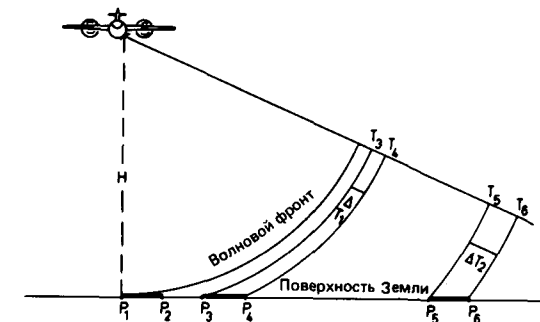


Рис. 104. Волновые пакеты в ближней зоне РЛ-снимка. Объяснение в тексте [95].

определяется, таким образом, разницей во времени прихода отраженных ими сигналов на антенну. Эта разница функционально связана с расстоянием между антенной и объектом, обозначаемым как «наклонная дальность» (рис. 105). Помещенный на рисунке текст разъясняет соотношения между расстояниями на местности (горизонтальной дальностью), наклонной дальностью и расстояниями на откорректированном снимке.

Как показано на рис. 104, волновому фронту излученного с антенны радиоимпульса для пересечения отрезка P_3P_4 , расположенного в ближней к антенне зоне, требуется определенный интервал времени ΔT_1 , более короткий, чем интервал времени ΔT_2 для пересечения равного по длине отрезка P_5P_6 , но расположенного в дальней зоне. Соответственно временной интервал между сигналами от P_3 и P_4 будет

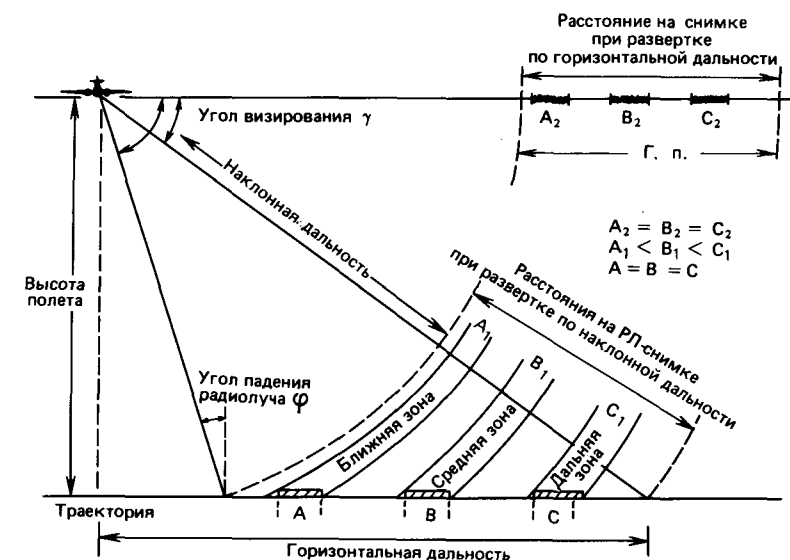


Рис. 105. Наклонная и горизонтальная дальность. Объяснения в тексте (по [15], с изменениями). $G. n.$ — гиперболическая поправка к радиолокационной наклонной дальности, приближающая расчетное представление к соотношениям на местности; $A_2 = B_2 = C_2$ — откорректированный РЛ-снимок; $A_1 < B_1 < C_1$ — наклонная дальность; $A = B = C$ — горизонтальная дальность.

короче, чем интервал между сигналами от P_5 и P_6 . В результате на РЛ-снимке отрезок P_3P_4 в ближней зоне будет соответственно короче, чем отрезок P_5P_6 в дальней зоне. Отсюда следует, что на радиолокационном снимке, полученном без коррекции этого явления (с «разверткой по наклонной дальности»), масштаб изображения увеличивается по нормали к траектории полета в направлении от ближней зоны к дальней, т.е. местность, расположенная вблизи от антенны, передается на снимке в «сплюсненном» виде.

Другой вид развертки радиолокационных снимков называется разверткой по горизонтальной дальности (рис. 106). При его построении описанные выше различия во времени пробега компенсируются гиперболическими корректирующими поправками. После этого передача пространственных соотношений местности на РЛ-снимке приобретает картографический характер. В противоположность первому случаю с его искажениями картины в поперечном к направлению полета направлении во втором случае горизонтальные расстояния между объектами на местности как в ближней, так и в дальней зоне передаются примерно в одном масштабе. Однако и при развертке по горизонтальной дальности будут все же проявляться некоторые искажения изображения, обусловленные процессом съемки или рельефом местности (так называемая радарная дорожка, или радарное сокращение).

Развертка по горизонтальной дальности ближе соответствует натуре и по сравнению с разверткой по наклонной дальности обеспечивает лучшую сравнимость и сопоставимость соседних полос съемки. Поэтому при составлении радиолокационных мозаик (фотосхем) и при стереоскопическом исследовании перекрывающихся полос съемки предпочтительны именно картографические РЛ-снимки.

Масштаб РЛ-снимков и ширина покрываемой

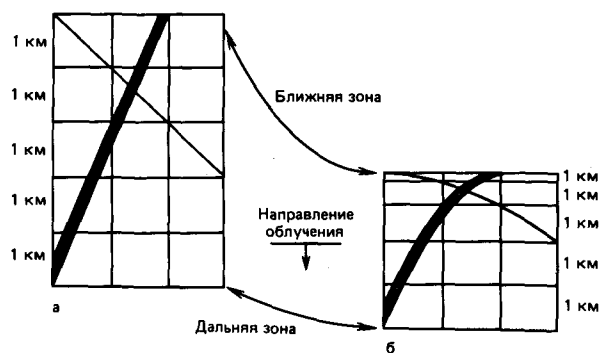


Рис. 106. Геометрия РЛ-снимка в развертках по горизонтальной и по наклонной дальности. Объяснения в тексте [130].

а — геометрия картинки при развертке по горизонтальной дальности (картографическое представление); б — геометрия картинки при развертке по наклонной дальности.

съемкой полосы определяются условиями съемки и залета. Определяющими являются высота съемки и угол падения радиолуча в ближней и в дальней зонах. Масштаб оригинальных снимков при съемках небольших районов соответственно условиям съемки изменяется от 1:100 000 до 1:180 000 при ширине снимаемой полосы местности от 6 до 18 км. При съемках больших территорий масштаб составляет около 1:400 000, а ширина полосы захвата — от 30 до 50 км. Длина съемочных полос в направлении залета может составлять многие сотни километров.

Для визуальной интерпретации полосы оригинальных снимков обычно разрезаются на части и с них изготавливаются копии с увеличением в 3–4 раза. Такие же увеличения применяются и при составлении фотомозаик (фотосхем). Например, в Бразилии в рамках проекта РАДАМБразил (RADAM-Projekt) были получены радиолокационные мозаики в масштабе 1:250 000 на площадь около 8,5 млн. км².

4.7.3.2. Пространственное разрешение систем РЛСБО с реальной апертурой. Пространственное разрешение систем РЛСБО с реальной апертурой различно в направлении облучения (по нормали к линии полета) и в направлении полета (азимутальное направление).

Как показано на рис. 103, размер облучаемой в момент съемки площадки на Земле в поперечном к полету направлении определяется длительностью импульса посылаемого микроволнового излучения (τ), а в направлении полета — горизонтальной шириной радиолуча (в русской терминологии — раскрыв, или апертура антенны). Теоретическое поперечное разрешение в поле зрения радиолокатора составляет произведение половины длительности импульса на скорость света ($c \cdot \tau/2$), поскольку импульс проходит расстояние от антенны до объекта туда и обратно. Длительность импульса τ измеряется микросекундами. Половину ее следует помножить на скорость распространения электромагнитного излучения в пространстве (c). Полученная величина представляет собой перспективное разрешение в нормальном к полету направлении. Чтобы получить величину соответствующего ему разрешения на местности, величину перспективного разрешения необходимо разделить на косинус угла визирования антенны γ или на синус дополнительного к нему угла падения радиолуча θ . Угол визирования (или угол места) γ есть угол между горизонтальной поверхностью, проходящей через антенну, и прямой линией, соединяющей антенну и объект (рис. 107а). Объекты, располагающиеся друг от друга на расстоянии, равном или меньшем, чем расчетная величина разрешения, не будут выражены на снимке как индивидуальные объекты. Они будут восприняты как суммарный сигнал от одного элемента разрешения. Если расстояние между объектами больше, чем величина разрешения

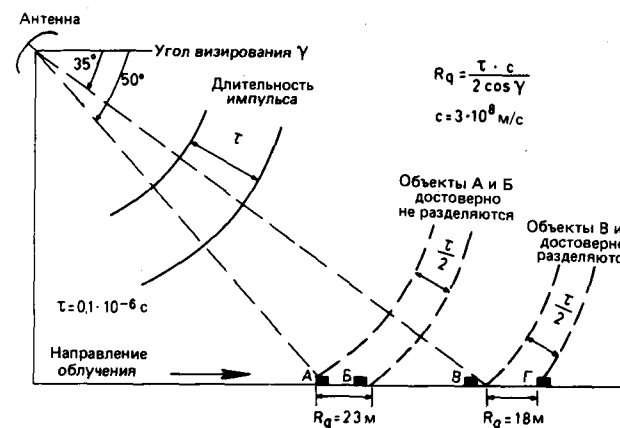


Рис. 107а. Поперечное разрешение РЛ-снимков (R_q) в ближней и дальней зонах [15].

на местности, они изобразятся на снимке раздельно. Как можно установить на рис. 107а, разрешение на местности, соответствующее половине длительности импульса, и соответственно поперечное разрешение (R_q) в ближней области хуже, чем в дальней. Оно улучшается пропорционально удалению объекта от антенны.

В направлении полета (или в азимутальном направлении) ширина элемента разрешения определяется шириной радиолуча (рис. 107б). Ширина радиолуча обратно пропорциональна длине антенны (реальной ее апертуре). Более длинные антенны дают лучшее разрешение. Угол раскрытия пучка излучаемой энергии прямо пропорционален также длине волны излучения. Поэтому азимутальное разрешение (R_a) выше для коротковолнового излучения. Как показано на рис. 107б, лепесткообразный радиолуч в ближней области уже, чем в дальней. Отсюда следует, что азимутальное разрешение систем РЛСБО в ближней области лучше, чем в дальней. Его величина представляет собой также функцию наклонной дальности. Два одинаково удаленных друг от друга на местности объекта (А и Б) в ближней зоне РЛ-снимка достоверно разделяются, но в дальней зоне (соответственно В и Г) будут отражены на снимке совместно, так как попадут внутрь одного элемента разрешения. Таким образом, пространственные разрешения в направлении облучения и в азимутальном направлении имеют тенденции к изменениям в противоположные стороны.

Во всех случаях величина элемента разрешения на местности определяется основными и решающими параметрами съемки: высотой полета, длительностью импульса и углом визирования. Параметры современных, наиболее употребительных систем РЛСБО по азимутальному разрешению колеблются от 10 до 30 м в ближней зоне и от 20 до 60 м в дальней. Значения поперечного разрешения лежат между 10 и 30 м.

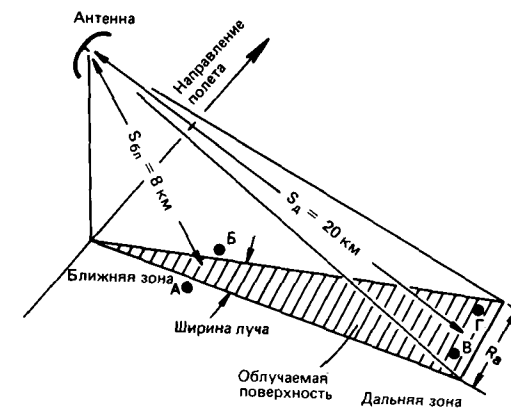


Рис. 107б. Ширина радиолуча и азимутальное разрешение (R_a) радиолокатора с реальной апертурой [15].

4.7.4. Съемочные радиолокационные системы с синтезированной апертурой. **4.7.4.1. Композиция, процесс съемки, построение снимков.** Как указывалось выше, геометрическое разрешение радиолокационных систем с реальной апертурой может быть улучшено путем применения более коротких волн или путем увеличения длины передающей антенны. Однако оба эти пути повышения геометрического разрешения РЛ-снимков порождают новые проблемы. Уменьшение длины волны вызывает снижение количества излучаемой в импульсе энергии.

Значительное (за пределы 5 м) увеличение длины антенны технически ограничено размерами и грузоподъемностью самолета. Эти проблемы были решены разработкой радиолокационных систем с синтезированной апертурой.

Радиолокационные системы с синтезированной апертурой, или РЛСА (SAR — радар с синтезированной апертурой) работают с относительно короткой антенной. Через регулярные промежутки времени она излучает относительно широкий лепесткообразный луч на местность в сторону от траектории полета (рис. 108). При поступательном движении платформы со съемочной системой располагающийся в полосе съемки объект перемещается внутри излучаемого антенной радиолуча (рис. 108, а). Во время полета объект облучается со многих следующих друг за другом позиций в пределах смешивающегося «лепестка» радиоантенны и отраженные от него импульсы энергии принимаются радиоантенной также со многих следующих друг за другом позиций. Вследствие кажущегося перемещения наземного объекта через радиолуч после отражения на объекте происходит изменение частоты и фазы излученных антенной радиопульсов. Эти основанные на эффекте Доплера разностные изменения частоты показаны на доплеровской диаграмме на рис. 108, а. Вследствие движения самолета эта разностная доплеровская частота отраженных от наземного объекта сигналов

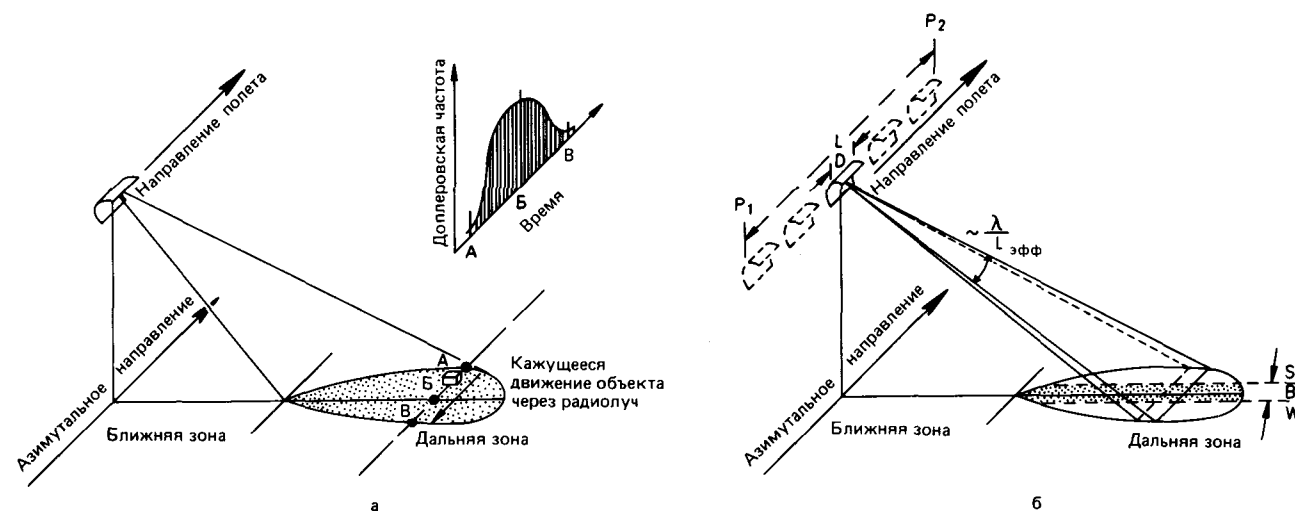


Рис. 108. Принципы и параметры съемки и разрешение на местности радиолокационных систем с синтезированной апертурой (по [337], с изменениями).

а - доплеровское изменение частоты отраженного сигнала обусловлено относительным перемещением объекта на местности через радиолуч; б - разрешение радиолокатора с синтезированной апертурой: L - синтетически удлиненная антенна ($L_{эфф}$), D - действительная длина антенны.

возрастает от некоторого минимума в момент входа в радиолуч в позиции A до максимума в позиции B непосредственно против самолета. Затем частота вновь падает до минимума в позиции B , когда объект выходит из радиолуча. Частота, амплитуда и фазовые характеристики отраженных от объекта радиосигналов за то время, в течение которого объект облучается антенной, накапливаются в электронном устройстве. Каждая точка внутри облучаемого пространства имеет свою, только ей присущую картину изменений доплеровских частот.

Принятые приемником системы РЛСА радиотражения регистрируются совместно с данными об изменениях их частоты и фазы. Интерференционные сигналы каждого радиозеха записываются как первичный материал либо на фотопленку в виде голограммы с помощью электронно-лучевой трубки, либо в цифровой форме на магнитную ленту. После завершения полета, уже на земле, эти данные, сочетающие в себе фазовую характеристику и характеристику наклонной дальности близлежащих импульсов и их отражений, перерабатываются таким образом, что получается радиолокационный снимок. В этом случае «длиной антенны» служит ширина облучаемого на Земле пятна, которая, безусловно, заметно больше, чем физические размеры излучающей и приемной антенн. Длина, таким образом, синтезированной антенны (L) соответствует отрезку траектории между позициями P_1 и P_2 на рис. 108, б. Преобразование первичных съемочных данных РЛСА в радиолокационный снимок осуществляется в случае оптической записи с помощью когерентных оптических процессоров, а в случае магнитной - с помощью ЭВМ и устройств воспроизведения изображений.

4.7.4.2. *Пространственное разрешение систем РЛСА.* При описанном способе регистрации пространственное разрешение определяется эффективной апертурой ($L_{эфф}$), связанной с расстоянием R от траектории выражением ($L_{эфф} = R/L$). Оно улучшается с ростом удаления объекта. Отсюда следует, что азимутальное разрешение составляет примерно половину физической длины антенны независимо от удаления и длины волны используемого излучения [310]. Синтезированная апертура излучающей антенны имеет, таким образом, эффект очень узкого постоянного по ширине в азимутальном направлении радиолуча. Это схематически показано в виде покрытой точками полосы на рис. 108, б.

В специальной разновидности аппаратуры РЛСА, так называемой фокусированной системе, с помощью корректировки смещения фаз достигается дополнительное улучшение азимутального разрешения. Корректировка фазовых смещений компенсирует влияние сферических искривлений волнового фронта путем фильтрации данных о фазах приходящих от наземных объектов отраженных сигналов. Упомянутое выше теоретическое азимутальное разрешение фокусированных систем РЛСА располагается между значениями половины физической длины антенны и половины реальной длины антенны. Это достижимо только в фокусированных системах РЛСА [198].

Так как азимутальное разрешение систем РЛСА не зависит от удаления (R) и длины волны (λ), эти системы особенно ценны для дистанционного зондирования. Поэтому применение радиолокационных систем высокого разрешения возможно и с искусственных спутников Земли. В этих случаях дополнительным преимуществом для достижения высокого



Рис. 109. Параметры съемки одного из залетов РЛСА [228].

разрешения являются постоянство угла визирования с орбиты спутника в комбинации с большой высотой полета и стабильностью съемочной платформы. На самолетах такая высокая стабильность траектории и положения съемочной платформы недостижима. Системы РЛСА на спутниках могут доставлять данные, существенно дополняющие многозональные съемки спутников типа «Лэндсат», поскольку они, с одной стороны, производятся в ином спектральном диапазоне и, с другой - могут осуществляться в таких районах, где облачность и туманы временами или постоянно мешают съемочной аппаратуре спутника «Лэндсат», работающей в более коротковолновых диапазонах (МСС, РБВ, ТМ).

Поскольку азимутальное разрешение радиолокационных систем РЛСА не зависит от длины волн, на которых они работают, в будущем будет возможно применение на самолетах и спутниках «многозональных» радиолокационных систем, одновременно работающих на нескольких различных частотах. Путем взаимно увязанной интерпретации многочастотных радиолокационных отражений от земной поверхности можно достичь более точного определения вещественного состава и состояния горных пород, почв и растительности.

Поперечное (по углу места) разрешение в системах РЛСА, так же как в системах РЛСБО, зависит от длительности импульса зондирующего сигнала.

Разрешение на местности, т.е. пространственная величина элемента разрешения, для большинства применяемых самолетных систем РЛСА может достигать $1,5 \times 1,5$ м. Разрешение на местности испытанной в ФРГ канадской многочастотной фокусированной радиолокационной системы РЛСА-580 достигало, к примеру, значений 5×5 м при высоте полета над местностью 6 км. Масштаб изображений в этом случае составлял 1:135000 [228] (рис. 109).

На природно-ресурсных спутниках система РЛСА в первый раз была испытана в рамках проекта «Сисат». Функционирующая в L-диапазоне система РЛСА «Сисат А» в 1978 г. снимала при высоте орбиты 795 км полосу местности шириной около 100 км с разрешением на местности около 25×25 м. Угол визиро-

вания составлял примерно 23° . На рис. 110 показана часть такого снимка, на котором изображены город Кёльн и его окрестности в масштабе 1:125000.

Тематическое картирование и изучение динамических процессов облегчается, если для интерпретации будут поступать снимки, сделанные в различных длинах волн и с помощью различных систем датчиков. В этой связи важно, чтобы были возможны как оптическая обработка голографически записанных аналоговых данных РЛСА, так и количественная обработка цифровых данных, допускающая геометрические корректировки и изменения масштабов снимков. С одной стороны, это позволит составлять высокоточные радиолокационные мозаики, а с другой - будут возможны поэлементные сравнения данных перекрывающих друг друга съемок РЛСА и многозональных сканеров. Это было, к примеру, опробовано на отдельных тестовых участках для данных «Сисат А» и снимков «Лэндсат» (см. Manual of Remote Sensing, 2 ed., 1983).

В ноябре 1981 г. система РЛСА в L-диапазоне была применена в США во время полета космического корабля «Шаттл». Этой системой SIR-A более 7 ч делались радиолокационные снимки многих районов Земли с высоты 250 км. Угол визирования в этом полете составлял 50° , а ширина полосы съемки - 50 км. Пространственное разрешение снимков SIR-A - примерно 40×40 м. Снимки и их интерпретация показаны на рис. 236-239.

4.7.5. *Геометрические искажения радиолокационных снимков.* Радиолокационные снимки имеют ошибки и искажения, которые определяются, с одной стороны, геометрическими особенностями изображений, а с другой - колебаниями пространственного положения съемочной платформы (самолета или спутника).

Ошибки, обусловленные геометрией РЛ-снимков, связаны прежде всего с тем, что радиолокационная система ошибается в определении времени пробега радиопульсов. Построение изображения основано на наклонной дальности, т.е. на расстоянии между радиолокационной антенной и объектом на земной поверхности. Одинаковые по длине отрезки на местности при развертке по наклонной дальности выглядят неодинаковыми (сравните отрезки A и A_1 , B и B_1 , C и C_1 на рис. 105). Этот эффект в съемочном процессе показан на рисунке путем сравнения горизонтальной и наклонной дальности. При картографической развертке РЛ-снимков необходима геометрическая корректировка, трансформация наклонной дальности в горизонтальную.

Кроме того, на РЛ-снимках имеются искажения, обусловленные характером рельефа, которые проявляются прежде всего при интерпретации снимков горных районов. Они проявляются в том, что сравнимые по своей длине склоны при изменении угла



Рис. 110. Снимок района Кёльна со спутника «Сисат» (НАСА). Масштаб 1:125 000.

визирования передаются на снимке отрезками различной длины. Эти ошибки приводят к описываемым ниже эффектам перспективного сокращения, «дорожки» (layover) и радиотеней. Геометрические искажения сильно зависят от соотношений между углом

склона и углом визирования (углом падения) радиолуча. Эти вызванные топографическими условиями объекта ошибки поддаются корректировке с большим трудом.



Рис. 111. Радарная дорожка как функция угла визирования (Manual of Remote Sensing, 1975).

4.7.5.1. «Дорожка». В связи с особенностями построения РЛ-снимков и их внутренней геометрией прежде всего необходимо рассмотреть так называемый эффект радарной дорожки, который приводит к неправильностям в снимках участков с рельефом средней и сильной расчлененности.

Как было показано, отраженные от наземных объектов сигналы достигают приемной антенны радиолокационной станции в порядке, определяемом их испусканием (рис. 97). Однако, как показано на рис. 111, в районах с высокими горами и крутыми склонами может встретиться ситуация, когда излученный антенной сигнал может достигать вершины склона ранее, чем его подножья. Соответственно отраженные вершиной горы сигналы достигнут катодной трубки и фотоленки ранее, чем сигналы, отраженные от ее подошвы. Поэтому на снимке получается впечатление опрокидывания высоких гор в направлении к антенне и эффект увеличения крутизны склонов. Это можно четко различить на рис. 99, по верхнему краю снимка.

Эффект радарной дорожки есть функция наклонной дальности (т.е. расстояния между антенной и наземным объектом), угла визирования и угла склона. Обусловленные им искажения в ближней зоне съемочной полосы выше, чем в средней ее зоне. Для гор от А до Г на рис. 111 расстояние между антенной и вершиной горы меньше, чем между антенной и подошвой горы. Здесь имеет место радарная дорожка. Для гор Д и Е соотношения на местности передаются на снимке правильно, поскольку расстояние между антенной и основанием горы меньше, чем расстояние между антенной и горной вершиной. Радиозоха от основания горы будет принята радиолокационной системой и попадает на фотоленку раньше, чем радиозоха от ее вершины. Радарная дорожка

вызывает значительные трудности при интерпретации РЛ-снимков горных районов.

4.7.5.2. Перспективное сокращение. Склоны, наклоненные к антенне, по сравнению со склонами, наклоненными от антенны, передаются на РЛ-снимке в «сжатом» виде. На рис. 112 можно видеть, что временной интервал $a'b'$, в течение которого принимается отражение от склона ab , относительно короче, чем временной интервал $b'c'$, невзирая на то, что оба склона имеют одинаковую длину. Поэтому обращенные к антенне склоны кажутся на РЛ-снимке сокращенными.

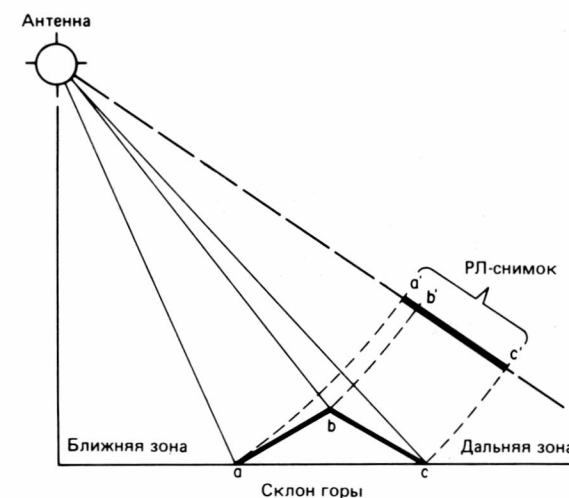


Рис. 112. Перспективное сокращение склона ab , передаваемого на РЛ-снимке в сокращенном ($a'b'$) виде [18].

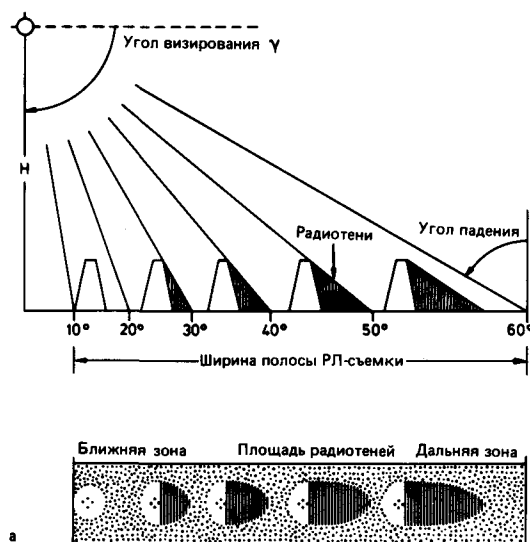


Рис. 113а. Радиотени в ближней и дальней зонах РЛ-снимка [197].

4.7.5.3. Радиотени. Вследствие прямолинейности распространения радиолокационных импульсов в горных районах имеются участки, которых радиоволны не достигают и от которых не может отразиться энергия сигнала. Такие участки на РЛ-снимке кажутся черными и называются радиотенями. Затененные участки отмечаются прежде всего на наклоненных от антенны склонах гор. В районах с очень резким расчленением рельефа радиотени могут отмечаться и на наклоненных к антенне склонах. Рис. 113а и 113б показывают, что величина радиотеней зависит от угла визирования, высоты полета и высоты объекта съемки и увеличивается от ближней к дальней зоне снимка.

4.7.5.4. Геометрические искажения. Для того чтобы получить оптимальное и постоянное качество снимков, необходимо по возможности точно выдерживать запланированные трассы, высоту и скорость полетов. Горизонтальные отклонения от расчетных позиций приводят [61] к нелинейным масштабным искажениям снимка. Вращения съемочной платформы вокруг горизонтальных осей (крены и тангаж) и вокруг вертикальной оси (рыскание на курсе) приводят к отклонениям радиолокационной антенны от ее идеального положения. Повороты вдоль продольной оси самолета (крены) приводят к изменениям распределения энергии внутри зондирующего радиолуча. Для коррекции таких в большинстве случаев неустраняемых движений, особенно при использовании в качестве съемочных платформ самолетов, современные системы РЛСБО оснащаются сервомеханизмами наклона антенны. Более подробное освещение этих проблем можно найти в работе [61].

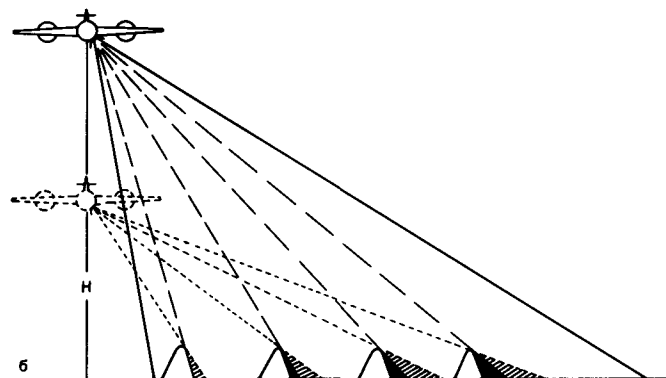


Рис. 113б. Радиотени как функция высоты полета и угла визирования [95].

Влияние бокового сноса с курса, случайных движений самолета, изменений скорости и курса на качество РЛ-снимков показаны на рис. 114.

Поскольку небольшие изменения курса и случайные, обусловленные турбулентными движениями атмосферы, перемещения самолета никоим образом не могут быть исключены, то РЛ-снимки имеют большие или меньшие искажения, координатные и масштабные изменения. Чтобы снизить ошибки, связанные с изменениями курса, съемочные самолеты оснащаются инерционными навигационными системами. Для того чтобы точно определить позицию самолета во время съемки и иметь возможность ввести геометрические корректировки в съемочные данные, приме-

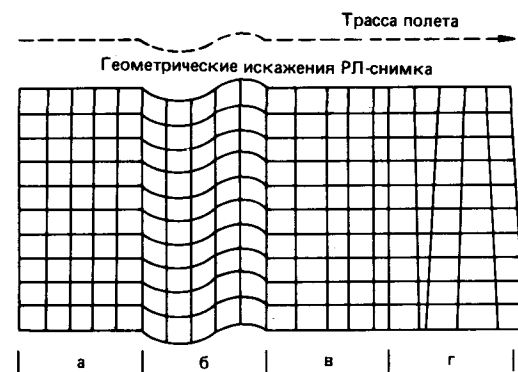


Рис. 114. Геометрические искажения РЛ-снимков, обусловленные движениями съемочной платформы. (Manual of Remote Sensing, 1975).

а — идеальная картографическая передача; б — отклонения от курса; в — отклонения по тангажу и изменения скорости полета; г — снос с направления полета.

няются также доплеровские и радионавигационные системы. Искажения снимков, обусловленные отклонениями в полете, и методы корректирования РЛ-снимков обсуждаются в работе [61].

4.7.6. Радиолокационные мозаики (фотосхемы). Радиолокационные мозаики или фотосхемы монтируются из прилегающих друг к другу или перекрывающихся полос радиолокационных снимков. Внутренняя геометрия и точность определения положения объектов и точек местности на мозаике зависят от качества отобранных для монтажа мозаики снимков и от процесса ее изготовления. При монтаже мозаики ближние зоны РЛ-снимков обычно вырезаются, поскольку они несут наибольшие искажения. Простейший метод монтажа мозаики состоит в возможно более точном совмещении средних и дальних зон прилегающих полос радиолокационной съемки. При возможности (в условиях существенного перекрытия съемочных полос) должны применяться только дальние зоны снимков, так как на них пространственные ошибки минимальны и величина радиотеней на соседних снимках примерно одинакова.

Для общей ориентировки следует использовать речную сеть. При составлении уточненной мозаики должны использоваться координатные точки, опознаваемые по мелкомасштабным картам, если они имеются. Для монтажа высококачественных мозаик необходимо достаточное взаимное перекрытие соседних полос съемки. Кроме того, следует отбирать полосы съемки с параллельных залетов и одинакового направления визирования для того, чтобы радиотени прилегающих полос имели одно и то же направление. Если прилегающие полосы сняты с противоположным направлением облучения, то это вызывает серьезные затруднения при монтаже. Здесь может быть легко получено обращенное представление о рельефе (так называемая топографическая инверсия). Если применяются неотректированные съемочные данные, то для составления радиолокационных мозаик в горных районах предпочтительны снимки в развертке по наклонной дальности, так как на снимках в картографической развертке эффекты радарной дорожки вызовут особые трудности при геологической интерпретации. В слабо расчлененных районах, где радарная дорожка почти или вовсе не встречается, для составления мозаик предпочтительны снимки в развертке по горизонтальной дальности. Обсуждение вопросов характера исходных материалов и процессов составления мозаик для геологических целей можно найти у Льюиса и Мак-Доналда [180].

Для составления уточненных радиолокационных мозаик необходимы данные о положении самолета при съемке, которые могут быть получены инерционной навигационной системой Шоран или с помощью сети наземных контрольных пунктов. При монтаже такой мозаики отдельные полосы съемки формиру-

ются в геодезически проконтролированную сеть. Проблемы и методы составления уточненных радиолокационных мозаик описаны в литературе [303, 175], причем в последней работе исследованы взаимосвязи между картографической точностью мозаики и густотой и распределением точек геодезического контроля, а также методы составления мозаик. Возможности сопоставления полос РЛ-съемки по блокам исследованы и описаны [61]. По данным Леберля [175], средние ошибки уточненных радиолокационных мозаик колеблются от ± 150 до ± 300 м в зависимости от качества снимков и методов составления мозаики. На неуточненных РЛ-мозаиках искажения и ошибки могут достигать первых километров.

Радиолокационные мозаики представляют собой важный и удобный исходный материал для составления предварительных топографических и тематических карт, прежде всего для районов, где вследствие постоянной и сильной облачности невозможны аэрофотосъемки (к примеру, над тропическими дождевыми лесами) и где затруднено наземное картирование. Поэтому в 1970-е гг. большие объемы радиолокационной съемки были проведены во многих странах Южной и Центральной Америки, Африки и в Индонезии. Результатами этих съемок были уточненные или полууточненные радиолокационные мозаики в масштабе 1:250 000. Наиболее известен проект РАДАМБразил, который был начат с бассейна Амазонки и распространен затем на другие части Бразилии, лежащие за пределами зоны дождевых лесов [303]. Радиолокационные съемки позволяют относительно быстро и дешево получить на большие районы радиолокационные мозаики, по точности соответствующие топографическим картам масштабов 1:100 000–1:50 000. Кроме того, радиолокационные мозаики могут непосредственно применяться как карты среднего или мелкого масштаба, хотя во многих случаях они обладают более высокой точностью, чем последние.

4.7.7. Радиолокационная стереосъемка (съемка, интерпретация). К настоящему времени опыт тематической интерпретации радиолокационных стереоснимков еще очень мал. Однако кажется ясным, что стереоскопическое изучение снимков РЛСБО и РЛСА улучшит возможности интерпретации и картирования и позволит делать количественные измерения (относительных высот, углов склонов). Как было показано [149] при сравнительном изучении РЛ-снимков тропических районов Колумбии, интерпретация стереоснимков прежде всего в районах со слабо расчлененным рельефом по сравнению с моноскопической интерпретацией существенно повышает точность составления карт. Парри [228] установил, что при картировании эрозионной сети в залесенных районах Канадского щита по стереоскопическим РЛ-снимкам

прирост информации может составить 19% по сравнению с моноскопической интерпретацией снимков этого же района.

Для того чтобы получить стереоскопическое изображение рельефа по двум РЛ-снимкам, необходимо их взаимное пространственное перекрытие¹. Кроме того, должны быть сравнимыми качество, освещение объектов, фототон и структура обоих изображений. В этих аспектах качество стереопар определяется следующими основными параметрами: углом визирования, углом раствора радиолуча и типом территории [173].

Как показано на рис. 115а и 115б, необходимое для стереоинтерпретации перекрытие РЛ-снимков одного участка может быть достигнуто различными способами [173, 150]. Съемка поверхности с противоположащих позиций создает трудности при интерпретации прежде всего горных районов, поскольку один и тот же участок при съемке облучается в противоположных направлениях. Склоны, затененные на одном снимке, будут освещенными на другом. Эти различные условия освещенности затрудняют получение стереоизображения участка, интересующего интерпретатора. Для интерпретации гораздо лучше, когда оба перекрывающихся РЛ-снимка получены при одинаковом направлении наблюдения (облучения), с двух параллельных залетов или с различных высот. В таком случае ориентировка теней на обоих снимках одинакова. Имеются также положительные примеры получения пригодных для стереоизучения снимков с залетов, ориентированных под углом друг к другу.

Наибольшее количество имеющихся к настоящему времени опытов осуществлено по схеме (вверху на рис. 115, б), в которой один и тот же участок снимается с двух параллельных залетов с одним и тем же направлением облучения. Условия съемки выбираются таким образом, чтобы обеспечить 60%-ное взаимное перекрытие двух соседних полос съемки. Отметим, что для непрерывного моноскопического перекрытия территории соседними залетами необходимо пространственное перекрытие в равнинных районах от 10 до 20%, а в горных районах до 30%, с тем чтобы компенсировать ошибки аэронавигации и искажения снимков. Вследствие большего пространственного перекрытия стереосъемка требует меньшего расстояния между соседними залетами. Леберль [173] считает, что затраты полетного времени и соответственно стоимость съемки приблизительно удваиваются.

4.7.8. Критерии геологической интерпретации радиолокационных снимков. 4.7.8.1. Общие положения. Основными критериями геологической интерпрета-

¹ Прежде всего, эти два снимка должны быть сделаны из разных точек пространства.—Прим. перев.

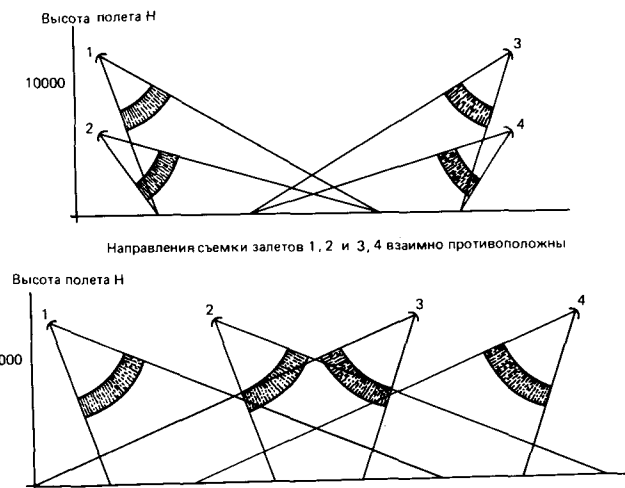


Рис. 115а. Возможности радиолокационной стереосъемки (из [61], по [173]).

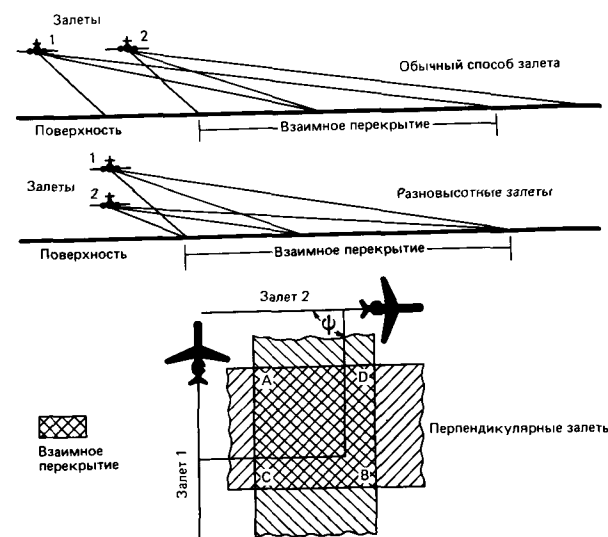


Рис. 115б. Возможности радиолокационной стереосъемки [93].

ции и картирования по радиолокационным снимкам являются: фототон и фоторисунок изображения, рельеф, гидрографическая сеть, растительность, контур и форма, топографическое положение. Все эти критерии применяются также при геологическом дешифрировании аэрофотоснимков для опознавания и разграничения литофациальных единиц различного типа и при картировании тектонических структур. Для геолога, знакомого с интерпретацией аэрофотоснимков, дешифрирование радиолокационных снимков не представляет принципиальных трудностей. При использовании перечисленных критериев он должен лишь отдавать себе отчет в том, что принципы и

параметры аэрофотосъемки и радиолокационной съемки различны в своих основах и поэтому ландшафт на радиолокационном снимке отражается иначе, чем на аэрофотоснимке. Прежде всего фототон и фоторисунок на РЛ-снимках обусловлены иными причинами, чем на аэрофотоснимках, и поэтому имеют иное значение для интерпретации. Интерпретатор должен знать как принципы съемки радиолокационными бокового обзора, так и влияние съемочных параметров и физических параметров объектов на передачу снимаемой территории на РЛ-снимках (см. предыдущие разделы).

4.7.8.2. Фототон радиолокационных снимков. Фототон, которым передается поверхность Земли на РЛ-снимках, определяется интенсивностью эхосигнала. Как было описано в предыдущих разделах, определяющее влияние на отражение радиосигналов от земной поверхности и объектов на ней оказывают шероховатость поверхности и диэлектрические ее свойства, угол падения радиолуча и его поляризация. Как правило, отражение однородно поляризованного сигнала (например, ГГ) наиболее сильное. Именно его интенсивность и динамический диапазон обуславливают большую часть изменений фототона снимка по сравнению с уровнем и динамическим характером деполаризованного сигнала. Соответственно тонировка перекрестно поляризованных РЛ-снимков более вялая и картинка более зернистая, чем в случае однородно поляризованных сигналов.

Точная идентификация почв и горных пород по фототону на РЛ-снимках в настоящее время невозможна, поскольку фототон литологических и почвенных единиц определяется прежде всего их микро-рельефом и влажностью. Различные породы и почвы могут передаваться на РЛ-снимках одинаковым фототонном, коль скоро они имеют схожие характеристики поверхности. Так, выходы ультраосновных пород и гранитов на РЛ-снимках аридных районов могут иметь одинаковый светло-серый фототон. Для того чтобы определить литофациальный состав откартированных по РЛ-снимкам единиц, требуется дополнительная информация. Важнейшими являются (как и при интерпретации аэрофотоснимков) рельеф, характер эрозионной сети, фоторисунок, наличие или отсутствие слоистости и топографическое положение литофациальной единицы в рельефе. Так, граниты можно отличить от ультрабазитов по формам их выветривания, однако они далеко не так просто идентифицируются на РЛ-снимке. Решающее значение имеет прежде всего сопоставление с результатами полевых наблюдений.

Различия в характере растительности на разных единицах ландшафта (тип, густота, распределение, высота) проявляются на РЛ-снимках через различия фототона и фоторисунка. Растительность отражает преимущественно коротковолновое радиоизлучение

(Ка- и Х-диапазонов), так как поверхность крон для излучения выступает в качестве шероховатой поверхности и действует как диффузный отражатель. Это приводит к множественным отражениям на поверхности крон и в верхней части растительного покрова, обуславливающим деполаризацию отраженного излучения. Деполаризованное излучение принимается в ГВ-виде. На РЛ-снимках с ГВ-поляризацией тональная расчлененность участков, покрытых растительностью, существенно выше, чем на снимках с ГГ-поляризацией. Поэтому снимки с ГВ-поляризацией более удобны для изучения и картирования залесенных участков, в том числе и для изучения геологического строения субстрата.

4.7.8.3. Фоторисунок радиолокационных снимков. Особенности фоторисунка или структуры изображения (тонкая и мелкая его структура) встречаются на РЛ-снимках в различном объеме и имеют различный характер. Они отражают регулярно повторяющиеся формы прежде всего микрорельефа, реже мезорельефа, а также закономерно повторяющиеся особенности эрозионной сети. Обусловленные рельефом различия фоторисунка надежно маркируют смену характера горных пород и поэтому являются важным различительным и опознавательным признаком при литофациальном картировании. Структурные особенности ландшафта на РЛ-снимках могут также быть обусловлены закономерностями в пространственном расположении разрывных структур (их направлением, отстоянием друг от друга, взаимным соподчинением различных систем). Структурные особенности ландшафта обуславливаются также характером выветривания и эрозионными бороздами между отдельными круто- или пологозалегающими слоями. На залесенных территориях различия фоторисунка тесно связаны с различиями в характере растительности (древесной, кустарниковой, травянистой, их видами, густотой, высотой, пространственным распределением деревьев или кустов). В районах с естественной растительностью смена ее характера на различных единицах ландшафта часто совпадает со сменой условий на подстилающей поверхности (почв, горных пород, тектонических структур, гидрогеологических условий). Разделение изображения растительных единиц, маркирующих структуру и анализ их пространственного распределения на заснятых РЛ-съемкой территориях, является важным вспомогательным средством при геологическом изучении подстилающей поверхности.

На РЛ-снимках тонкая и мелкая структура изображения единиц ландшафта часто сопровождается также и изменениями фототона, прежде всего частоты и интенсивности изменений фототона внутри отдельных единиц. Важно также отметить, что характер и частота изменений фототона зависят от масштаба РЛ-снимков. Они определяются для каж-

дого снимка, во-первых, величиной элемента пространственного разрешения, а во-вторых, площадью участка, облучаемого в каждый момент РЛ-съемки. Кроме того, количество отражающих площадок, а с ним и количество соответствующих наземных объектов, а также конфигурация рельефа, отражающего радиозо, изменяются с изменениями условий съемки (длины волны, угла визирования) и разрешающими характеристиками применяемой аппаратуры. Сообразно с изменениями разрешения и масштаба различия в фототоне и фоторисунке РЛ-снимка изучаемой площади могут иметь совершенно различные причины. Это необходимо обязательно учитывать при тематической интерпретации РЛ-снимков.

4.7.8.4. Форма объектов на радиолокационных снимках. Геологические объекты можно также опознавать на РЛ-снимках по их контурам и очертаниям на поверхности. К числу наиболее характерных принадлежат, например, аллювиальные наносы, вулканы, лавовые потоки, дайки, речные террасы, разрывы, системы трещин, складчатые структуры. Подчеркнутая передача рельефа на РЛ-снимках, сделанных при соответствующем направлении съемки, способствует опознаванию на снимках перечисленных выше форм.

5. ОБЩАЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

5.1. Введение

Геологическая интерпретация материалов дистанционных съемок состоит из опознавания, ограничения, идентификации и классификации литологических единиц и тектонических структур, а также из разграничения рыхлых и коренных пород и участков с различными почвенными и поверхностными условиями и с различными гидрогеологическими особенностями. Классические материалы для геологического дистанционного зондирования – это черно-белые и цветные снимки. Для геолога, работающего с аэроснимками, критериями опознавания, идентификации и классификации литофациальных единиц и тектонических структур и определения характера геологического субстрата являются изменения фототона или цветовых оттенков, различия в фоторисунке и характере рельефа, изменения характера растительности и эрозивной сети совместно с пространственным распределением и взаимосвязями объектов и единиц земной поверхности. Важнейшее значение для фотогеолога при интерпретации снимков имеют интерпретация всего комплекса съемочных данных и ее сопоставление с результатами дешифрирования более ранних материалов съемок и с полевыми наблюдениями.

Качество дистанционного картирования зависит, с одной стороны, от качества обрабатываемых материалов и, с другой – от способностей интерпретатора к наблюдениям и осмыслению полученных данных, но прежде всего от его опыта. Способности интерпретатора важны потому, что одинаковые горные породы и одинаковые тектонические структуры геологического субстрата в различных ландшафтных условиях даже в пределах одного региона могут передаваться резко различными поверхностными феноменами. Поэтому применимых повсюду интерпретационных ключей для картирования определенных пород и почв или определенных тектонических структур по материалам дистанционных съемок не существует. Каждый ландшафт имеет собственную историю развития, собственные экологические особенности и резко изменчивые формы проявления одинаковых природных объектов и единиц в различных условиях

и в разные времена года. В каждом новом районе работ интерпретатор должен прежде всего изучить встреченный им ландшафт и свойственные ему локальные и региональные ландшафтные явления, имеющие геологическое значение и распознаваемые на применяемых материалах съемок, и выявить те феномены, которые можно использовать как прямые или косвенные критерии для расчленения, разграничения и классификации, т. е. как индикаторы геологических объектов. Это касается как обычного картирования, так и интерпретации результатов съемок новейшими системами дистанционного зондирования (РБВ, МСС, радиолокационными), поскольку визуальная интерпретация в практике изучения аэрофотоснимков и других материалов дистанционных съемок, как и прежде, стоит на первом месте.

Во многих случаях интерпретатор работает непосредственно с тем материалом, который ему предоставлен. Однако интерпретация облегчается в том случае, когда на материалах съемок природные объекты и единицы ландшафта, важные для интерпретатора в рамках поставленной перед ним задачи, дифференцированы, контрастированы и точно привязаны к местности. Такая оптимизация съемочных материалов осуществляется, с одной стороны, путем выбора техники съемок, соответствующей целям интерпретации данного объекта, и, с другой стороны, путем обработки снимков, предваряющей интерпретацию. Таким образом, кроме рассмотренного выше выбора применяемой съемочной системы и соответствующих спектральных зон важно выбрать и надлежащие способы обработки снимков. В настоящее время существуют фотографические, оптические и электронные способы обработки, преобразующие в новую форму первичные материалы съемки, контрастирующие и делающие более ясным содержание снимков с тем, чтобы облегчить интерпретацию. В связи с большим объемом данных, поставляемых многозональными съемками, прежде всего спутниками «Лэндсат», важное значение для обработки снимков приобретают счетно-решающие устройства. На них осуществляются: геометрическая и радиометрическая коррекция первичных съемочных данных; более контрастное

отображение содержания снимков; автоматизированное расчленение и классификация съемочных данных; сопоставление данных, получаемых разными съемочными системами; представление в виде изображений различных результатов обработки. Применение ЭВМ возможно в том случае, когда данные съемок записываются в цифровой форме на магнитную ленту, как это делается ныне в сканирующих и радиолокационных системах. Кроме того, и аэрофотоснимки, и другие изображения могут быть считаны, преобразованы в цифровую форму и подвергнуты электронной обработке. Количественная обработка данных обеспечивает также интерпретатору возможность быстрого извлечения информации из материалов съемок. ЭВМ быстро и целенаправленно извлекают данные со снимков и обрабатывают большие объемы материалов.

Обработка данных образует внутри дистанционного зондирования несколько обособленную область применения и исследования. Здесь будут только вкратце раскрыты некоторые наиболее применяемые в геологических исследованиях методы и задачи обработки снимков и переработки данных. Более подробное рассмотрение теоретических основ обработки изображений, отдельных методов, возможностей и ограничений их применения можно найти в специальных исследованиях, частично цитированных в тексте, частично помещенных в списке литературы. Полный обзор и обсуждение темы можно найти в Manual of Remote Sensing, 2nd ed., 1983. Принципиальная схема аналоговой и цифровой обработки данных при дистанционном зондировании помещена на рис. 120.

5.2. Фотографические способы

5.2.1. Введение. С целью повышения пригодности съемочных материалов для интерпретации их содержательная часть может быть контрастирована с помощью сравнительно простых фотографических способов обработки. Описанные ниже фотографические способы достаточно дешевы. Они могут быть применены в любой фотолаборатории. Из этого достоинства, однако, вытекают и недостатки, заключающиеся в том, что фотографические результаты обработки, как правило, точно не воспроизводимы и носят сугубо качественный характер. Кроме того, при многократном перекопировании снимков происходит заметная потеря информации.

5.2.2. Контрастирование. Участки фотоизображения со слабыми тоновыми различиями могут быть представлены в более контрастной форме. Это достигается следующим путем: съемочный материал копируют на контрастном негативном материале, проявляют в жестком режиме и печатают на контрастной фотобумаге. Этот способ приводит, однако, к существ-

ственным потерям информации на участках с высоким и средним расчленением фототона. В литературе описано [21] улучшение контрастов снимков «Лэндсат» путем варьирования контрастностью фотоматериалов, свойствами проявителя и временем проявления при изготовлении черно-белых и цветных фотоконверсий. Такие результаты фотографического контрастирования, отвечающие количественной «растяжке» фототона, получаются без больших затрат. Как подчеркивают авторы, применение контрастированных копий многозональных снимков «Лэндсат» приводит к лучшему цветовому насыщению ложноцветных и композитных изображений, получаемых при последующей обработке. Этот же способ применяют при изготовлении фотомозаик для сглаживания контрастных различий соседних снимков «Лэндсат». Результаты фотографического контрастирования слишком вялых или, наоборот, слишком плотных негативов снимков «Лэндсат», нередко поставляемых Центром распространения данных ЭРОС и другими центрами, описывает также Сабинз [37].

5.2.3. Цветовое контрастирование. Возможности интерпретации цветных снимков во многих случаях повышают путем фильтрации некоторых цветов с помощью цветных светофильтров, что приводит к более контрастному изображению определенных сюжетов. После такого разделения цветов полученные материалы могут быть представлены в черно-белом изображении в виде копий или увеличенных отпечатков.

5.2.4. Маскирование, подчеркивание границ, псевдорельефные изображения. Эти методы применяются в тех случаях, когда съемочные материалы, богатые контрастами, с тонким расчленением фототона должны быть представлены в более мягкой форме. С этой целью обрабатываемый негатив точно совмещают с мягким, недодержанным позитивом того же снимка и с них делается копия. При этом светлые участки негатива совмещаются с темными участками позитива и наоборот, и общий контраст снимка существенно снижается.

Если позитив и негатив несколько сместить перед копированием по вертикали или по горизонтали, то это приведет к образованию темных или светлых полос вдоль границ участков с резкими переходами фототона. Картинка приобретает от этого псевдорельефный характер (ср. рис. 116а и 116б). Если негатив и позитив сместить друг относительно друга по горизонтали, то рельефными линиями подчеркиваются вертикальные границы фототонов. Если их сместить по вертикали, то будут подчеркнуты горизонтальные границы. Такая техника — смещение позитива — подчеркивает или подавляет определенные элементы изображения. Псевдорельефные изображения наиболее пригодны для структурного анализа и кар-

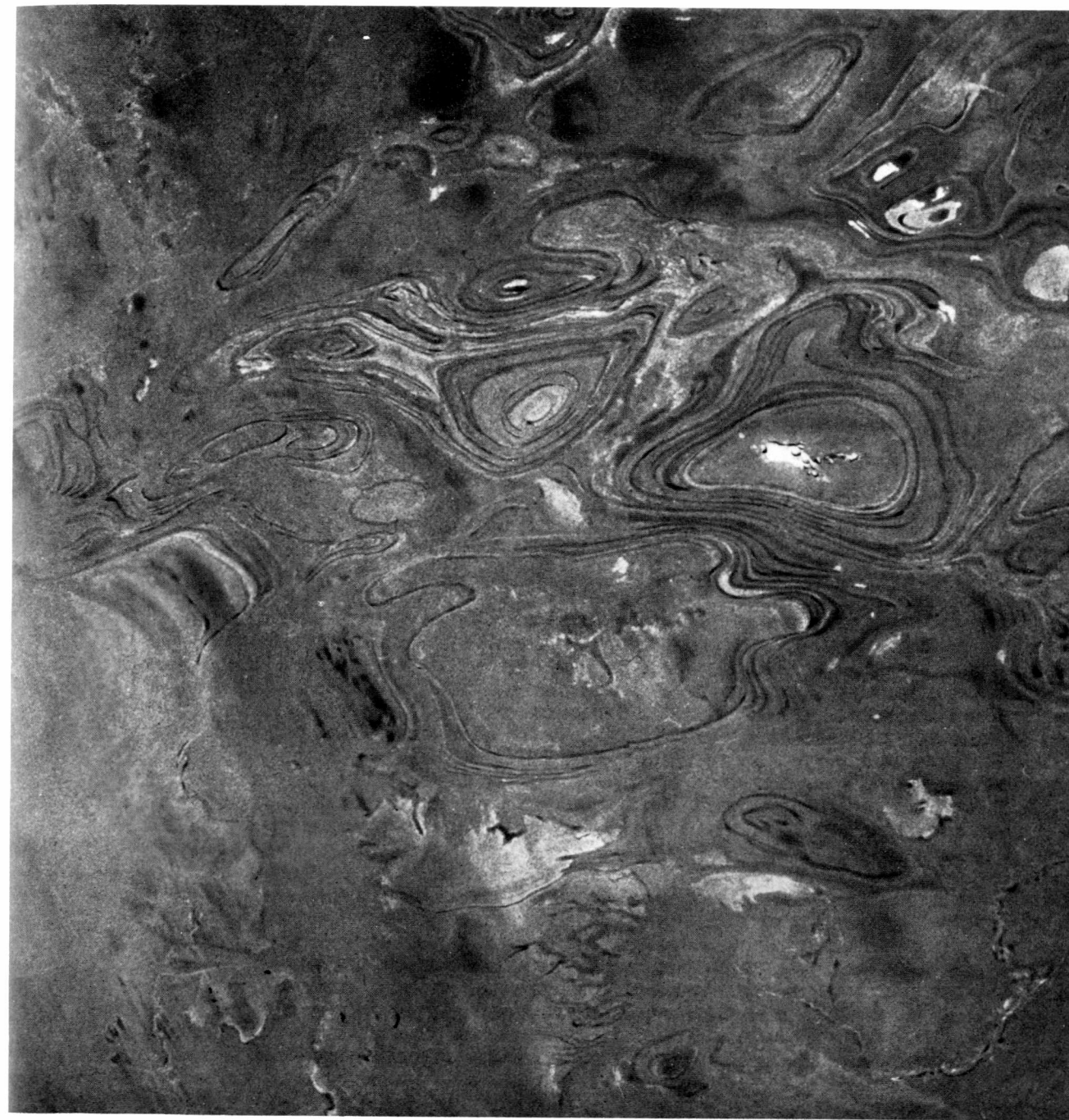


Рис. 116а. Снимок района Тидикельт в Алжире со спутника «Аполлон-9». Различия фототона маркируют чередование пластов и слоистость (AS 9-3390 NASA).

тирования тектонических элементов по снимку. Эти методики уже описаны [318, 172]¹.

¹ См. также Геологическое изучение Земли из космоса. — М.: Наука, 1978. — Прим. перев.

5.2.5. Цветовые преобразования. Многозональные снимки в видимом диапазоне спектра, сделанные на определенный район, содержат, как известно, три черно-белых узкозональных снимка в синем, зеленом и красном цвете. Применив соответственно синий,



Рис. 1166. Контрастированное изображение слоистости и тектонического строения по тому же снимку (подчеркивание границ, псевдорельеф).

зеленый и красный светофильтры, с них можно изготовить негативные копии, а с помощью желтого, пурпурного и синего фильтров (дополнительные цвета) — диапозитивные копии. Суммируя эти изображения на просвет или на цветную фотобумагу в единую картину, можно получить изображение заснятой местности в естественных цветах. Уже таким путем могут быть повышены возможности интерпретации снимка, так как ландшафтные единицы на цветном снимке передаются более дифференцированно, иногда и более контрастно, и легче воспринимаются глазом, чем на черно-белом изображении.

Для обработки снимков представляет интерес возможность в процессе построения суммарного изобра-

жения применить иные светофильтры или же изменить их порядок¹. Таким путем можно добиться усиления определенного цвета или получить оптимальное цветоразделение, которое может привести к более контрастному воспроизведению требуемой части информации снимка. В ряде работ дана характеристика соответствующих фотографических способов улучшения возможностей интерпретации снимков «Лэндсат» [151, 136].

Для обработки многозональных аэрофотосним-

¹ В советской литературе такие изображения называют ложноцветными, в английской — false color composite image. — Прим. перев.

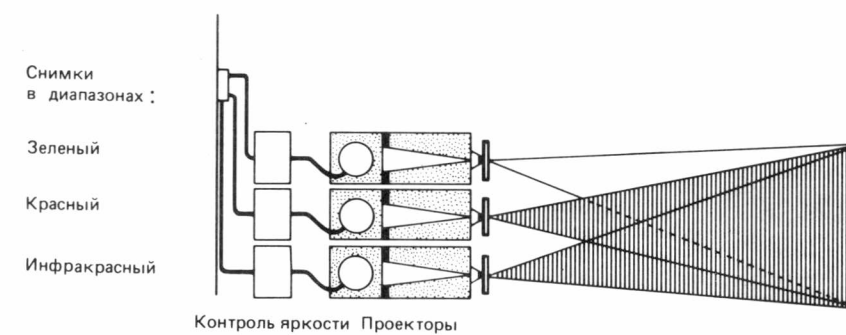


Рис. 117а. Схема мультиспектрального проектора [40].

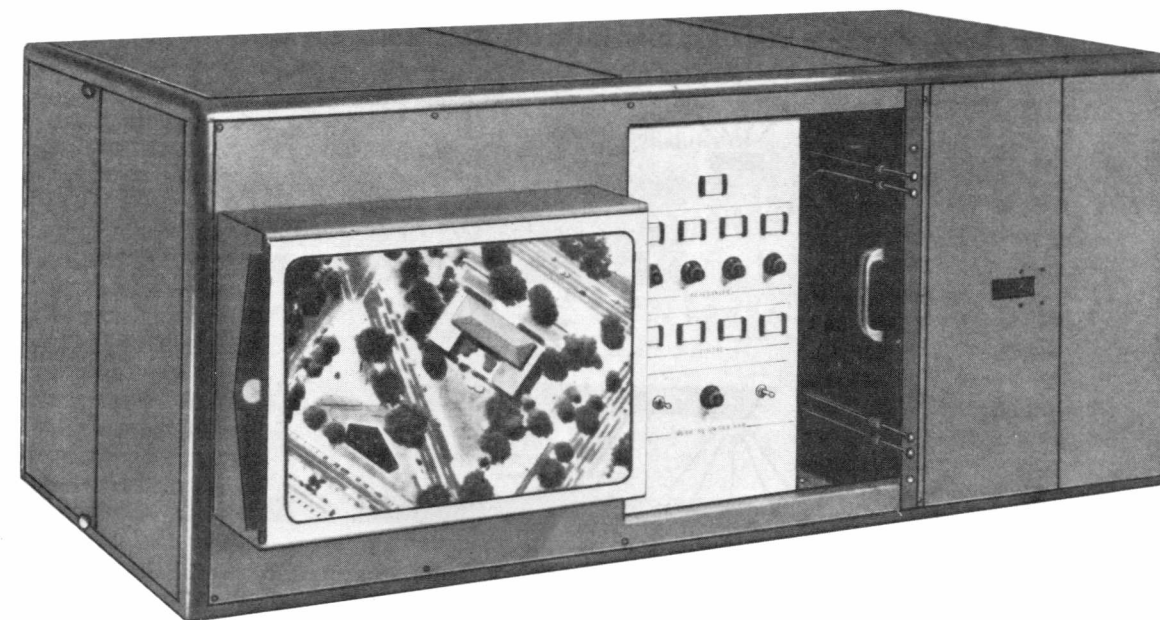


Рис. 1176. Мультиспектральный проектор ACVS 60/70 (Additive Color Viewer Series) фирмы Spectral Data (из проспекта фирмы).

ков или снимков «Лэндсат» разработаны специальные мультиспектральные проекторы (рис. 57, 117а и 1176). Они обеспечивают точное совмещение до четырех узкозональных снимков, обычно в формате 70 мм. Черно-белые диапозитивы узкозональных снимков проецируются на экран. При таком аддитивном (суммированном) воспроизведении различия в плотности фототона черно-белых узкозональных снимков преобразуются в различия цвета. Воспроизведение изображений возможно в натуральных естественных цветах, в спектрально-зональном виде (с включением ближнего инфракрасного диапазона) или в иной комбинации ложных цветов. Оптимальный контраст интересующих интерпретатора объектов на снимке достигается варьированием узкозональными негативами, светофильтрами и интенсивностью освещения каждого из каналов при постоянном контроле

за качеством изображения по экрану. С помощью мультиспектральных проекторов могут быть представлены в более контрастной форме распространение определенных горных пород или почв и различия в увлажненности почв или в типах растительности по сравнению с черно-белыми узкозональными изображениями, заложенными в проектор. На композитных изображениях могут быть также более ярко отражены тектонические структуры и тектонические аномалии, неразличимые на черно-белых узкозональных снимках.

5.2.6. Эквиденситный способ. Для решения многих задач геологической интерпретации возникает необходимость опознать участки изображения с одинаковой яркостью фототона, ограничить их и представить их распространение на площади снимка. Ин-

Схема обработки для практического применения:

I. Черно-белые эквиденситные изображения

С негатива или позитива изготавливаются эквиденситы I или II порядка для одной или нескольких ступеней фототона. Копированием на обычные черно-белые фотоматериалы получаются черные поверхности или линии на белом фоне.

II. Цветные эквиденситные изображения

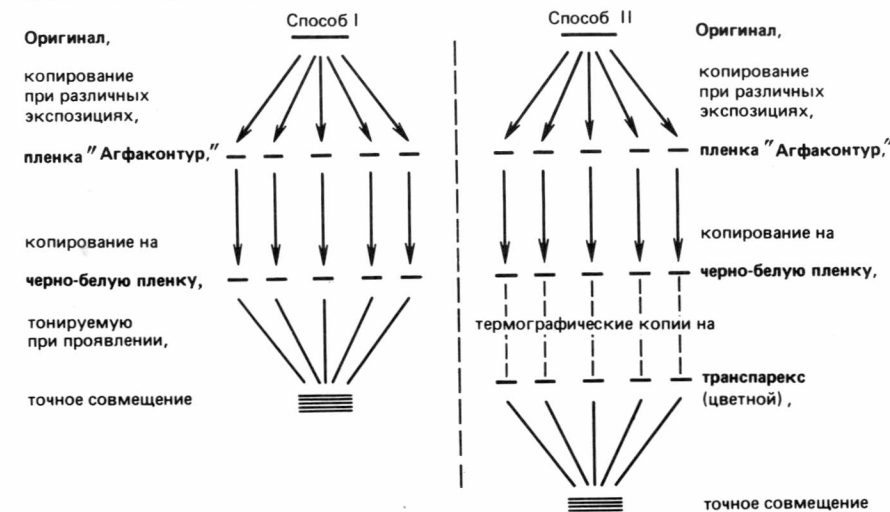


Рис. 118а. Схематическое представление фотографического эквиденситного метода «Агфаконтур» (из проспекта фирмы Agfa-Gevaert).

терпретатору также бывает важно представить ступени тонального расчленения снимка в более дифференцированном виде, чем на первичном материале. Это касается, например, обработки и интерпретации тепловых сканерных снимков, где вариации фототона отражают изменения температуры излучения и поверхностной температуры воды, почв и горных пород; или же расчленения аэрофотоснимков или сканерных узкозональных снимков на определенные ступени густоты фототона (плотности изображения), индицирующие выходы определенных горных пород, почв, растительных сообществ, а также, например, участки с одинаковой глубиной воды или содержа-

нием в ней взвешенного материала (мути).

Участки с одинаковой плотностью фототона на фотографических материалах называют эквиденситами. С помощью метода, разработанного фирмой Agfa, их можно представить в виде изображения путем копирования на пленку «Агфаконтур». При копировании фотоснимков на эту пленку освещение эмульсии вызывается только определенной плотностью фототона. Участки с более высокой или с более низкой плотностью фототона остаются черными. Положением выявляемой ступени плотности фототона можно управлять, меняя время выдержки (ср. рис. 118б и 118в). Ширина эквиденситы (т. е. узкая

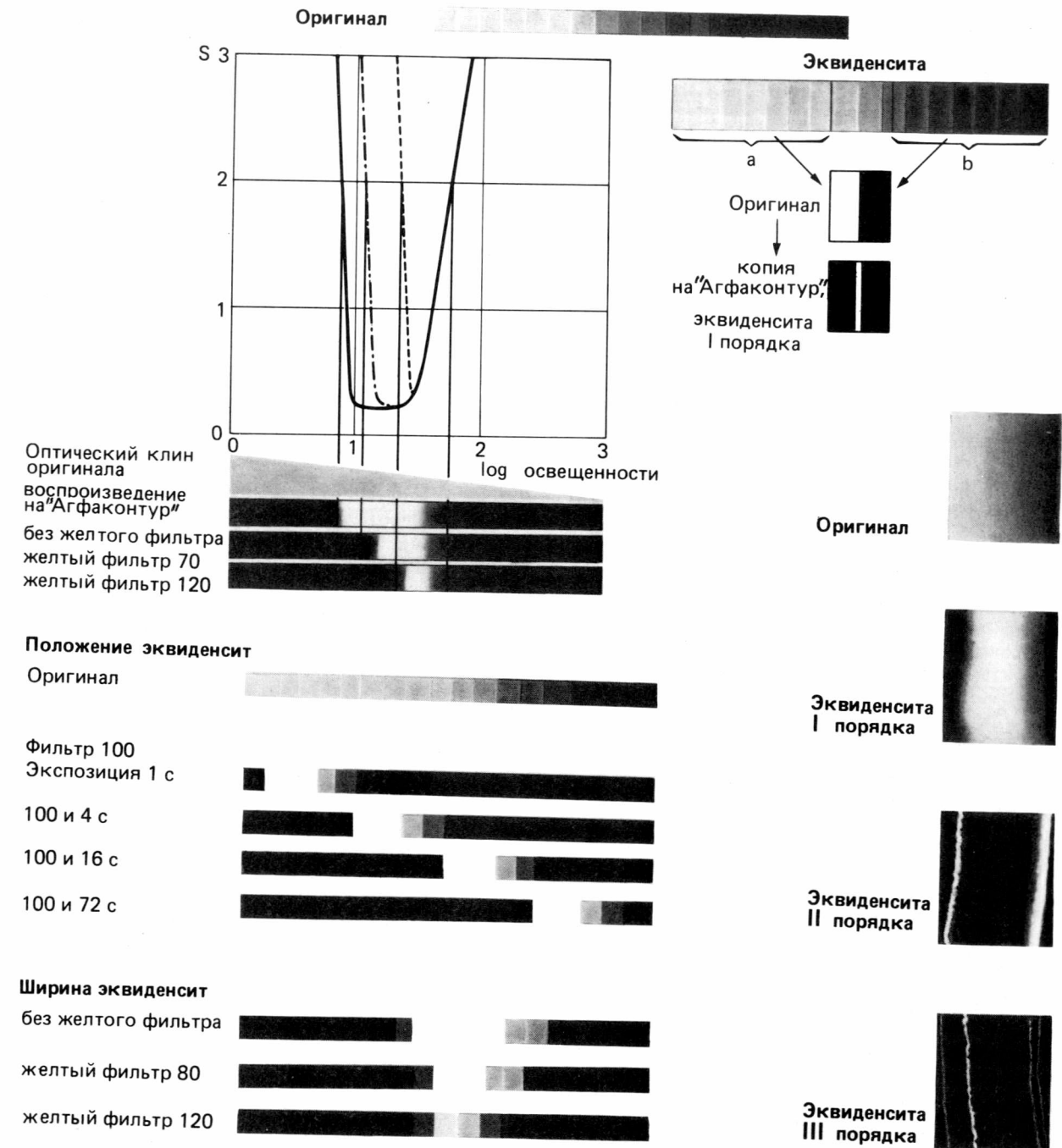


Рис. 118б. Эквиденситы первого, второго и третьего порядков.

или широкая полоса плотности фототона, проявляемая на снимке) определяется цветом и плотностью фильтра. Желтый светофильтр сужает эту ширину, причем, чем плотнее фильтр, тем уже становится эквиденсита. Пурпурный фильтр, напротив, расширяет эквиденситу.

Одна изготовленная копия содержит информацию об одной ступени плотности фототона и показывает распространение именно этой плотности фототона на снимке. Копируя отдельные срезы плотности через цветные фильтры на цветную фотобумагу или фотопленку (т. е. суммируя эквиденситы), можно выразить

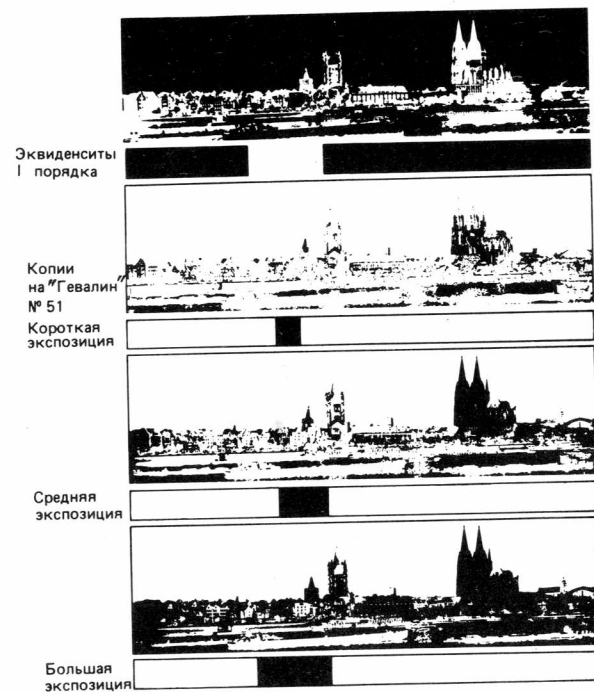


Рис. 118в.

степени почернения всего снимка в цветовых тонах. Ступени черно-белого фототона кодируются, таким образом, цветом.

Если эквиденситу первого порядка повторно скопировать на пленке «Агфаконтур», то мы получим эквиденситу второго порядка. При этом получаются тонкие линии или контуры, которые, как на штриховом рисунке, ограничивают с обеих сторон белые участки с одинаковой плотностью фототона (рис. 119). Построение эквиденсит второго порядка представляет интерес, например, при обработке тепловых сканерных снимков, где эквиденситы второго порядка в виде контурных линий ограничивают площади с одинаковым фототонам, т.е. участки с одинаковой температурой поверхности или излучения, имея, таким образом, значение изотерм.

Полное описание метода «Агфаконтур» содержится в брошюре фирмы Agfa-Gevaert. Результаты применения способа Агфаконтур для структурного анализа на примере географической интерпретации дал Вечорек [325]. Описано также применение фотографического расчленения плотности для выявления изменений в растительном мире [40]. Эквиденситы второго порядка в практике геологического картирования впервые применил Пёльман (см. [182]). Для района Тибести, покрытого многими снимками «Лэндсат», он построил цветную картину интерпрета-

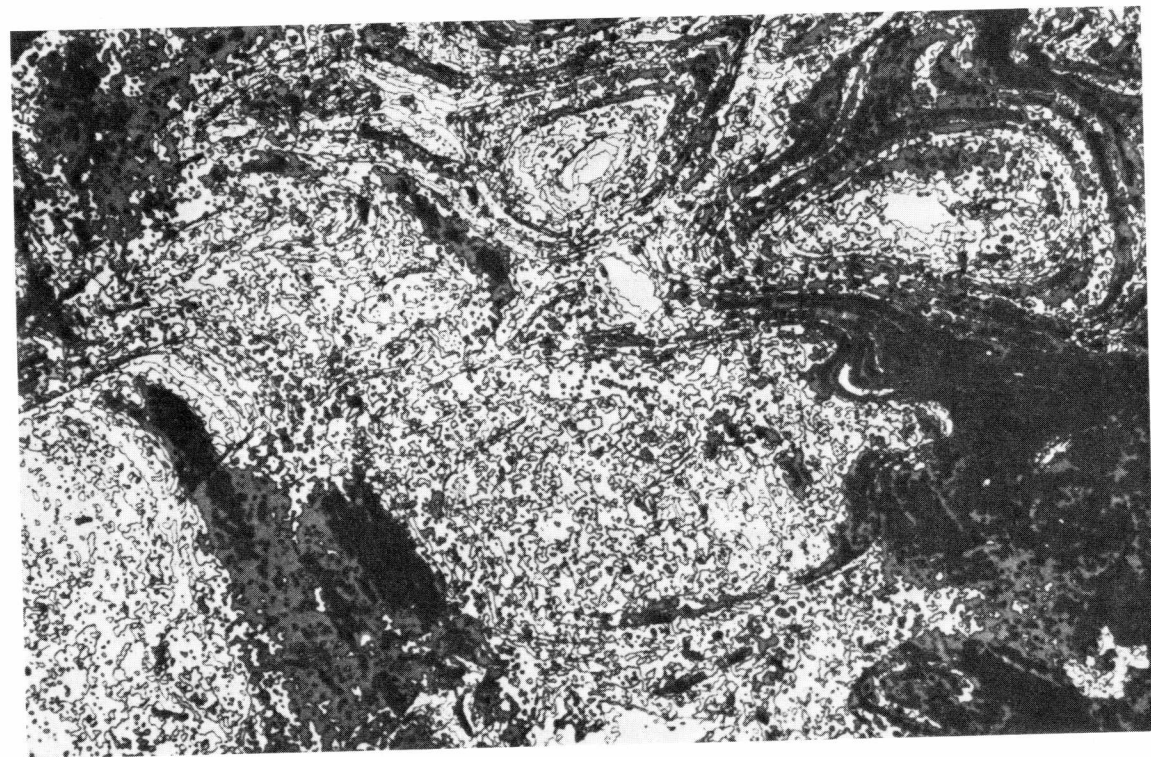


Рис. 119. Разделение плотностей по методу «Агфаконтур» (ср. с рис. 116а и 116б). Участки одинаковой плотности фототона представлены контрастнее, чем на оригинальном снимке [95].

ции в масштабе 1:1 000 000, где на мозаике, составленной из снимков «Лэндсат», нанес 17 литологических единиц, границы которых были подчеркнуты эквиденситами второго порядка, полученными фотографическим путем. Точность, тематическое содержание, а также читаемость и практическая пригодность карт, составленных таким образом, существенно выше, чем у ранее составленных карт сравнимого масштаба. Этот способ применил также Лист (см. [181]) в 1982 г. при составлении геолого-топографических карт юго-западного Египта.

5.3. Электронная обработка снимков

5.3.1. Введение. Для цифровой обработки изображений данные съемки должны быть представлены на магнитной ленте, позволяющей ввести их в ЭВМ. Если первичные снимки существуют только в виде фотоизображения, то они должны быть преобразованы в цифровую форму путем сканирования и записи на магнитную ленту. Возможности обработки изображений определяются в каждом отдельном случае видом и характером применяемого аппаратного оснащения и возможностями используемого программного обеспечения. Цифровая система обработки изображений состоит в основном из трех частных систем: устройства ввода изображения (телевизионная камера, считывающее устройство, магнитная запись), процессора и устройства вывода изображения (черно-белый или цветной монитор-дисплей, печатное устройство или графопостроитель). Необходи-

димо также запоминающее устройство для хранения данных перед операциями счета (см. рис. 121а).

В настоящее время разработано большое число систем цифровой обработки изображений и прикладных пакетов программ. Таковы, к примеру, системы фирм Optronics, Spectral Data, I²-S, ISI-Log Etronic и др. Наиболее известны программные пакеты LAPS (Университет Парду), VIGAR (Лаборатория реактивного движения, Пасадена), DIBIAS (DFVLR, Оберпфaffenхофен) и др.

Во многих институтах, занятых электронной обработкой данных, разработаны специальные прикладные программные пакеты. Они, как правило, приспособлены к одной определенной системе ЭВМ и не всегда применимы к ЭВМ другой системы. Обычно системы обработки изображений позволяют применять как аналоговые, так и цифровые способы обработки данных (гибридные системы). Предпочитаются системы, позволяющие работать в интерактивном режиме с контролем за ходом обработки на дисплее. Таковы системы, в которых весь процесс аналоговой или цифровой обработки не определяется жесткой схемой и интерпретатор может вмешиваться в отдельные этапы обработки с тем, чтобы оптимизировать в соответствии с ходом интерпретации характер промежуточных и окончательных данных. Эта возможность имеет решающее влияние на качество конечного результата обработки и пригодность его для нужд интерпретатора. Только сведущий и опытный интерпретатор может решать, каким образом должна идти обработка изображения и насколько достигнутые результаты приближают его к цели. Исследователь, изучающий материалы дистанционного зондирования, не должен перекладывать подготовку и обработку своих снимков на техников и операторов. Обычно после небольшой практики геолог получает возможность работать в интерактивном режиме, используя электронно-аналоговую часть гибридной системы обработки изображений.

Схема аппаратного оснащения гибридной системы обработки изображений показана на рис. 121а на примере устройства, используемого группой «Дистанционное зондирование» (Fernerkundung) в Институте прикладной геологии Свободного университета в Западном Берлине. Эта система обработки изображений ГЕОМАПС состоит из двух подсистем. Первая из них, многоцелевая, служит для обработки и воспроизведения больших изображений и для программирования. На подсистеме могут одновременно работать несколько интерпретаторов (см. рис. 121а, нижняя часть). В нее также включен аппарат (плоттер) для выдачи изображений на черно-белую или цветную фотопленку. Вторая подсистема применяется для графической интерактивной обработки отдельных частей снимков. Построение ее аппаратной части отражено в верхней половине рис. 121а. Разработанное для системы ГЕОМАПС программное

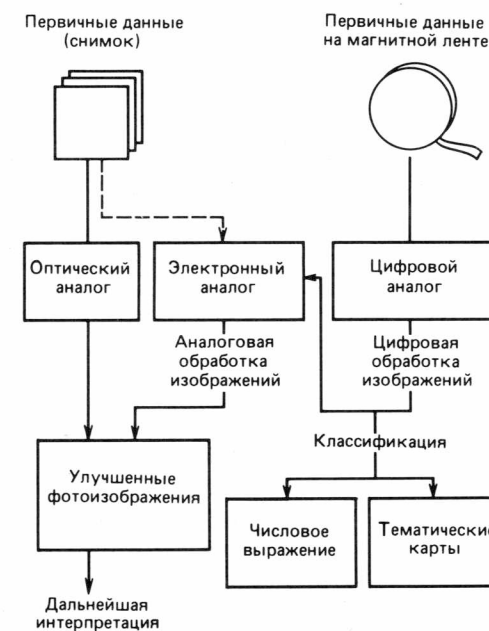


Рис. 120. Схемы аналоговой и цифровой обработки изображений ([28], с изменениями).

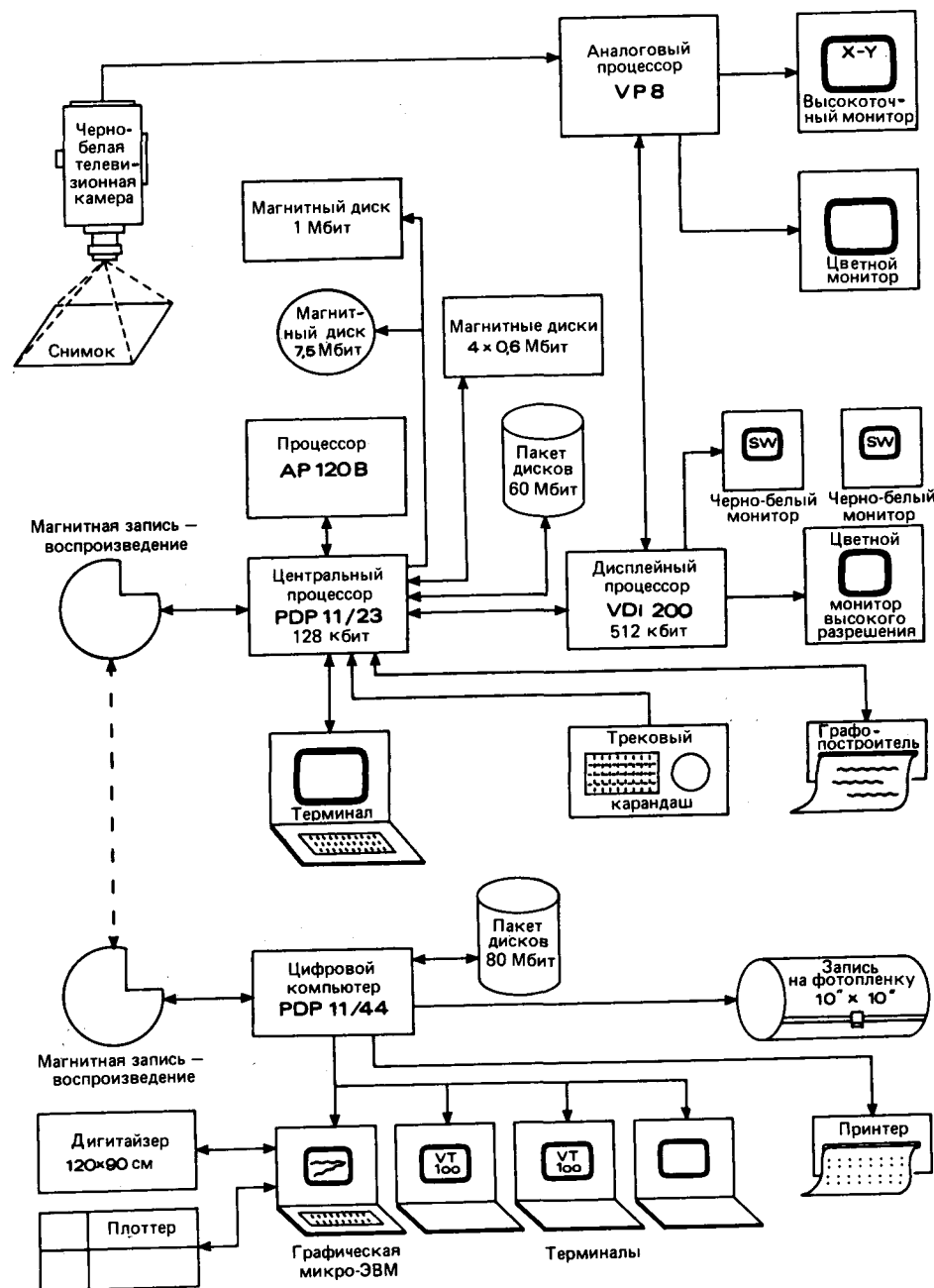


Рис. 121а. Схема аппаратного оснащения системы геологической обработки изображений ГЕОМАПС рабочей группы «Дистанционное зондирование» Института прикладной геологии Свободного университета, Западный Берлин.

обеспечение позволяет осуществлять представленные на рис. 121б виды предварительной обработки и интерпретации изображений. Подробное описание аппаратной и программной части системы ГЕОМАПС дал Шёле [273].

Предварительная обработка съемочных данных имеет цель улучшить качество изображений для последующей интерпретации: контрастирование инте-

ресующей интерпретатора части информации, содержащейся в снимке; трансформация снимков; цветовое кодирование и воспроизведение; построение эквиденсит; фильтрация; построение изображений по отношениям спектральных яркостей. Для этого применяются как аналоговые (контрастирование, фильтрация, изображения отношения спектральных яркостей), так и цифровые способы обработки. Аналоговые и цифро-



Рис. 121б. Программы и пути обработки, применяемые в системе ГЕОМАПС.

вые способы имеют различное аппаратное обеспечение. Получаемые при аналоговой обработке данные имеют качественный характер. Способы цифровой предварительной обработки дают возможность количественной обработки данных многозональных съемок. При этом производится, с одной стороны, геометрическая и радиометрическая коррекция изображений и, с другой стороны, тематическая классификация выделенных наземных объектов по их спектральным и текстурным признакам (статистические способы обработки). Для цифровых методов обработки данных необходимо применять пригодные для репродукции количественные данные съемок и технологию. На многих стадиях обработки данные промежуточных количественных расчетов могут быть представлены в виде изображений, чтобы иметь возможность проверить и оценить их пригодность. Применение цифровых способов обработки в значительной мере рассчитано на автоматическую классификацию многозональных съемочных данных. Для этого съемочные данные вводят в ЭВМ в цифровой форме. По истечении процесса классификации плоттер или графопостроитель рисует на снимке площадное распространение участков с выбранными спектральными или текстурными признаками (разд. 5.3.13). Результатами цифровой обработки многозональных съемочных данных являются тематические картографические построения, статистические диаграммы или численные данные по спектральным характеристикам

изучаемых наземных объектов или ландшафтных единиц.

В конце книги можно найти список литературы по основам, методам, целям и проблемам аналоговой и цифровой обработки изображений (прежде всего в геолого-географических аспектах). Ниже рассмотрены лишь основные методы и возможности применения электронной обработки съемочных данных. Рис. 120 дает схематическое представление о возможностях обработки изображений.

5.3.2. Превращение съемочных данных из аналоговой формы в цифровую и обратно. Электронные способы обработки изображений основаны на использовании цифровых данных. Применение их в современных методах обработки изображений дает возможность комбинировать оптические и электронные обрабатывающие системы, сочетать аналоговые и цифровые способы подготовки, переработки и выдачи данных. Такие способы широко применяются при обработке снимков «Лэндсат». Каждый снимок «Лэндсат» состоит, как это было показано ранее, из большого числа отдельных точек — пикселей, образующих плановую решетку-растр (рис. 83). Положение каждого пикселя задается его координатами по осям x и y . Яркость пикселя определяется числом, обозначенным в английской терминологии DN (digital number). Таким образом, каждый элемент картинки определяется тремя числами: координатами по осям x и y и яркостью, которые могут быть использованы для различного рода расчетов.

При преобразовании набора чисел в картинку значения яркостей модулируют яркость источника света, который через оптическую систему, перемещающуюся вдоль оси барабана, пиксель за пикселем освещает черно-белую фотопленку, расположенную на барабане перед оптическим устройством. После записи на пленку одной строчки барабан поворачивается на ширину этой строчки, процедура повторяется вновь и вновь строчка за строчкой, пока не возникает на пленке восстановленная картинка. Числовые плоттеры (к примеру, Optronics, Hell) изображают каждый пиксель в виде квадрата с определенным значением фототона. При сильном увеличении такие картинки имеют зернистую квадратную структуру в отличие от линейной структуры изображения у аналоговых плоттеров. В аналоговых плоттерах источник света модулируется через линейный усилитель аналоговым сигналом¹, так что каждая строка имеет непрерывные переходы (например, плоттер «Линоскан» фирмы DFVZR).

Если фотографическое изображение (снимок «Лэндсат», аэрофотоснимок, РЛ-снимок) преобразуется в цифровую форму, то процесс протекает в

¹ С постепенным переходом между яркостями. — Прим. перев.

обратном направлении. Предназначенное для этого изображение в позитивной или негативной форме монтируется на барабане. Источник света передвигается вдоль строки и освещает изображение пиксель за пикселем; проходящее через снимок излучение принимается смонтированным за снимком детектором и преобразуется в аналоговый электросигнал, чье напряжение отвечает плотности фототона освещаемого элемента изображения и может также получить численное значение. Поворотом барабана осуществляется переход от строки к строке. Таким образом, картинка преобразуется в числовую сетку – растр. Каждый элемент изображения в этой сетке определяется его координатами по осям x и y и значением его яркости.

5.3.3. Геометрическая и радиометрическая коррекция данных съемки. С помощью электронной числовой обработки могут быть исправлены ошибки изображения, возникающие в ходе съемки и передачи данных. Геометрическая коррекция исправляет искажения изображений, определяемое съёмочной системой (в частности, сканерных изображений), а также независимые от съёмочной системы пространственные и масштабные ошибки, происходящие от изменений высоты или скорости полета или пространственного положения съёмочной платформы (самолета, спутника). В случае спутника «Лэндсат» учитывается также влияние вращения Земли на процесс съемки (смещение строчек).

Особенно важны геометрические коррекции при обработке многовременных снимков «Лэндсат» при сопоставлении их пиксель за пикселем. Геометрическая коррекция выходных данных необходима, как правило, в тех случаях, когда сопоставляются данные, полученные различными съёмочными системами (к примеру, панхроматические снимки высокого разрешения системы РБВ и многозональные снимки МСС со спутника «Лэндсат» или снимки «Лэндсат» с РЛ-снимками). Наконец, геометрическая коррекция проводится с помощью электронной обработки изображений в том случае, когда снимки или данные съемки на магнитной ленте преобразуются в определенную стандартную проекцию.

Необходимость радиометрической коррекции также определяется, с одной стороны, погрешностями съёмочной системы (например, разной чувствительностью приемника излучения в различных диапазонах яркости, эффектами наводок вдоль линии сканирования, смещением строчек) и, с другой – помехами, не зависящими от съёмочной системы. На снимки «Лэндсат» в зоне 4 прежде всего влияют процессы рассеяния в атмосфере, когда рассеянный в атмосфере свет подсвечивает темные участки снимков. Именно атмосферным рассеянием и объясняется завуалированное малоконтрастное изображение снимков МСС в зоне 4. Коррекция данных съемок в зонах 4 и 5

возможна, когда общая кривая распределения фототона смещена в сторону черного тона; достигается она путем вычитания показателя дымки из значений яркости каждого элемента изображения. Радиометрическая коррекция первичных данных съемки необходима и для того, чтобы обеспечить радиометрическую сопоставимость данных многозональной съемки. Она является предпосылкой для определения соотношений интенсивности между различными спектральными каналами и для обработки изображений с помощью алгоритмов цифровой радиометрической классификации. Влияние атмосферных помех на данные МСС со спутника «Лэндсат» и возможности их коррекции уже неоднократно исследованы [295, 245].

5.3.4. Контрастирование. Чтобы усилить информацию, заключенную в снимке, и возможно полнее интерпретировать ее, необходимо усилить контрастные различия фототона снимка. Здесь также применимы способы цифровой обработки снимков, так как они более точны, чем упоминавшиеся ранее фотографические способы, и представляют большие возможности манипуляций с фототоном.

Эти способы прежде всего применяются для усиления контрастов многозональных сканерных снимков. Многозональные сканеры технически сконструированы так, что отраженная от земных объектов энергия излучения может приниматься в очень широком динамическом диапазоне (128 или 64 ступени яркости). Этот динамический диапазон необходим потому, что на снимаемой местности могут встречаться совместно такие резко различные материалы (почвы, растительность), как, с одной стороны, базальты или ультрабазиты, а с другой – соль, гипс или снег. При таких сочетаниях на гистограмме распределения яркостей занята практически вся шкала тонов от черного до белого. Но, как правило, спектральные отражающие свойства внутри одного ландшафта не бывают столь резко различными. Соответственно гистограммы фототональных различий многозональных снимков МСС занимают лишь более или менее узкую часть общей черно-белой шкалы фототонов. Об этом свидетельствуют, в частности, гистограммы на рис. 123. Если с помощью статистической цифровой обработки определено распределение тонов внутри одного широкозонального или четырех узкозональных снимков МСС, то можно осуществить относительно простые пересчеты значений фототона. Например, можно растянуть узкий диапазон колебаний фототона так, чтобы самому темному из них присвоить значение 0, а самому светлому из встречающихся фототонов – значение 255. По данным такого пересчета строится новое изображение, на котором тонкие различия фототонов будут представлены в гораздо более дифференцированной форме. Этот способ (в английской терминологии – stretching) инте-

ресен прежде всего тем, что для тематической интерпретации важны только определенные (в разных случаях – различные) диапазоны изменений яркости на снимках, и именно их тонкие нюансы должны быть переданы более контрастно для улучшения возможностей дешифрирования.

В других случаях бывает необходимо подчеркнуть градиенты плотностей фототона внутри выбранного динамического диапазона плотностей. Для этого выбирается нелинейный закон пересчета плотностей. Это приводит к тому, что средние ступени серого тона выступают на изображении сильнее, чем экстремальные тона, встречающиеся гораздо чаще и в геологическом аспекте имеющие меньшее или не имеющие вообще никакого значения. Такие тона представляют часто облака, снег, лед, тени или воду.

Дальнейшие возможности фототональных преобразований представляет контрастирование по закону Гаусса. Этот метод подчеркивает, наоборот, экстремальные значения плотности фототона, которые обычно подавляются наиболее распространенными. Способы контрастирования и оптимальная последовательность их применения определяются в каждом конкретном случае отдельно.

Необходимо упомянуть также способ «кусочного линейного подчеркивания», который обычно дает наилучшие результаты. При этом способе с разными отрезками гистограммы распределения фототона осуществляются различные манипуляции: для одних применяется усиление, для других – подавление контрастов фототона.

Кроме того, следует указать, что перечисленные преобразования фототона с целью усиления его контрастов могут осуществляться не только с оригинальными первичными данными съемки, но и с материалами съемки, модифицированными в ходе различных стадий их обработки. Фототональные преобразования предварительно обработанных съёмочных данных (например, изображений отношений спектральных яркостей по данным МСС – «Лэндсат») дают дополнительные возможности для тематической оптимизации с целью последующего визуального анализа. Некоторые примеры такой обработки показаны в публикации Роуэна и др. [260], откуда взят рис. 129, а также в работах Критикоса [153], Бохтеля и Хайдна [28], Сабинза [37], Хайдна [103], Полсина и др. [235] и Колуха и др. [145].

5.3.5. Цветовое разделение. С цветных материалов съемок (аэрофотоснимков, космических фотоснимков) путем цветового сканирования могут быть получены цветоделенные изображения. С помощью цветного светофильтра раздельно регистрируется информация, заключенная в одном из слоев цветной пленки. Полученные цветоделенные изображения в изменениях плотности своего черно-белого фототона отражают изменения плотности цвета соответствующего

слоя цветной пленки в пределах снимка; плотность цвета в свою очередь является мерой яркости объекта в том участке спектра, к которому чувствителен этот слой пленки (Хелльвиг, 1973).

Для получения цветоделенного изображения со съёмочного материала строка за строкой считывается его плотность либо в одном цветовом канале, либо одновременно в нескольких. Плотность фототона преобразуется в светоприемнике в электрический сигнал, напряжение которого отвечает плотности цвета снимка в считываемом канале. Выходной сигнал модулирует силу света в источнике, который освещает черно-белую пленку, перемещаемую перед оптической системой в соответствии со скоростью сканирования считываемого снимка. Благодаря очень высоким разрешающим возможностям цветовых сканеров цветоделенные изображения достигают высокого качества и могут быть использованы для дальнейших преобразований: усиления контрастов, эквиденситных псевдорельефных преобразований, подчеркивания границ, преобразований Фурье. Описанный Хелльвигом аппарат (Хелль-хроматограф) дает возможность одновременно записывать изображения по трем цветовым каналам. Аналоговый преобразователь хроматографа позволяет осуществлять обработку сигнала в синхронном режиме. Различные комбинации применяемых оптических, электронных и фотографических методов преобразования изображений позволяют опознать и представить на изображении участки определенной структуры, характеризующиеся определенным цветом, которые выявляются на снимке по сочетанию цветовых тонов. Кроме описанных выше имеется значительное число иных аппаратов, используемых для получения цветоделенных изображений и преобразования изображений в цифровую форму.

5.3.6. Разделение плотностей (эквиденситный метод). Разделение плотностей, осуществляемое фотографическими методами с помощью пленки «Агфа-контур», может осуществляться также и с помощью электронных методов обработки. При этом исследуется яркость каждого элемента узкозонального снимка или изображения, полученного различными методами обработки данных, и выявляются участки изображения с одинаковой яркостью или с одинаковой плотностью фототона на снимке. При этой методике могут быть получены эквиденситы избранной плотности или интервала плотностей. Для облегчения интерпретации определенные эквиденситы или сочетания многих эквиденсит могут быть представлены в цветном виде. Это делает результат преобразования более контрастным и облегчает прослеживание по снимку отдельных ступеней плотности изображения. Таким путем передается, например, распределение плотности изображения тепловых сканеров, где определенным ступеням плотности снимка (т. е. темпера-

туры поверхности) отвечает определенная окраска изображения. Аналогичным образом могут быть представлены результаты съемки водных поверхностей, где участки различной глубины или различного содержания взвесей в воде определяют плотность фототона узкозонального снимка.

5.3.7. Подчеркивание границ. Имеющиеся на снимке участки различного фототона по результатам контрастирования могут быть отделены от их окружения темной или светлой линией. Критерием ее проведения для ЭВМ является разность между значениями яркости соседствующих элементов изображения, превышающая определенное заданное значение.

5.3.8. Цветовое воспроизведение и преобразование. К хорошо освоенным методам цифровой обработки снимков относится цветовое воспроизведение. Черно-белые цветоделенные изображения отдельных спектральных каналов взаимно суммируются с применением синего, зеленого и красного светофильтров или взаимно вычитаются при использовании желтого, пурпурного и синего светофильтров (дополнительных цветов). Эти суммирующие (аддитивные) и вычитающие (субтрактивные) фильтры можно после выбора различных спектральных каналов многозональной съемки сочетать в ином порядке. Поэтому выходными материалами многозональных сканерных съемок, например съемок МСС со спутника «Лэндсат», могут служить снимки с различными сочетаниями цветов. К числу стандартных комбинаций принадлежит «спектрозональное воспроизведение» с участием снимков в ближней части ИК-диапазона, при котором растительность передается красными тонами. Обычно этот вариант называется цветным композитным изображением, в котором участвуют узкозональные данные каналов 4, 5 и 7. Возможно также воспроизведение многозональных съемочных данных в натуральных цветах [37, 321]. При работе с интерактивными системами обработки изображений интерпретатор может произвольно изменять комбинации цветов при одновременном наблюдении за результатами на цветном дисплее с тем, чтобы получить наиболее контрастное воспроизведение именно той информации, которая его интересует. Цветные композитные изображения имеют главной целью синоптическое воспроизведение информации, заключенной в отдельных спектральных каналах.

В заключение следует упомянуть, что композитные цветные изображения можно построить не только по первичным съемочным данным, полученным в отдельных спектральных зонах. Получение композитных изображений возможно и по предварительно обработанным многозональным съемочным материалам: изображениям отношений яркостей разных спектральных зон, цветным эквиденситным изображениям, изображениям по результатам трансформа-

ций, по принципиальным компонентам и т. п. Таким способом достигается более контрастная передача литологических единиц, определенных структурных элементов и участков с различными природными условиями. Наибольший успех эти методы приносят при обработке и интерпретации данных многозональных съемок районов, не покрытых растительностью.

5.3.9. Псевдорельефное воспроизведение. Описанное при рассмотрении фотографических методов псевдорельефное воспроизведение изображений возможно также и при электронной обработке съемочных данных, и последующем отражении полученных результатов в черно-белой фототональной передаче. При этом воспроизводятся эффекты освещения объектов съемки с различных направлений. Псевдорельефное воспроизведение имеет наибольшее значение при выявлении линейных структурных признаков ландшафта. Оно облегчает картирование тектонических структур.

5.3.10. Фильтрация. Математический процесс пространственной фильтрации, например фильтрации пространственных изменений фототона на снимках «Лэндсат», подчеркивает, акцентирует воспроизведение природных единиц и признаков, особенно линейных структур ландшафта (трещин и разрывных нарушений). При этом процессе выделяются и фильтруются частота и амплитуда изменений фототона определенного искомого направления, к примеру, вдоль направления сканирования на снимках «Лэндсат» или в ином направлении. Направление, в котором принимается фильтрация, определяет, структуры какого простирания на снимке будут подчеркнуты. Структуры, ориентированные перпендикулярно направлению фильтрации, будут переданы в усиленном виде, а структуры, ориентированные параллельно, будут подавлены. Для усиленного воспроизведения трещин и разрывных нарушений с частыми, но пространственно ограниченными изменениями фототона применяется так называемая высокочастотная фильтрация, которая улавливает лишь частные и пространственно ограниченные изменения фототона и подавляет изменения, которые встречаются реже и охватывают большое пространство.

Другой вид фильтрации, часто применяемый при геологической интерпретации, представляют преобразования Фурье. Для подавления нежелательного вуалирования снимков может быть применена программа «медианный фильтр». Основы и результаты применения различных способов фильтрации изображений описаны Сабинзом [37], Джиллесли [82] и другими [145, 37].

5.3.11. Изображения отношений. Качество многозональных снимков и передаваемая ими информация о важных природных условиях (о различных типах

горных пород и их распространении, об участках распространения различных почв, о различном увлажнении, различной растительности) могут быть улучшены путем простых арифметических операций (сложения, вычитания, деления, умножения) с данными разных спектральных каналов. Упомянувшегося метода получения цветных композитных изображений по результатам многозональных съемок отвечает сложение значений интенсивности яркости или фототона отдельных узкозональных изображений. С большим успехом в геологическом дистанционном зондировании применяется еще один метод – метод отношений. Изображения отношений спектральных яркостей в отдельных диапазонах по материалам съемок «Лэндсат» можно получить путем деления значений измеренной яркости в двух спектральных каналах пиксель за пикселем. По значениям частных всех пикселей для всего снимка «Лэндсат» строится новое изображение, фототон которого передает не меру отраженной от поверхности энергии в определенных интервалах длин волн, а отношения яркостей в двух спектральных каналах.

Чаще всего при цифровой обработке данных «Лэндсат» получают изображения отношений между зонами 4 и 5. Если объект в зоне 4 (зеленой) ярче, чем в зоне 5 (красной), то в отношении 4/5 числитель больше, чем знаменатель. На изображении отношений этот объект передается соответственно светлым фототоном. Если, наоборот, объект в зоне 5 светлее, чем в зоне 4, то в отношении 4/5 больше знаменатель, и на изображении отношений этот объект передается темным фототоном. Таким образом, темные и светлые тона черно-белого изображения отношений передают отношения интенсивности отражения в тех спектральных каналах, которые избраны для вычисления отношений.

Изображение отношений по данным каналов 4 и 5 обладает способностью подавлять на снимке эффект теней, обусловленных неровностями рельефа, которые приводят к резким изменениям условий освещенности. Предположим, что определенная литофациальная единица (обнаженная поверхность горных пород) лежит частично в тени, частично на освещенном солнцем участке. В этом случае отношения яркостей как в тени, так и на солнце останутся постоянными, и на изображении отношений как освещенные, так и затененные участки получат одинаковый фототон, отвечающий не значениям, а отношениям яркостей в зонах 4 и 5 [37, 38].

Каким образом передаются один и тот же участок и отдельные его части на снимках в отдельных узких зонах спектра и на изображении отношений их спектральных яркостей, можно видеть на рис. 164–166. При их сравнении на первый взгляд выступает большая разница в передаче на снимке условий местности. При более внимательном изучении можно видеть, что некоторые единицы ландшафта по отно-

шению к их окружению наиболее контрастно передаются лишь на одном определенном изображении (в том или ином канале или на изображении отношений). Отсюда следует, что для решения конкретных задач интерпретации необходим оптимальный подбор материалов многозональных сканерных съемок. Это могут быть отдельные узкозональные снимки или изображения отношений различных диапазонов спектра. Максимального выигрыша в информативности следует ожидать, как правило, в случае сравнительной интерпретации многих разнообразных изображений картируемого района, включая разновременные снимки.

Изображения отношений часто строятся по иным комбинациям каналов, в частности по соотношению каналов 4 и 7, облегчающему распознавание растительности. По трем различным изображениям отношений можно построить ложноцветные изображения.

Изображения отношений обеспечивают успех в распознавании и контрастном воспроизведении различных литофациальных единиц. Разграничение и прослеживание петрографических разностей по изображениям отношений часто выполняется успешнее, чем по узкозональным снимкам, поскольку уменьшает влияние рельефа на освещенность и подчеркивает цветовые различия горных пород и почв.

Кроме построения соотношений по данным двух спектральных каналов съемки возможны иные, более сложные манипуляции. Так, можно фототональные показатели одного узкозонального снимка разделить на усредненный показатель фототона всех других зон снимка или провести расчеты типа (канал 4 – канал 5):(канал 4 + канал 5) или иные. Целесообразность подобных форм обработки съемочных данных определяется по методу проб и ошибок на лучшее воспроизведение специального содержания интересующей исследователя информации. Как правило, невозможно предусмотреть, как такие расчеты отразятся на содержании снимка. В подобных случаях целесообразно работать с интерактивной системой последовательным способом и результаты промежуточных цифровых расчетов каждый раз выводить на дисплей или фиксировать на фотоплёнке с тем, чтобы оценить, приводят ли предпринимаемые манипуляции к желаемой более контрастной передаче интересующих объектов или ландшафтных единиц.

Для того чтобы объединить информацию нескольких изображений отношений, их можно взаимно совмещать. Цветные совмещения в виде ложноцветных изображений часто дают дополнительный прирост информации. Более контрастное выражение геологически обусловленных особенностей местности возможно в том случае, если перед таким совмещением изображений отношений обрабатываемые материалы контрастированы по линейному или гауссову распределению [260, 85, 82].

5.3.12. Трансформация принципиальных компонент изображений. Важный способ, улучшающий качество изображений, а также сокращающий количество передаваемых со спутника данных, называется трансформацией принципиальных компонент. Этот способ, более подробно описанный Джиллесли [82] и Бургером [37], заключается в том, что на каждом этапе обработки данного материала распределение фототонотон определенных объектов и единиц местности последовательно обновляется и изменяется. При такого рода трансформациях большое количество элементов содержания снимка может быть передано в более контрастной форме. Изменения распределения фототонотон и контрастов определенных элементов содержания снимка по отношению к окружающим видны на рис. 165а–165в. Изображение первой трансформации основных компонент демонстрирует большой контраст при передаче особенностей местности; здесь решающую роль оказывает фактор яркости обнаженных пород. Изображения второй и третьей трансформаций в целом более вялые, однако ряд определенных объектов оказывается отображенным на них более контрастно, чем на оригинальных снимках. Кроме того, на них выступают некоторые литологические единицы, оставшиеся неразличимыми на оригинальных снимках [103]. Для более успешного воспроизведения интересующей информации изображения трансформаций принципиальных компонент можно подвергнуть дальнейшей цифровой обработке, к примеру высокочастотной фильтрации или псевдоокрашиванию. Во многих случаях можно также улучшить результаты кластерного анализа и разделения на классы по спектральным характеристикам, если выходные данные подвергаются трансформации принципиальных компонент перед или после статистической обработки.

5.3.13. Тематическая классификация данных съемки. Большой объем данных многозональных съемочных систем и прежде всего данных МСС со спутника «Лэндсат» и потребности быстрого тематического использования результатов дистанционного зондирования с самого начала привели к исследованиям в области развития и применения машинных способов обработки и интерпретации данных. Для исследования природных ресурсов особый интерес представляют автоматизированные классификации геоботанических единиц и единиц землепользования, участков здоровой и подвергающейся стрессу растительности, распределения взвесей в воде, распределения почв и горных пород.

Для тематической классификации результатов съемок программа для ЭВМ составляется таким образом, что для каждого элемента изображения (пикселя) выясняются показатели его спектральных отражающих свойств во всех диапазонах и сопоставляются с ранее установленными классами спектральных

признаков. Результаты классификации в настоящее время почти всегда выдаются в форме изображения и представляют собой пространственное распространение единиц с определенными классами спектральных признаков (см. рис. 122,з).

Тематическая классификация данных МСС со спутника «Лэндсат» с помощью специальных алгоритмов электронной цифровой обработки возможна потому, что каждый снимок «Лэндсат» представляет собой пространственную решетку (растр, матрицу) одинаковых по величине элементов изображения (пикселей), состоящую из 2340 рядов (линий сканирования) по 3240 элементов (пикселей) в каждом. Каждый пиксель занимает на поверхности Земли площадь 57×79 м. Измеренные МСС показатели излучения каждого пикселя превращаются на борту в цифровую форму и записываются на магнитную ленту. Присваиваемое каждому пикселю численное значение показателя DN пропорционально энергии, полученной приемником излучения от площади элемента разрешения за время экспозиции (ср. разд. 4.4.3 и рис. 83а и 83б). Поскольку отраженное излучение, достигающее многозонального сканера спутника «Лэндсат», охватывает одновременно 4 спектральных канала (зоны), то каждому пикселю присваиваются четыре числа DN или четыре спектральных признака, используемые при тематической классификации данных МСС.

Тематическая классификация многозональных съемочных данных основана на том, что картируемые объекты или единицы на земной поверхности обладают определяемыми их вещественным составом спектральными признаками, по которым они отличаются от своего окружения, т.е. могут быть соответствующим образом ограничены и отделены от объектов, не интересующих исследователя. В процессе классификации спектральные яркости (или плотность фототона снимка) классифицируемых объектов поверхности выявляются с помощью статистических методов цифровой обработки изображений, сопоставляются с показателями таких яркостей, установленных наземными измерениями для представительных тест-объектов или участков с известными заранее характеристиками, опознанных на анализируемом снимке, коррелируются и ограничиваются по спектральным признакам (см. рис. 123–128). После этого с помощью специальной программы ЭВМ задается задача: проверить все пиксели анализируемого участка снимка или всего снимка на соответствие их ранее установленным спектральным классам. Для надежности классификации решающими являются пороговое значение спектральных показателей каждого спектрального класса и учет возможных колебаний спектральных показателей внутри одного класса. Спектральные данные, которые располагаются в области границы или взаимного перекрытия двух спектральных классов или лежат за пределами выбранных спектральных

классов, оцениваются как не подлежащие классификации.

Возможности и ограничения тематической классификации рассмотрели Хайдн [103] и Бургер и др. [37, 38]. Более подробное описание и обсуждение различных проблем обработки и классификации изображений можно найти в «Руководстве по дистанционному зондированию» (Manual of Remote Sensing, 2nd ed., 1983).

Возможны два вида классификации: контролируемая (*англ.* supervised) и неконтролируемая (*англ.* unsupervised). При контролируемой классификации в основу распознавания кладутся тест-объекты или тренинг-участки, чья принадлежность и свойства устанавливаются при полевых наблюдениях, что и определяет их принадлежность к тому или иному классу. При неконтролируемой классификации, напротив, классы устанавливаются с помощью кластерного анализа, без полевых наблюдений, чисто статистическим путем: случайным образом отбираются несколько сотен пикселей и их спектральные показатели исследуются с целью определения их естественной группировки. Опознавание установленных спектральных классов осуществляется по оригинальному снимку МСС или по материалам, подвергнутым предварительной обработке – фототональному контрастированию или построению изображения отношений.

Оба способа классификации Бургер [37] оценивает в своем исследовании по возможностям классификации литолого-петрографических единиц следующим образом: «Для применения метода контролируемой классификации заснятый участок часто не дает необходимого материала; отнесение пикселей к тому или иному классу часто бывает многовариантным. Неконтролируемая же классификация обеспечивает расчленение снимка на классы (литолого-петрографические разности и др.), зависящее часто от структуры комплекса собранных данных или же от примененных алгоритмов кластерного анализа. В этих случаях связь результатов классификации с запросами исследователя может отсутствовать, и он получит ответы на вопросы, которые он и не ставил». Бургер считает желательным осуществить взаимодействие между этими двумя методами, чтобы, с одной стороны, тренинг-участки отбирались с учетом требований интерпретатора, а с другой стороны, были устранены ошибки методов классификации, отклоняющие машинную классификацию спектральных признаков от естественного их группирования.

Надежность тематической классификации данных многозональных съемок по программам цифровой обработки изображений зависит от выбора и разграничения спектральных классов, обусловленных вещественным составом горных пород. Попытки осуществления полностью автоматизированной классификации литолого-петрографических единиц зачастую встречают значительные трудности. Во многих

случаях установлено, что один и тот же тип горных пород в разных районах и участках сопровождается различными ландшафтными проявлениями на поверхности. Изменения литолого-петрографического состава и условий залегания, различия в характере и интенсивности выветривания, изменения условий рельефа, почвенно-растительного покрова, ориентировки к лучу зрения, сезонные изменения растительности и почвенной влажности – все это приводит даже на небольших участках, не говоря уже об относительно больших районах, охватываемых снимком «Лэндсат», к более или менее значительным колебаниям спектральных отражающих свойств литологических единиц.

Особенно большую роль играют изменчивые топографические условия горных районов, которые обуславливают резкое изменение условий освещенности (распределение затененных и освещенных склонов), приводящее к существенным вариациям спектральных отражающих сигналов горных пород в пределах одного снимка. По данным Келера [144], показатели отражающих свойств поверхности горных пород сильно зависят от геометрических особенностей съемочного процесса и условий съемки. Высота Солнца, угол и ориентация склона, расположение приемника излучения в момент съемки – все это оказывает существенное влияние на спектральные показатели поверхности горных пород в условиях расчлененного рельефа. Таким образом, при классификации горных пород по снимкам «Лэндсат» или по цифровым данным МСС необходимо учитывать влияние рельефа и условий освещенности. Упущение этих условий из рассмотрения приводит к ошибкам классификации и ошибочной интерпретации, особенно при геологических работах.

Таким образом, имеется мало надежд на разработку алгоритмов полностью автоматической классификации, которые были бы применимы во всех ландшафтных условиях. Можно ожидать успехов только в отдельных районах. К тому же автоматическое распознавание и разграничение литолого-петрографических единиц по спектральным признакам заметно менее успешны в районах, покрытых растительностью, чем в обнаженных районах, где картируемые литологические единицы слагают дневную поверхность. Даже в этих последних имеются некоторые помехообразующие факторы, такие, как кора выветривания, солевые выпоты, изменчивый покров золотого песка, которые приводят к изменениям спектральных отражающих свойств одинаковых литологических единиц. Эти проблемы были рассмотрены Бургером [37, 38] на примерах Тибести и юго-западного Египта.

Более серьезные трудности автоматической классификации заключены в том [262], что при цифровой обработке и автоматической классификации съемочных данных эти данные вырываются из своего при-

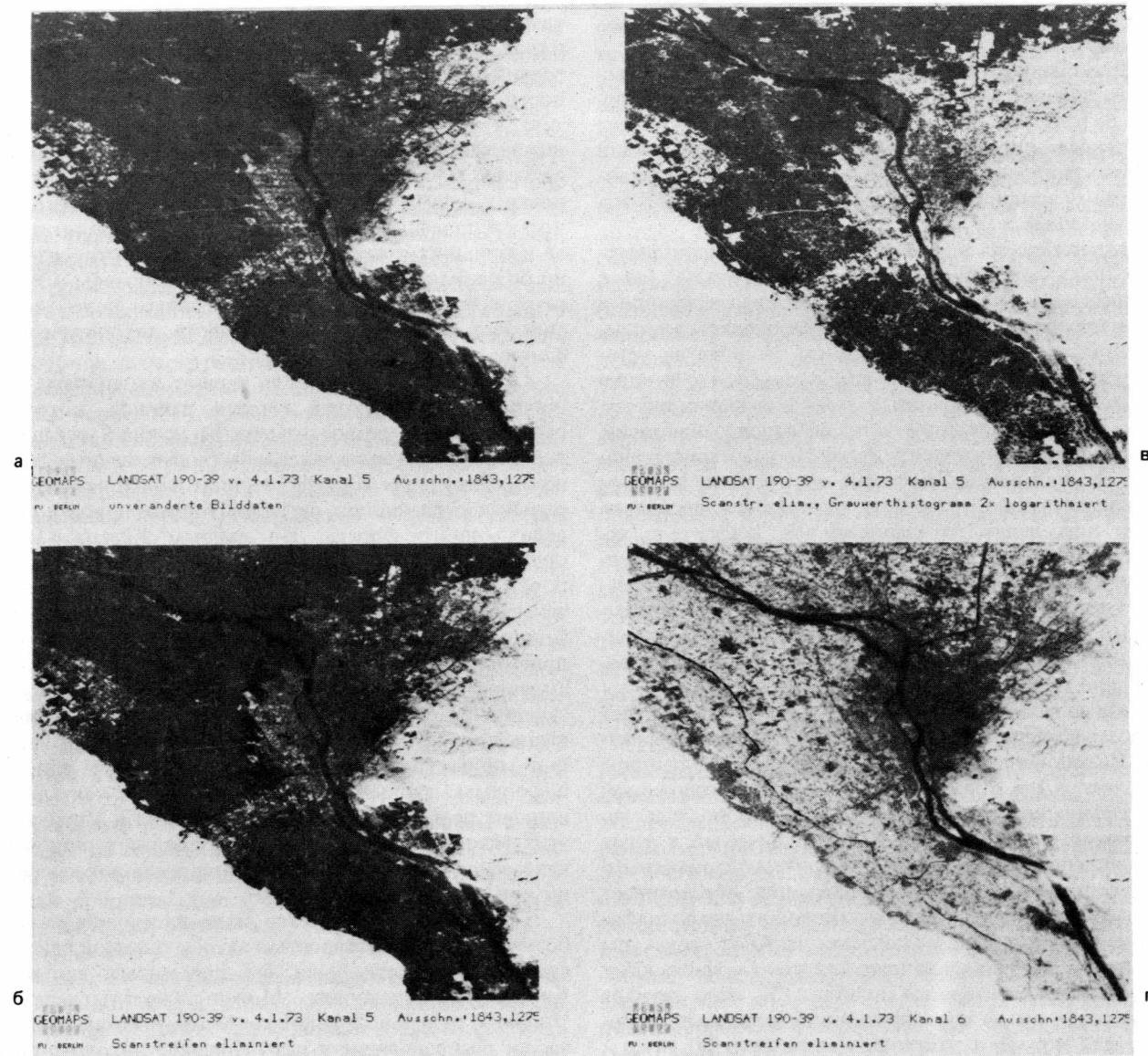
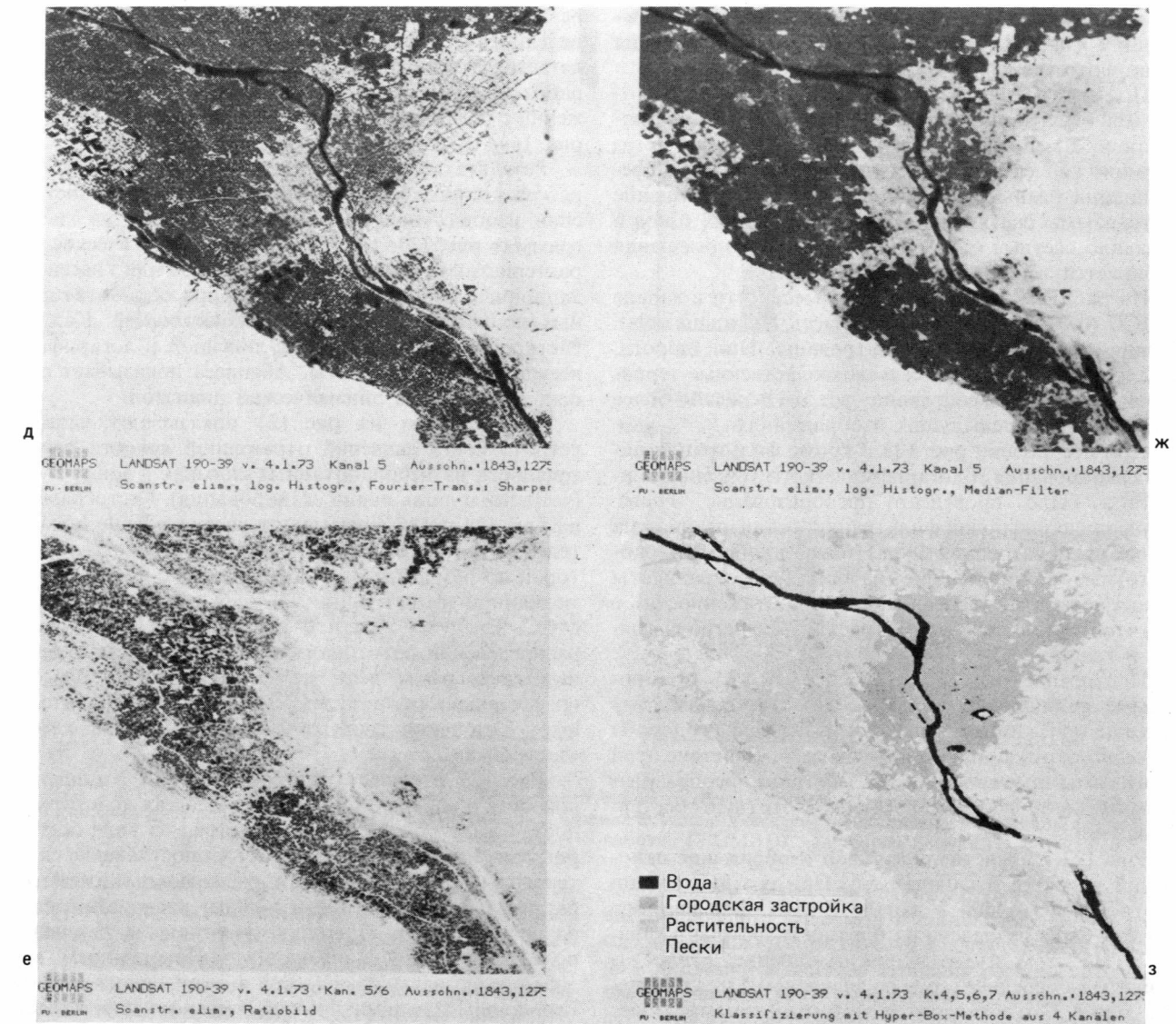


Рис. 122. Участок местности в районе Каира на оригинальном снимке и на изображениях, полученных на различных этапах и при различных программах обработки. Объяснения см. в тексте. Масштаб около 1:375 000. Обработка проведена Р. Шёле на системе ГЕОМАПС, Западный Берлин.

а — оригинальный снимок в зоне 5 МСС; б — зона 5, фильтрация линий сканирования; в — зона 5, фильтрация линий сканирования, контрастирование по логарифмическому закону; г — зона 6, фильтрация линий сканирования; д — зона 5, фильтрация линий сканирования, логарифмическое контрастирование, преобразование Фурье; е — фильтрация линий сканирования, изображение отношений яркостей зон 5/6; ж — зона 5, фильтрация линий сканирования, логарифмическое контрастирование, медианная фильтрация; з — тематическая классификация по четырем зонам.

родного окружения. При классической визуальной интерпретации снимков интерпретатор видит изучаемое локальное явление в окружающем его ландшафте и получает из этих связей дополнительную информацию. Опытный интерпретатор учитывает при дешифрировании разнообразные ландшафтные явления и их пространственные взаимоотношения и использует их как комплексные критерии для опознавания и разгра-

ничения горных пород, почв и тектонических структур. Этот единый процесс наблюдения, сопоставления и критического осмысления не воспроизводим при автоматической цифровой обработке данных. Наибольший успех при геологическом использовании дистанционного зондирования достигается в настоящее время визуальной интерпретацией опытным дешифровщиком предварительно обработанных дан-



ных многозональных съемок. Она к тому же дешевле, чем относительно дорогая классификация многозональных съемочных данных.

Типичная последовательность и результаты цифровой обработки снимков (статистика, предварительная обработка, классификация) показаны нами на примере части снимка «Лэндсат» района Каира. Обработанная часть снимка МСС (рис. 122) имеет величину 512×512 пикселей. Обработка снимка проведена Р. Шёле с помощью системы обработки изображений ГЕОМАПС в Институте прикладной геологии Свободного университета Западного Берлина. Им же составлены приводимые ниже комментарии. С тем чтобы более ярко показать влияние различных стадий обработки снимка, представлены лишь некоторые различным образом обработанные изображения. Гис-

тограммы показывают результаты типичных этапов статистической обработки данных многозональных съемок.

На рис. 122, а помещен снимок выбранного участка в канале 5 МСС (0,6–0,7 мкм, красный цвет). Показатели фототона увеличены от значений 0–127 на оригинале до 24–200 по линейному закону. Иных преобразований не проводилось. Распознаются городская застройка Каира, река Нил, темные тона территории, используемой сельским хозяйством, и естественных зарослей в долине Нила, ограниченные по сторонам почти белыми районами пустыни. Четко различимы (особенно на темном фоне) линии сканирования.

При построении изображения, показанного на рис. 122, б, были устранены линии сканирования пу-

тем различной калибровки шести детекторов, записывающих каждую линию сканирования и усреднения их по фототональной гистограмме.

При построении рис. 122, в фототональная гистограмма была подвергнута двукратному логарифмированию. Смещение максимума гистограммы и логарифмический ее характер привели к лучшей дифференциации темных фототонов (рис. 122, а). Смещение гистограммы растянуло ее в области темных тонов и подавило светлые (для противоположного смещения выбирается экспоненциальная функция).

На рис. 122, г показан снимок местности в канале 6 МСС (0,7–0,8 мкм, ближняя часть ИК-диапазона). Линии сканирования отфильтрованы. Нил, дороги, поселки в долине Нила, сельскохозяйственные территории в различном состоянии – все это передано более четко, чем на предыдущих изображениях.

При построении рис. 122, д кроме фильтрации линий сканирования и логарифмического усиления контрастов было проведено преобразование Фурье. С помощью цифровой фильтрации, реализованной на основе преобразования Фурье, были подняты высокочастотные составляющие изображения (градиенты фототонов малой интенсивности и протяженности), с тем чтобы увеличить их контраст. Более четко выглядят и границы.

Построение рис. 122, ж осуществлялось по программе «медианный фильтр», по которой каждому пикселю присваивается значение фототона, среднее из значений окружающих его 9 пикселей. Действие этой программы противоположно действию преобразования Фурье и подавляет высокочастотную составляющую.

Рис. 122, е представляет собой изображение отношений яркостей в каналах 5/6. При его построении плотность фототона в канале 5 МСС для каждого пикселя была разделена на плотность фотона в канале 6. На этом изображении отношение, равное 1, принято как среднее серое со значением 128. Отношения менее 1 отображаются темными тонами, более 1 – светлыми.

Для тематической классификации на рис. 122, з применен способ «гипер-бокс», при котором каждый класс природных объектов определяется некоторым интервалом значений яркости в каждом спектральном канале. В *n*-мерном пространстве признаков классы образуют прямоугольные тела, давшие наименование методу. Главное достоинство этого метода заключено в экономии машинного времени.

Для классификации ландшафтных единиц «вода», «застройка», «растительность» и «пески» использованы данные съемок во всех четырех зонах МСС после обработки медианной фильтрацией. Легенда помещена на иллюстрацию.

Сопоставление различных изображений одного и того же района показывает, что данные съемок могут быть оптимизированы путем цифровой обработки по

различным программам с целью интерпретации определенного содержания снимка. Именно здесь и располагается основная область применения цифровой обработки. Итоги различных этапов обработки изображений с целью геологической интерпретации даны на рис. 164–167.

Результаты предварительной статистической обработки данных съемок, использованные при построении изображений на рис. 122, показаны на гистограммах рис. 123–126. Они дают статистические характеристики тренировочных участков или классификационных районов, выделенных при обработке данных по району Каира и его окрестностей. Каждая гистограмма представлена с линейной и логарифмической шкалой ординаты. Абсцисса показывает степень яркости или динамический диапазон.

Гистограммы на рис. 123 показывают частоту встречаемости значений отраженной яркости растительности на необработанных снимках в зонах 5 и 6 (устранены лишь линии сканирования). Гистограммы на рис. 124 и 125 показывают распределение показателей фототона растительности и застроенных территорий по результатам классификации с применением медианной фильтрации во всех четырех каналах МСС. Следует обратить внимание на различия в распределении фототональных характеристик отдельных гистограмм всех четырех каналов в классах «растительность» и «застройка». Наиболее значительные отклонения гистограмм отмечаются в классе «застройка».

Рис. 126 отражает разброс значений отношений яркостей в каналах 5 и 6 МСС в классах «растительность», «застройка», «вода» и «пески» в виде скаттерграмм (англ. scatter – разброс). Сопоставление скаттерграмм показывает, что спектральные свойства растительности, застройки и воды располагаются в различных полях. Площадь, очертания и удлинение полей встречаемости обусловлены естественными колебаниями значений яркостей внутри одного класса. Решающим для тематической классификации является требование, чтобы поля (кластеры) встречаемости определенных значений яркостей, свойственных различным вещественным и природным единицам, были четко отделены друг от друга и располагались по возможности дальше друг от друга. В рассматриваемом примере это осуществляется для классов «растительность», «застройка» и «пески». Частотные поля «застройки» и «воды» лежат столь близко, что их границы частично пересекаются. Это создает затруднения при разграничении обоих классов на изображении. Во всех этих материалах статистические характеристики выведены по половине площади снимка.

На гистограммах на рис. 127 и 128 представлены статистические характеристики распределения фототонов для всего снимка с расчленением соответственно на 16 классов и 64 класса. Верхние гистограммы на рис. 127 и 128 показывают результаты линейного

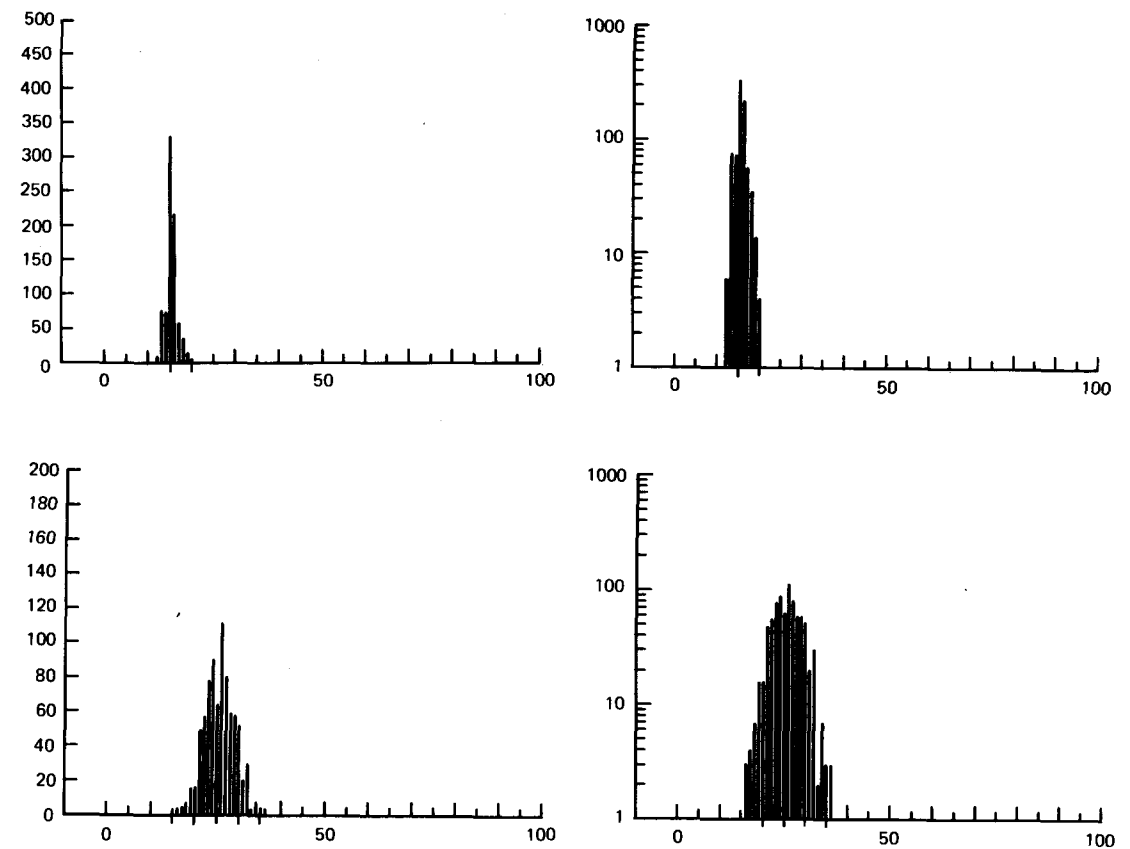


Рис. 123. Гистограммы фототональных характеристик растительности (без обработки) в зоне 5 (верхний ряд) и в зоне 6 МСС (нижний ряд) для района, показанного на рис. 122. Ордината (число пикселей) представлена в линейном (слева) и в логарифмическом (справа) масштабах. (Обработка ГЕОМАПС, Западный Берлин.)

контрастирования между минимумом и максимумом яркости (после устранения строчности изображения). В минимуме все значения объединены, поскольку сумма их встречаемости не превышает 1%. То же относится к максимуму. Гистограммы в нижней части рис. 127 и 128 представляют результаты линейного контрастирования с дополнительным логарифмическим контрастированием фототонов.

Для интерпретации фотоизображений важно, что полученные в ходе различных преобразований данные с измененным распределением фототональных характеристик существенно улучшают его контрастные свойства и представляют собой изображения, на которых интересующие исследователей объекты или ландшафтные единицы могут быть более достоверно опознаны и ограничены.

5.4. Статистическое выявление и воспроизведение линеаментов

5.4.1. Введение. На снимках «Лэндсат» выделяется и картируется значительное число линейных (прямолинейных и криволинейных) структур, представляющих

собой линии выхода разрывных структур (трещин и систем трещин, разломов и систем разломов), важных в научном и практическом аспектах для геологической съемки и анализа строения региона. Большое число линеаментов¹, выявляемых на снимках «Лэндсат» при осуществлении геологического картирования, создают для интерпретатора большие затруднения при визуальном выявлении линеаментов, корреляции систем линеаментов различных простираний, распознавании структурных закономерностей в распределении крупных и мелких структур и в анализе их пространственного распределения на те или иные геологические явления. Визуально-графическая интерпретация и воспроизведение линеаментов занимают много времени. Если же используется специальный аппарат (дигитайзер), сопряженный со счетно-решающим устройством и плоттером, то с помощью электронной обработки данных выявление и интерпретация фотолинеаментов получают более разнообразные

¹ В немецкой литературе по дистанционному зондированию используется термин «линеация» – Lineation. Прим. перев.

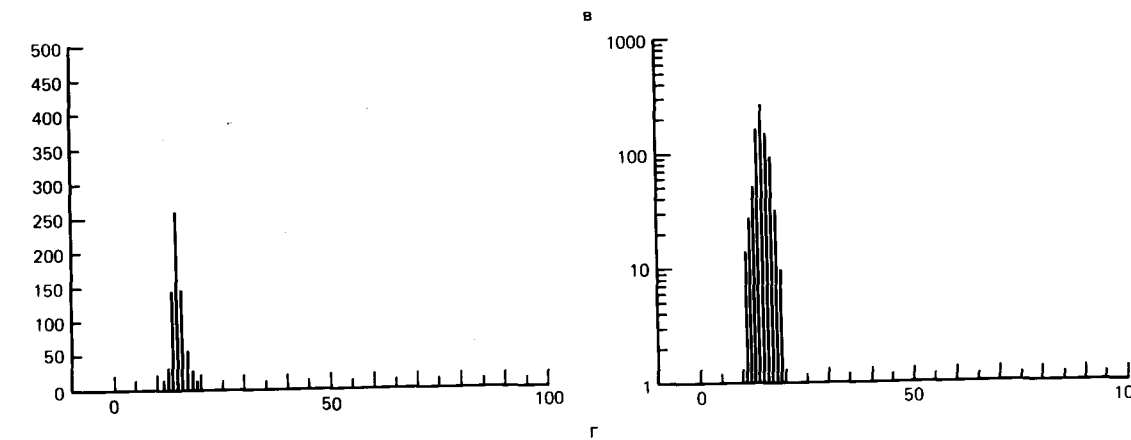
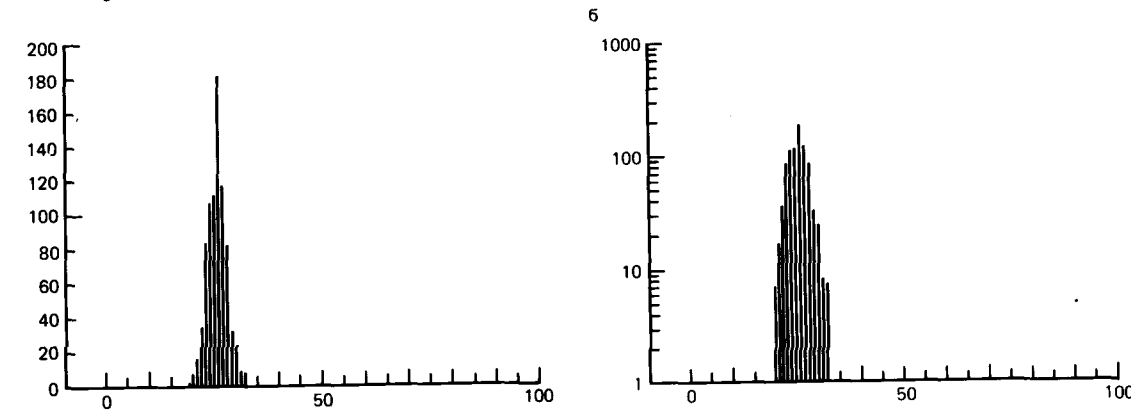
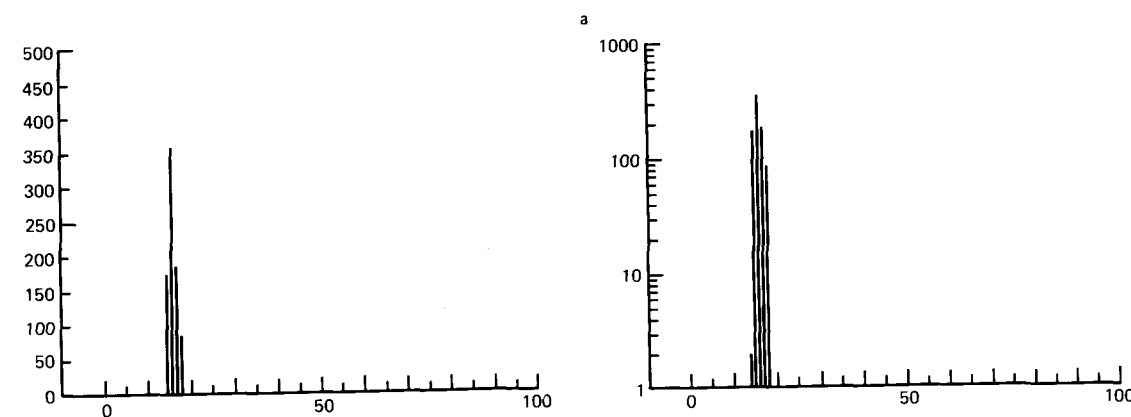
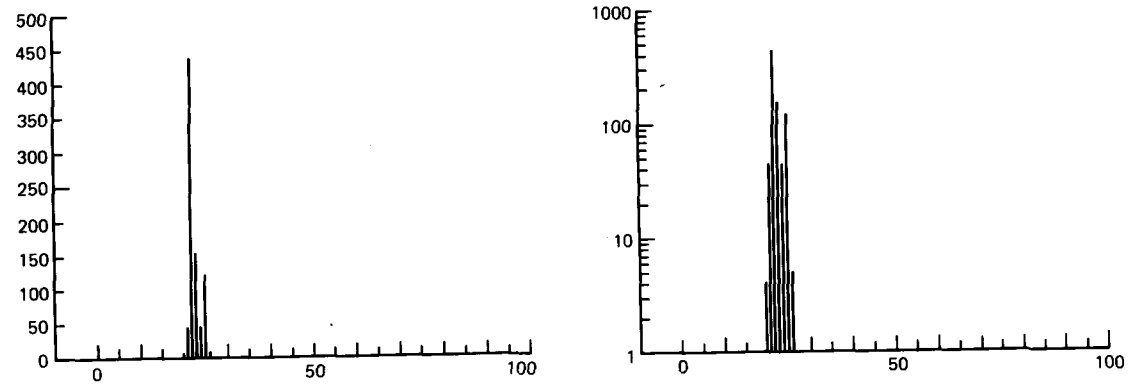


Рис. 124. Гистограммы фототональных характеристик класса «растительность» после медианной фильтрации во всех четырех зонах МСС.
а – зона 4; б – зона 5; в – зона 6; г – зона 7. Слева – линейная шкала; справа – логарифмическая шкала. (ГЕОМАПС, Западный Берлин.)

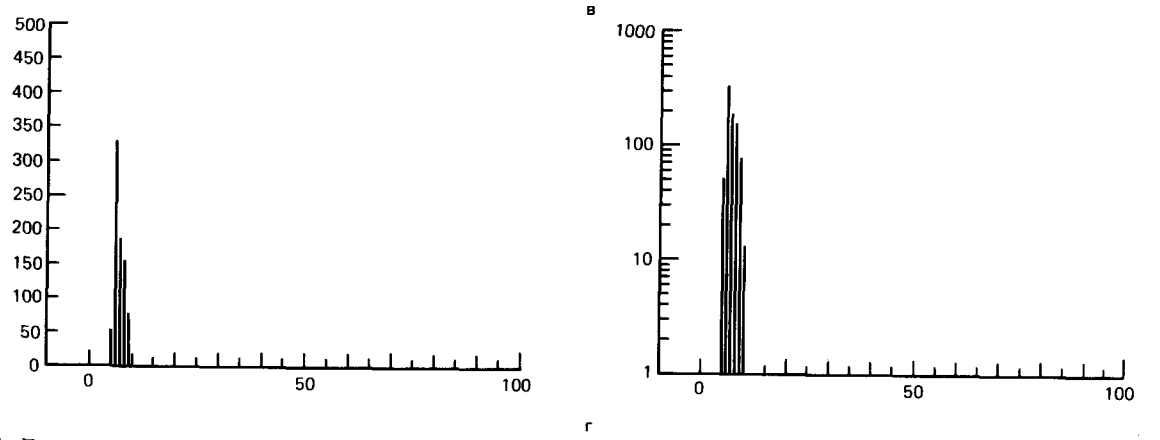
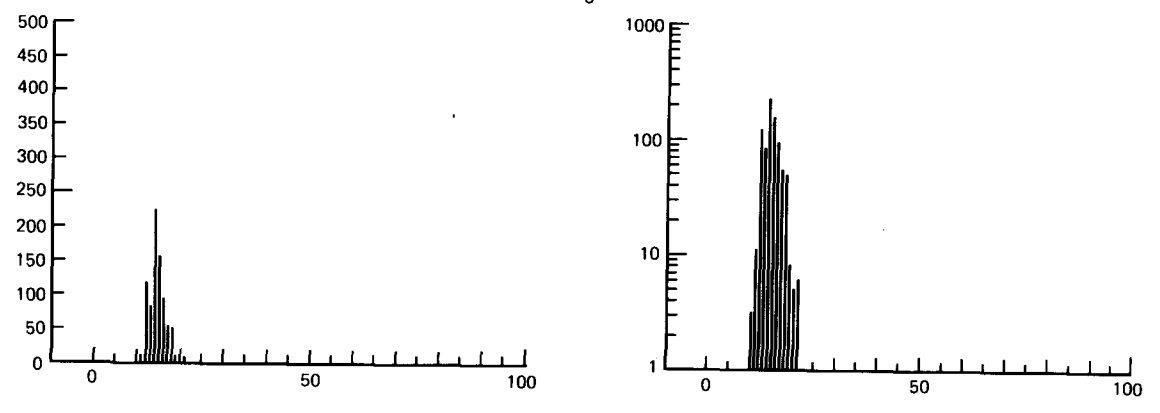
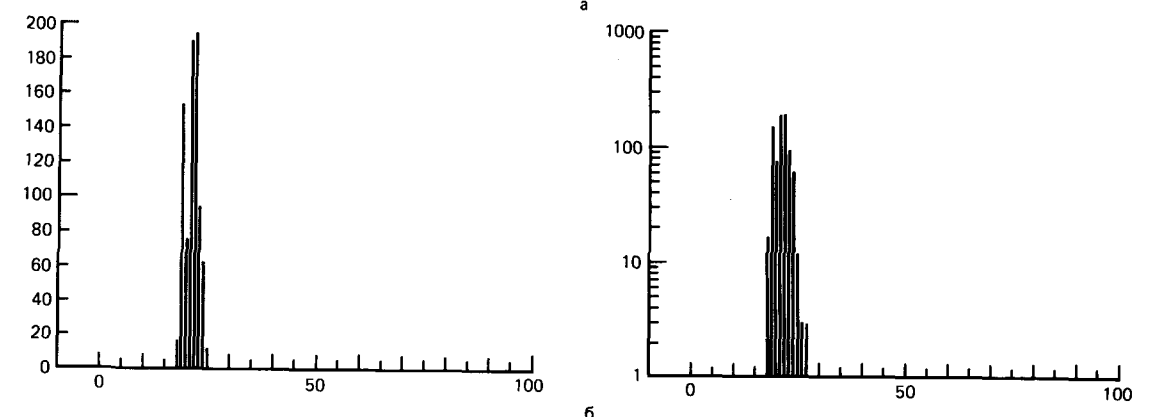
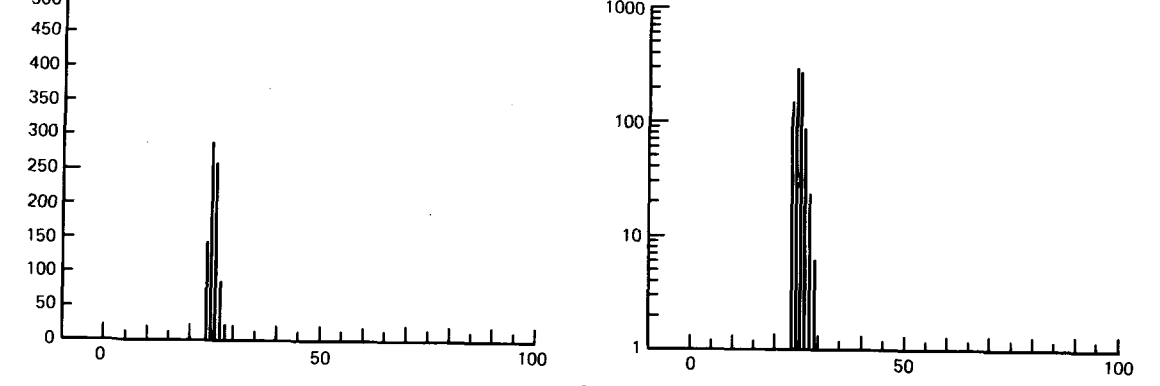


Рис. 125. Гистограммы фототональных характеристик класса «городская застройка» после медианной фильтрации во всех четырех зонах МСС.
а – зона 4; б – зона 5; в – зона 6; г – зона 7. Слева – линейная шкала; справа – логарифмическая шкала. (ГЕОМАПС, Западный Берлин.)

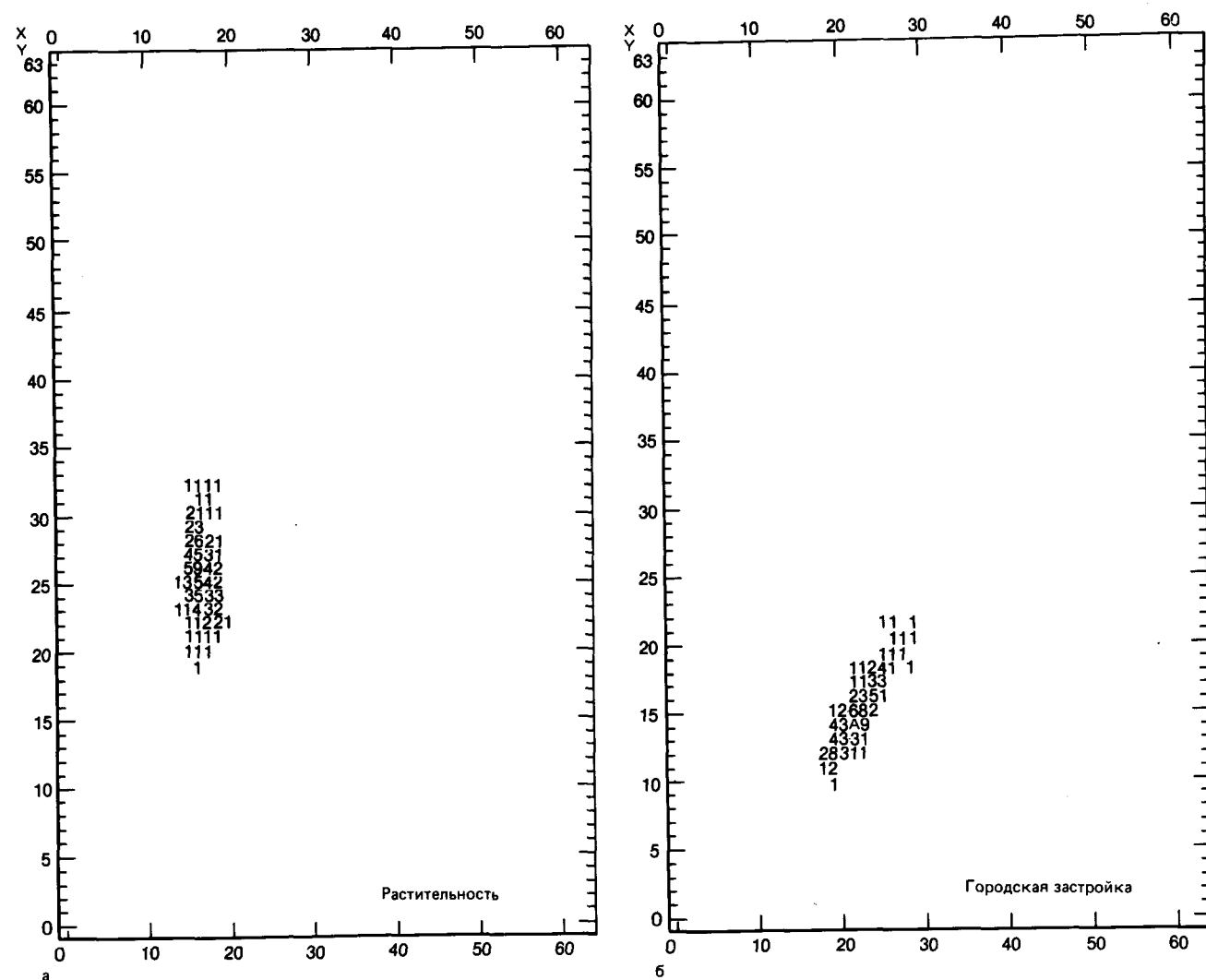


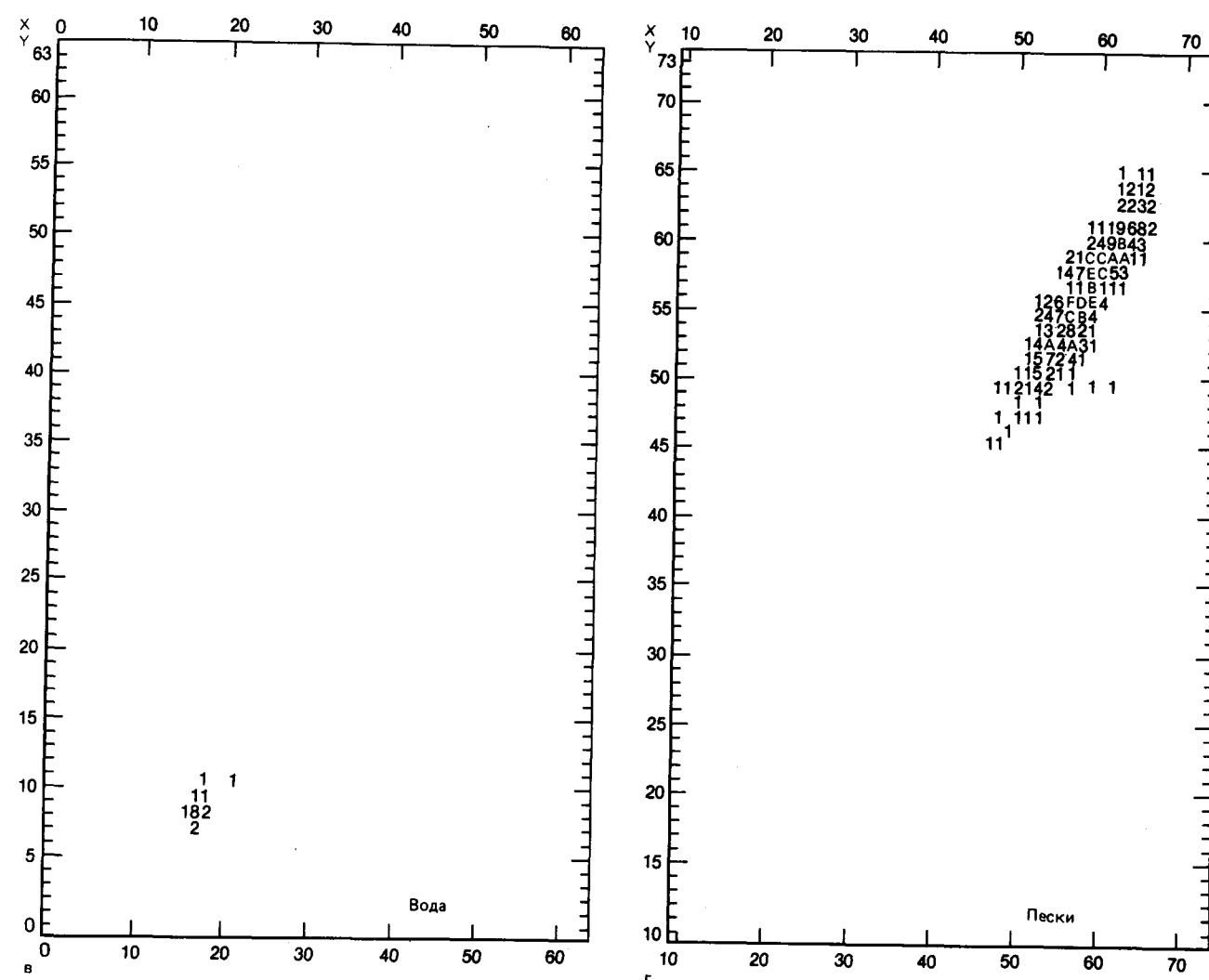
Рис. 126. Скаттерграммы спектральных отражающих свойств классов «растительность» (а), «городская застройка» (б), «вода» (в) и «пески» (г). По горизонтали—зона 5, по вертикали—зона 6. Скаттерграммы отражают распределение показателей (естественный разброс значений) каждого класса на рис. 122. Объяснения в тексте. (ГЕОМАПС, Западный Берлин.)

возможности и осуществляются гораздо быстрее.

Дигитайзер может быть выполнен либо отдельно от счетно-решающего устройства, либо совмещен с ним (к примеру, ЭВМ «Хьюлетт-Паккард» с дигитайзером и плоттером, т. е. периферийными устройствами ввода и вывода). Координаты начала и конца фотолинеамента относительно произвольно выбранной точки снимка или точки с определенными топографическими координатами в ЭВМ. Некоторые возможности интерпретации и воспроизведения фотолинеаментов описаны в разд. 5.4.2–5.4.5 на примере картирования линеаментов Гарца ФРГ и ГДР. Рис. 130 показывает фотолинеаменты Гарца, откар-

тированные по снимку «Лэндсат» (с применением программы для ЭВМ, описанной Цомбосом и Сурборгом [297]).

5.4.2. Определение простираний фотолинеаментов и воспроизведение их в виде гистограмм и роз-диаграмм. На рис. 131 приведены гистограммы откартированных по снимку «Лэндсат» фотолинеаментов Гарца, обработанных по программе РИВЕРЛИН. На них отражена суммарная длина линеаментов по различным интервалам простираний в градусах. Гистограммы позволяют установить, что объединение данных по интервалам 10 и 5° слишком грубо и показывает лишь общие тенденции, не позволяя разделить близко



расположенные друг к другу максимумы. Представление по интервалам 1° слишком дифференцировано для большинства задач и трудно интерпретируется. К тому же точность определения простираний фотолинеаментов, картируемых по снимку «Лэндсат», и ввод ее в ЭВМ с помощью дигитайзера недостаточны для столь детальных построений. Хорошие геометрические свойства снимков «Лэндсат», прежде всего в районах со слабо- и среднерасчлененным рельефом, и разрешающие возможности дигитайзера делают возможным воспроизведение и анализ линеаментов по интервалам 1° лишь в том случае, если картирование и дигитализация выполнены аккуратно и внимательно. Однако наилучшим представляется объединение данных по интервалам 3°. Оно достаточно дифференцировано и дает возможность сопоставлять данные картирования и компасных замеров в поле без серьезных ошибок по направлению. При сопоставлении простирания разрывных структур, откартированных

по снимкам «Лэндсат», с литературными данными встречаются определенные трудности, поскольку в литературе, как правило, содержатся слишком обобщенные данные (к примеру, «меридиональные структуры с простиранием от 170 до 15°» или «северо-западные структуры с простиранием от 110 до 160°»), в то время как распределение простираний различных систем разрывных нарушений по снимкам «Лэндсат» устанавливается со значительно более высокой точностью. Сопоставить данные, полученные по снимкам «Лэндсат» и литературным источникам, легче, если результаты наблюдений в публикациях представлены в виде круговых диаграмм. Поскольку максимумы концентраций направлений простираний трещинных и разрывных систем определяются с удовлетворительной точностью, круговые диаграммы позволяют определять отклонения пространственного положения определенных систем трещин и разрывов от главных направлений. Программу можно составить

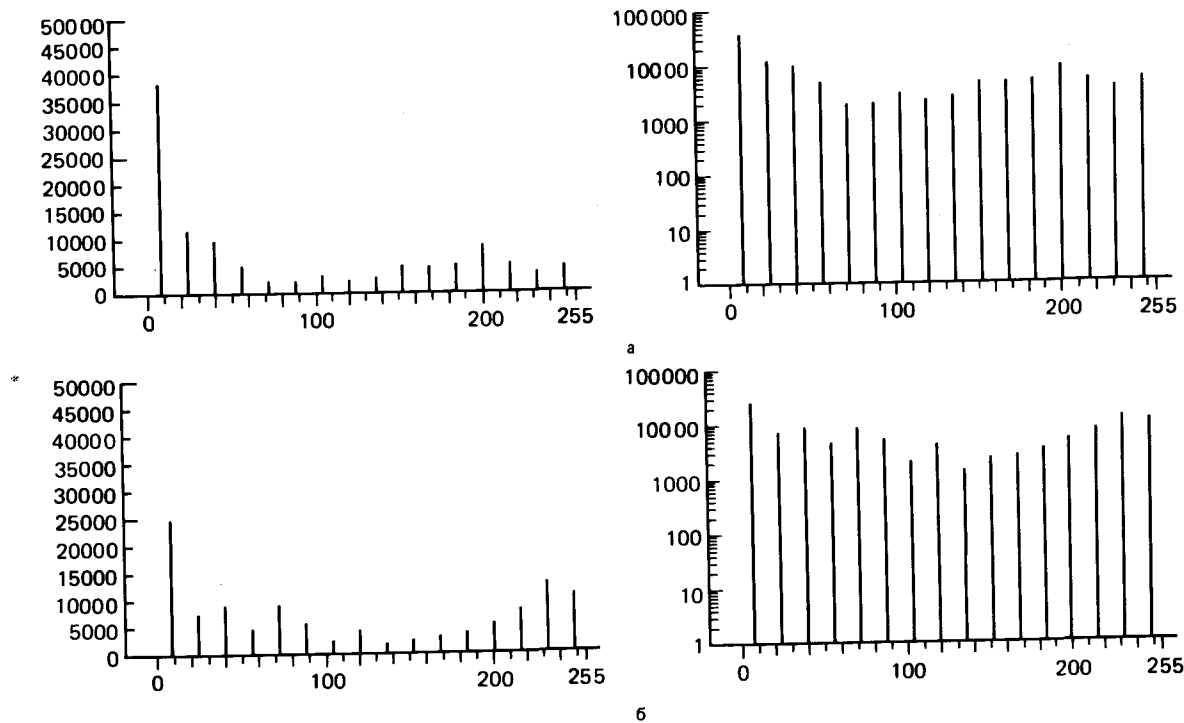


Рис. 127. Статистические характеристики всего снимка в зоне 5 МСС с 16 классами. Абсцисса – значения яркостей пикселей, ордината – число пикселей (слева – в линейном масштабе, справа – в логарифмическом). *а* – результаты после фильтрации сканирования и линейного контрастирования между максимумом и минимумом. Значения в минимуме и максимуме суммированы, так как их сумма не превышает 1%; *б* – результаты после линейного и дополнительного логарифмического контрастирования. (ГЕОМАПС, Западный Берлин.)

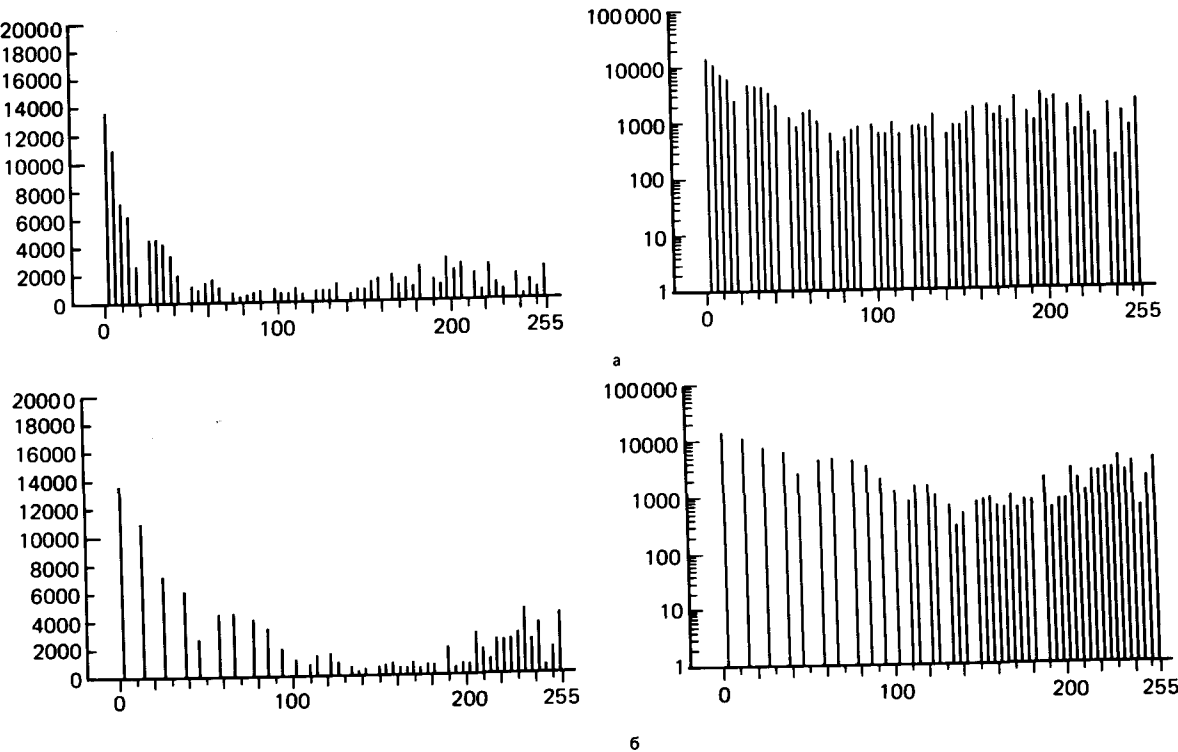


Рис. 128. Статистическая характеристика всего снимка в зоне 5 МСС с 64 классами. Остальное аналогично рис. 127.

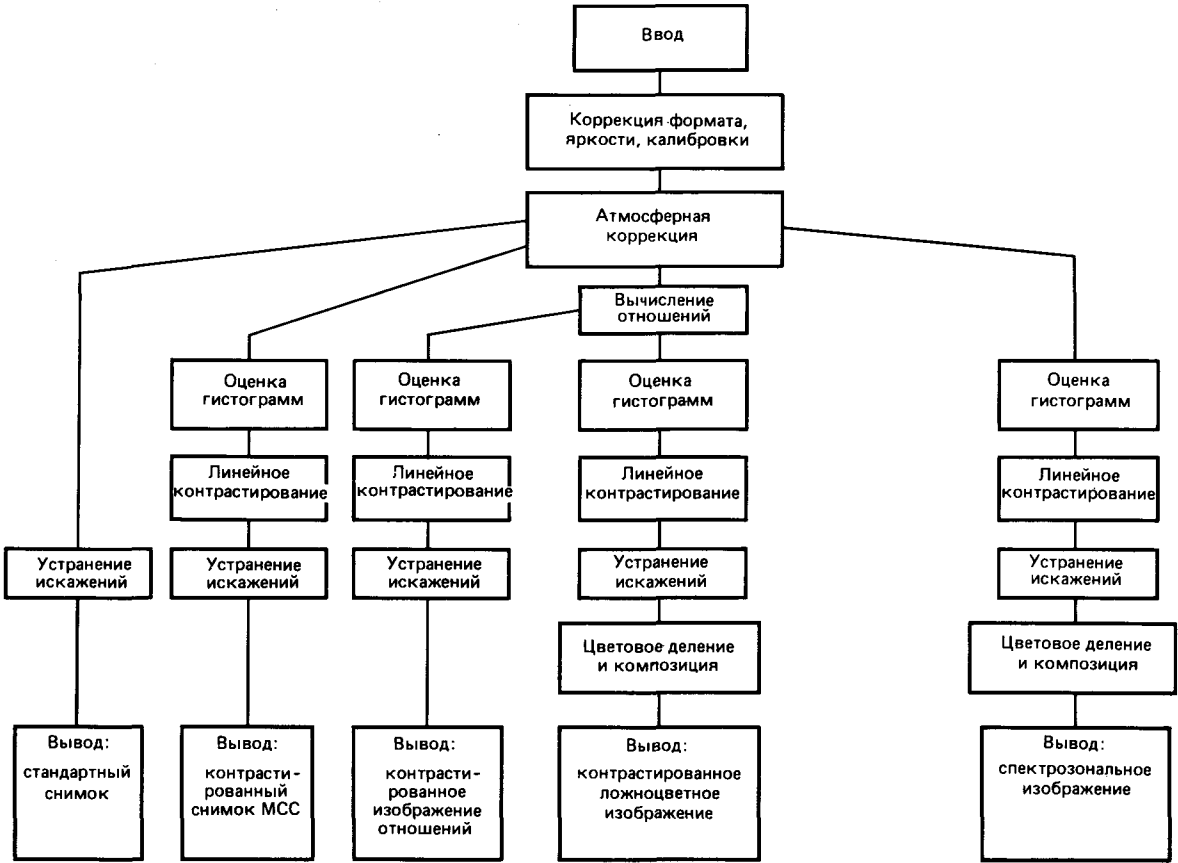


Рис. 129. Этапы обработки изображений «Лэндсат» и типы представляемых материалов [260].

так, чтобы воспроизвести на гистограммах рассеивание простирающихся картируемых линейных элементов, задаваясь определенным изменчивым градусным интервалом. Для этого надо вывести средние значения различного порядка. Рис. 131 на двух нижних графиках показывает влияние этого приема на форму гистограмм. Таким образом, представление данных в виде гистограмм может изменяться в соответствии с поставленной задачей.

5.4.3. Выявление и воспроизведение точек пересечения линейных элементов. С помощью программы ШНИПУ-ЛИН на карте можно показать реальные точки пересечения линейных элементов. Очень важно изучить частоту пересечения фотолинейных элементов для того, чтобы выявить участки и зоны повышенной трещиноватости с целью прогнозов рудоносности и нефтегазоносности и для постановки гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. Программа выбирает из любого числа известных ЭВМ фотолинейных элементов те линейные элементы, которые имеют общую точку с одним и тем же значением координат. Это и есть тот пункт, где они пересекаются. Пространственное расположение точек пересечений выводится на карту, на кото-

рой можно легко установить участки наиболее частых пересечений. Кроме выявления и воспроизведения точек реальных пересечений двух фотолинейных элементов программа предоставляет возможность определять и точки возможных их пересечений. Она основана на том, что каждый фотолинейный элемент со свойственным ему простирающимся продолжается в обе стороны. Картируемые по снимкам «Лэндсат» фотолинейные элементы представляют весьма протяженные системы трещин и разломов, которые проявляются в картируемой форме только на более или менее удаленных друг от друга участках своей полной длины. Продолжение или соединение отдельных отрезков линейных элементов дает возможность установить потенциальное расположение разрывных структур. Рис. 132 воспроизводит карту пересечений линейных элементов в районе Гарца по данным «Лэндсат». По этой карте можно, с одной стороны, определить участки повышенной концентрации точек пересечений и, с другой – выявить зоны повышенной раздробленности разрывными нарушениями.

5.4.4. Воспроизведение регионального распространения фотолинейных элементов определенных простирающихся.

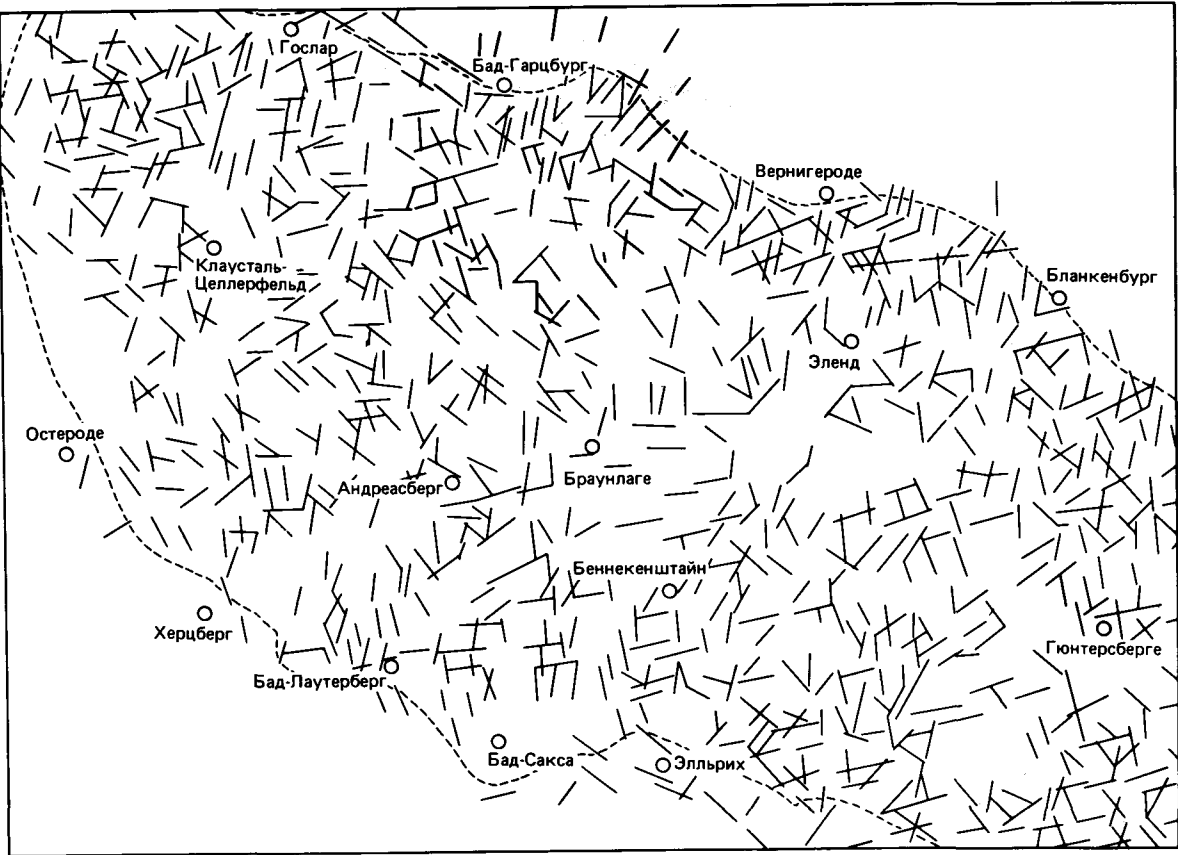


Рис. 130. Фотолинементы Гарца по снимку «Лэндсат».

Отбор линементов определенных простираний и воспроизведение их пространственного расположения осуществляются с помощью программы РИДАР-ЛИН. Она дает возможность выявить положение разрывных структур определенных простираний и их локальное, зональное или региональное значение. С помощью этой программы можно выделять одно или несколько направлений с изменяемой шириной интервала объединения (к примеру, 1, 5 или 10°). Анализ пространственного распределения простираний отдельных разрывов указывает на следующий факт, установленный эмпирически: во многих регионах устоявшиеся нарушения определенных простираний проявляют себя приблизительно одинаково. Нередко они обнаруживают черты эквидистантности (т. е. равного отстояния друг от друга) и группирования во взаимно перпендикулярные системы, что может быть по желанию подчеркнуто программой обработки. С помощью этой программы можно просто и быстро провести точный и селективный анализ направлений и пространственного распределения разрывных структур (рис. 133). К таким же заключениям приходит Бухройтнер [36] для австрийской части Альп и их форланда.

При использовании трех перечисленных программ и прежде всего при анализе картографического воспроизведения отцифрованных фотолинементов необходимо учитывать, что изменения природных и ландшафтных условий внутри территории, охватываемой снимком «Лэндсат» или рядом соседних снимков, а также различия в картируемости фотолинементов могут оказать значительное влияние на число, длину и плотность откартированных линементов в определенном регионе. Изменения длины, густоты и пространственного распределения фотолинементов могут быть обусловлены местными условиями, отрицательно влияющими на возможности картирования линементов. Поэтому при анализе гистограмм и карт линементов следует избегать геологических ошибок и ложных заключений. Это касается как районов, покрытых растительностью, так и обнаженных районов, на которых развиты молодые осадки изменчивой мощности (например, в межгорных бассейнах), что обуславливает местные вариации длины и густоты фотолинементов. Кроме того, при анализе материалов съемок «Лэндсат» необходимо учитывать, что в соответствии с местным временем и направлением освещения Солнцем в момент съемки

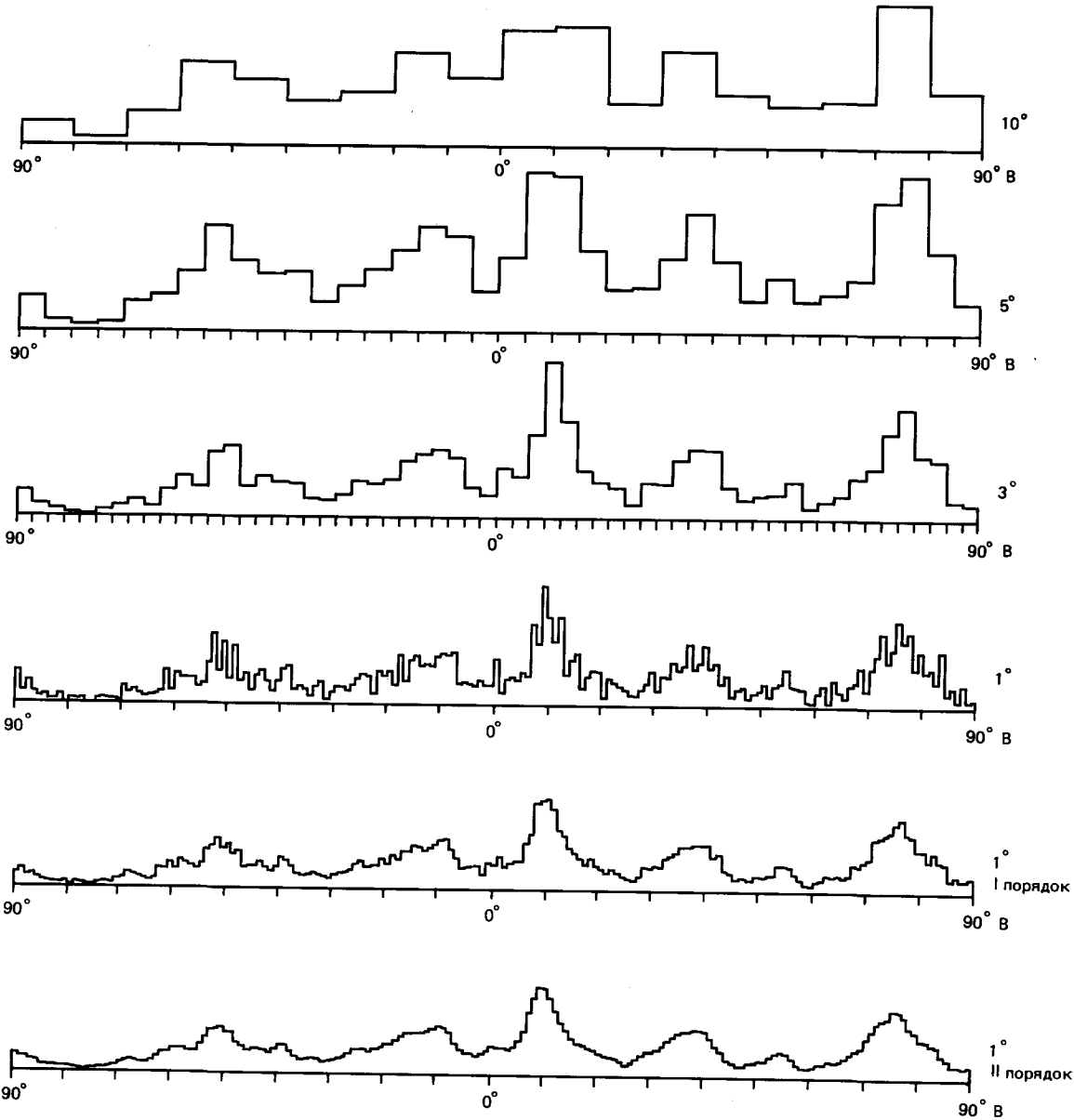


Рис. 131. Распределение простираний фотолинементов Гарца, установленных по снимку «Лэндсат». Объяснения в тексте.

линейные структуры северо-восточного простирания на снимках «Лэндсат» несколько подчеркиваются в ущерб структурам иных простираний. С другой стороны, направление линий сканирования (с азимутом около 100°) ухудшает возможность выявления линементов этого простирания по сравнению с линеаментами других направлений. Поэтому линементов этого направления на гистограммах и картах, как правило, несколько меньше, чем в действительности.

5.4.5. Воспроизведение зон региональной трещиноватости в системе координат Гаусса-Крюгера. Съем-

ки «Лэндсат», перекрывшие большие участки Земли, позволили осуществить региональное и межрегиональное картирование элементов разрывной тектоники, что было невозможно при работе ранее применявшимися методами, включая и аэрофотогеологическое картирование. Программы цифровой обработки данных позволили осуществлять построение гистограмм простираний и роз-диаграмм для любых по величине районов на основе регионального и межрегионального картографирования. С целью проведения такого картографирования основные координаты и топографические данные с помощью дигитай-

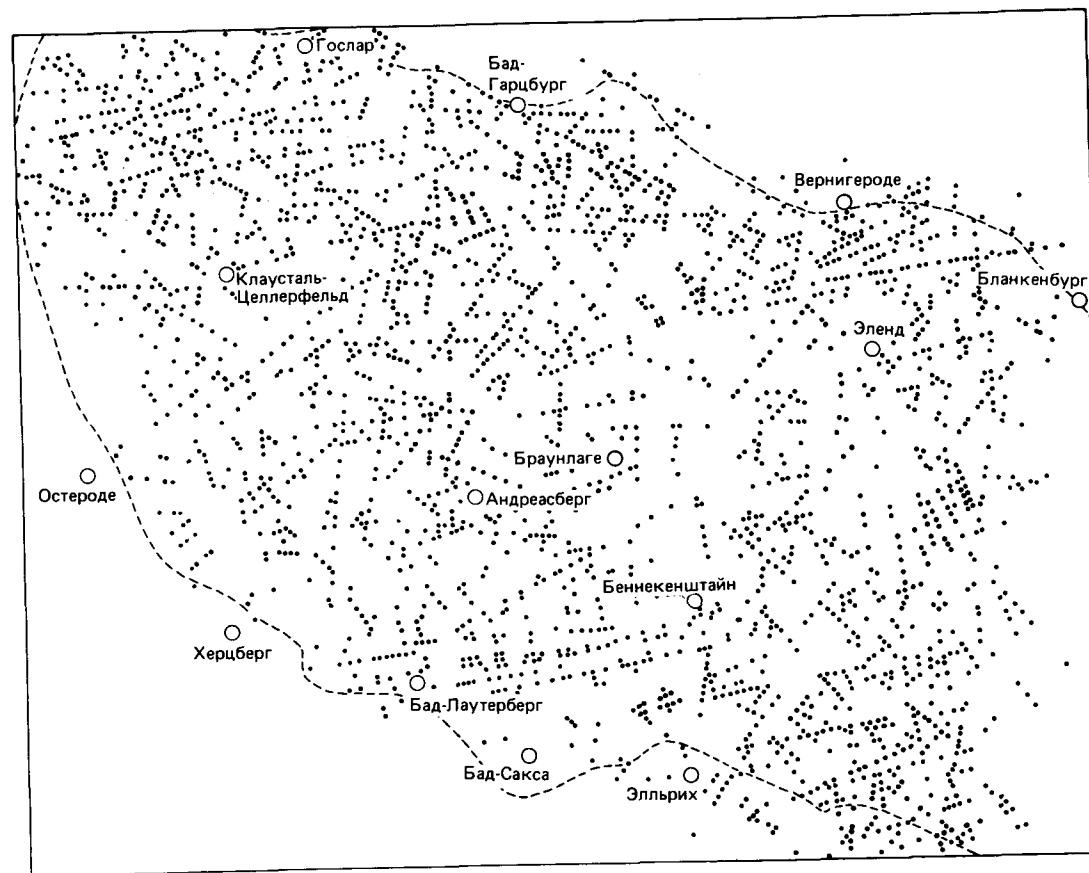


Рис. 132. Карта точек пересечения фотолинеаментов Гарца по данным обработки снимка «Лэндсат».

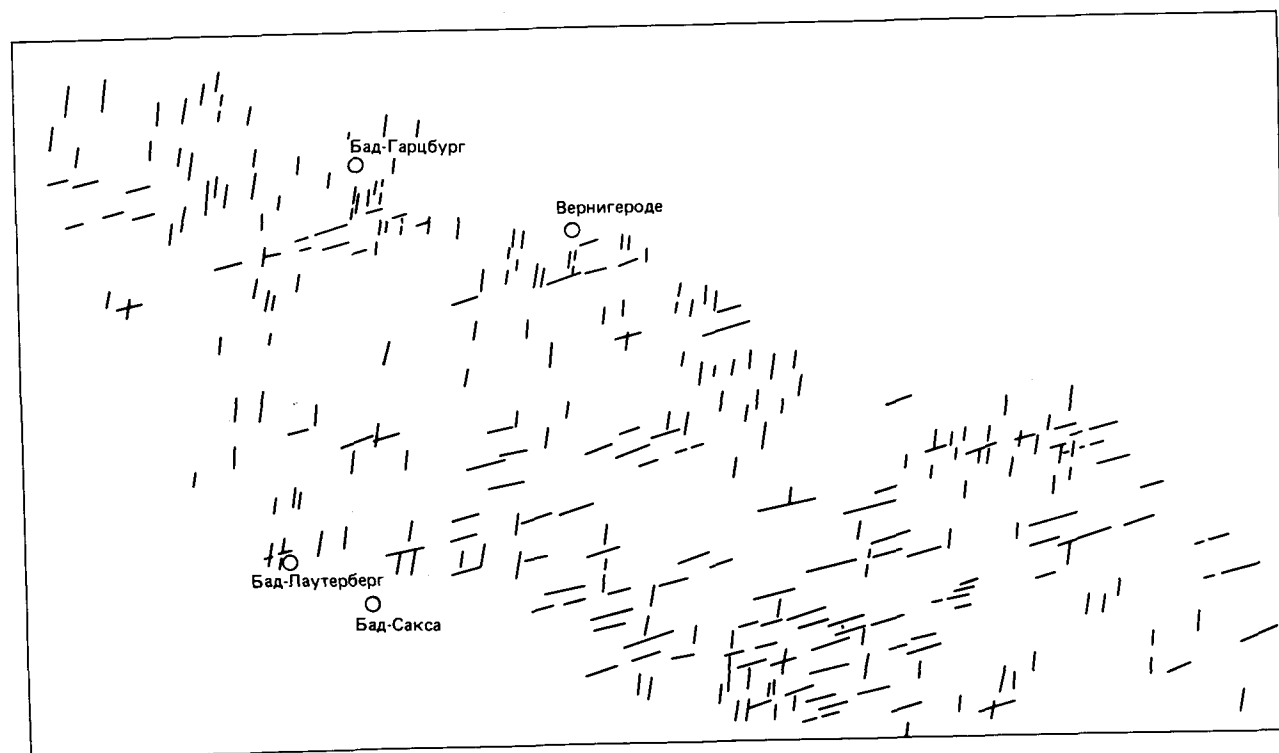


Рис. 133. Фотолинеаменты Гарца с простираниями 5–15° и 70–80°.

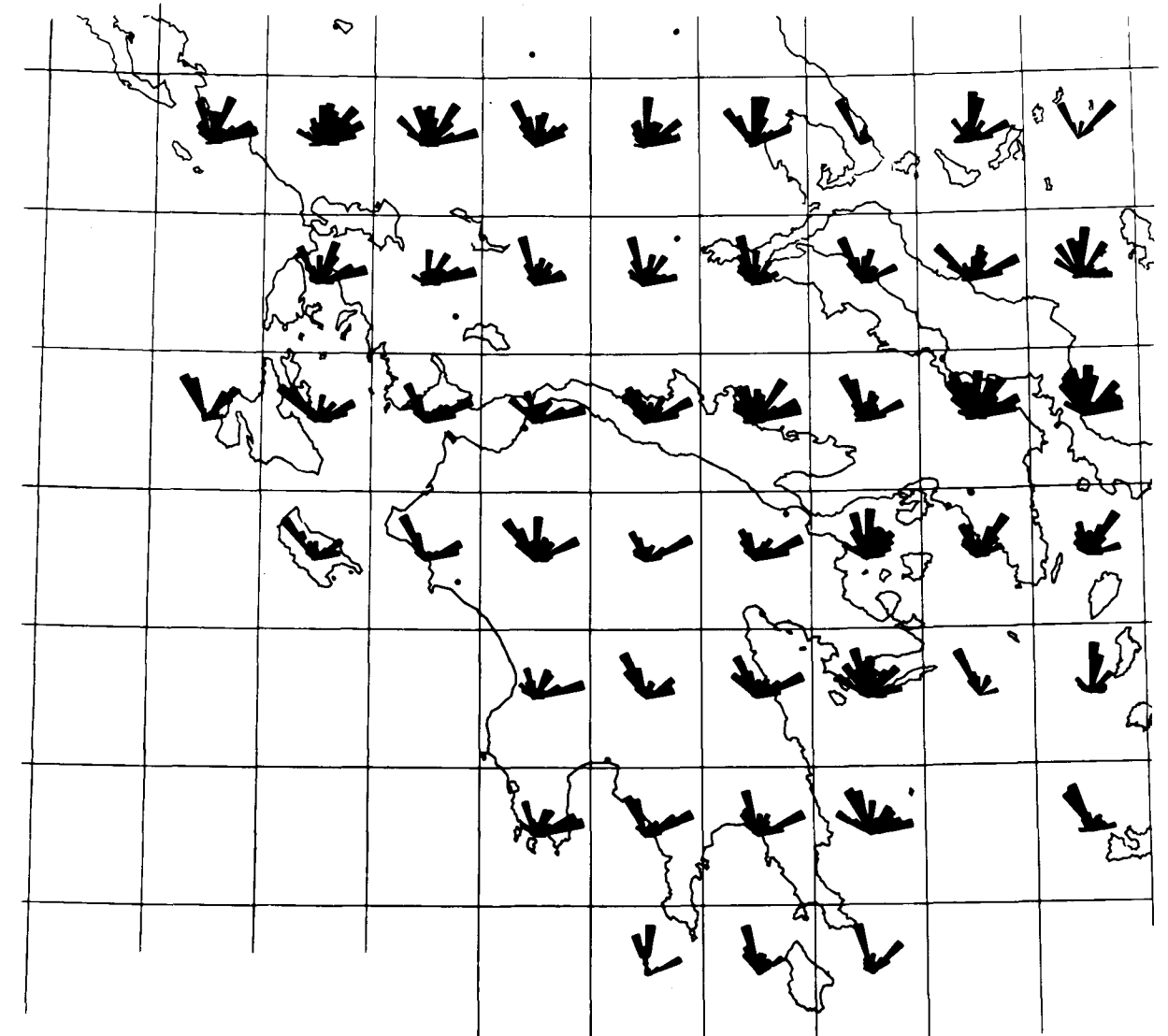


Рис. 134. Розы-диаграммы фотолинеаментов средней и юго-западной Греции, дешифрованных по снимкам «Лэндсат». Каждая роза составлена для территории трапеции топографической карты масштаба 1 : 50 000; осреднение по интервалам 10° [167].

зера вводятся в ЭВМ и совместно с данными по расположению и статистике простираний линеаментов выводятся на плоттер. На рис. 134 показана такая карта части территории Греции. Каждый прямоугольник на ней (в оригинале эта карта охватывает всю Грецию, Эгейский регион и западную Турцию) соответствует территории листа карты масштаба 1 : 50 000. Розы-диаграммы могут быть составлены по любым интервалам между азимутами. Для Греции были составлены карты по интервалам 3, 5 и 10° [167].

5.4.6. Замечания к интерпретации данных по статистике направлений разрывов. Сопоставление данных по

статистике простираний фотолинеаментов на снимках «Лэндсат» и данных по тектоническим наземным исследованиям в различных регионах показало, что картируемые по снимкам «Лэндсат» фотолинеаменты хорошо отражают разрывную структуру (преимущественно крутопадающие разрывы) картируемых регионов. Из этого следует, что даже относительно небольшое число фотолинеаментов, установленных по снимкам «Лэндсат», дает представительный статистический материал. Это видно на рис. 135, где показано распределение простираний 73 фотолинеаментов Гарца, откартированных по одному из снимков «Лэндсат», и 4000 трещин, замеренных Фребольдом [338] в районе плутона горы Брокен. Все прости-

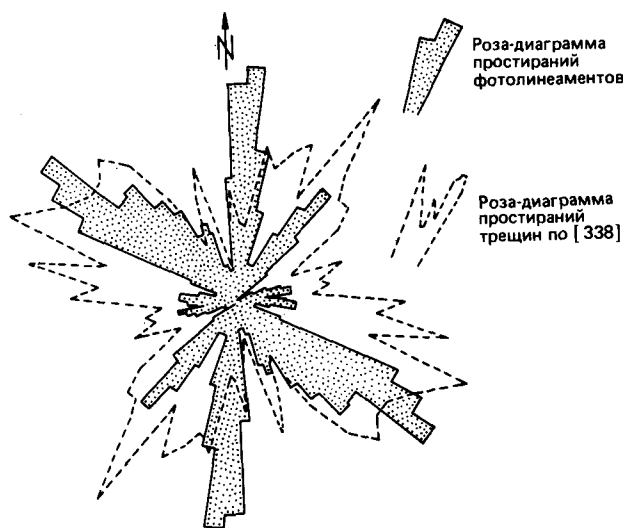


Рис. 135. Сопоставление простираций крутопадающих разрывов района плутона Брокен по данным дешифрирования снимка «Лэндсат» (73 фотолинеамента) и по данным полевых измерений [338] трещин (4000 замеров).

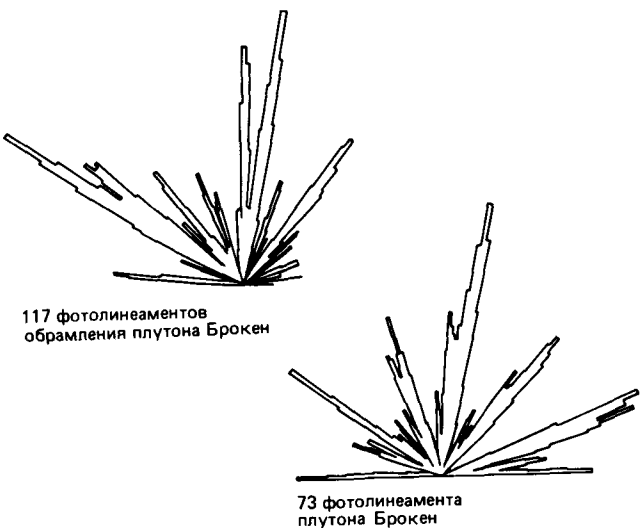


Рис. 136. Распределение простираций крутопадающих разрывов в районе плутона Брокен и его обрамления по данным дешифрирования снимка «Лэндсат».

рания трещин, наблюдавшиеся в поле, четко проявляются на розе-диаграмме простираций фотолинеаментов. Почти совпадают также главные и второстепенные максимумы розы-диаграммы. Сравнительный анализ показывает, что план разрывной тектоники плутона Брокен почти такой же, как в его обрамлении (рис. 136). Характерные для района Брокен простираения крутопадающих разрывных структур типичны для всего Гарца и его обрамления, из чего можно сделать вывод о том, что положение плутона Брокен отвечает заданной системе нарушений (или полю напряжений) и что сеть разрывов плутона Брокен формировалась под влиянием региональной сети разрывных нарушений верхней части земной коры. К аналогичным выводам [46] привели и полевые микроструктурные исследования в западной части массива Брокен и его рамы.

То, что фотолинеаменты, установленные по снимкам и мозаикам (фотосхемам) «Лэндсат», дают весьма представительную информацию по разрывной тектонике исследуемых регионов, видно также из рис. 137. Здесь показано распределение простираций крупных фотолинеаментов, дешифрированных [96] по снимкам «Лэндсат» и космической фотокarte ФРГ, а также всех разрывных нарушений, показанных на геологической карте ФРГ масштаба 1:1 000 000 [2]. Четко видно далеко идущее совпадение данных дешифрирования снимков «Лэндсат» и результатов наземных тектонических исследований.

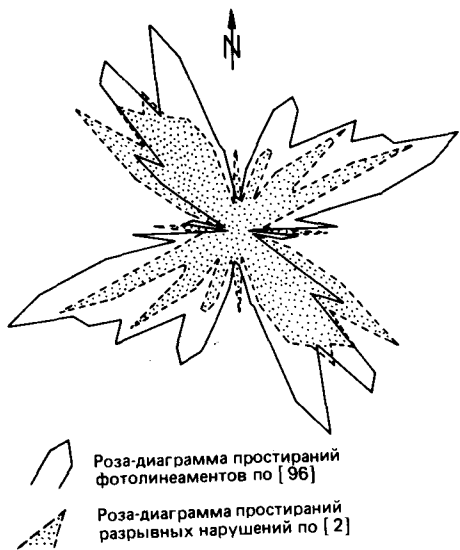


Рис. 137. Сопоставление простираций крупных фотолинеаментов, дешифрированных на снимках «Лэндсат» и космической фотокarte ФРГ масштаба 1:1 000 000, и разрывных нарушений, показанных на геологической карте ФРГ масштаба 1:1 000 000 [339].

6. МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ: ИНФОРМАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ, ИНТЕРПРЕТАЦИЯ, ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

6.1. Введение

В разд. 6.2–6.3.3 на представительных примерах рассматриваются информационное содержание и сферы применения снимков, полученных различными методами дистанционного зондирования. Особое внимание обращено на возможности фотографического и нефотографического способов съемки при постановке особых проблем и особых практических и научных задач в области геологии, например при картировании литологических комплексов и тектонических структур, при поисках месторождений, осуществлении гидрогеологических проектов, выявлении геотермических аномалий и изучении современных геологических процессов, в том числе в рамках экологических исследований. Представляет интерес, каким образом определенные геологические особенности местности отразятся на узкозональных снимках при мультиспектральном методе съемки, какие объекты и состояния местности особенно контрастно выделятся на узкозональных снимках определенных каналов или диапазонов длин волн, как контрасты в отображении определенных объектов местности или ее состояний (и тем самым их распознаваемость и картируемость по частному узкозональному изображению или комбинации изображений) могут быть подчеркнуты благодаря применению аналоговых и цифровых методов обработки снимков. Показано также отображение объектов местности и ее состояний на инфракрасных тепловых и радиолокационных снимках, которые сделаны в интервалах длин волн за пределами видимого спектра и отражают ландшафт новым и непривычным образом. Наконец, проиллюстрированы преимущества снимков со спутников, которые благодаря синоптическим изображениям с высокой разрешающей способностью предоставляют геологу новые возможности обзора, картирования и анализа. На них исследователь распознает связи и отличия региональных и локальных геологических комплексов и структур, которые до сих пор в сопоставимом масштабе могли представляться и интерпретироваться лишь на мелкомасштабных картах – примерно от 1:1 000 000 до 1:250 000, а они все еще представляют собой лишь

упрощение соотношений на местности, тематические подборки. Напротив, изображение со спутника при том же масштабе намного лучше (в смысле пространственного разрешения и сохранения естественности) отражает поверхностные признаки и реалии заснятой местности. Другой аспект заключается в том, что мелкомасштабные геологические карты большей частью основаны на результатах полевых работ, длящихся иной раз десятилетиями, большого числа сотрудников и рабочих отрядов, т. е. на тематически и качественно довольно разнородных данных частных съемок. Снимки со спутников предлагают в качестве основы любому геологу или небольшой рабочей группе возможности тематической обработки весьма обширных площадей для постановки определенных вопросов на базе современного уровня наших знаний. В качестве важного преимущества к этому добавляется возможность проведения регионального картирования с существенно меньшими затратами времени и средств, чем при использовании традиционных методов.

В тексте упоминаются некоторые публикации, связанные с рассматриваемой темой (см. также список литературы). Число публикаций о методах дистанционного зондирования и возможностях его тематического применения на практике и в науке весьма велико. Оно стремительно возросло в последние годы. Относящиеся к теме актуальные литературные данные имеются во втором издании «Manual of Remote Sensing» (1983), в журналах «Photogrammetric Engineering and Remote Sensing», «Photogrammetria» и «Bildmessung und Luftbildwesen».

6.2. Снимки «Скайлэб»

(Геологическое содержание изображения, примеры интерпретации.)

Большой площадной охват, высокая пространственная разрешающая способность, точность определения позиции снимков камерами S 190A и S 190B вполне подходят для тематической интерпретации снимков со спутников. Особые преимущества дала возмож-



Рис. 138. Снимок камерой ETC (S 190B), Эфиопия. Увеличение масштаба снимка до 1 : 500 000. Оригинал в условных цветах (NASA, SL 3-RL-45-341).

ность стереоскопического рассмотрения картируемых участков местности. В особенности это относится к цветным и ложноцветным снимкам камерой ETC (Earth Terrain Camera).

На рис. 138 увеличенный фрагмент (около 1 : 500 000) изображает пограничную область между Эфиопским нагорьем (юго-восточнее Асмэры) и Красным морем (залив Зула; север-справа внизу). Нагорье образовано в основном породами кристаллического фундамента. Типично чередование пачек филлитов, зеленых сланцев, метаграувакк и мета-

конгломератов. Простираение слоев в переслаивающихся пачках можно видеть на левом краю снимка. Местами в фундаменте появляются граниты (округлая структура). В верхней половине снимка наблюдаются останцы древней поверхности пенепленизации, развившейся на комплексе фундамента. В районе нагорья, разрастаясь к Красному морю, появляются базальтовые вулканы и дайки от третичного до четвертичного возраста. У края гор выделяются конуса выноса, галечниковые равнины, песчаные поверхности и дюны, а также древние береговые линии.

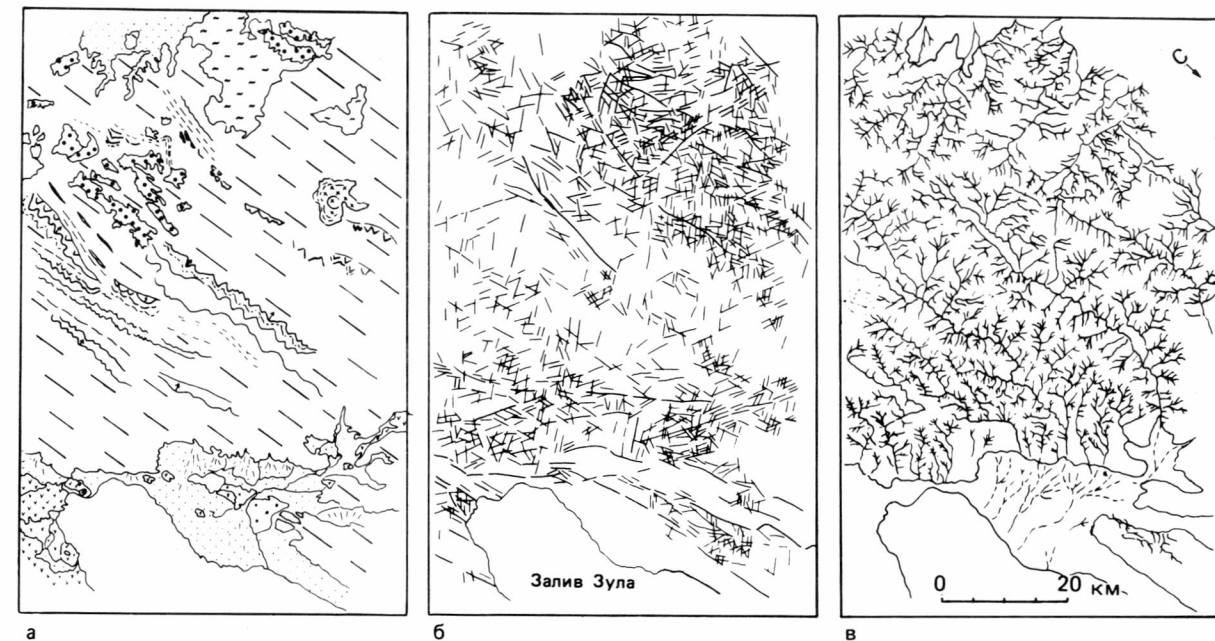


Рис. 139. Фрагменты трех тематических карт площади снимка на рис. 138, Эфиопское нагорье. Карты базируются на следующих данных:
а – литофациальные комплексы: диагональные штрихи – кристаллические серии докембрийского фундамента, крестики – интрузия, волнистые линии – основные интрузивные породы (?), крупные точки – юрские осадки, галочки – третичные и четвертичные вулканы, мелкие точки – четвертичные образования; б – тектонические структуры; в – дренажная сеть.

Условная фотогеологическая интерпретация цветных и ложноцветных снимков исследуемой области Эфиопии позволила выделить 16 литофациальных комплексов (твердых и рыхлых пород), провести картирование региональных и локальных разрывных структур и составить довольно детальную карту поверхностного стока. На рис. 139 показаны фрагменты трех тематических карт одной частной площади в пределах изучаемой области.

Наряду с применением фотографических снимков высокого разрешения со спутников для литологического и тектонического картирования следует особенно отметить их применение для региональных гидрогеологических работ. Рассмотрение под стереоскопом дает вполне надежные сведения о положении водоразделов, о положении и размерах водосборной области. Имеет значение и корреляция гидрографической карты с данными литологического и тектонического картирования изучаемой области.

Цветные снимки камерой ETC особенно хорошо подходят для литофациального картирования аридных и семиаридных областей с их благоприятными условиями обнаженности. На рис. 141 изображено структурное строение области поднятия Сан-Рафаэль, шт. Юта, США, – антиклиналь длиной около 116 км. Опорные горизонты распознаются и прослеживаются по серому либо (в оригинальном виде) цветному тону и по топографическим признакам.

В поросших растительностью областях с более или менее мощной корой выветривания ложноцветные снимки высокого разрешения камерой ETC (покрытие площади 109 × 109 км при разрешении на местности 23 м) могут быть полезны для геологического картирования, если различия в литологическом строении фундамента отражаются в изменении видов и плотности растительности и различиях в землепользовании. Это иллюстрирует рис. 142 – стереопара снимков. Опорные горизонты или пласты отчетливо выделяются среди окружения в виде куэст и разницы в растительности. Это дает возможность картирования складчатых структур данной частной области орогена Аппалачей (близ Алтуны, шт. Пенсильвания): простираение и погружение, а также воздымания и ныряния шарниров складок. Отчетливо видна вергентность складчатой структуры (к левому краю снимка).

Здесь еще раз следует указать на то, что, с одной стороны, по снимкам «Скайлэб», покрывающим значительные площади и имеющим высокое разрешение, можно проводить детальные наблюдения и картирование тектонического строения территории, а с другой – корреляцию тектонических структур (с учетом иных особенностей местности) через значительные расстояния, превышающие 100 км. Получение снимков состояния и их анализ делают возможным создание тектонических схем регионального и суперрегио-



Рис. 140. Снимок камерой ETC (S 190B), Эфиопия. Увеличено до масштаба 1:500 000. Оригинал в условных цветах. Внизу – базальтовые вулканиты вдоль центрального грабена Данакиль. (NASA SL 3-RL-87-367).

нального масштабов. Это доказали исследования в рамках экспериментов «Скайлэб», которые вместе с их итогами приведены в томе «Skylab EREP Investigations Summary», NASA, 1978. В этом издании показаны также возможности использования многозональных снимков «Скайлэб» для поисков рудных месторождений. На снимках камерами S 190A и S 190B рассмотрены связи между пространственным распределением фототиняментов и рудными жила-

ми, выделены кольцевые структуры и измененные зоны как индикаторы залежей медно-порфирового типа, применен компьютерный способ обработки снимка для контрастного представления измененных зон. Исследования на некоторых полигонах США, Центральной Европы и Южной Америки показали, что фотоснимки камерой типа S 190B, имеющие высокое разрешение и покрывающие значительные площади, могут успешно применяться также для



Рис. 141. Литофациальные комплексы и тектоническое строение района поднятия Сан-Рафазль, шт. Юта. Масштаб около 1:500 000. Оригинальное изображение на цветной пленке (NASA SL-2-81-014).

картирования литологических комплексов и тектонических структур с целью поисков нефти. Особый интерес здесь представляет то, что на снимках «Скайлэб» слаборасчлененных гумидных областей по различиям серого тона и особенностям дренажной

сети выделяются структуры основания (антиклина-ли, куполообразные структуры), которые отражают местоположение известных структур, связанных с месторождениями, или приводят к открытию новых месторождений. Можно также показать, что ввод в

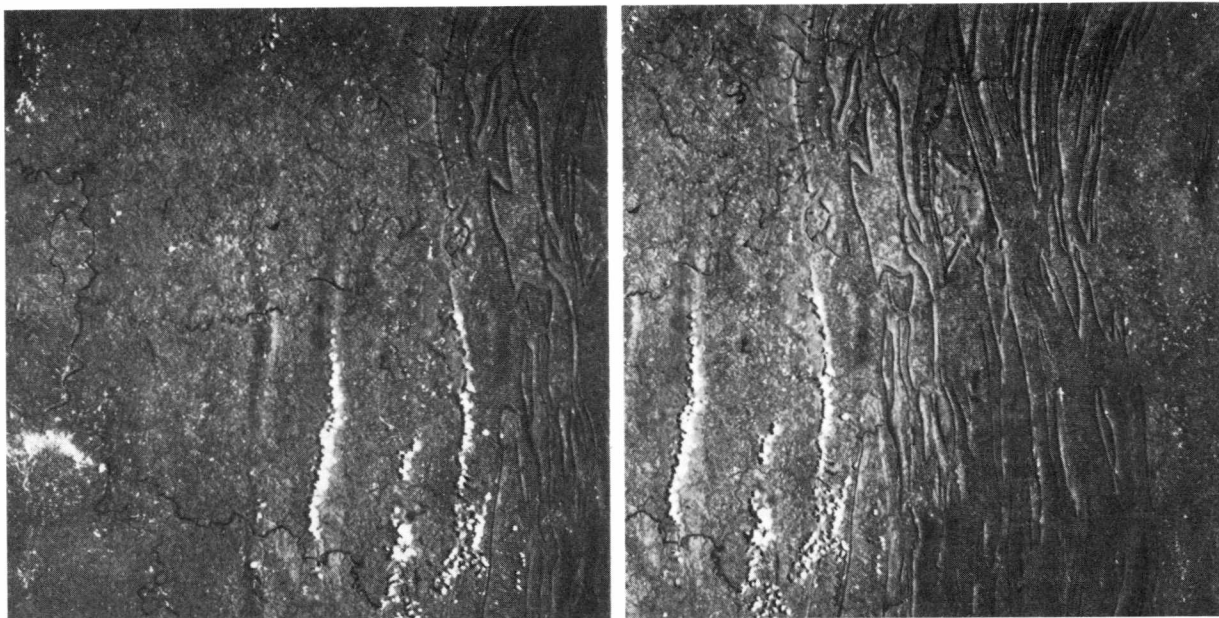


Рис. 142. Литофациальные комплексы и тектонические структуры Аппалачей, на снимках «Скайлэб». Масштаб 1 : 2 850 000. Стереоскопическое перекрытие, оригиналы – в условных цветах (NASA SL 3-21-191 и SL 3-21-192).

действие геофизических методов на базе предшествовавшей интерпретации изображений со спутников может быть осуществлен более рационально, и это позволит сэкономить средства. Наконец, с помощью интерпретации изображений со спутника можно выявить главные особенности площади, предлагаемой в концессию.

На значение косвенных индикаторов различных особенностей подземных вод указывают исследования Баннерта и др. (см. [168]) в аргентинской пампе. В районе работ уровень зеркала массива грунтовых вод, сформировавшегося в четвертичных лёссовых отложениях, колеблется между отметками от 0 до 2 м ниже дневной поверхности. Содержание солей в приповерхностных грунтовых водах относительно высокое, однако от места к месту оно меняется. При обработке снимков «Скайлэб» в ИК-диапазоне бросалось в глаза, что многие участки местности выделяются светло-синей окраской из своего окружения, для которого характерны красные тона растительности сельскохозяйственных областей (рис. 143). Сопоставления с наземными наблюдениями показали, что зеркало грунтовых вод лежит не глубже 5–7 м, соленость почвы и грунтовых вод повышена и растительный покров характеризуется преобладанием соленелюбивых форм (галофитов). Таким образом, на снимках в ИК-диапазоне светлыми голубыми тонами выделяются районы, в которых из-за сравнительно низкого залегания зеркала грунтовых вод происходит усиленное испарение, приводящее к значительному повышению содержания соли в почве и грунтовых водах и вследствие этого к неблагоприятным усло-

виям существования для определенных видов растений и, следовательно, к уменьшению плотности растительности. Полевые работы показали, что наилучшие условия произрастания наблюдаются в тех районах, где зеркало грунтовых вод располагается, как в изученной области, примерно в 10 м под зоной испарения или глубже. Области с соответствующим залеганием уровня грунтовых вод выделялись на ложноцветных снимках «Скайлэб» красным тоном, присущим густой растительности, богатой хлорофиллом. Баннерту и др. удалось провести сопоставление нюансов окраски поверхности местности на ложноцветных снимках с глубиной залегания зеркала грунтовых вод заснятой области и составить карту предполагаемых глубин уровня грунтовых вод в области работ по проекту (рис. 144). Точно так же Ли и Хатчинсон [177] сообщают о вариациях нюансов окраски и текстуры на снимках «Скайлэб», вызванных различиями растительности и свойств почв, т. е. поверхностными явлениями, которые также обусловлены разницей в глубине залегания уровня грунтовых вод.

Для гидрологической ситуации в области работ Баннерта и др. важны также так называемые бахос (Bajos) – выдержанные мелкие западины рельефа без поверхностного стока, которые на изображениях со спутников вырисовываются как полосы иной цветной или серой тональности (рис. 145). Они достигают ширины примерно 100–200 м, появляются через довольно равномерные интервалы примерно 2 км и обусловлены, возможно, структурами фундамента. После сильных дождей вода скапливается в основа-

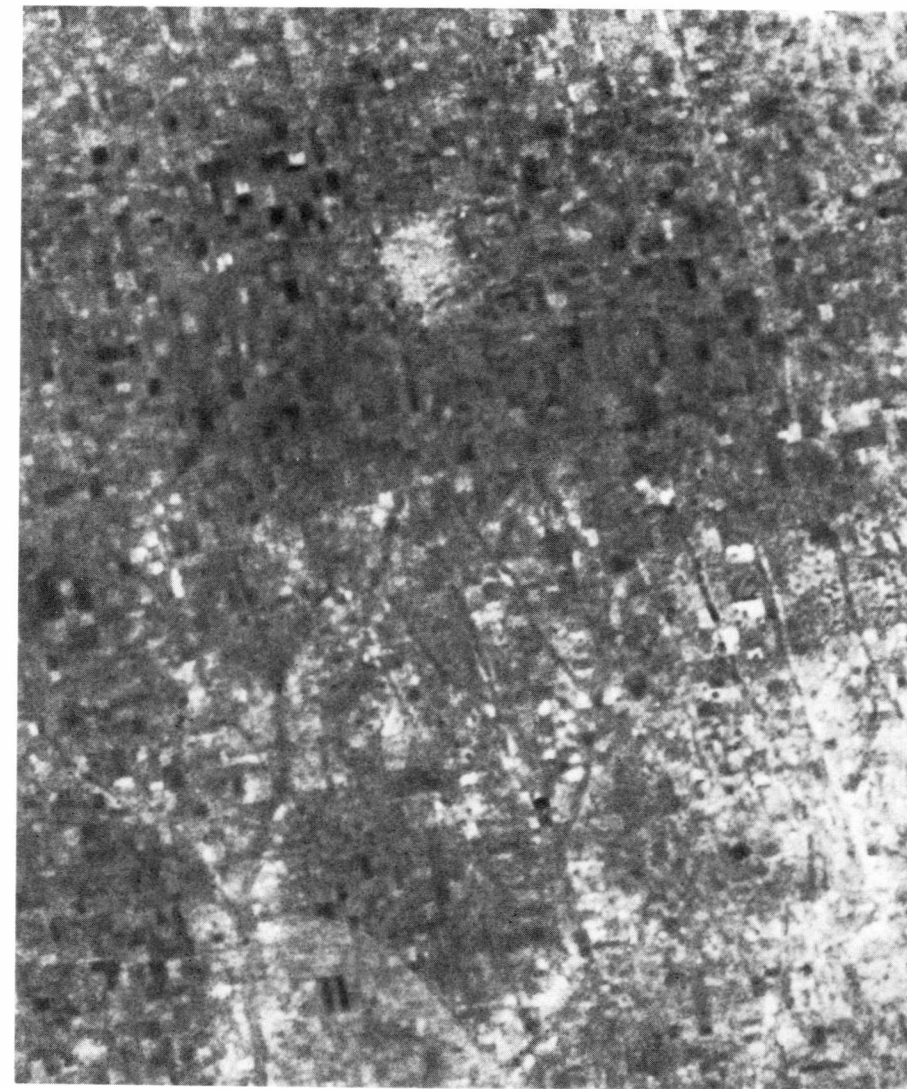


Рис. 143. Ландшафт Аргентины на снимке «Скайлэб». Районы сельского хозяйства – различия растительности и свойств почв – вырисовываются градациями серого тона. Оригиналы в условных цветах (NASA, SL 3-34-163).

нии бахос. Образуются пригодные для сельского хозяйства пресноводные линзы, тогда как в остальных местах грунтовые воды остаются солеными. На основании геофизических данных и пробных откачек в отдельных бахос Баннерту и др. удалось рассчитать аккумуляционные возможности бахос и ввести эти расчеты в гидрологическую оценку возможностей использования и анализ прихода – расхода. Для условного предварительного зондирования глубин залегания уровня грунтовых вод и их солености в пампе требуется примерно по 20 скважин на 100 км². Для более детального исследования водных запасов требуется примерно 80 скважин. С помощью данных, полученных в результате интерпретации снимков «Скайлэб» (или «Лэндсат»), можно сократить число

точек наблюдения на предварительной стадии зондирования наполовину, а число скважин, потребных для детальной оценки, – на 75%. По Баннерту и др. во время исследований это соответствовало сокращению полевых расходов на каждые 100 км² с 600 до 300 долл. на предварительной стадии и соответственно с 2400 до 600 долл. при детальной обработке. Сравнительные исследования результатов дешифрирования снимков «Скайлэб» и сюжетов МСС «Лэндсат» показали, что упомянутые выше интерпретации, корреляции и пересчеты можно производить и на основе снимков «Лэндсат». Однако оценка запасов вод бахос получается надежнее с помощью снимков «Скайлэб» благодаря их более высокому пространственному разрешению. Локализация и ограничение приповерх-

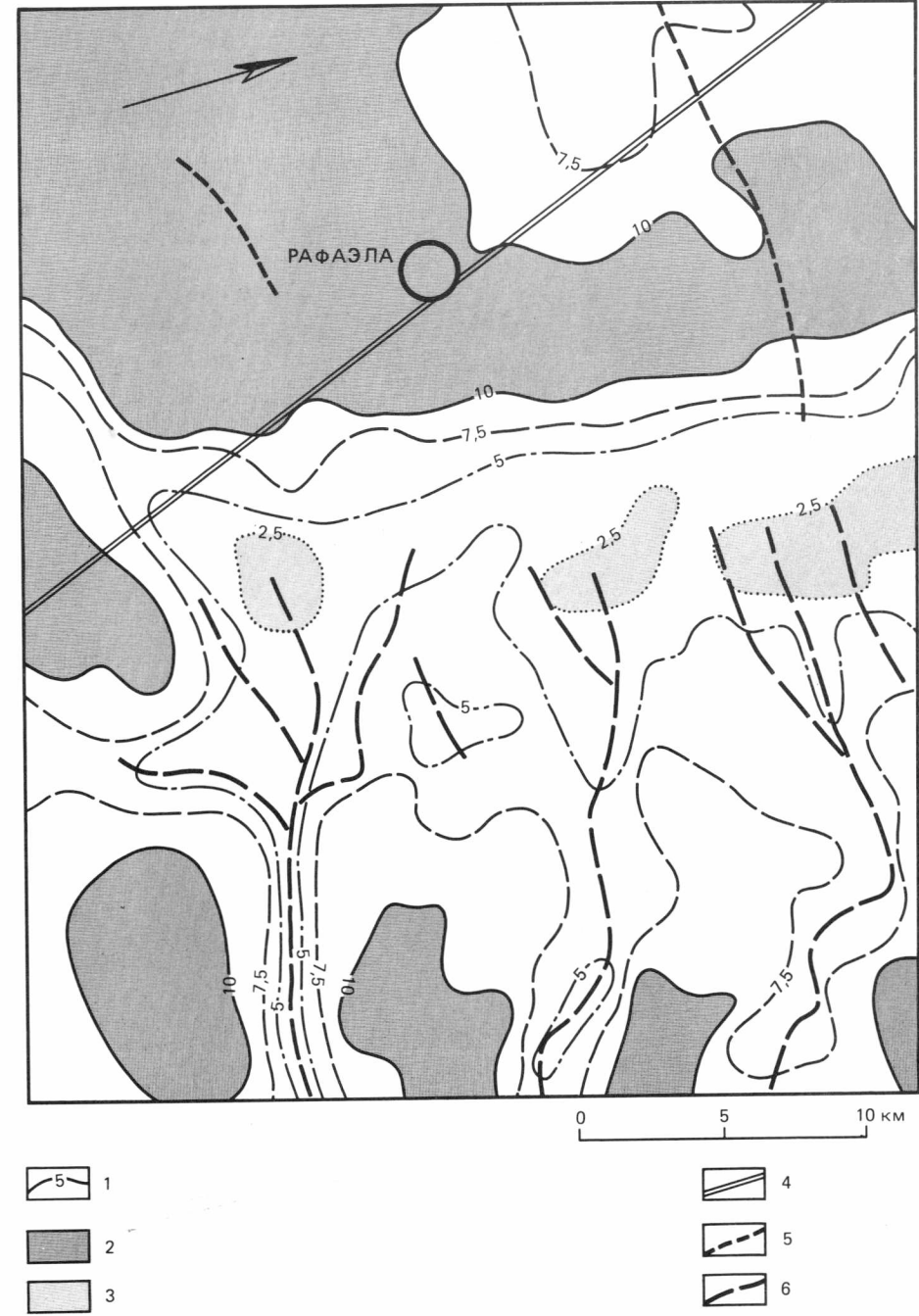


Рис. 144. Глубина залегания зеркала грунтовых вод по интерпретации снимка «Скайлэб» на рис. 143 и по полевым наблюдениям [168].
1—изолинии глубины залегания грунтовых вод в метрах; 2—глубина залегания грунтовых вод свыше 10 м; 3—глубина залегания грунтовых вод менее 2,5 м; 4—дорога; 5—бахо; 6—русла водотоков.



Рис. 145. «Бахос» (b) на увеличенном фрагменте снимка камерой ЕТС (по [168]).

ностных залежей грунтовых вод, по Баннерту и др., могут быть проведены точнее и экономнее, чем с помощью обычных методов, при умелом сочетании интерпретации снимков со спутников и полевых работ на представительных участках в районах исследования. Решающим для успеха соответствующих проектов является верная интерпретация изображения по

цветной тональности или тонам серого цвета, растительности, текстуре, дренажной сети и т. п. и их связей с геологическими и гидрологическими особенностями фундамента. Опыт рабочей группы Баннерта вполне можно было бы перенести на климатически и гидрогеологически сопоставимые области.
Синоптические снимки крупных участков местнос-



Рис. 146. Перенос осадков речными и прибрежными водами в районе залива Мобил, шт. Алабама, на снимке камерой ETC. Масштаб 1 : 500 000, оригинальный цветной снимок (NASA SL 4-92-300).

ти (190 × 190 км) при весьма высоком пространственном разрешении (21 × 21 м) дает также Метрическая камера, которая была впервые применена в конце 1983 г. экспедицией STS-9 на «Спейс шаттл» (ср. гл. 3). Снимки камерой «Скайлэб» 190А и Метри-

ческой камерой следовало бы повсюду, где они имеются, привлекать для регионального геологического картирования и создания кадастра.

Интересны возможности применения многозональных снимков со спутников для фиксации и иссле-

дования таких современных процессов, как перенос, осаждение и размыв поверхностными водами и прибрежными морскими (в том числе с точки зрения связи с проблемами окружающей среды). Рис. 146 на примере залива Мобил (шт. Алабама) показывает, как различные концентрации осадков в воде и процессы течения вырисовываются различиями оттенков на снимках камеры ETC со станции «Скайлэб-4». Распознаются исходная область выноса, направления перемещения и процессы смешения большей и меньшей концентрации мути. Основой снимка служит цветное изображение масштаба 1 : 500 000. С помощью выделения эквиденсит и кодирования их цветом оказалось возможным на многом резче дифференцировать массу взвеси и разделить области с различной концентрацией осадка ([333] и другие работы). Однако в корреляции оттенков цвета или степени плотности как показателей концентрации осадков (в мг/л) все же возникают некоторые проблемы (ср. разд. 3.5.7). Несомненно нужны дополнительные исследования – измерения с судов, чтобы иметь представление о батиметрии и проницаемости водной массы во время съемки и отличать эффекты воздействия различных концентраций осадков от влияния глубины до морского дна. Следует также учитывать мешающие влияния испарения или пелены облаков на тональность изображения поверхностных вод [231]. Заросли водорослей на поверхности воды (представляющие интерес в рамках изучения окружающей среды) выделяются на снимках в ИК-диапазоне красноватыми тонами.

Изучение распределения и переноса осадков по разовым снимкам поверхностных вод, даже если это многозональные снимки, имеет все же ограниченную ценность. Более удачные интерпретации и оценки, прежде всего динамических процессов, возможны на основе многократных многозональных снимков, которые поступают, например, со спутников «Лэндсат», к сожалению, еще со слишком больших расстояний. К тому же требуются повторные съемки одной и той же области, чтобы отделить более или менее случайные процессы переноса осадков и их осаждения от тех процессов, которые в определенных зонах или прибрежном районе осуществляются равномерно или периодически повторяются, т. е. происходят в данной области все время. Подобные процессы имеют значение прежде всего для инженерно-геологических и гидрологических проектов, равно как и экологических исследований озер, рек и прибрежных вод (в том числе для водозабора либо оценки содержания взвесей или вредных веществ. См. [267]). Для изучения концентраций осадков или взвесей и их переноса лучше всего зарекомендовали себя узкозональные снимки камеры «Скайлэб» в диапазонах волн длиной 0,5–0,6 и 0,6–0,7 мкм.

6.3. Снимки «Лэндсат» (МСС)

(Геологическое содержание изображения, примеры интерпретации.)

6.3.1. Введение. Снимки «Лэндсат» аридных и семи-аридных областей, в которых обнажаются скальные или рыхлые породы и тектонические структуры, не затушеванные и не скрытые растительностью, могут дать особенно обильную геологическую информацию. Различия интенсивности серого тона маркируют на черно-белом снимке «Лэндсат» (являющемся обычной основой фотогеологического картирования) зоны выходов различных пород. При этом серый тон одного и того же петрографического комплекса, равно как и градации серого тона смежных комплексов пород разного состава (либо различных цветов на сочетаниях узкозональных снимков четырех каналов МСС), могут более или менее сильно меняться. Опыт показывает, что снимки канала 5 МСС особенно подходят для картирования пород и почв, поскольку большей частью они особенно контрастно отражают интересные для геолога вещественные различия. Однако в частном случае определенные породы или различия пород на снимке в каком-либо из остальных каналов МСС могут быть более контрастными и тем самым легче картируемыми, чем на одновременном снимке канала 5 МСС.

Наряду с градациями серого тона важнейшим критерием выделения и разграничения литофациальных комплексов служат различия рельефа местности, его крупные и мелкие морфологические черты. Различия густоты, расчлененности и ориентировки дренажной сети дают важную информацию о геологическом строении ее основания.

На рис. 147а на увеличенном фрагменте снимка «Лэндсат» показан участок местности на северо-востоке Ирана (канал 5, масштаб примерно 1 : 250 000), а на рис. 147б представлены откартированные на кальке, наложенной на этот рисунок, границы литофациальных комплексов и тектонические структуры. В верхней половине снимка видны типичные формы проявления осадочных толщ. Различия перепадов серого тона и различия в рельефе маркируют зоны выхода различных слоистых комплексов. Можно выделить и отграничить друг от друга разноцветные слоистые пачки, но конкретный вещественный состав выделенных комплексов нельзя установить без маршрутных исследований на местности. В строении смятой в складки слоистой толщи, представленной в верхней половине снимка, участвуют: (а) гипсоносные красноватые отложения и конгломераты, (б) эвапориты и мергели, (в) флишеидные серии с зеленоватыми песчаниками, мергелями и конгломератами, содержащими туфы, а также (д) переслаивающиеся с песчаниками и мергелями конгломераты. Весьма темным серым тоном выделяются в средней



Рис. 147а. Фрагмент снимка «Лэндсат», канал 5 МСС, северо-восток Ирана. Масштаб около 1:250 000 (NASA E 2-233-06023).

части снимка андезиты (е) — в масштабе снимка они составляют сравнительно ровную поверхность. Выделяясь клиновидным ограничением, сильной расчлененностью рельефа, частыми куэстами и многократными полосчато-линзовидными изменениями серого тона,

в правой части середины снимка располагается комплекс цветного меланжа. Он сложен перемятыми и разбитыми на отдельные чешуи мергелями, песчаниками, известняками, радиоларитами, туфами и андезитами (f). Справа внизу по разрывному нарушению

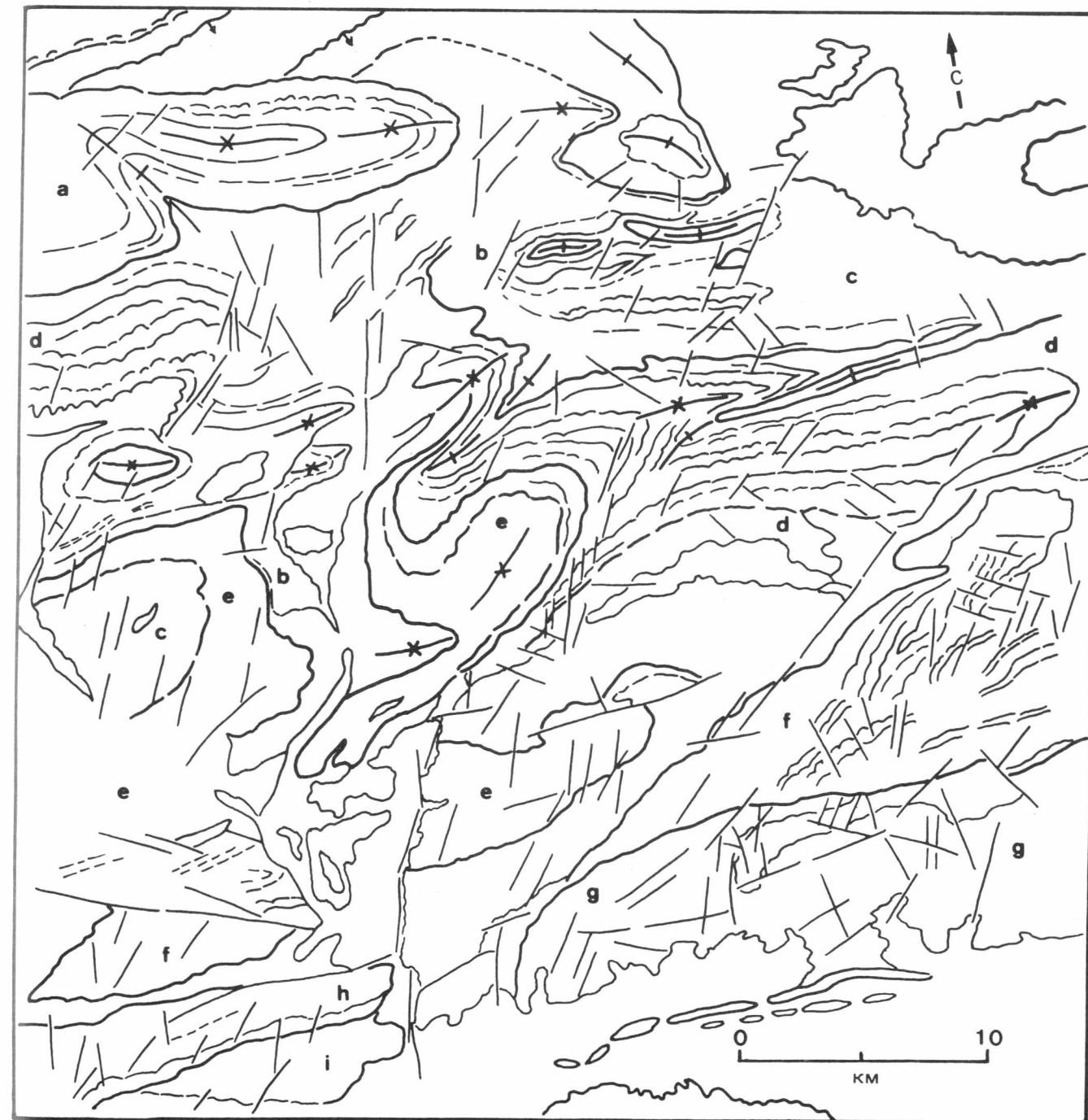


Рис. 147б. Карта литофациальных комплексов и тектонических структур территории, показанной на рис. 147а (фотогеологическое картирование).

он граничит с комплексом метаморфических сланцев и гранитов (g), который на представленном изображении детальнее не расчленяется. Светлый рельефообразующий комплекс (h) в левом нижнем углу изображения сложен известняками, а примыкающая с

юга область (i) — переслаивающимися пачками конгломератов, песчаников и алевролитов.

Рис. 148 показывает тот же участок местности на черно-белом отпечатке улучшенного по контрасту ложноцветного изображения. Отдельные частные



Рис. 148. Участок территории с рис. 147 на улучшенном по контрасту изображении (оригинал в условных цветах, получен Р. Гайдном, ZGF). Масштаб около 1:550 000.

комплексы и их границы здесь вырисовываются резче, чем на увеличенной копии черно-белого стандартного изображения. У нижнего края снимка в молодых осадках на дневной поверхности проявляется след разлома Большого Кевира – еще и в настоящее время сейсмически активной зоны нарушений протяженностью в несколько сот километров.

Рис. 149а изображает часть плато Эр в Нигере. На фотогеологической карте рис. 149б свободная от точечного раstra область отвечает докембрийскому фундаменту. Штриховыми линиями показаны местами наблюдаемые направления простираний смятых в крутые складки гнейсов. Фотолинеаменты маркируют картирующиеся зоны выходов разломов и трещиноватости. В фундамент внедрено несколько интрузивных тел гранитоидов («известково-щелочные граниты» по [24]). В связи с интрузиями проявляется оловянное и ниобиевое оруденения. Центры излияния и лавовые потоки оливиновых базальтов отличаются от центров излияния и скоплений трахитов, фонолитов и трахитовых туфов, характеризующихся средними до темных градациями серого тона, специфическими формами рельефа и черными тонами. Точечные линии показывают зоны выходов вулканических даек.

Рис. 150а показывает отдельный район блока Пилбара (Западная Австралия), который сложен докембрийскими и архейскими кристаллическими породами. Более молодые гранитные плутоны с несогласным контактом сидят в более древних сериях, сильно метаморфизованных и смятых в крутые складки. В левой половине снимка это смятые в складки с крутыми шарнирами серии пород архейских зеленокаменных поясов (метабаазальты). В правой части середины снимка по резкой границе с окружающими толщами выделяется блок крутозалегающих архейских сланцеватых гнейсов, кварцитов и итабиритов. Иногда видны места обнажений и дайки (пунктир) базальтовых лав (черный цвет). К нижнему краю снимка кристаллические породы погружаются под покров более молодых, не смятых в складки осадков (ср. рис. 150б).

Типичные формы ландшафтов кристаллического фундамента на северо-западе Канады показаны на рис. 151. Здесь область восточнее и юго-восточнее Большого Невольничьего озера сложена высокометаморфизованными, смятыми в складки и пронизанными разрывными нарушениями докембрийскими гнейсовыми сериями и гранитоидами Канадского щита.

Блок фундамента ограничен у Большого Невольничьего озера и в направлении к реке Невольничьей крупными разломами. В окрестностях реки древний фундамент отчасти перекрыт молодыми аллювиальными отложениями. Впрочем, темные тонированные поверхности в правом верхнем углу снимка не связаны с различиями пород в фундаменте. Они указывают скорее на те районы, в которых в недавнее время растительность была уничтожена лесными пожарами, которые часто проявляются в Канаде на обширных пространствах тайги. Области с процветающей растительностью, которая большей частью густо покрывает основную площадь распространения фундамента, отражаются на этом изображении в канале 7 (ближний инфракрасный диапазон) более светлыми градациями серого тона. Этот пример отчетливо показывает, что к различиям серого тона на снимках «Лэндсат» некоторых областей при геологической интерпретации следует подходить осторожно. При ревизии интерпретации спорных областей часто помогает сопоставление изображения одной и той же местности или какого-то объекта на ней на узкозональных снимках остальных каналов (и прежде всего каналов 4 и 5).

Рис. 152а изображает в канале 5 участок территории северо-западной Греции, представляющий собой ряд частных зон орогена Эллинид. Диагонально протягивающиеся через площадь снимка региональные комплексы выделяются по различиям в рельефе, а также по различиям серого тона и поверхностного дренажа. На основании этих критериев границы отдельных зон на снимке «Лэндсат» картируются довольно хорошо (рис. 152б). Ясно распознаваемая граница протягивается примерно по линии Трикала (Т)–Кастория (К). Гористые части области, расположенной к северо-востоку от этой линии, сложены метаморфитами и гранитами Пелагонийской либо Субпелагонийской зоны орогена Эллинид. На изображении «Лэндсат» распознаются и картируются несколько более крупных и менее крупных комплексов метаморфических пород. Они отличаются от окружающих гнейсов, которые детальнее не подразделяются, весьма светлым серым тоном и особыми формами рельефа. В горах выделяются межгорные бассейны Копани и Птолемаис, заполненные четвертичными отложениями (выделены редкими точками). Разбитые на чешуи офиолиты комплекса Вуринос (обозначены галочками) выделяются из примыкающих мраморов своим серым тоном и морфологией. Однако от окружающих гнейсов они отличимы лишь с трудом. Не смятые в складки молассовые образования Мезозеллинского прогиба выделяются относительно слабой расчлененностью рельефа, тонко ветвящейся дренажной сетью и относительно единообразным серым тоном средней интенсивности. Эти осадки занимают область между линией Кастория–Трикала и северо-восточным склоном гор Пинд. Флишевые серии зоны Олонос–Пиндос (белый фон без штриховых знаков), примыкающие с юго-запада, сильно смятые в складки и разбитые на чешуи, более дробно не дифференцируются. Однако в совокупности они отделяются от надвинутых комплексов известняков и роговиков, слагающих западные районы (частые точки). В той же мере разбитые на чешуи или надвинутые офиолиты Пинда (галочки), хотя и отличаются от обрамляющих единиц своими формами рельефа и иной растительностью, могут быть ограничены на рассматриваемом рисунке лишь приблизительно. Не выделяются также флишевые комплексы зоны Гаврово–Триполи в горах Пинд от аналогичных комплексов зоны Олонос–Пиндос, поскольку они развиты примерно в тех же фациях и слагают такие же формы рельефа. В противоположность этому известняки примыкающей с юго-запада Ионической зоны резко отделяются от окружающих флишевых осадков светлым серым тоном и формами рельефа. Чешуйчатая и складчатая структура Ионической зоны отчетливо проявляется в виде незакономерного повторения крупных и мелких известняковых комплексов, большей частью падающих к северо-востоку. Во многих местах на снимках «Лэндсат» распознаются простирания и падения известняков и свит песчаников и алевролитов, смятых вместе с ними в складки и участвующих в чешуйчатом строении.

Рис. 152 демонстрирует как возможности, так и границы картируемости по снимкам «Лэндсат» северной части Средиземноморской области. В ее пределах комплексы пород отчасти обнажаются на поверхности, а отчасти скрыты макгиевой и – выше в горах – древесной растительностью. Для региональных геологических проектов в этих районах синоптические крупноплощадные снимки «Лэндсат» всегда представляют собой хорошую информационную и картографическую основу. Как правило, они в картируемом виде отражают региональные геологические (макро-)комплексы и их границы и в то же время дают сведения о геологической ситуации в частных районах развития региональных комплексов. Снимки «Лэндсат» показывают региональные ограничения локальных геологических особенностей. Однако благодаря своей сравнительно высокой пространственной разрешающей способности они предоставляют сведения и о локальных геологических чертах, если литофациальные и структурные детали выражены на поверхности в формах рельефа (например, в области Ионической зоны на рис. 152). Становятся отчетливо видны, с одной стороны, региональные связи и, с другой – соотношения между локальными геологическими особенностями и региональным обрамлением, прежде всего тектонические элементы (нарушения, зоны нарушений, план разрывных нарушений, системы трещин). На снимках «Лэндсат» распознаются такие региональные планы систем разломов, кото-

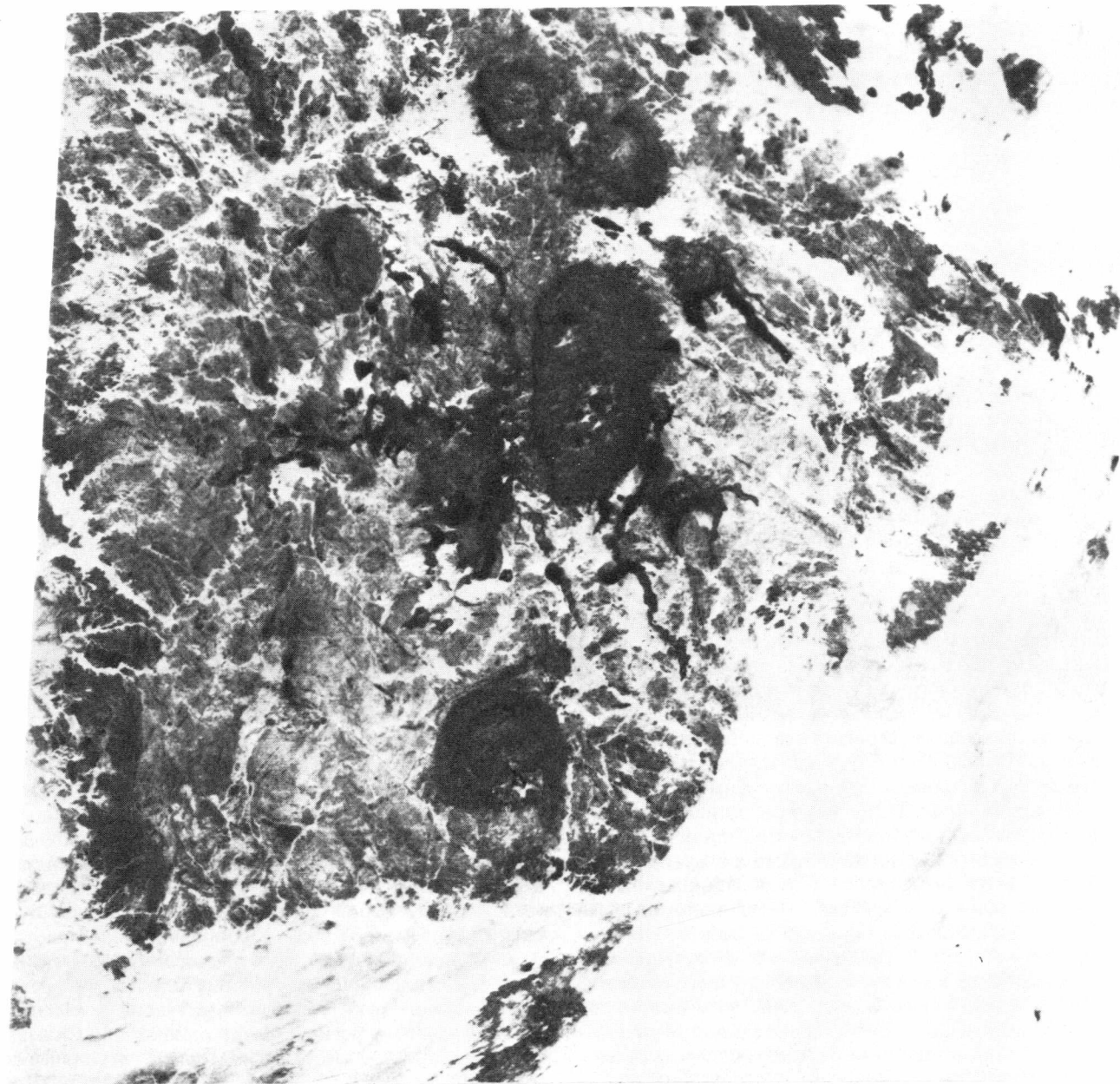


Рис. 149а. Снимок «Лэндсат» МСС части плато Эр в Нигере. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1286-09191).

рые на аэрофотоснимках и на местности различимы не в своей целостности, а лишь на отдельных отрезках, а иногда и вовсе неразличимы, хотя установление их имеет значение и для локальных исследований, и для постановки вопросов. Так, пример фотогеологического картирования на рис. 152б отчетливо показывает, что на площади снимка проступает региональная сеть разломов коры, отдельные системы которой пересекают все охваченные снимком частные зоны орогена Эллинид и, без сомнения, оказывают влияние

и на локальную разрывную тектонику (например, разрывные системы запад-северо-западного и северо-восточного простираний). Эти тектонические планы не отражаются ни в одной из опубликованных до сих пор геологических карт, однако намечаются на многих картах в локальных частных структурах.

На снимках «Лэндсат» районов умеренно гумидных зон, например Центральной Европы, выделение и разграничение литофациальных комплексов и картирование тектонического строения часто затрудне-

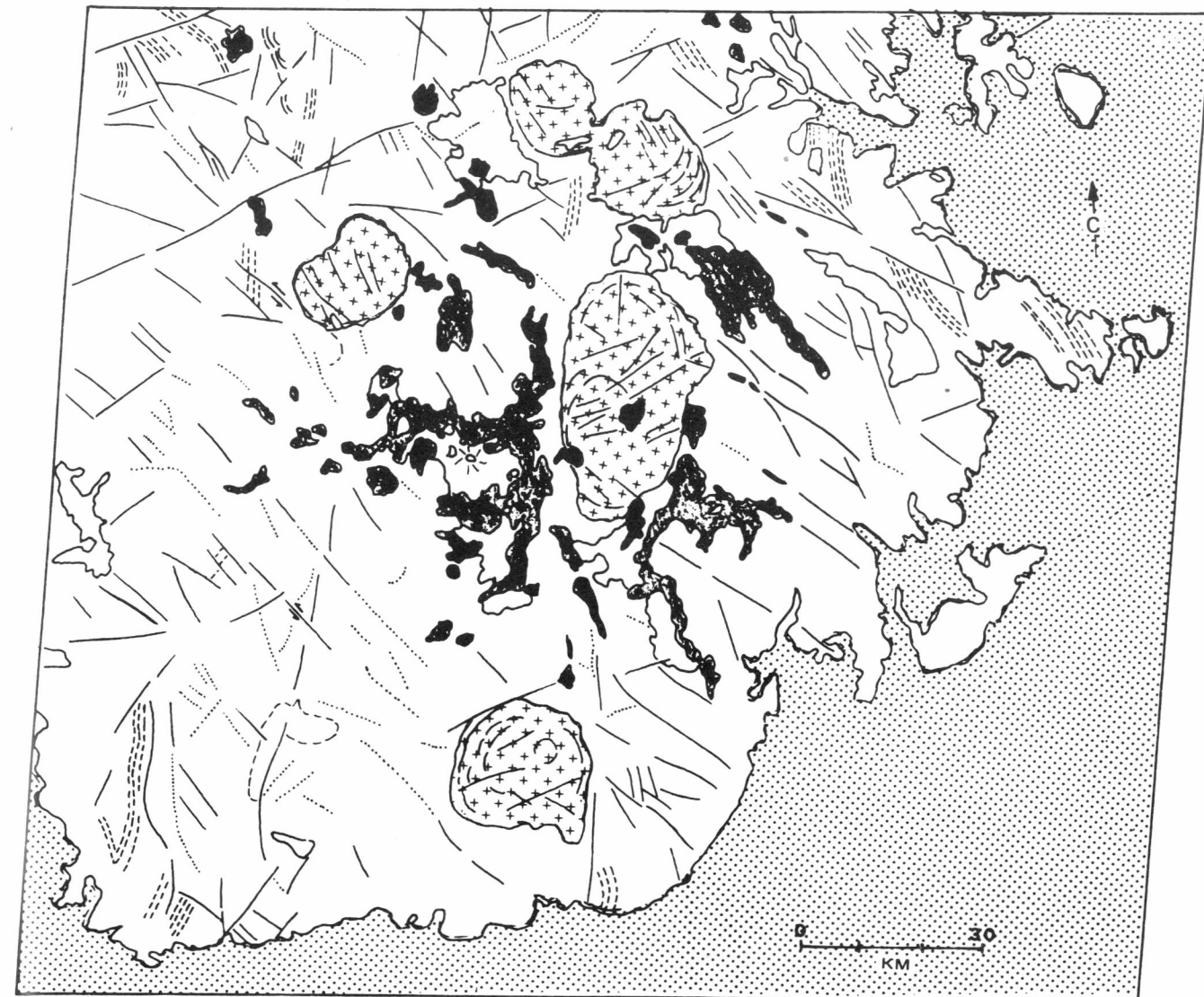


Рис. 149б. Карта литофациальных комплексов и тектонических структур территории, показанной на рис. 149а.

ны. Глубоко проникающее выветривание, образовавшаяся почва, интенсивное землепользование и растительность (большой частью культурная) могут на обширных площадях маскировать геологическое строение основания. С другой стороны, во многих районах существуют тесные связи между рельефом, растительным покровом, землепользованием и геологическими особенностями территории. При этом они по-разному могут выделяться на узкозональных снимках различных каналов МСС (ср. фрагменты на рис. 153а и б). На снимке канала 5 весьма темными серыми тонами своих лесных насаждений выделяются куэсты гор Виенгебирге Тевтобургского Леса и Эгге у восточного края Мюнстерского «залива». Граница между палеозойскими Рейнскими Сланцевыми гора-

ми и примыкающим с севера Мюнстерским меловым заливом в такой же степени достаточно ясно отражается границей лесов горной области, протягивающейся в примерно широтном направлении. Слои меловых отложений, трансгрессивно перекрывающие погружающееся к северу варисийское складчатое сооружение, выделяются рисунком серого тона площадей, используемых в сельском хозяйстве, равно как и области развития третичных и четвертичных покровных отложений. В северной части Сланцевых гор Варштейнская и Брилонская антиклинали выделяются среди залесенных областей как площади серого тона средней интенсивности (рис. 153, в). Очертания Нутларской главной мульды (у Арнсберга), расположенной севернее Остзауэрландской главной антикли-



Рис. 150а. Область выхода-фундамента – метаморфические породы, гранитные интрузии и молодые вулканы, район блока Пилбара, Западная Австралия. Масштаб примерно 1:1 000 000 (NASA, E-1148-01282).

нали, вырисовываются на рис. 153а темной окраской хвойных лесов. Пограничная область между слоями среднего и верхнего девона и кульма на юго-восточном крыле Остзауэрландской главной антиклинали устанавливается, например, к юго-западу от Корбаха по различиям растительности (темный либо средний серый тон на рис. 153, а и б). В области Остзауэрландской главной антиклинали различия в составе растительности, прослеживаясь линиями или полосами, маркируют зоны выходов пачки чередующихся

песчаников с глинистыми прослоями. Песчаники образуют гребни.

Тот факт, что узкозональные снимки отдельных каналов МСС могут предоставлять различную информацию, показывает сравнение рис. 153а и 153б. На фрагменте снимка канала 5 МСС примерно параллельно северному краю Сланцевых гор протягивается светлая зона, которая на севере снова граничит с темнее окрашенной зоной. С приближением к горам Эгге граница серого тона отклоняется к северу. Зона,



Рис. 150б. Карта литофациальных комплексов и тектонических структур территории рис. 150а.

имеющая более темный серый тон и на западе более узкая, в восточной части залива занимает сравнительно большую территорию и, имея площадное либо пятнистое распространение, устанавливается и в области к югу от Тевтобургского Леса. Центральный район в восточной части Мюнстерского бассейна в сравнении с окружением снова обнаруживает рисунок в общем более светлого серого тона. Обращение к геологической карте показывает, что зоны серого цвета в восточной части Мюнстерского залива на

снимке в канале 5 МСС довольно хорошо отражают различное геологическое строение основания. На юге светлая зона от западного края снимка до линии примерно севернее Брилонской антиклинали подстилается лёссом. Примыкающая с севера темнее окрашенная область сложена преимущественно русловыми песками и отложениями террас, а на северо-востоке и в зоне южнее Тевтобургского Леса – основной моренной. Более светлая центральная область мелового бассейна (вокруг Беккума) подстилается

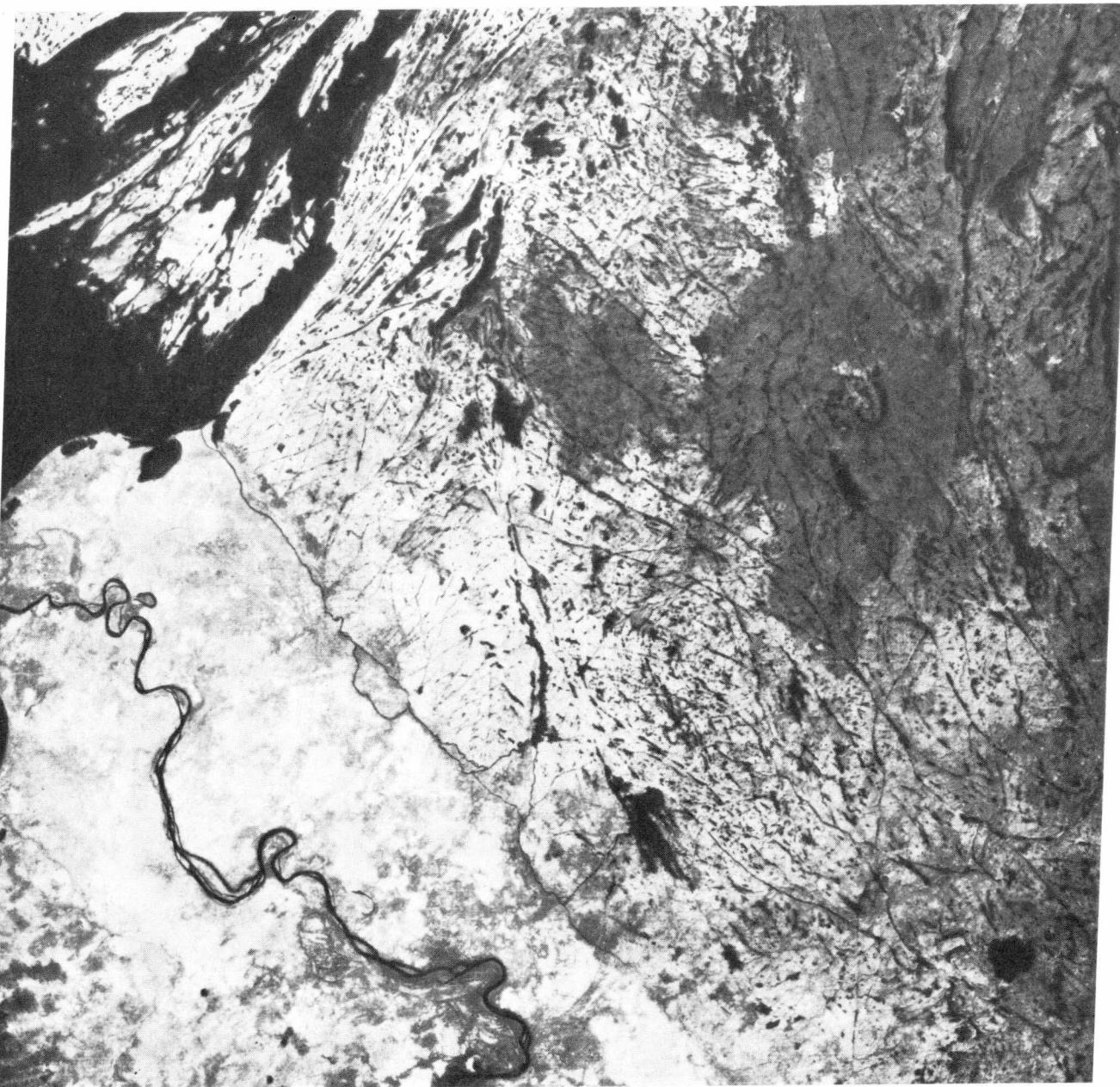


Рис. 151. Типичные формы проявления кристаллического фундамента на Северо-Западных территориях, Канада. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1436-18145).

преимущественно мергелистыми известняками верхнего мела. Эти градации серого тона, отображающие литофациальные различия в основании, могут простекать прежде всего из различий свойств почв в районах, которые в основном заняты под сельское хозяйство. Снимки в канале 5 МСС (0,6–0,7 мкм), как уже многократно упоминалось, отражают отличия свойств почв особенно хорошо. С помощью аналоговых и цифровых методов обработки снимков

эти различия серого тона узкозональных снимков каналов 5 и 7 (и тем самым границы между площадями с различными геологическими соотношениями в основании) удалось представить для интерпретации существенно контрастней. Более контрастное изображение можно было бы также получить кодированием цветов площадей с определенными ступенями серого цвета (гл. 5).

Нужные данные для геологической съемки соотно-

шений фундамента и свойств почв предоставляют градации серого тона также в области севернее гор Виенгебирге. Здесь по контрастам серого тона (иногда резким, ср. с Геологической картой Северный Рейн-Вестфалии, масштаб 1:500 000) друг от друга отделяются основные морены, русловые пески, отложения террас, заболоченные области и области торфяников верховых болот (например, в окрестностях Дюммер-Зе).

Рис. 153, 154 и 155 ясно дают понять, что сцены снимков «Лэндсат» Центральной Европы большей частью не допускают детального литофациального картирования. Однако на снимках «Лэндсат» картируются и получают свое отражение более крупные литофациальные комплексы и их структурное выражение. Так, на рис. 154а градациями серого тона вырисовываются все крупные региональные геологические комплексы фрагмента изображения охваченной области, прежде всего благодаря контрасту районов, используемых сельским и лесным хозяйством, а также по различиям рельефа на этом изображении «Лэндсат». Картируемые на снимке границы некоторых более крупных структур представлены на рис. 154б. Этот рисунок наглядно показывает также, какие данные можно получить по разрывным структурам и сети разломов района благодаря фотogeологическому картированию (с помощью стереоскопа и двух снимков в канале 6 при рассмотрении их с увеличением или с помощью четырехкратной лупы с широким полем обзора и одного снимка канала 6). Интерес представляют, с одной стороны, позиция и ориентировка появляющихся на отдельных участках (крутых) разрывных структур, характер которых и роль (в том числе и для постановок специализированных вопросов) следует уточнить полевыми маршрутами. С другой стороны, эти нарушающие структурный план района основные линии и зоны разрывных структур пересекают все регионально-геологические частные комплексы и потому должны иметь иную причину появления, чем последние. Как показывает рис. 154б, картируемые линии выходов крутых систем разломов, с одной стороны, оказывается возможным свести к преимущественным направлениям (нарушающим структурным направлениям). Однако, с другой стороны, системы разломов определенного направления или сочетания определенных направлений проявляются лишь в отдельных более или менее крупных районах картируемой области. Здесь обнаруживаются локальные особенности разрывно-тектонической структуры, которые могут иметь значение для многих вопросов практики и научных исследований. Так, удалось, например, по всей исследуемой области закартировать — при относительно тесном параллельном скучивании — системы разломов, простирающиеся примерно по азимуту 80°. Разрывные структуры, протягивающиеся по азимуту 100°, появляются в меньшем числе и с большими интервалами друг от друга в

широкой полосе к югу от Везерских гор, равно как и в Везерских горах и Золлинге, где они имеют региональный характер, хотя появляются также в небольшом числе. Разрывные структуры, простирающиеся в соответствии с ориентировкой гор Эгге, появляются прежде всего в западной краевой полосе картируемой области. Разрывная система Золлинга и области между горами Эгге и Золлингом, судя по картированию на основе «Лэндсат», намного сложнее, чем она изображена на геологической карте масштаба 1:1 000 000 (ср. рис. 155).

Как уже упоминалось, положение и ориентировка картируемых по снимку «Лэндсат» разрывных структур могут быть без особых трудностей перенесены с помощью пантографа или с помощью проекции изображения (диапозитив) на топографическую или геологическую карту в масштабе 1:250 000, 1:100 000, равно как и 1:50 000. Увязка осуществляется по хорошо распознаваемым наземным ориентирам, например рекам, дорогам, границам лесов. На увеличенном до масштаба 1:100 000 фрагменте (рис. 156) можно распознать границы леса, отдельные поля, местами даже дороги и железнодорожные линии. Эти элементы могут быть использованы как для увязки с топографической картой, так и для ориентировки при маршрутных обследованиях территории.

Рис. 157а охватывает южную часть Верхне-Рейнского грабена, части Шварцвальда и Вогезов, столовую и складчатую Юру, а также молассу и краевую зону Бернских Альп. Сравнение с геологической картой масштаба 1:1 000 000 показывает, что все региональные геологические комплексы, а также литофациально и структурно различающиеся отдельные области в пределах региональных единиц на изображении «Лэндсат» (канал 7) картографически отделяются друг от друга различиями в рельефе, дренажной сети и градациями серого тона. Так, сложенная, например, кристаллическими породами область Вогезов отличается по расчлененности рельефа от обрамляющего ее с юга и запада осадочного чехла (смятый в складки палеозой). Северная граница столовой Юры, перекрывающей палеозой, маркируется ступенями серого цвета, располагающимися волнообразно или лопастеобразно, и различиями в землепользовании (структурно-денудационные уступы). Равнина Рейна заметно выделяется среди примыкающих глыб гор. Протяжение краевых нарушений видно по восточному краю Вогезов и по юго-западному склону Шварцвальда. Структуры складчатой Юры морфологически четко отделяются от расположенной перед ними столовой Юры и молассы на юге. Во всех региональных геологических единицах более крупные нарушения распознаются и прослеживаются уже без всякого увеличения. Рис. 157б показывает оси главных складок, положение картирующихся более крупных нарушений, равно как и некоторых локальных и региональных систем разломов, взаимная согласованность

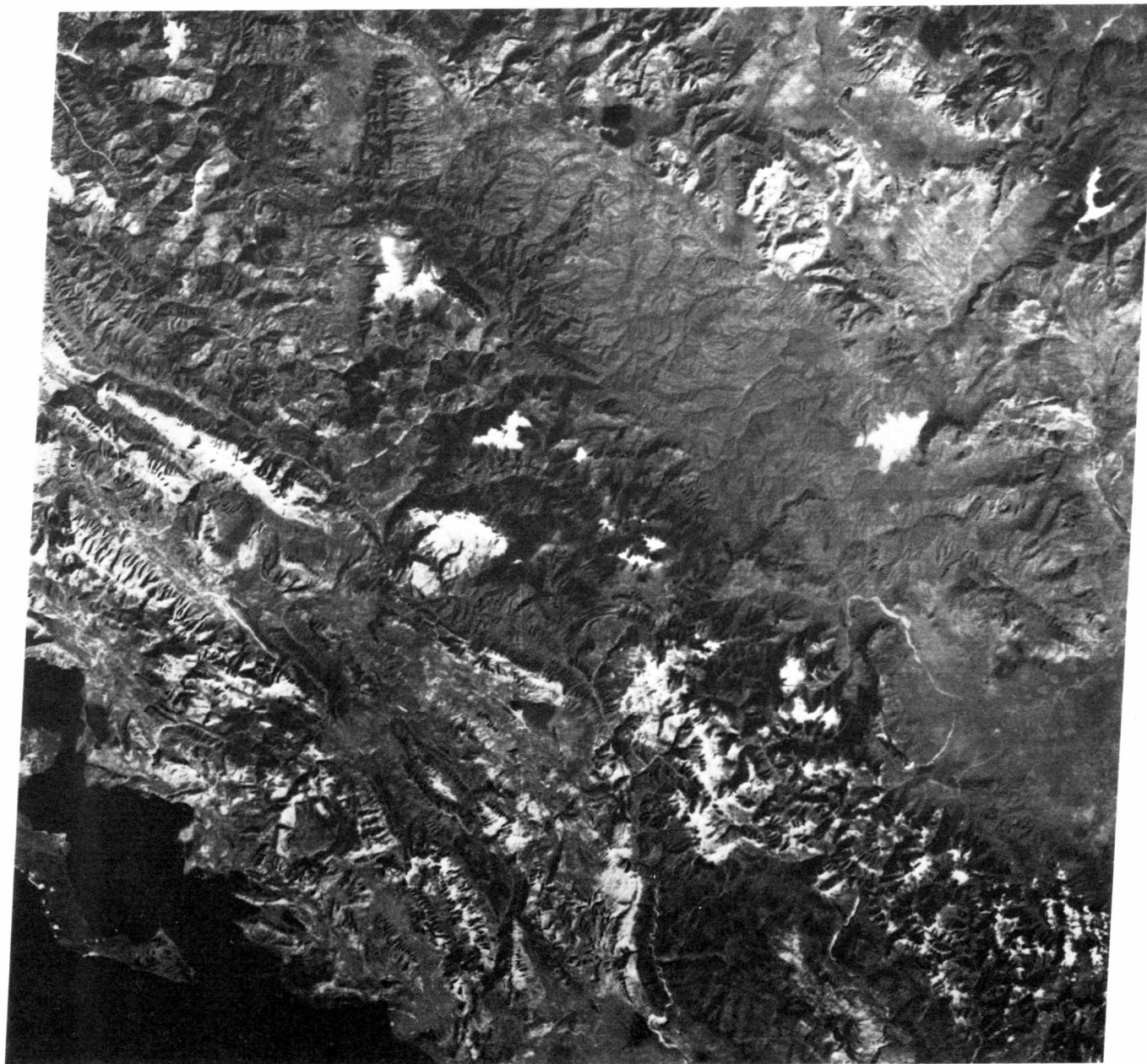


Рис. 152а. Региональные геологические единицы Эллиниды северо-западной Греции на снимке «Лэндсат». Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1102-08491).

которых, общность сети и пространственного проявления делают отчетливым суперрегиональный характер многих систем разломов. Это относится, например, к разрывным структурам с простиранием 90–100°, которые появляются прежде всего в южной половине снимка и с позиций плитной тектоники интерпретируются многими авторами как оперяющие структуры предполагаемых трансформных разломов глубинного фундамента между Верхне-Рейн-

ским и Бресским грабенами. Интересную взаимосвязь открыл Майер [203] между разрывными структурами, простирающимися по азимутам 10–15°, около 40° и около 50°, и структурным развитием восточной части складчатой Юры. Картированием мелких тектонических форм на местности он установил, что системы разломов этих и иных направлений существовали уже перед складчатостью юрских слоев и обусловили структурные особенности складчатой

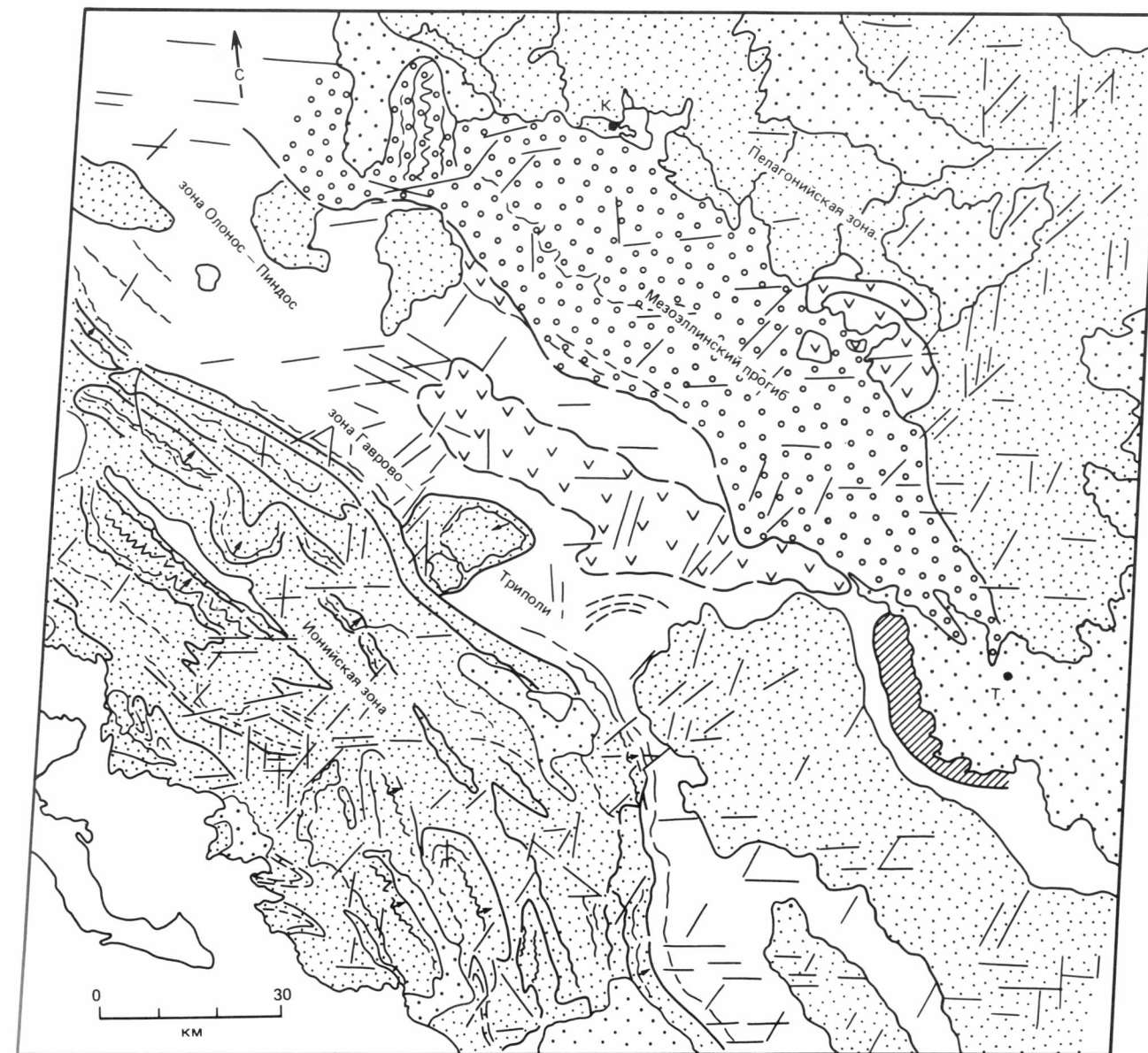


Рис. 152б. Региональные геологические единицы и тектонические структуры (крутые разрывы), картирующиеся по снимку «Лэндсат» с рис. 152а.

Юры в диапазоне масштабов от локального до зонального. Разломные структуры с простираением 10–15°, существовавшие еще до складчатости и обусловившие осложнения в складчатой структуре Юры, позднее, по данным Майера, вновь активизировались (см. также [171]).

На «Лэндсат»-снимках тропических ландшафтов фотогеологическое картирование часто затруднено из-за глубоко проникшего выветривания и густой вечнозеленой растительности. К тому же проблемой здесь оказывается частая облачность. Охваченная

снимком 158а (канал 4) область на востоке Бирмы в значительной степени скрыта под естественным растительным покровом. Он обуславливает темно-серый тон как гористых, так и равнинных районов, в которых преобладают леса зоны муссонов и зоны тропических дождей (в первую очередь в областях, расположенных выше). Местами на плато и в долинах лес выкорчеван, тогда на его месте появляется растительность саванн. Здесь, как и на используемых сельским хозяйством равнинах у западного края снимка в канале 4 МСС наблюдаются средние и более светлые

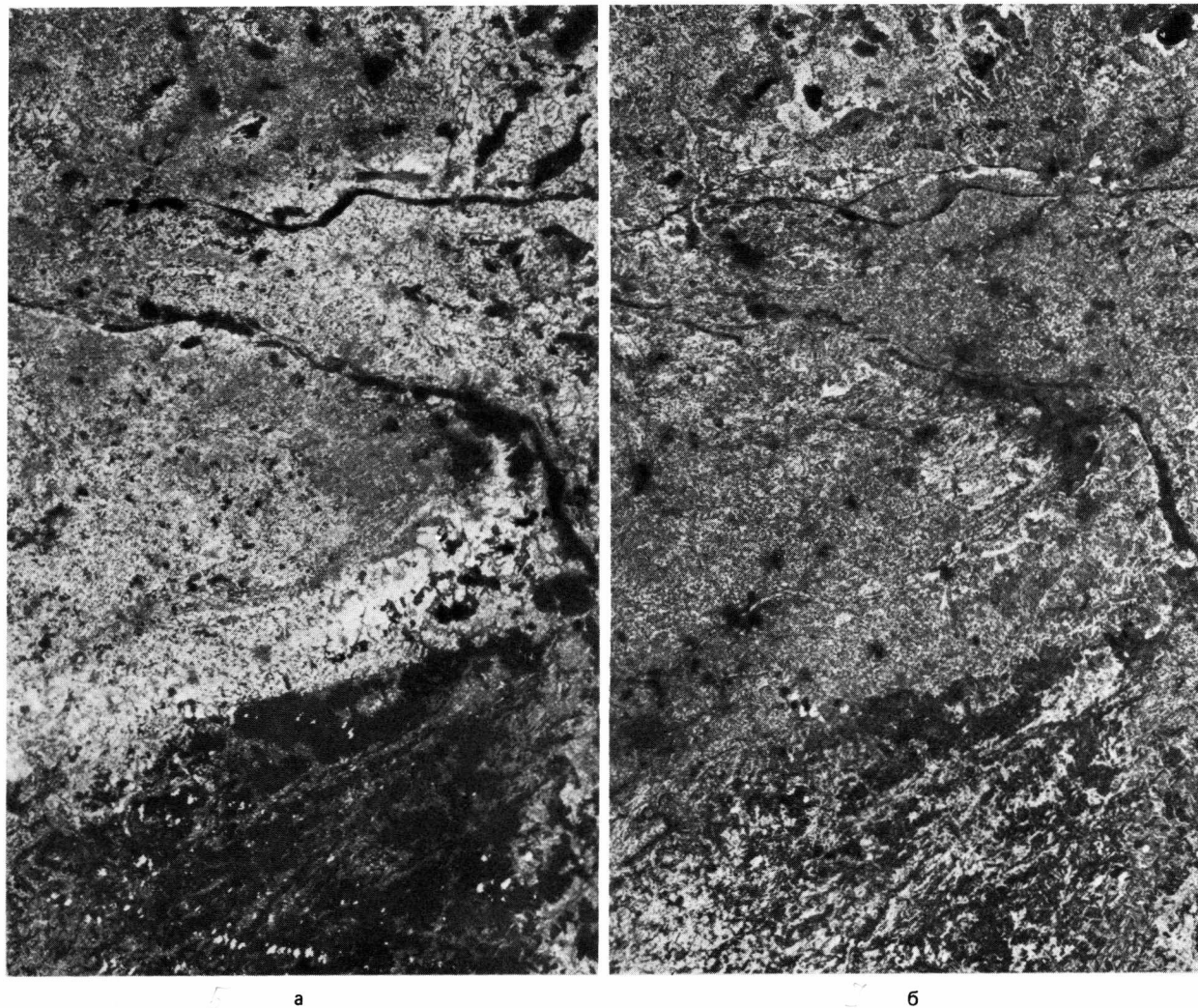


Рис. 153. Фрагмент снимка «Лэндсат» показывает участок местности между горами Виенгебирге и восточной частью Рейнских Сланцевых гор в канале 5 (а) и канале 7 (б). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, Е-2200-09421). Фрагмент Геологической карты ФРГ (в), масштаб 1:1 000 000 (Федеральное ведомство по наукам о Земле и сырью, Ганновер, 1981).

серые тона. В этом случае серый тон в качестве критерия для фотогологического картирования литофациальных единиц отпадает отчасти еще и потому, что природная растительность этих ландшафтов довольно однообразна даже на различных комплексах пород. Различия литофациального характера и стратификации, равно как и тектонические структуры геологического основания, выражаются в заснятом ландшафте прежде всего в вариациях форм рельефа, а также в различиях плотности и расчлененности дренажной сети. Однако на снимке в канале 4 МСС (0,5–0,6 мкм) эти критерии фотогологической интерпретации могут быть использованы лишь с ограниченным успехом, поскольку довольно однообразная отражательная способность растительности в этом

интервале длин волн и сильное рассеяние коротковолнового светового излучения в атмосфере приводят к ухудшению качества изображения. Высокая влажность воздуха в тропических областях влечет за собой усиленное атмосферное рассеяние падающего светового излучения. Поэтому изображение в канале 4 в сравнении со снимком в канале 7 МСС (рис. 158б) кажется менее четким, менее дифференцированным. Напротив, регистрируемое в канале 7 инфракрасное излучение (0,8–1,1 мкм) на своем пути через атмосферу к поверхности территории и оттуда к приемнику рассеивается менее сильно, изображение становится резче, детали местности, прежде всего формы рельефа, выступают яснее. Теневые зоны на фоне в основном светлых серых тонов областей, покрытых расти-



тельностью, подчеркивают формы рельефа и различия в нем. Таким путем на снимке канала 7 удается откартировать крупные литофациальные комплексы, простирания их пластов, их элементы залегания, равно как и нарушения и главные системы трещин. Сравнение рис. 158а и 158б показывает, что оба узкозональных снимка дают различную, отчасти дополняющую одна другую информацию по геологии площади, охваченной снимком. Это касается прежде всего районов долин и плато, которые на снимке в канале 4 отражаются более дифференцированными серыми тонами, чем на снимке канала 7. Напротив,

существенные для литофациального и тектонического картирования различия форм рельефа несравненно лучше выражены на снимке в канале 7.

Геологическое строение области съемки довольно сложно из-за большого числа разрывов, протягивающихся вдоль генерального направления простираения или под острыми углами к нему. Основную часть картируемой области составляют неметаморфизованные, но смятые в складки и разбитые на чешуи осадочные серии, имеющие обычно крутое залегание или падающие под средними углами. Морфологически большей частью довольно хорошо выражены

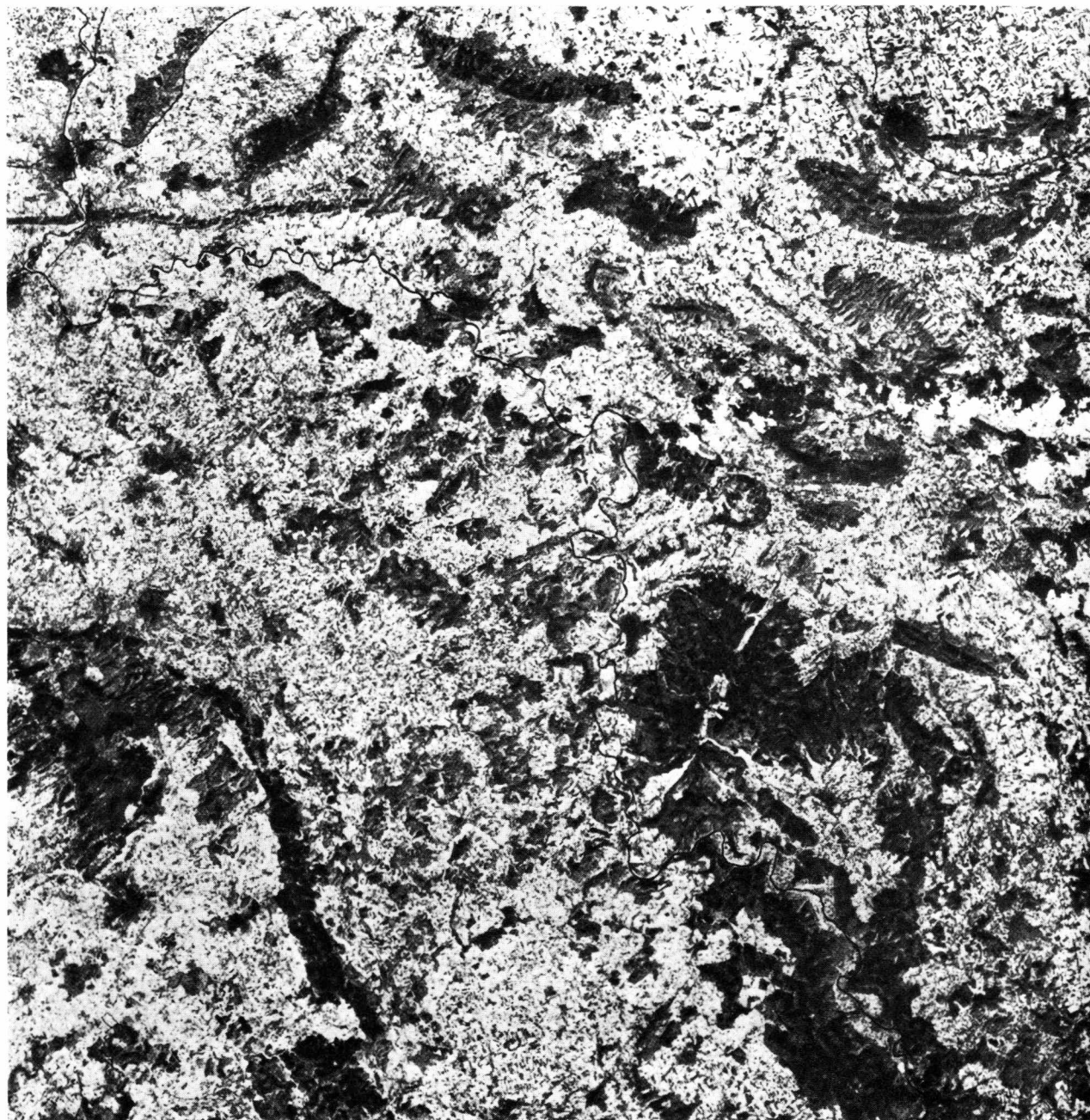


Рис. 154а. Региональные геологические единицы и структуры между Эгге (на юго-западе) и Хильдесхаймским Лесом (на северо-востоке) на снимке «Лэндсат», канал 6. Масштаб около 1 : 500 000 (NASA, E-2200-09421).

границы слоев и их залегание. Восточнее и севернее озер пологохолмистые районы подстилаются закарстованными известняками. Отдельные крупные районы юго-западной части горной цепи сложены метаморфическими породами и гранитами, которые по формам рельефа на изображении «Лэндсат» (без привлечения дополнительной информации маршрут-

ных исследований на местности) разграничиваются все же с трудом. Точно так же и во многих областях с палеозойскими осадками разбитые на чешуи глыбы гнейсов не выделяются на изображении. И вообще установление петрографического состава литофациальных единиц, картируемых по различиям рельефа, классификация или идентификация комплексов пород

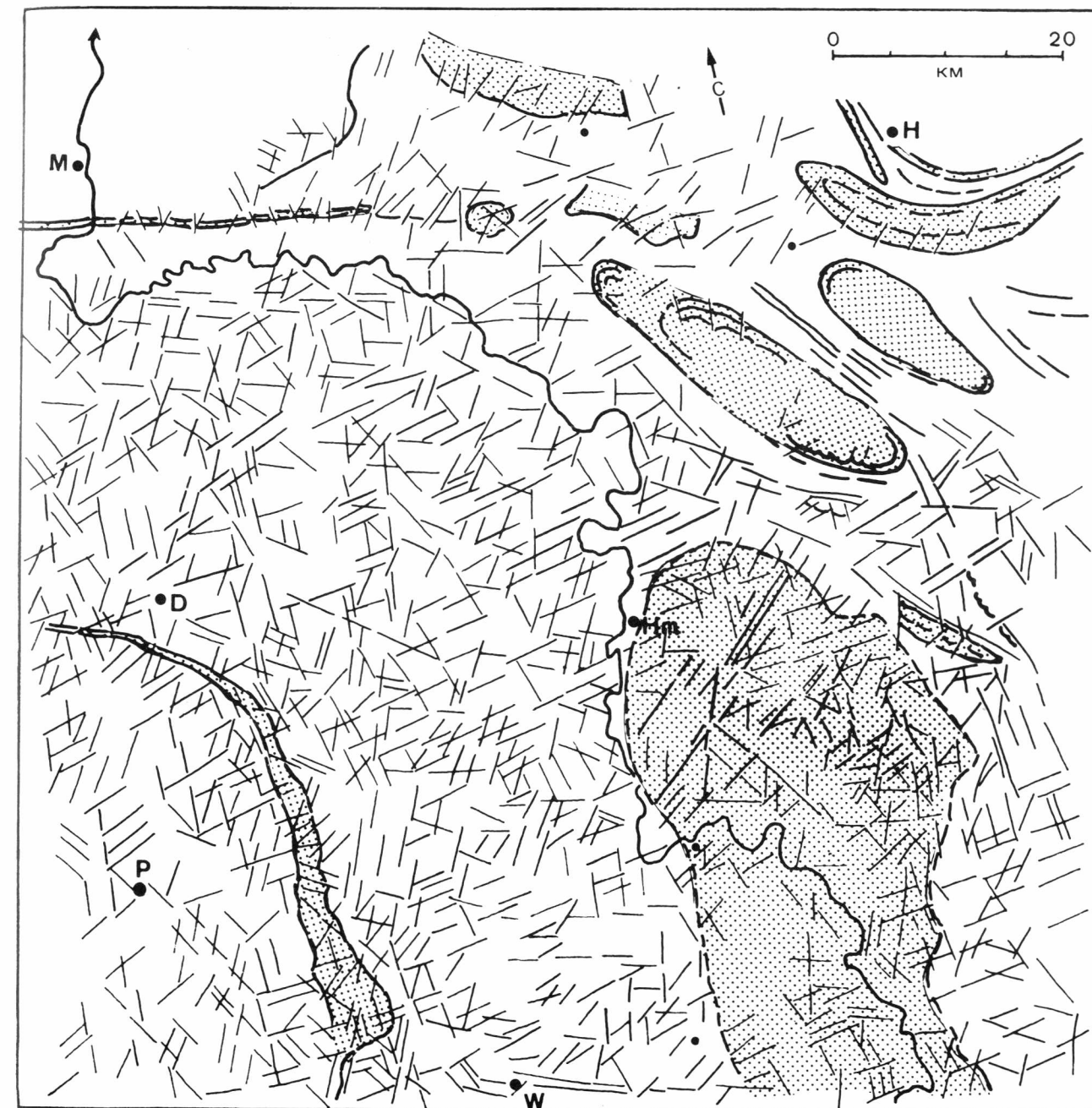


Рис. 154б. Карта региональных геологических единиц и картируемых по изображению «Лэндсат» крутых разрывов. Р – Падерборн, М – Минден, Н – Хильдесхайм, W – Варбург, Нм – Хольцминден.

невозможны без дополнительной информации, получаемой непосредственно в поле. Однако фотогеологическое картирование, проведенное в подобном районе до полевых маршрутов, позволяет ограничить последующие полевые работы ключевыми или спорными участками. В этом заключается большое преимущество, поскольку искаживание территории тро-

пических ландшафтов с густой растительностью бывает весьма затруднительным. Полевые маршруты в столь тяжелых районах важны еще и потому, что при продолжении работ и продвижении по территории распознаются связи между многими явлениями на поверхности данных районов и определенными геологическими особенностями их основания. Эти связи

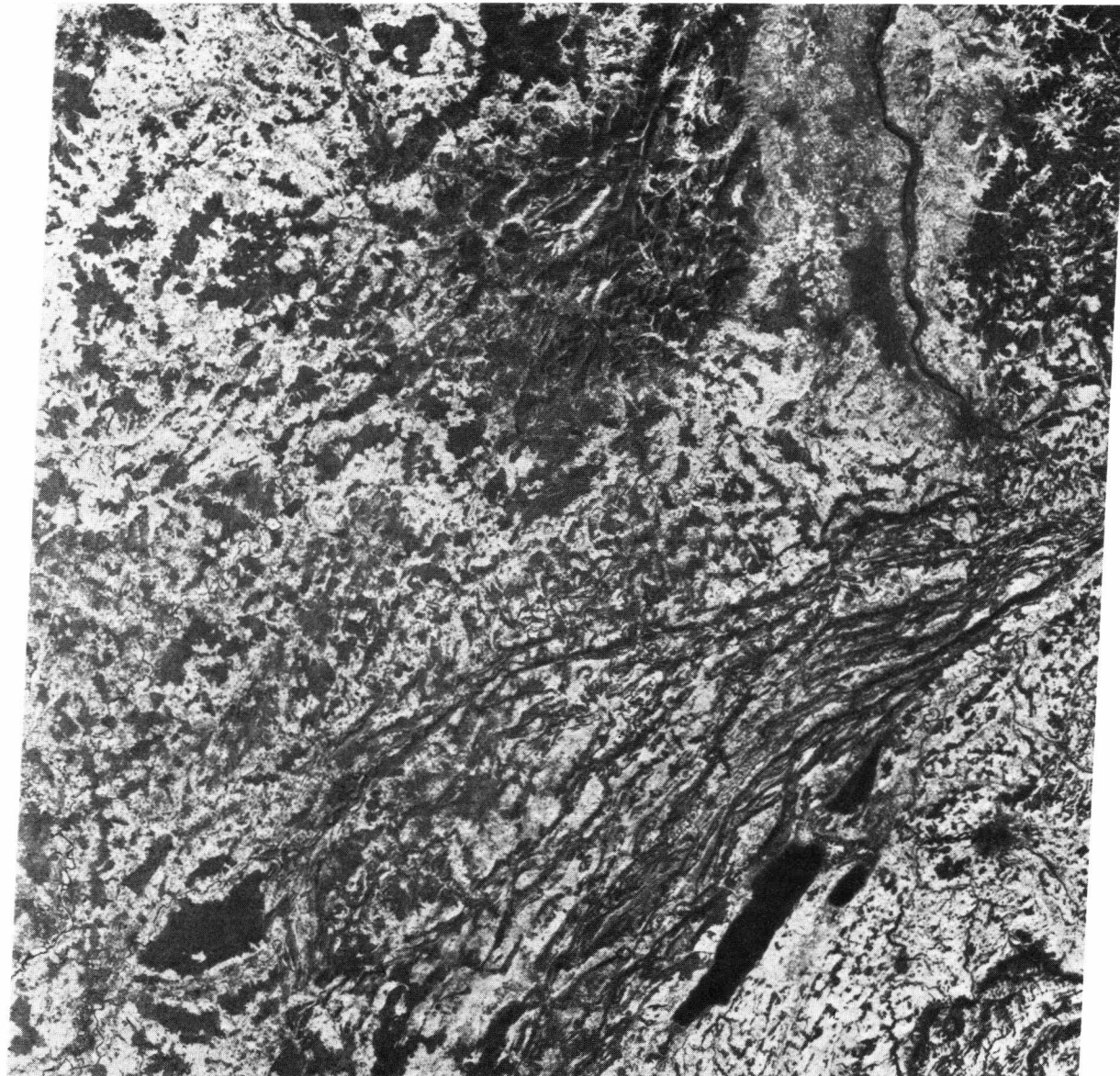


Рис. 157а. Южная часть Верхне-Рейнского грабена, части Вогезов и Шварцвальда, столовой и складчатой Юры и молассы на снимке «Лэндсат» в канале 7. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-2452-09391).

ные узкозональные снимки четырех каналов особенно контрастно, в зависимости от обстоятельств, отображают разные геологические особенности. Это наглядно видно при сравнении рис. 160а и 160б. На изображении в канале 5 морфологически, но прежде всего более темным серым тоном отделяется от своего обрамления (резче, чем на снимке канала 7) кольцевая структура щелочного гранита (верхняя часть снимка). Напротив, площади выхода ультрабазитов Бушвелдского комплекса (расслоенной интрузии по Гроотенбоуру) на снимке в канале 7 гораздо контрастнее отделяются от примыкающих с севера Бушвелдского

гранита (правая верхняя часть снимка), а с юга кварцитов и глинистых сланцев, чем на снимке в канале 5. На последнем переход к смежным комплексам, в особенности к Бушвелдскому граниту, отчасти вообще не распознается.

Наряду с различной способностью пород и кор выветривания к отражению и поглощению свой вклад в различное отображение соответствующих комплексов пород на снимках каналов 5 и 7 вносит растительность. Так, щелочной гранит (комплекс Пилансберг) в основном покрыт растительностью. Поэтому он показывает на снимке канала 5 темные, а в канале 7

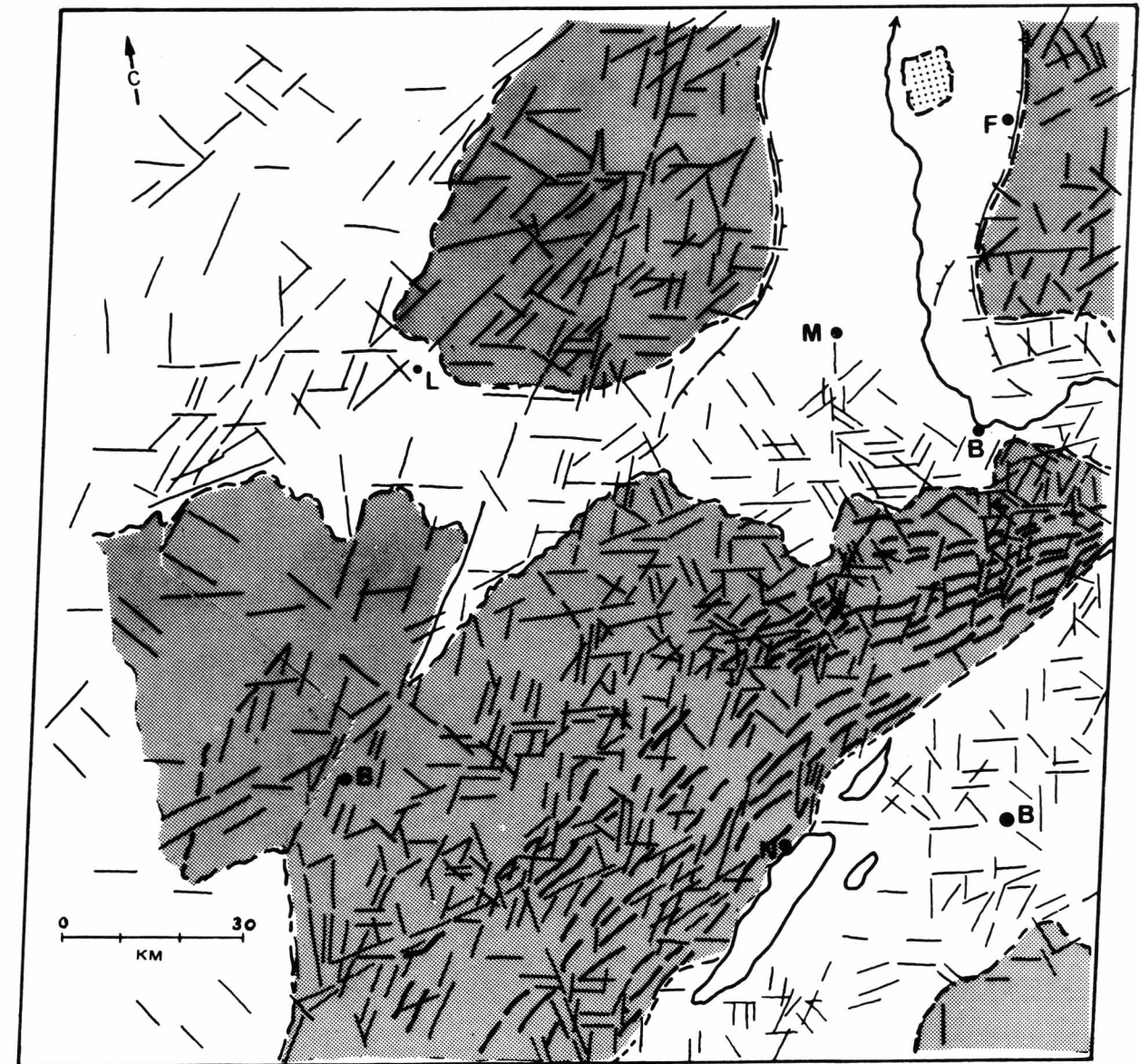
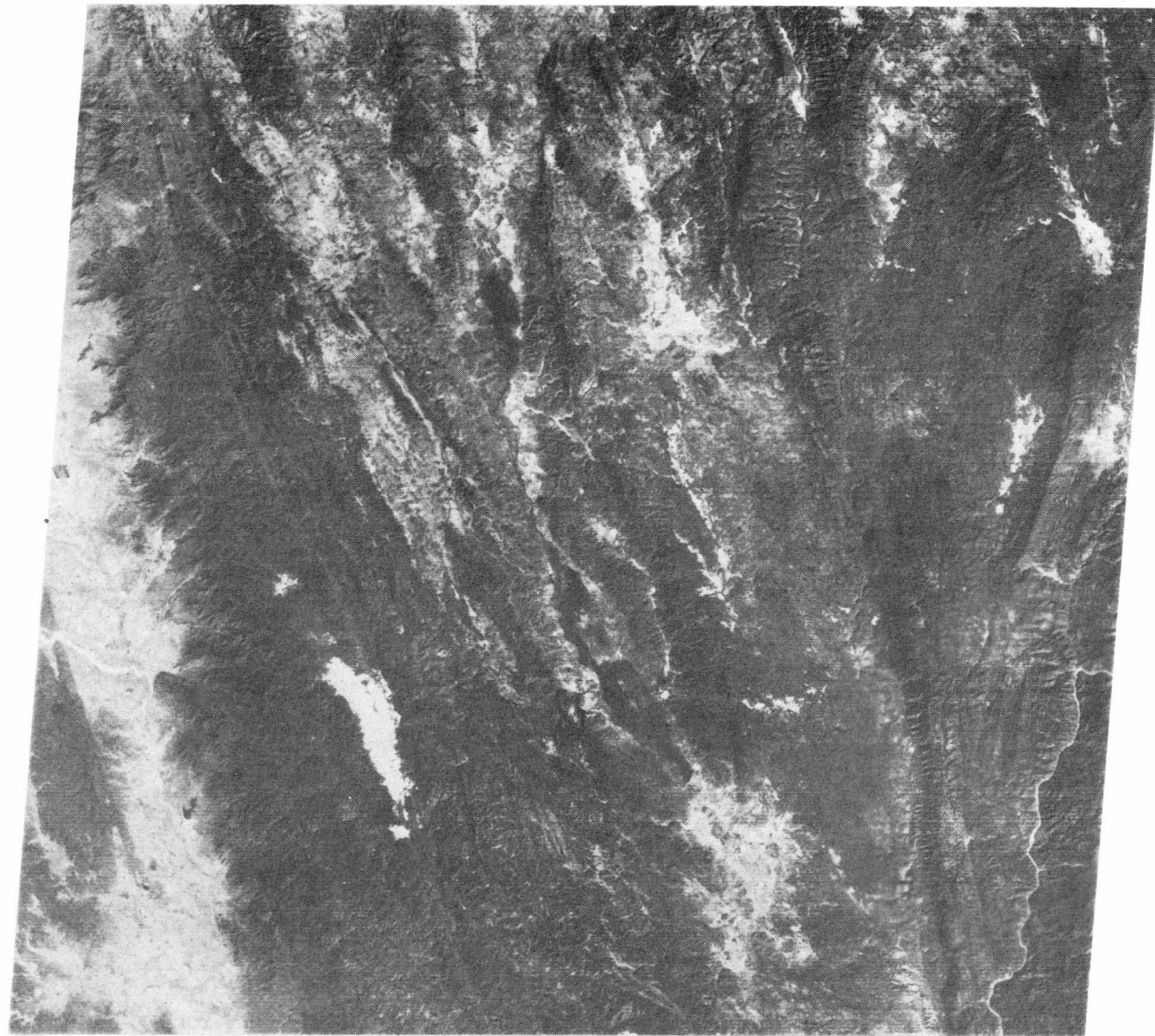


Рис. 157б. Тектонические структуры (оси складок и крутые разрывы), откартированные по снимку «Лэндсат» с рис. 157а. Здесь и далее буквы на картах – первые буквы названий городов.

светлые серые тона. Поверхности выхода ультрабазитовых пород и кор выветривания по ним, напротив, в основном свободны от растительности. Они отражают падающее солнечное излучение в красном спектре (канал 5, 0,6–0,7 мкм). Поступающее ИК-излучение (канал 7, 0,8–1,1 мкм), напротив, в основном поглощается. Отсюда темные тона на изображении канала 7. С экономической точки зрения представляет интерес, что в ультрабазитах у верхнего края снимка своим очень темным серым тоном выделяется комплекс, который, по Гроотенбоуру, весьма богат магнетитом. И вообще заснятая область имеет важное

значение с точки зрения полезных ископаемых и экономики, поскольку в ней расположены золотые и урановые рудники, залежи платины и хрома Бушвелдского комплекса, алмазоносные поля и свинцово-цинковые месторождения. Уже 90 лет этот район служит объектом интенсивного изучения геологами и специалистами по полезным ископаемым. Следует упомянуть, что, по сообщению Гроотенбоура, на многозональных летних снимках 1972 г. открыты литофациальные подкомплексы, которые пока не были известны по данным наземной съемки. По литостратиграфическим признакам они коррелируются с



а

Рис. 158а и 158б. Снимки «Лэндсат»–литофациальные и структурные особенности территории Бирмы, по-разному отраженные на узкозональных снимках в канале 4 (рис. а) и канале 7 (рис. б). Масштаб около 1:1000 000 (NASA, E-1531-3244).

имеющимися отдаленными выходами. Это относится, например, к темным полосам, которые наблюдаются в комплексе серого тона средней интенсивности, в нижней половине снимка. Судя по результатам наземных маршрутов, речь идет о переслаивающихся пачках светлых известняков с кремнистыми сланцами и темноокрашенных доломитовых известняков.

Левая нижняя часть снимка образована гранитоидными породами системы Вентерсдорп. Выходы почти отсутствуют, но связанные с интрузиями кольцевые структуры могут быть откартированы на снимке в канале 5.

В основании пачки ультрабазитов, выделяясь ха-

рактерной куэстой, в виде опорного горизонта появляется свита кварцитов. На снимках в каналах 5 и 7 она тоже отображается особым серым тоном, по-разному контрастируя с обрамлением. На изображении в канале 7 обнажающиеся поверхности напластования кварцитов имеют темную окраску. В основании куэсты появляется совсем светлая полоска. На снимке канала 5 поверхности напластования дают среднюю градацию серого тона. Куэсту кварцитов сопровождает здесь в основании темная полоса. Такое подчеркнутое отображение слоев и их простираций происходит благодаря густой растительности на свите глинистых сланцев, находящейся в основании кварцитов. Расти-

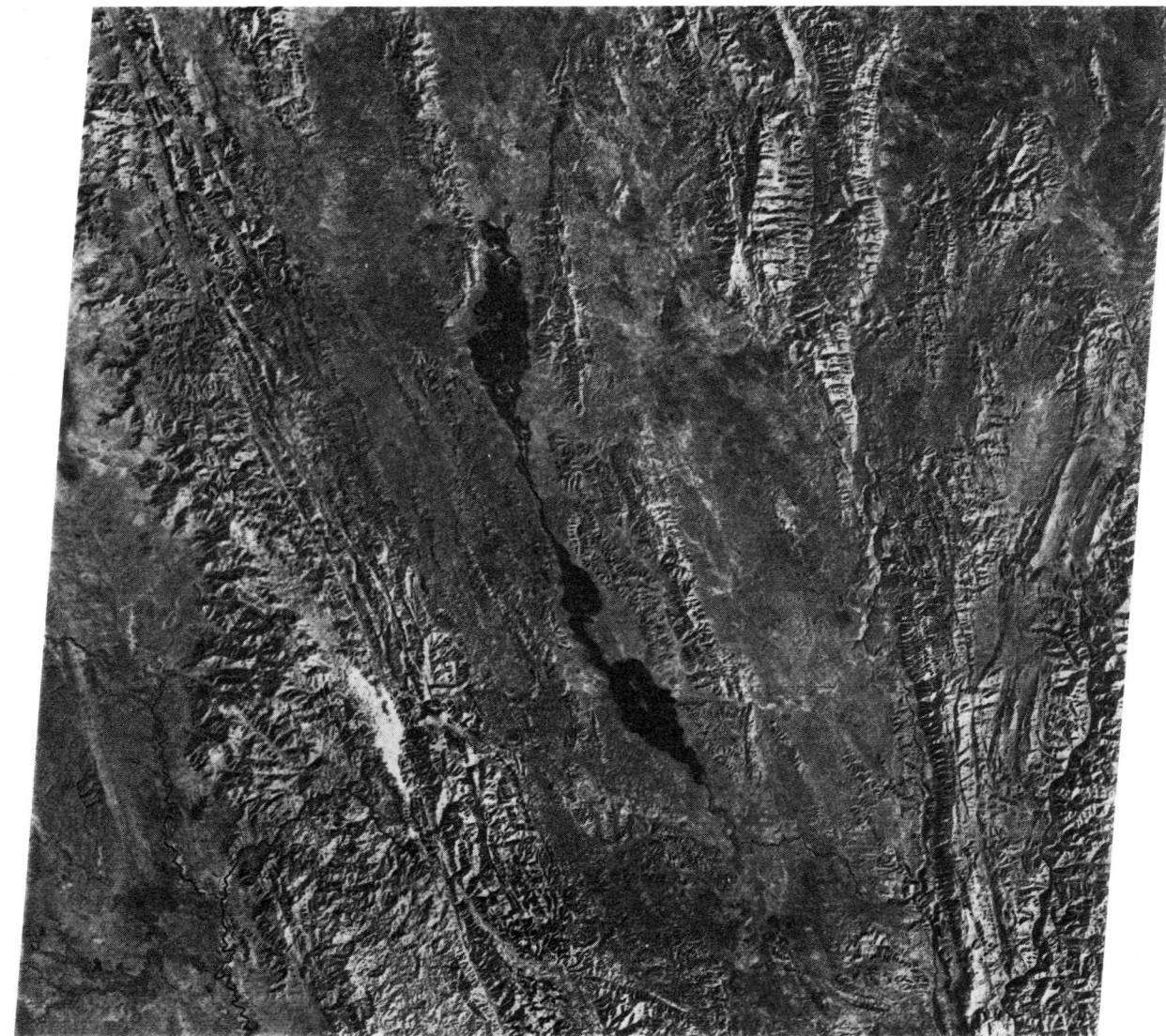


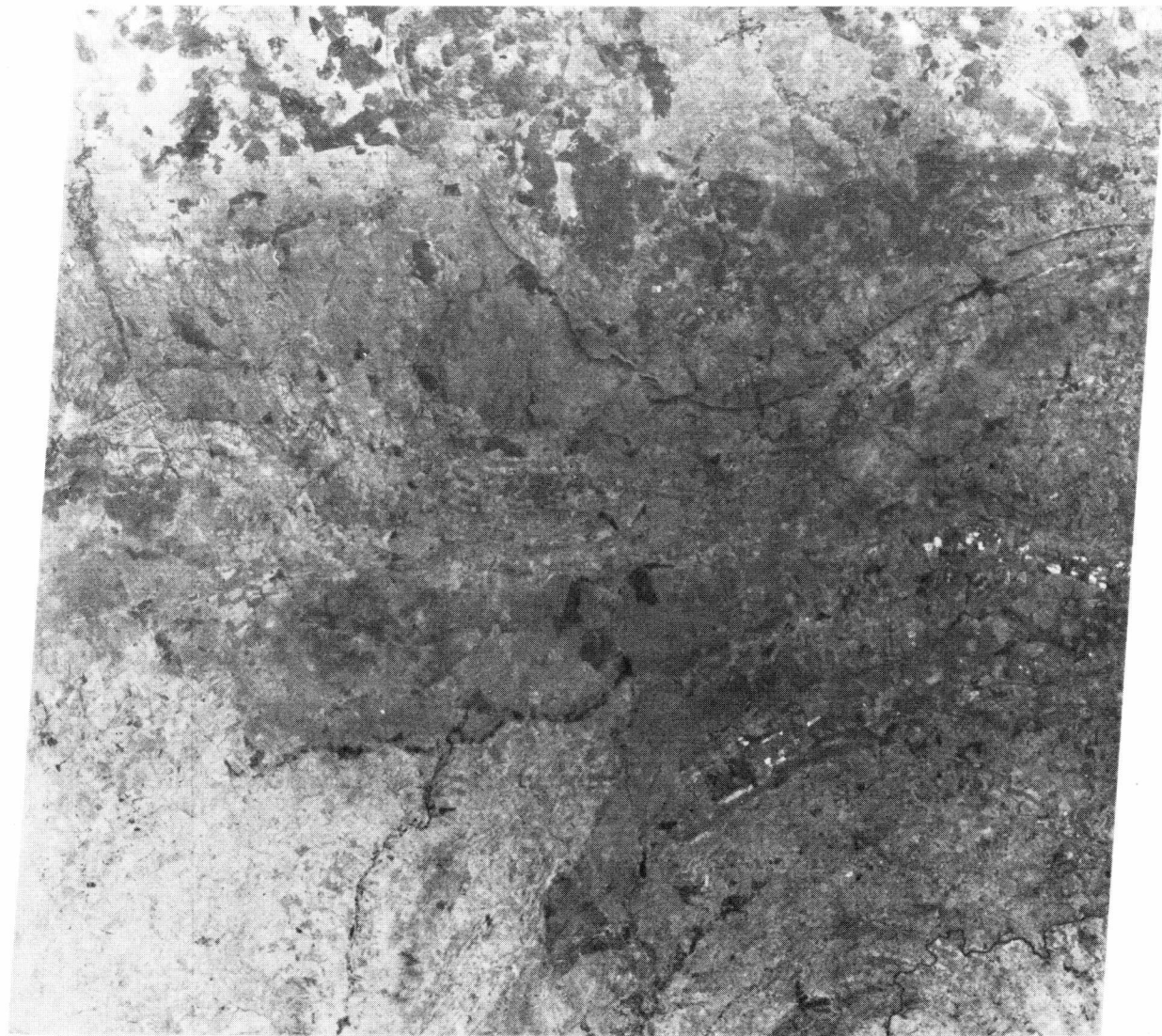
Рис. 158б.

тельность обуславливает появление полосы темного серого тона, которую при рассмотрении сверху можно трактовать как теневой эффект.

Рис. 160в показывает картирующиеся на летнем снимке (без ознакомления с местностью) границы литофациальных комплексов, равно как и положение картирующихся нарушений, зон разломов и зон трещиноватости. Картировали по узкозональным снимкам в каналах 5 и 7. Не была учтена информация канала 4, которая, по Гроотенбоору, должна предоставить дополнительные сведения прежде всего о выходах гранитных пород. Оптимальным был бы картографический итог, при получении которого наряду с отдельными узкозональными снимками по четырем каналам МСС мог бы быть использован в

фотогеологических целях ложноцветной снимок, полученный в результате наложения информационных изображений в каналах 4, 5 и 7. Нередко на подобных ложноцветных снимках становятся видны литофациальные границы, тектонические структуры либо различия свойств почвы, которые на обычных черно-белых снимках остаются незаметными.

В зависимости от времени года меняются высота и азимут Солнца и, следовательно, в зависимости от времени дня–условия освещенности ландшафта, который спутник «Лэндсат» облетает и снимает с 18-сут или более частым циклом. Тем самым наряду с упомянутой выше изменчивостью растительности и влажности почвы при фотогеологической интерпретации снимков «Лэндсат» играет роль еще и освещен-



а
Рис. 159а и 159б. Снимки «Лэндсат» района в провинции Трансвааль, ЮАР, конец зимнего сезона, канал 5 (рис. а) и канал 7 (рис. б). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1050-07355).

ность. Она меняется на протяжении года и приводит к различным эффектам соотношения света и тени на заснятых ландшафтах. Летом отбрасываемая во время съемки тень сравнительно мала, зимой же, напротив, более выражена из-за низкого положения Солнца. Соответственно один и тот же ландшафт предстает на снимках «Лэндсат» в разные времена года либо более плоским, либо более пересеченным. Это наглядно иллюстрируют рис. 161, а и 161, б. Заснят один и тот же участок местности. Оба изображения сняты в канале 7 МСС. Летний снимок изображает Эйфель, часть Хунсрюка, а также долину Мозеля с менее отчетливыми формами рельефа. Доминирующим и главным критерием для фотогеологического картиро-

вания являются вариации серого фототона, обусловленные растительностью. Напротив, на зимнем снимке сильнее выделяются формы рельефа ландшафта. Дренажная сеть отражается значительно более дифференцированно, чем на летнем снимке. Разрывные структуры и системы разломов многих направлений, которые подчеркиваются линейными отрезками участков долин различной длины, по зимнему снимку картируются лучше. Во многих частях зимнего снимка более рельефно выглядят куэсты, положение которых и простираение на августовском снимке неразлично либо заметно лишь по изменениям в растительности (например, на Хунсрюке, на снимке—слева вверх).

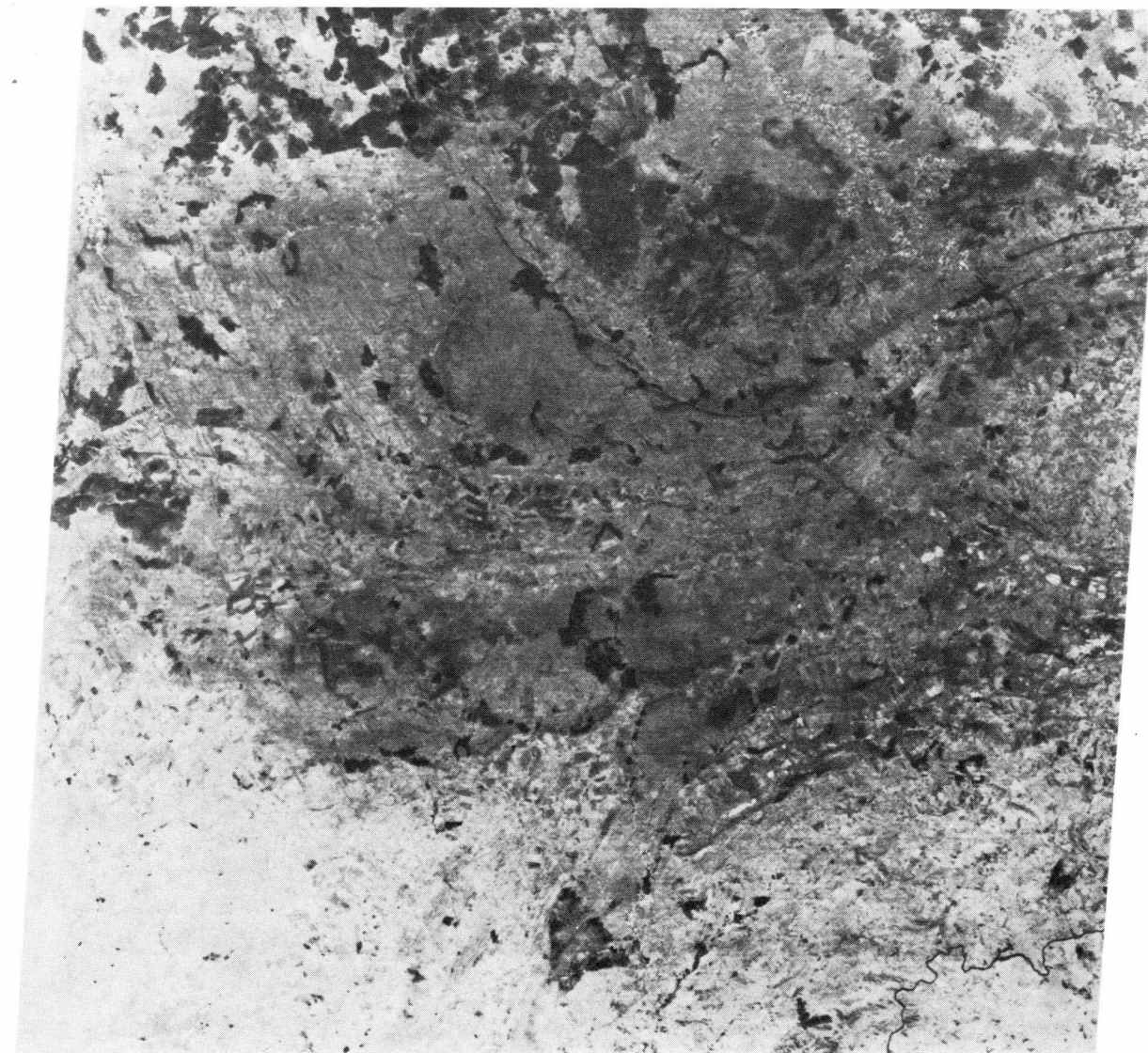
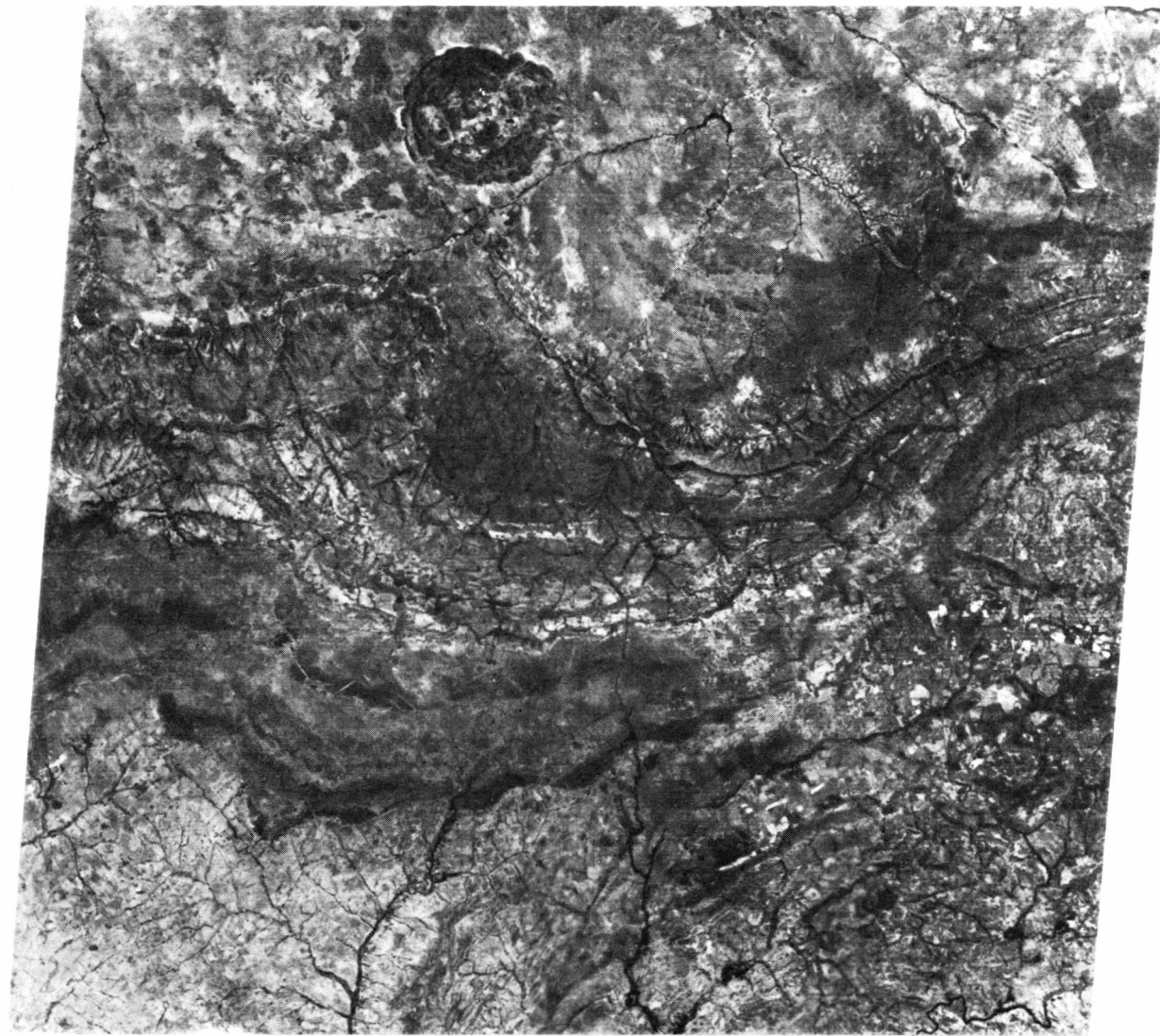


Рис. 159б.

Сделанные при низком положении Солнца снимки «Лэндсат» обладают преимуществом при картировании тектонических структур—прежде всего в менее расчлененных районах, в которых пологое падение света подчеркивает даже малые различия в рельефе ландшафта и делает эти снимки пригодными для картирования. Это касается и ландшафтов с тонким снежным покровом. Воздействие заснеженного ландшафта и полого падающего солнечного излучения, усиливающее контрасты рельефа благодаря контрастам соотношения света и тени, иллюстрирует рис. 162а (канал 6). На изображенной территории расположен хребет Брукс, Аляска, через который проложен Аляскинский трубопровод. В северном

форланде горной цепи отчетливо видны такие детали рельефа ландшафта, как моренные отложения и отложения талых вод эпохи плейстоценового оледенения. В левом верхнем углу снимка распознаются валы конечных морен по их рисунку в виде русла. В горах отмечаются широкие, выпаханные ледниками U-образные долины и образованные линейной эрозией V-образные долины. Бросается в глаза прямолинейная форма многих долин различной длины, прежде всего в верхней половине снимка. Здесь прямолинейные и протягивающиеся параллельно друг другу, а также сочленяющиеся под углом долины подчеркивают линии выхода на поверхность крутых разрывных структур основания, которые в виде зон параллель-



а

Рис. 160а–160в. Снимок «Лэндсат» территории, показанной на рис. 159, середина южного лета, канал 5 (рис. а) и канал 7 (рис. б); литофациальные комплексы и тектонические структуры, картируемые на декабрьских снимках (рис. в). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1158-07363).

ных сгущений могут быть распределены между определенными преимущественными направлениями. На карте фотополосности (рис. 162б) отражены позиция и простирание отдельных разрывных структур (нарушений и зон трещин) и пространственное распространение систем разломов определенных направлений. Частные разрывные структуры и системы разломов прослеживаются из района гор в плейстоценовые ледниковые отложения форланда. Там часто в пригодном для картирования виде через прямолинейные отрезки долин вырисовываются разрывные структуры основания.

Различное отражение одного и того же ландшафта

на летнем и зимнем снимках и различную информативность снимков показывает сравнение рис. 163а и 163б. На зимнем снимке в канале 7 (февраль 1975 г.) в подчеркнутом виде отражаются различные формы поверхности двух региональных геологических единиц. Летний снимок по сравнению с ним выглядит плоским. На снимках представлен северо-восточный район Канады. Они показывают контакт между архейским фундаментом провинции озера Верхнего на юго-западе (возраст около 2,4 млрд. лет) и Лабрадорским прогибом (около 1,7 млрд. лет), относящимся к провинции Черчилл. В области выхода архейского фундамента формы рельефа определяются мас-



Рис. 160б.

сивным строением преобладающих здесь гранитоидов и многочисленными крутыми нарушениями. Линии выхода последних на изображении «Лэндсат» вырисовываются и картируются в виде прямолинейных или слегка искривленных фотополосностей. Местами кольцевые структуры указывают на интрузивные тела. В северо-восточной части снимка, напротив, формы ландшафта обусловлены складчатой структурой серий Лабрадорского прогиба. При этом зоны выхода устойчивых к выветриванию слоев своими куэстами и структурно-денудационными уступами в деталях маркируют довольно сложное структурное строение. Распознаются некоторые более крупные нарушения (по Baragar, 1981; Dimroth et al., 1970—это пологие надвиги в юго-западной и крутые в северо-

восточной частях Лабрадорского прогиба, делящие его складчатые серии на несколько крупных зон). Смятая в складки толща Лабрадорского прогиба образована комплексом лежащих складок, выходящим в виде зоны шириной около 20 км, протягивающейся параллельно несогласному контакту с фундаментом. Этот комплекс слагают неметаморфизованные осадки (граувакки, глинистые сланцы, кварциты, доломиты, железорудная формация). С северо-востока подходят метаморфизованные во все возрастающей степени толщи переслаивания основных лав (силлы габбро, подушечные лавы, массивные базальты), пирокластитов и осадочных пород (Baragar, 1981). Пространственное расположение складчатых серий на рис. 163в, который с северо-востока примыкает к

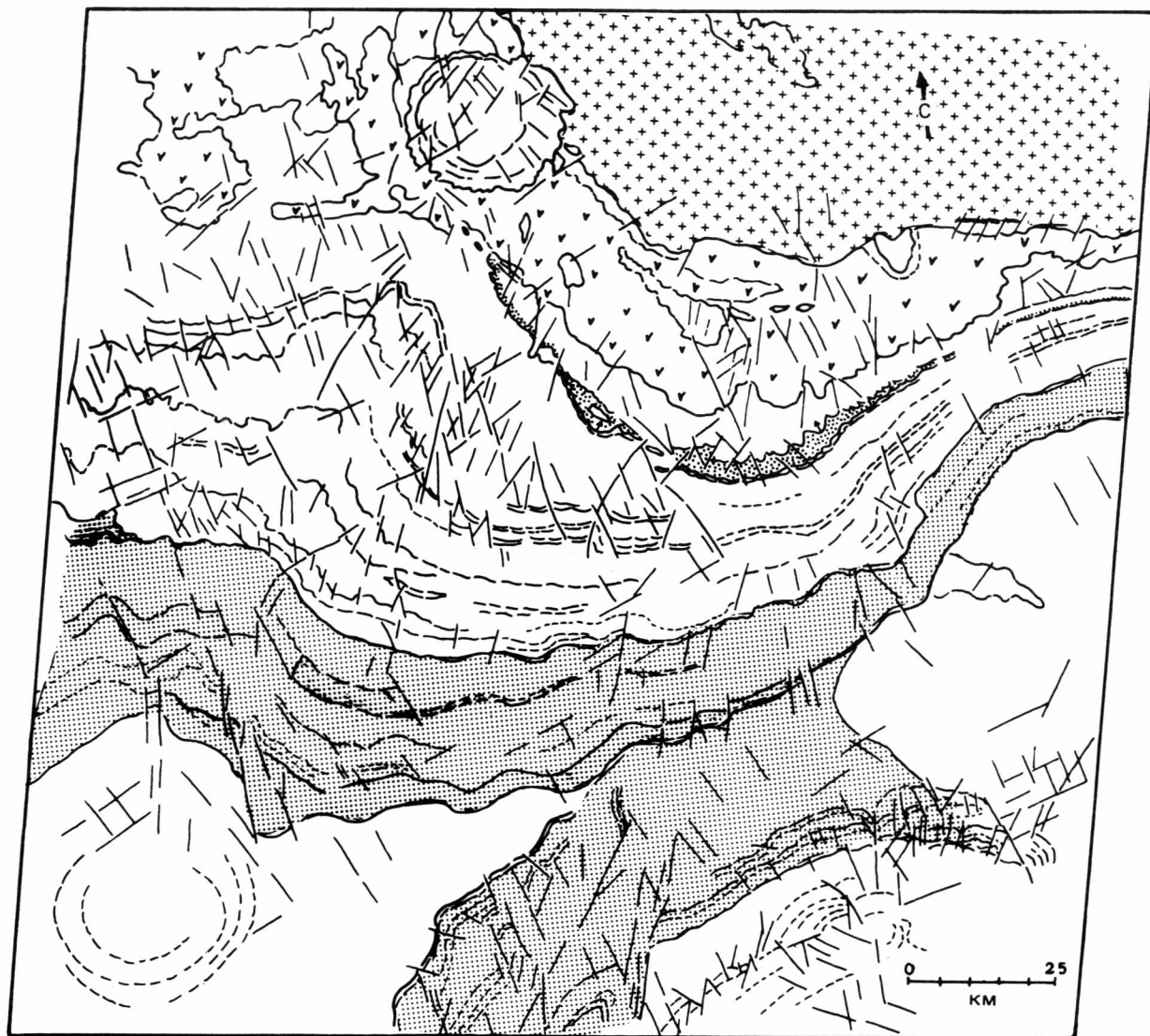


Рис. 160в.

рис. 163а и дает более хороший обзор центральной части Лабрадорского прогиба и его тыловой области, характеризует территорию собственно Лабрадорского прогиба. С северо-востока крутым нарушением, протягивающимся (примерно через середину снимка) в направлении общего простирания, он разграничен с довольно широкой площадью развития комплекса мощных метаграувак и кварцево-сланцевых сланцев. Этот блок четко отделяется от прогиба своим массивным строением и менее дифференцированными формами поверхности. Формами рельефа он отличается и от участка в правом верхнем углу снимка, сложенного гранитами и парагнейсами. Параллельные, простирающиеся в северо-восточном направлении и выдержанные узкие врезки долин, появляющиеся между

названными единицами, отвечают, наверно, крупной зоне разломов, разделяющей оба комплекса.

Основными среди всех рассмотренных до сих пор примеров были обычные виды снимков – черно-белые отпечатки со вторых и третьих дубль-негативов. Как уже описано в гл. 5, снимки «Лэндсат» с целью представления и картирования определенных особенностей территории или ее объектов могут быть оптимизированы благодаря применению аналоговых или цифровых методов обработки снимка. Целью таких операций является, например, более контрастное отображение различных типов пород, выделение тектонических структур. Рис. 164а–164в показывают один и тот же участок местности – блок докембрийского фундамента близ восточного побережья Крас-

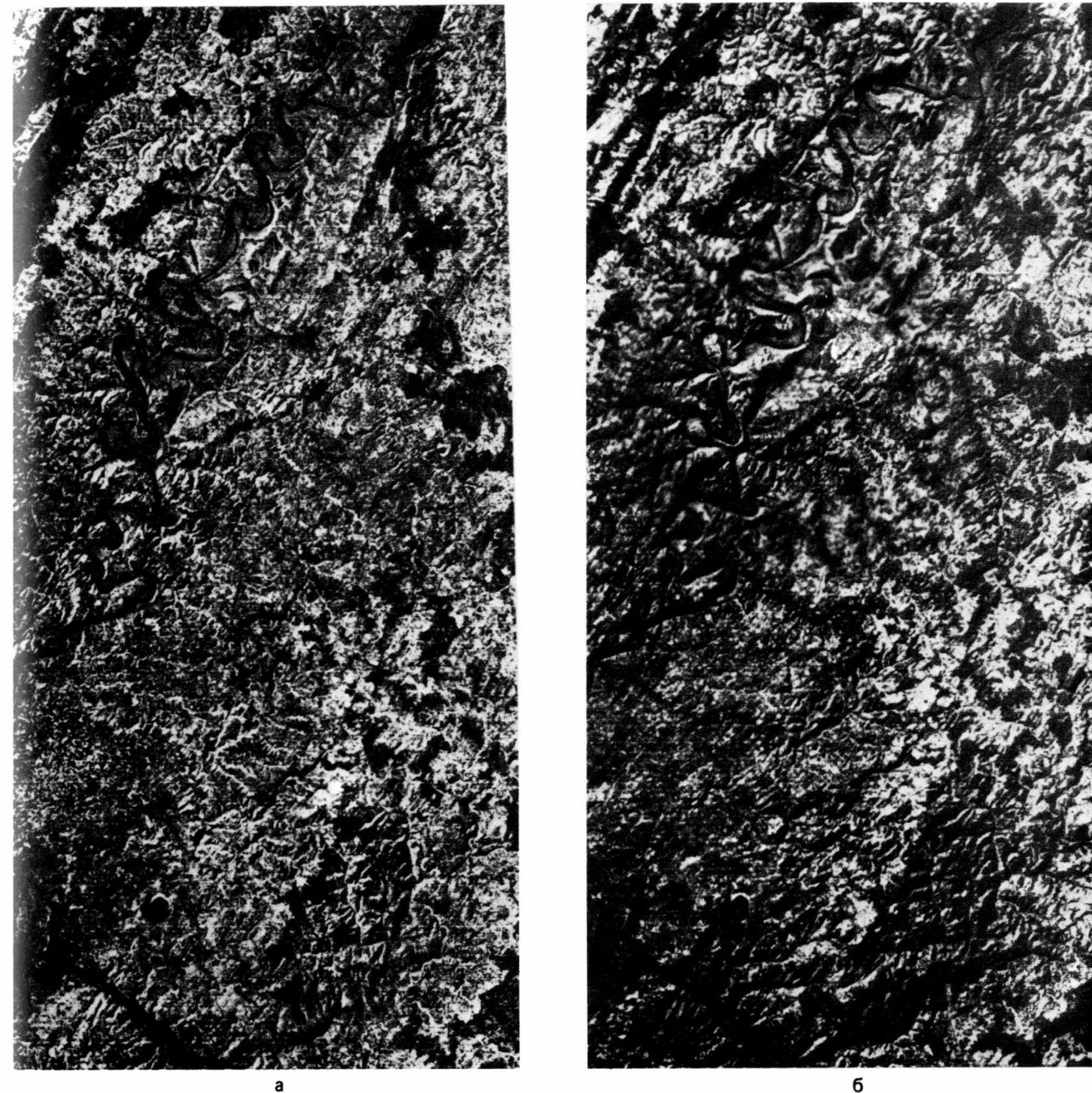


Рис. 161. Различия в изображении одного и того же ландшафта на снимке в конце лета (а) и зимой (б); оба снимка в канале 7. Слева сверху – меандрирующее течение реки Мозель, в нижней части снимков – Лаахское озеро. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-2219-09475 и E-1151-10010).

ного моря (Саудовская Аравия). Рис. 164а представляет собой стандартный фотоотпечаток снятого в канале 5 снимка «Лэндсат». В гнейсы и метаморфические сланцы, интенсивно смятые в складки и расчлененные крупными нарушениями, внедрились более молодые интрузии гранитных пород. Контакты с

вмещающими породами несогласные, и в сравнении с вмещающими толщами они выделяются более светлым серым тоном и овальными до округлых очертаниями. Рис. 164б изображает ту же область после фильтрации высокочастотных пространственных вариаций серого тона на узкозональном снимке канала



Рис. 162а. Осенний снимок ландшафта хребта Брукс, Аляска, канал 6. Масштаб около 1:750 000. Заметны линейные врезы долин или рек, выделяющиеся в горных районах и прослеживающиеся иногда и в молодых ледниковых отложениях (слева вверх) (NASA E-1072-21173).

5. Снимок становится контрастней, детали и различия рельефа выступают нагляднее. Лучше картируются структурное строение основания и протягивающиеся примерно параллельно побережью разрывные зоны. Рис. 164в показывает ту же область в виде изображения, полученного по отношению каналов МСС 4/5. Серые тона этого изображения отражают соотношения яркости обоих спектральных каналов (ср. разд. 5.3.11). Теневой эффект ландшафта приглушен. В верхней части снимка отчетливым контрастом выделяется несколько гранитных интрузий, которые на изображениях двух других снимков менее заметны, или имеют не такие очертания, или вообще неразличимы. Бросается также в глаза дифференцирован-

ное отображение молодых осадочных пород прибрежного района, которые на рис. 164а выглядят довольно монотонно.

Рис. 165а (канал 5) изображает участок на западном краю глыбы Лут в восточном Иране. Горный хребет (часть хребта Шотори), протянувшийся с северо-запада к середине снимка, сложен в тектоническом плане. Палеозойские и мезозойские осадочные толщи здесь интенсивно смяты в складки и тектонически раздроблены и разбиты на чешуи. Горный хребет, как и все здешние горные сооружения, окружен широкими предгорными равнинами, перекрытыми более или менее мощными чехлами продуктов сноса и щебнем (педимент, эрозионный гла-

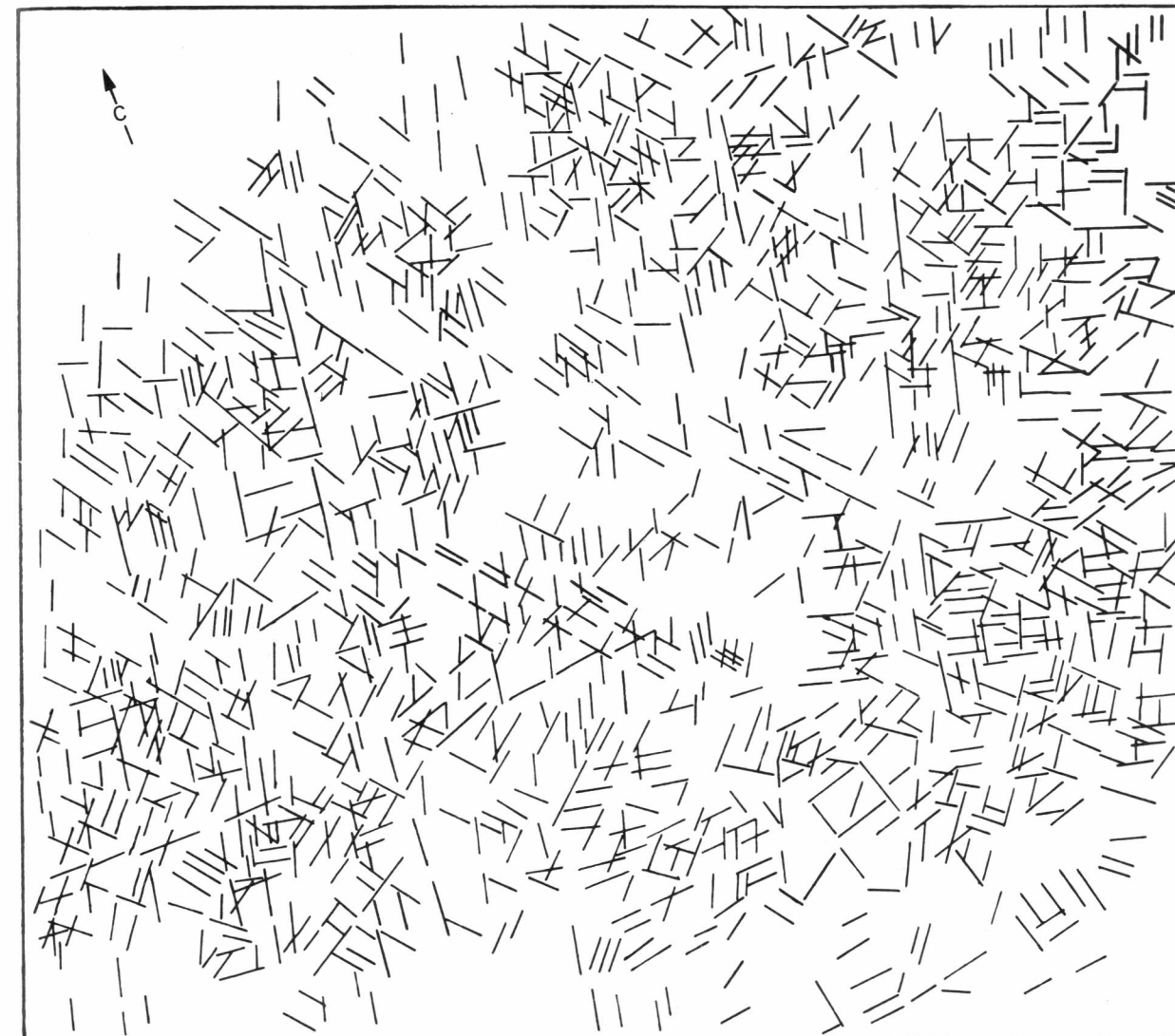


Рис. 162б. Крутые разрывы в пределах площади на рис. 162а, картирующиеся в виде фотолинеamentов.

сис). Восточная половина снимка показывает морфологически сильно расчлененный горный ландшафт, образованный мощными свитами вулканических пород, отчасти смятых в складки и раздробленных на глыбы многочисленными крупными и мелкими нарушениями. Базальты и базальтовые туфы, как и образующиеся при их разрушении продукты сноса, выделяются среди окружающих вулканитов (андезитовых покровов, дацитовых лав, игнимбритов, кварцевых кератофиров и туфов) черной окраской. Часты вулканические дайки (по Геологической карте масштаба 1:250 000, лист Босхруйе, и Геологической карте Ирана масштаба 1:1 000 000). Нижняя часть снимка представляет мезозойские серии (песчаники, плотные глины и мергели, известняки). Рис. 165а

базируется на полученном фотоизображении записи на ленте (DFVLR-GSOC). Охваченный снимком участок обнаруживает крайние различия цвета и яркости (например, белые эвапориты, светлый песок пустыни, базальт). Эти различия являются причиной недостаточной дифференциации серого тона в слишком светлых и темных частях изображения. В этом случае следовало бы использовать соответствующие методы обработки снимка, позволяющие достичь равновзвешенного распределения яркости или серого тона и улучшить картируемость снимка в критических зонах.

В целом более равновзвешенное и дифференцированное изображение особенностей местности было получено путем трансформации по первой главной компоненте (рис. 165б). Эта операция существенно



Рис. 163а–163в. Летний (рис. а) и зимний (рис. б) снимки примерно одной и той же области на северо-востоке Канады, полуостров Лабрадор. На зимнем снимке подчеркнута выделяются прежде всего тектонические структуры (NASA, E-10925-14531 и E-20921-14341). Снимок (рис. в) дополняет предыдущие рисунки, показывая структуры фундамента (NASA, E-1546-14592-7). Масштаб около 1:1 000 000.

улучшает картируемость геологических особенностей. Однако получаемое после трансформации по второй главной компоненте изображение, в которое входят цветовые различия существующих литофациальных комплексов картируемой области, на первый взгляд кажется более вялым. Но при тщательном рассмотрении выявляется, что благодаря измененному представлению градации серого тона во многих частных районах контрастнее отображаются лито-

фациальные комплексы и тектонические структуры, которые вообще не распознаются на стандартном снимке и на изображении, полученном путем трансформации по первой главной компоненте, или же остаются слабо заметными. Это относится, например, ко многим обнажениям смятых неогеновых толщ на юго-западном склоне хребта Шотори (на педименте), которые на рис. 165в выделяются темным серым тоном, а на рис. 165а и 165б лишь

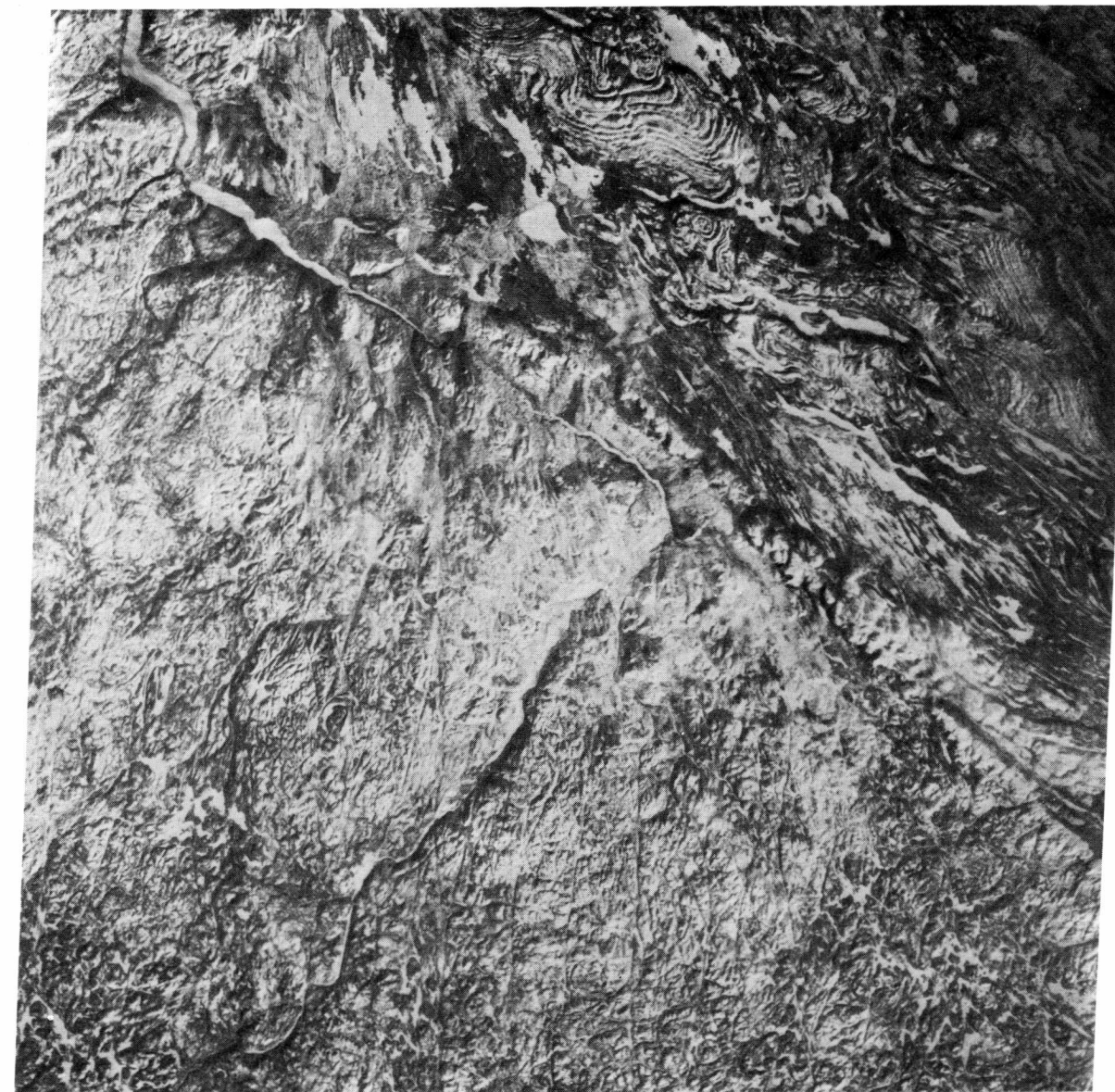


Рис. 163б.

намечаются слабым контрастом серого тона. Соответствующие различия распознаются также и в изображении геологических соотношений в юго-западном углу снимка. Этот пример показывает, как с помощью методов обработки снимка можно контрастнее отобразить и лучше откартировать определенные геологические объекты или особенности частных районов снимка «Лэндсат». Подобные улучшения снимка бывают, например, желательны, если требуется установить зоны или площади выхода отдельных литологических комплексов, выявить и ограничить измененные зоны в перспективных в смысле обнаружения месторождений областях, разграничить

рыхлые и скальные породы или выявить тектонические структуры.

На изображениях по отношению каналов МСС 4/5 и 5/6 (рис. 165г и 165д) снимков «Лэндсат», смотря по обстоятельствам, более контрастно отражаются определенные геологические особенности, которые на остальных представляемых снимках незаметны, тогда как иная информация, отчетливо распознаваемая на этих остальных снимках, здесь ущербна.

Довольно различные сведения об определенных особенностях картируемой площади дают также рис. 166а–166г. Заснятая область – тропический ландшафт саванн с травянистой растительностью, бушем

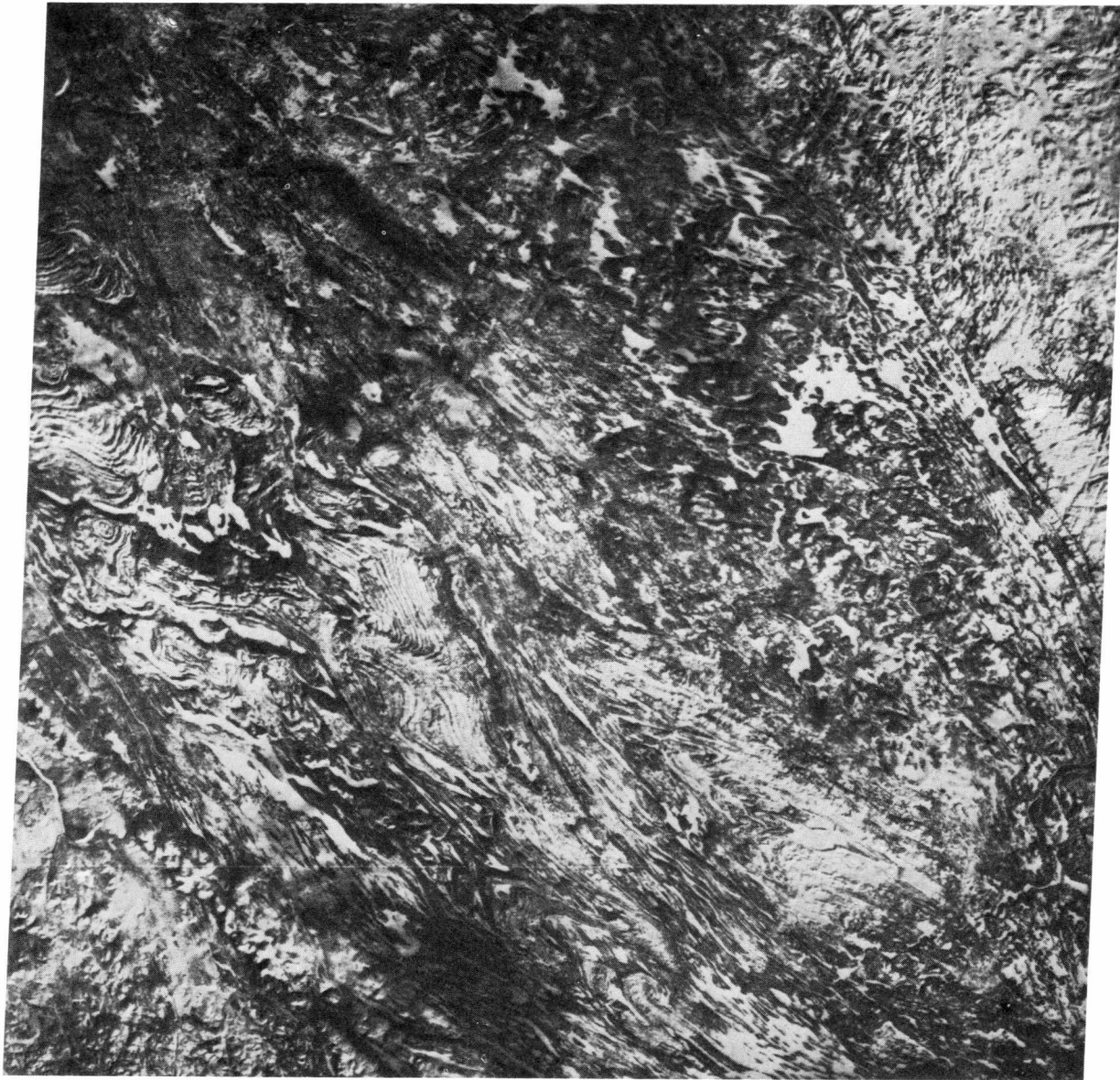
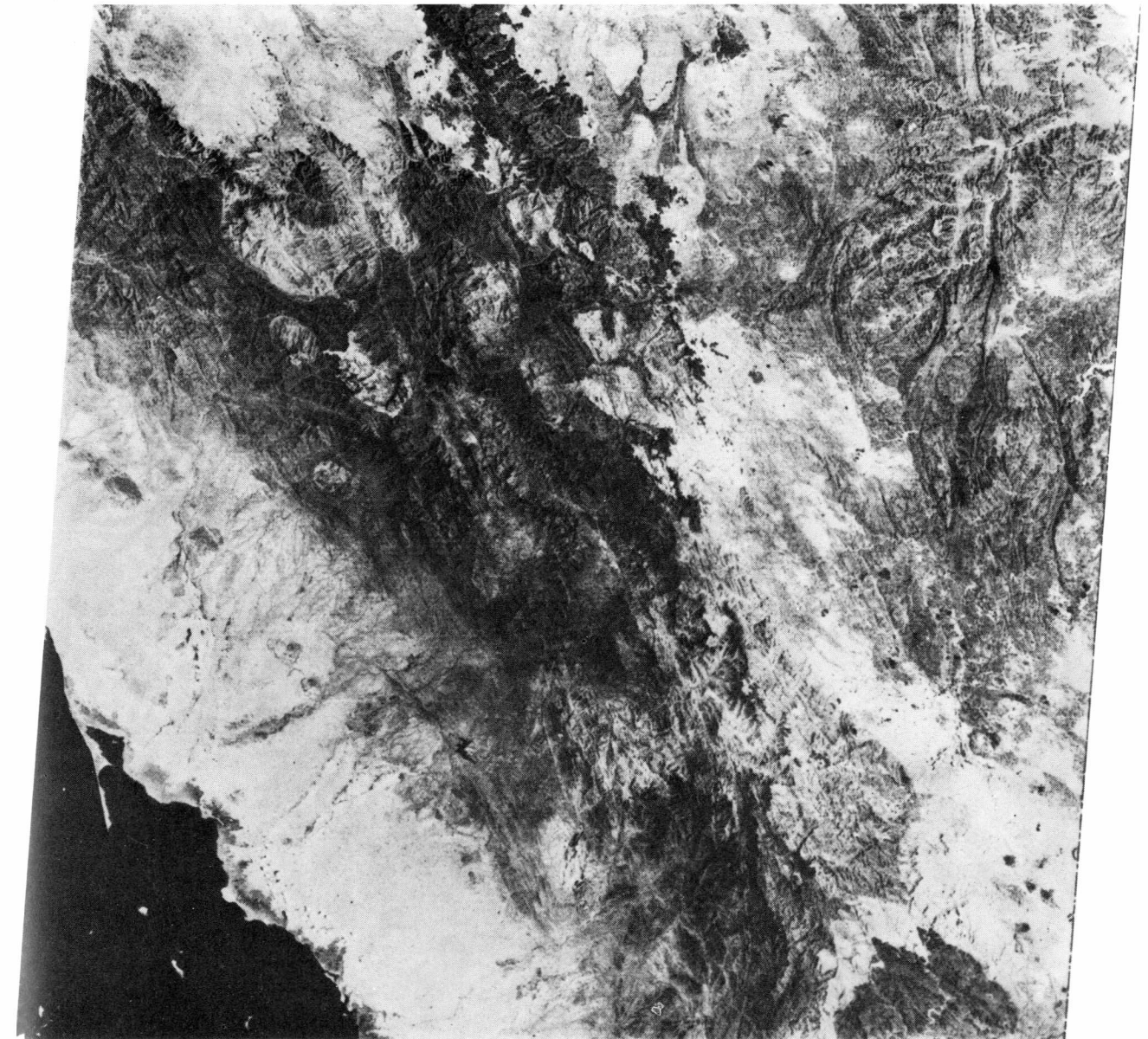


Рис. 163в.

и островками групп деревьев – располагается на границе провинций Мату-Гросу и Гояс (центральная Бразилия). Для геолога интересна кольцевая структура, которая с различной контрастностью и различным разрешением или дифференцированностью выражена на четырех снимках (масштаб около 1 : 500 000). Кольцевая структура Арагуаина интерпретировалась как сиенитовая интрузия мезозойского возраста [221]. Диц, Френч и Оливейра [57] после полевых маршрутов и интерпретации снимка «Лэндсат» определили импактный характер структуры. Эта трактовка была подтверждена результатами исследо-

ваний Тейлен-Виллиге [291]. Были обнаружены конусы дробления, ударнометаморфические породы и зювит. Ударная структура имеет диаметр около 40 км. Она состоит из центрального поднятия, концентрически опоясанного кольцеобразными куэстами и зонами понижений или равнинами долин и террасированными склонами. Центральное поднятие состоит из докембрийских кристаллических пород, концентрически окаймленных массами зювита и полимиктовой брекчии. Снаружи примыкают вздернутые и также запрокинутые по концентрическим разломам толщи и глыбы песчаников и глинистых сланцев. Темные



а

Рис. 164а–164в. Метаморфические породы и гранитные интрузии (округлые структуры) докембрийского фундамента Саудовской Аравии и молодые отложения на побережье Красного моря на стандартном снимке «Лэндсат» в канале 5 (рис. а), после высокочастотной фильтрации (рис. б) и в виде изображения по соотношению каналов (рис. в). Обработка снимков Р. Гайдна, ZGF, Мюнхен. Масштаб около 1 : 1 000 000 (NASA, E-1424-06593).

участки на снимке в канале 5 (рис. 166а) и на изображении по отношению каналов МСС 5/6 (рис. 166б) образуют кольцеобразные зоны, соответствующие более густой или специфической растительности, которая явно развивается на определенных литофациальных комплексах основания. В общем примеры с изображениями показывают, как могут быть подчеркнуты или приглушены благодаря методам обра-

ботки снимка различия в характеристиках почв и растительности, а также детали дренажной сети. Какие методы или комбинации методов обработки снимков особенно контрастно выразят характеристики местности, представляющие интерес в рамках данного исследования или задачи, в значительной степени зависит от действительных условий местности, а часто также от специфических ее особен-

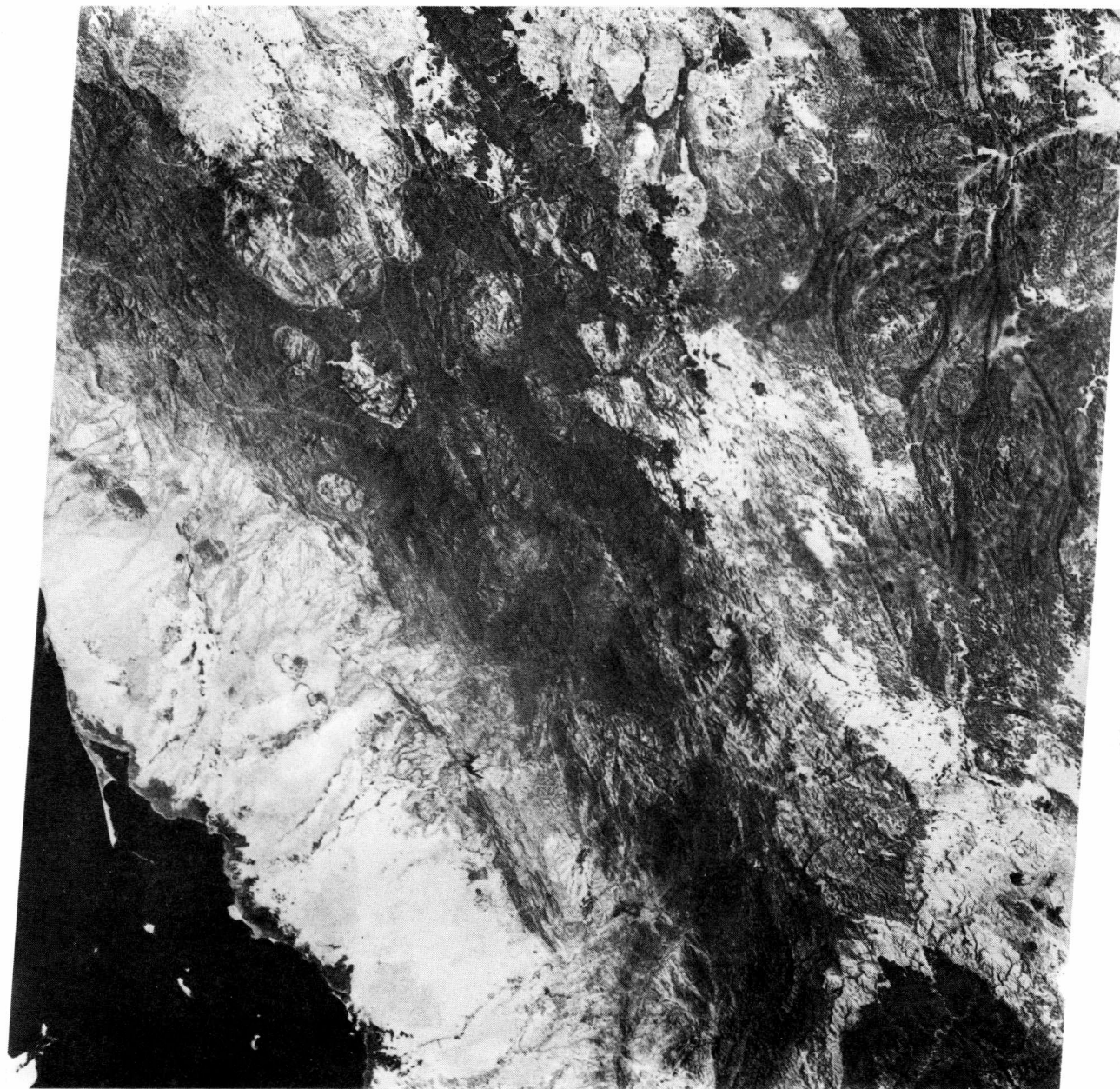


Рис. 164б.

ностей или явлений на местности во время съемки. Наиболее подходящие методы обработки снимка выбираются либо на основании опыта, либо (нередко) методом проб и ошибок.

Пример другого вида обработки данных снимка дают рис. 116а и 116б. Зоны выхода осадочных серий, участвующих в строении района Тидикельт в Алжире, и его, сравнительно простое, хотя и незакономерное строение, выражаются на снимке градациями серого тона. Напротив, в изображении псевдорельефа (рис.

116б), составленном с помощью фотографической обработки снимка, резче выражено тектоническое строение. Изображения псевдорельефа часто используются также, чтобы подчеркнуть линейные структурные элементы ландшафта. К интерпретации подобных изображений все же рекомендуется подходить осторожно, поскольку на изображении псевдорельефа (без сравнения с оригинальной основой изображения) не всегда бесспорно можно решить, вызваны ли наблюдаемые линейные структуры геологическими

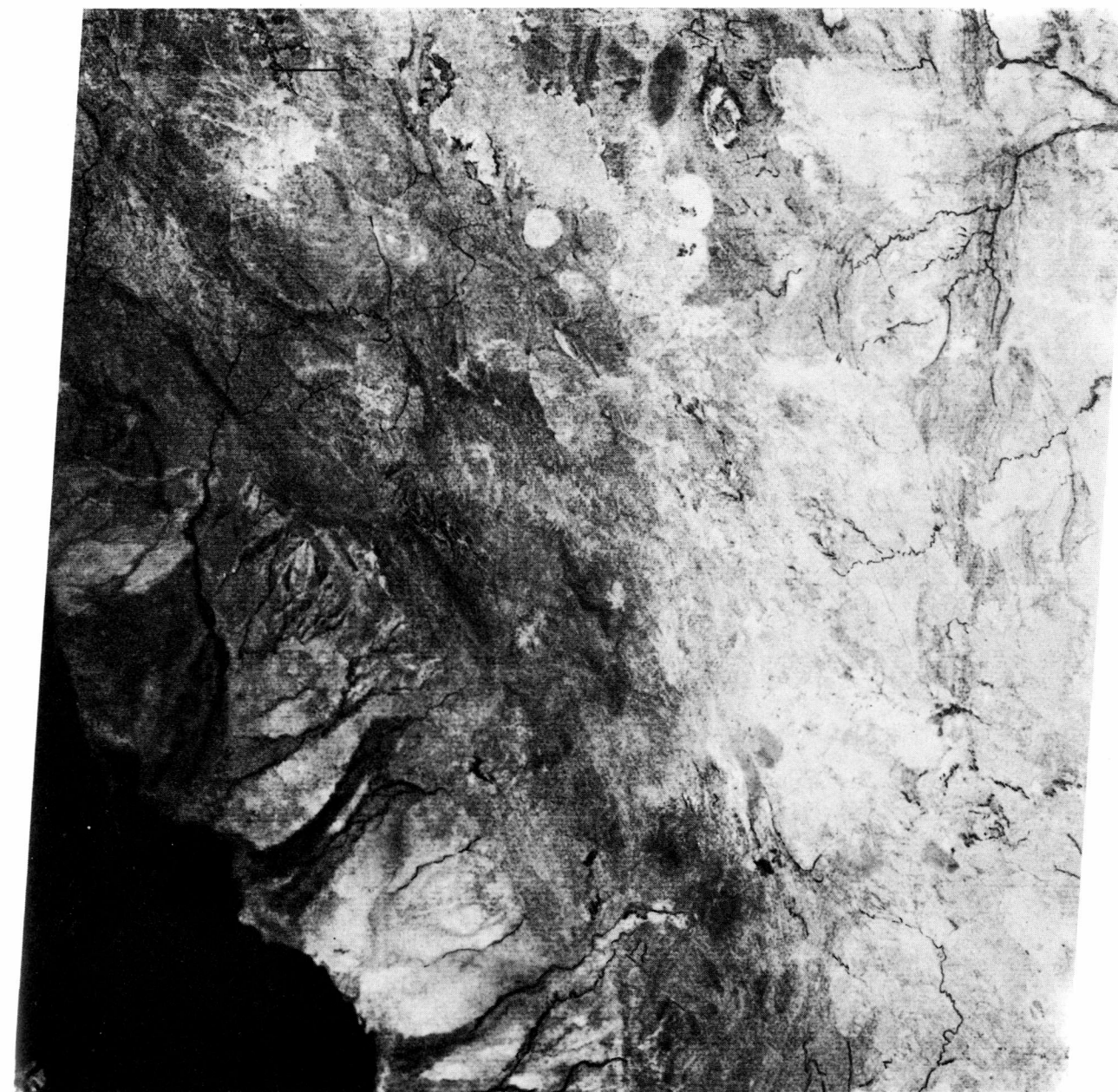


Рис. 164в.

причинами, т. е. связаны с линиями или зонами выхода крутых нарушений и зон трещиноватости, или же имеют негеологическое происхождение. Для картирования крутых нарушений, зон трещиноватости и систем трещин всеобъемлющие и надежные данные поставляет, исходя из опыта, комбинированная критическая интерпретация узкозональных снимков «Лэндсат» МСС. Хорошую основу для картирования представляют собой обычно черно-белые фотоотпечатки, которые изготавливают с полученных из Цент-

ра данных ЭРОС негативов. Не всегда дополнительные меры по обработке снимков приносят дополнительные сведения о сети разломов на территории снимка. Однако линейные выдержанные структуры типа зон нарушений линейного характера до сих пор лучше выделяются на ложноцветных изображениях «Лэндсат» или на цветокодированных, заранее обработанных изображениях, чем на стандартных черно-белых снимках.

Рис. 167 показывает, как фильтрацией может быть

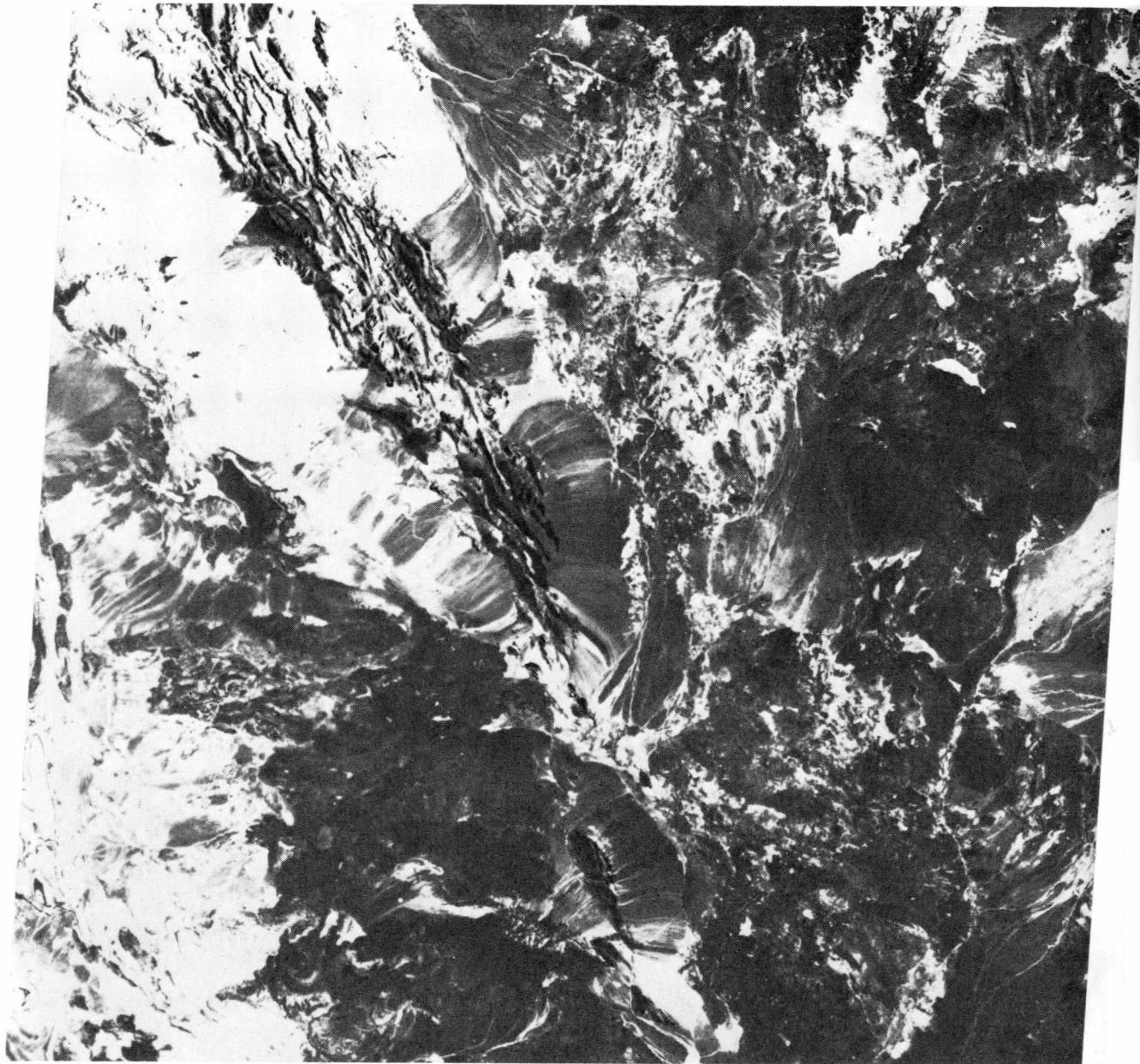


Рис. 165а–165д. Участок местности на северо-западном краю блока Лут в северо-восточном Иране на обычном снимке «Лэндсат» в канале 5 (рис. а), после трансформации по первой главной компоненте (рис. б), после трансформации по второй главной компоненте (рис. в), по отношению каналов МСС 4/5 (рис. г) и по отношению каналов МСС 5/6 (рис. д). Обработка снимков Р. Гайдна, ZGF, Мюнхен. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-2125-06042).

изменено качество изображения снимков «Лэндсат». Левый фрагмент изображает часть снимка МСС (канал 5), а правый – то же изображение после фильтрации.

6.3.2. Структурное картирование по снимкам «Лэндсат». Как правило, интерпретация снимков

«Лэндсат» дает намного больше данных о положении, ориентировке и пространственном развитии крутых разрывных структур, чем геологическая карта того же масштаба (1:1 000 000 или 1:500 000) на область, охваченную снимком. Рис. 168 показывает нанесенные с Геологической карты Ирана масштаба 1:1 000 000 в области северной части глыбы Лут и

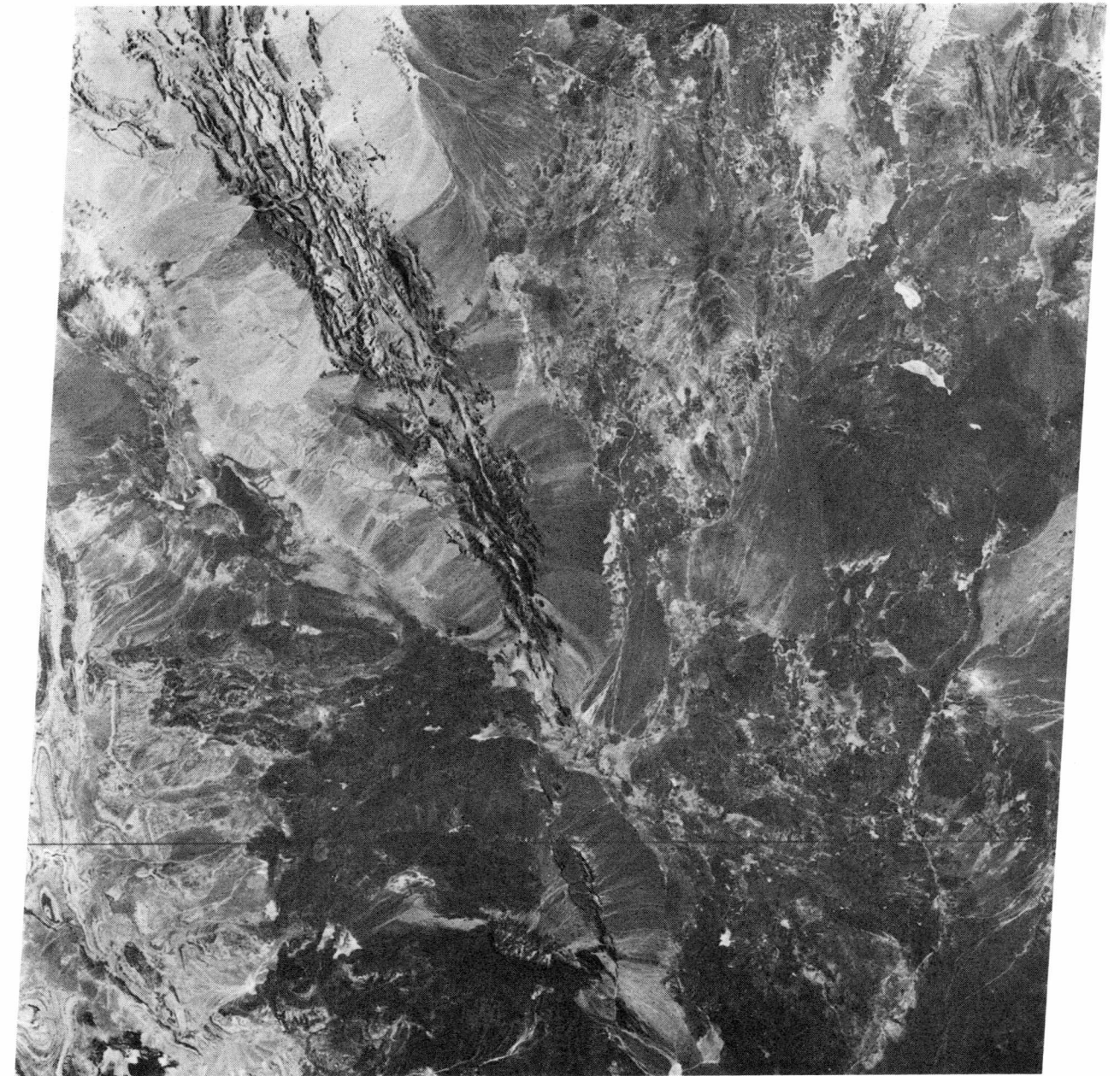


Рис. 165б.

примыкающего с запада блока Табас (северо-восточный Иран) зоны нарушений (наверху) и откартированные в виде фотолинементов на снимках «Лэндсат» той же области разрывные структуры (внизу). Число, позиция и протяжение крупных откартированных зон нарушений на снимках «Лэндсат» в значительной степени совпадают с соответствующими тектоническими данными Геологической карты. Однако сверх того картирование на основе «Лэндсат» выявля-

ет структурные зоны, системы разломов и разрывный план, которые никак не отражены на Геологической карте. Геологическая карта создает впечатление наличия крупных и мелких глыб или блоков, ограниченных крупными краевыми нарушениями. В самих блоках локальные нарушения занимают изолированное положение. Картирование с помощью «Лэндсат», напротив, высвечивает протяженные системы разломов, в том числе появляющиеся в блоках. Оно пока-



Рис. 165в.

зывает положение локальных систем разломов в регионально-тектонических рамках. В этом заключается прирост информации существенно нового типа, что может иметь большое значение при решении различных проблем, например в разведке месторождений, изучении землетрясений, а также в инженерной геологии.

Получение без больших затрат фотосхем «Лэндсат», составленных по смежным снимкам «Лэндсат» и перекрывающих большие площади, открывает новые

возможности для регионально-тектонических исследований. Даже небольшие рабочие группы, в том числе отдельные сотрудники, могут в настоящее время проводить на основе фотосхемы «Лэндсат» регионально-тектоническое картирование и анализ. Рис. 169 изображает фотосхему «Лэндсат», которая в рамках проекта «Геотраверс Ирана» Немецкого исследовательского общества составлена в масштабе 1:1 000 000 и проинтерпретирована с точки зрения линейных и криволинейных фотолинементов [163,



Рис. 165г.

164]. На структурной карте (рис. 170) более толстыми линиями выделены крупные зоны нарушений и системы нарушений, как, например, краевые нарушения блоков Лут и Табас, нарушение Наин-Бафт и разлом Большого Кевира. Позиция и протяжение основных нарушений фиксируют главные границы глыб, как и границы региональных геологических единиц. Большое число откартированных разрывных структур можно разделить на группы с определенными предпочтительными направлениями. Благодаря этому вы-

деляются секущие системы разломов в виде параллельных пучков, которые пересекают различные регионально-геологические единицы Ирана независимо от их возраста, литофациального строения и стиля тектонической структуры. Эти системы, отражающие крупнейшую сеть разломов верхней коры, до интерпретации фотосхемы «Лэндсат» не были известны. Их и нельзя было постичь, поскольку отсутствовала сопоставимая с фотосхемой «Лэндсат» основа (обширная по площади и одновременно синоптичес-

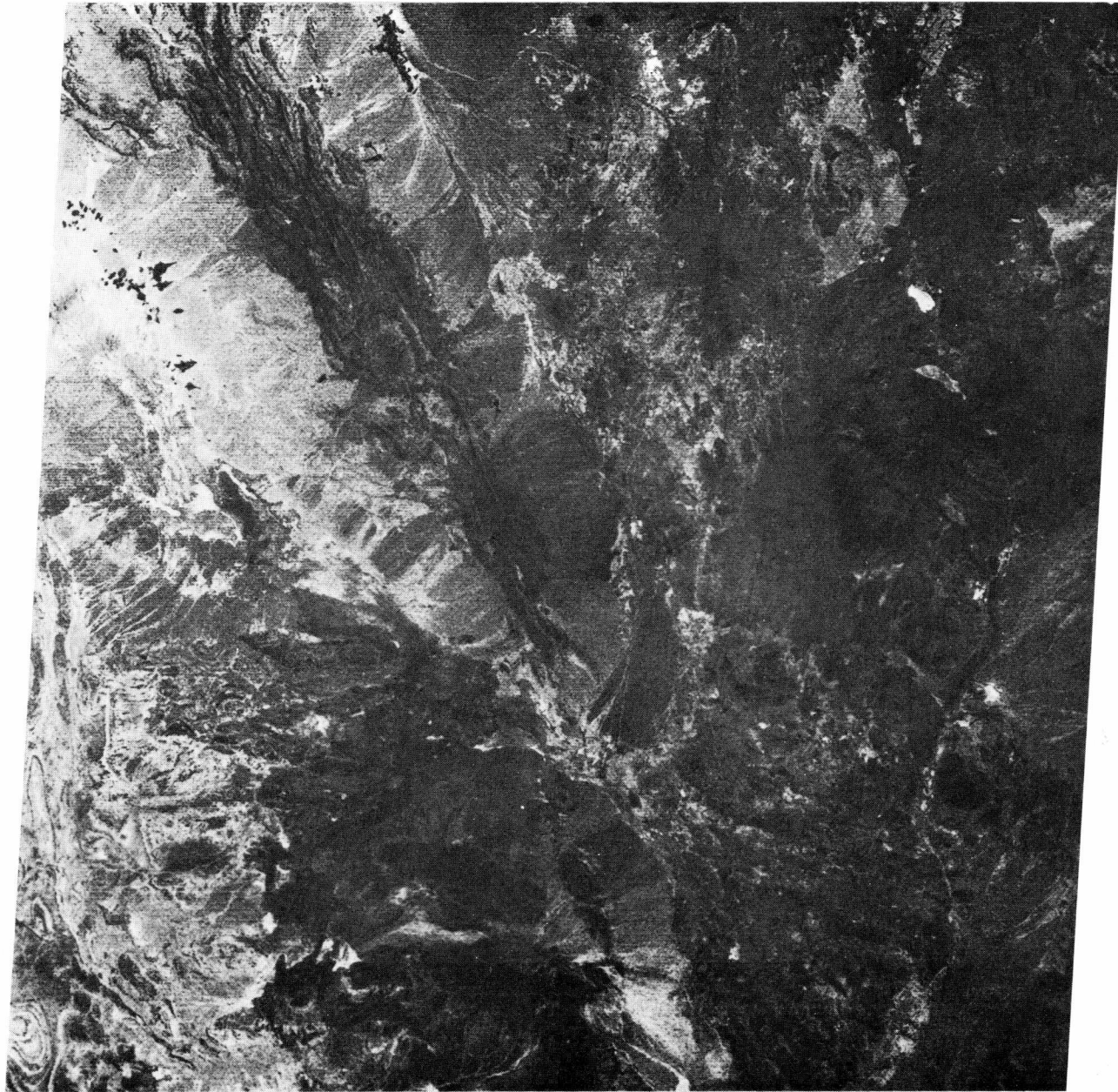
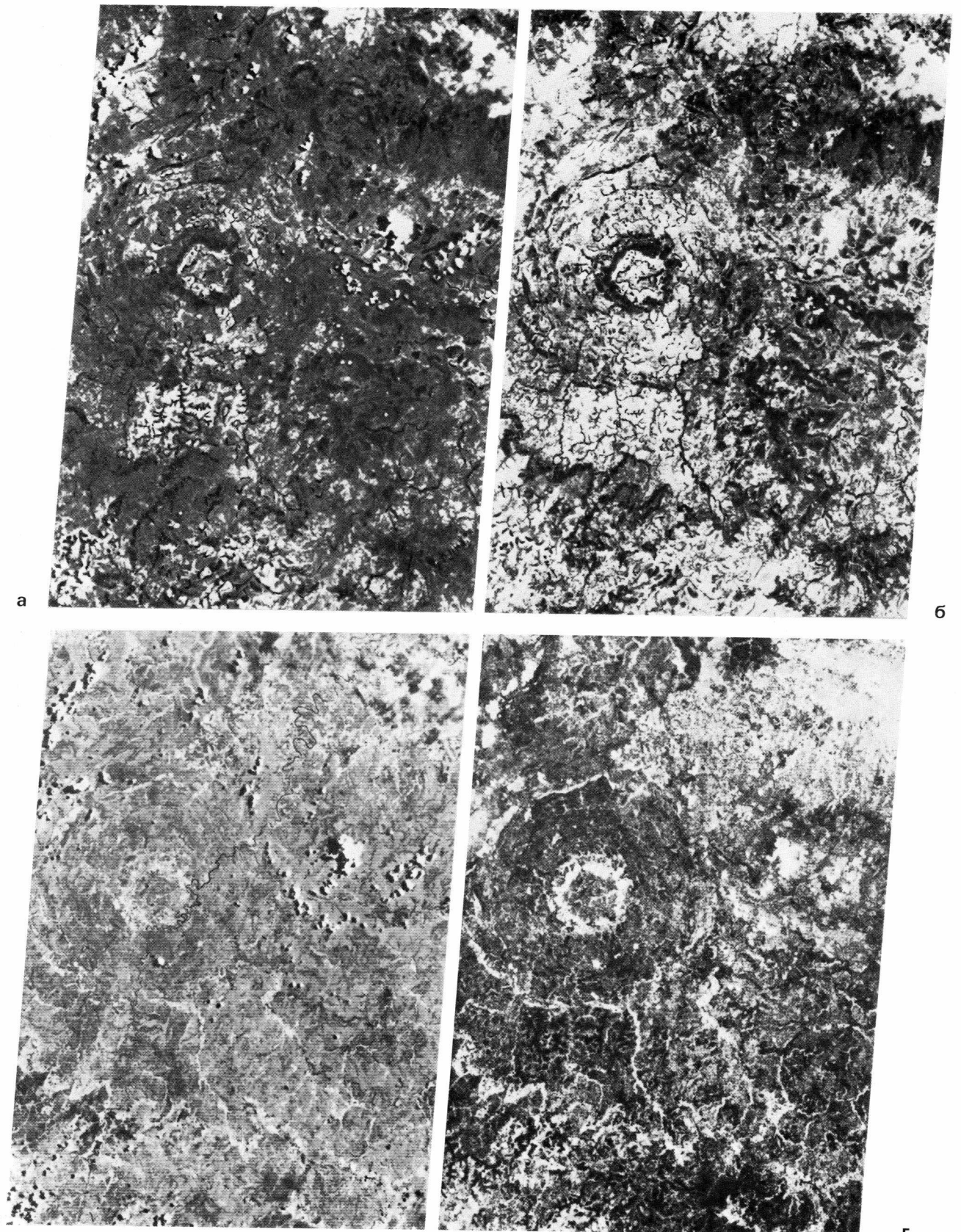


Рис. 165д.

Рис. 166а–166г. Фрагмент снимка «Лэндсат» изображает кольцевую структуру Арагуаина, центральная Бразилия, на улучшенном по контрасту узкозональном изображении канала 5 (рис. а), на изображении, полученном по отношению каналов МСС 5/6 (рис. б), на улучшенном по контрасту узкозональном изображении канала 7 (рис. в) и на изображении по отношению каналов МСС 4/5 (рис. г). Сопоставление четырех изображений показывает, что одни и те же особенности местности или ее объекты по-разному отображаются на снимках и что многие объекты видны лишь на специально обработанных снимках. Обработка снимков Р. Гайдна, ZGF, Мюнхен. Масштаб около 1:500 000 (NASA, E-1391-12374).



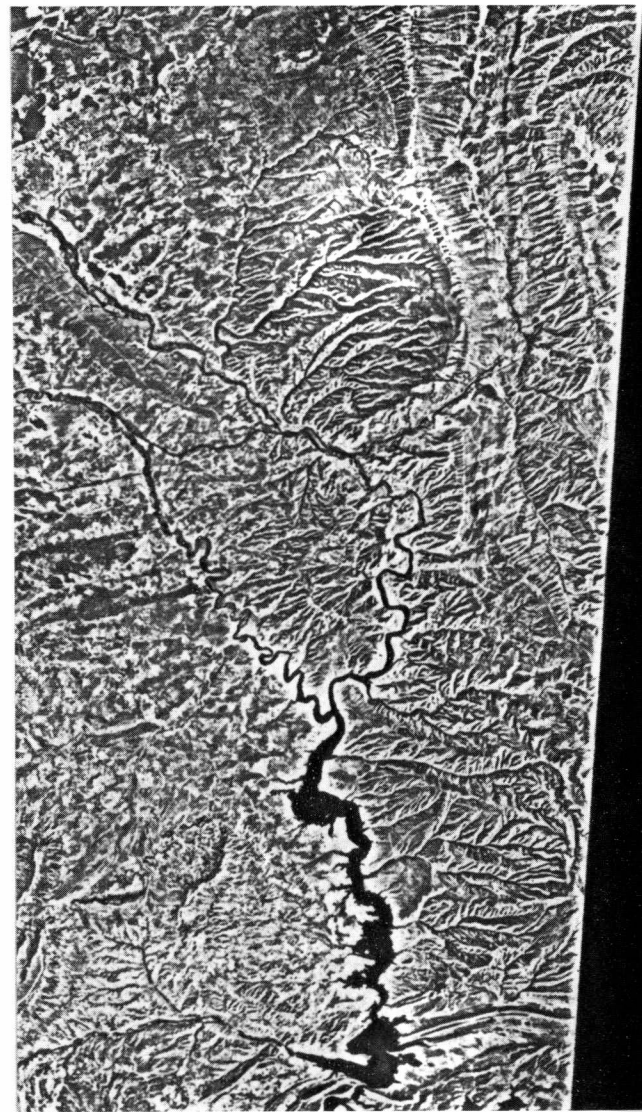


Рис. 167. Фрагмент изображения снимка МСС «Лэндсат» (канал 5): оригинал (слева) и после цифровой обработки (справа) для лучшей дешифрируемости снимка (из проспекта Aero Service/Geoimages).

кая, с высоким пространственным разрешением) для картирования подобных крупных областей. Сравнение интерпретации снимков «Лэндсат» с опубликованными данными и полевыми наблюдениями в совокупности показало, что суперрегиональные системы разломов или образованная ими сеть разломов коры имели влияние на самые различные геологические процессы и события региона. Развитие региональных и локальных тектонических структур, магматизм, вулканизм и образование месторождений, седиментация и сейсмотектоническая активность во многих местах обнаруживают связь с системами разломов, установленными по фотосхеме «Лэндсат» (см. также [109, 163]). Некоторые из предполагаемых связей

схематически показаны на рис. 171. Тонкими линиями здесь изображены откартированные по фотосхеме «Лэндсат» разрывные структуры вдоль главных направлений. Точечными линиями показаны известные на местности нарушения альпийского возраста. Утолщенные линии маркируют зоны нарушений, которые были сейсмически активны в четвертичном периоде. Линиями крупных точек показано положение и протяжение современных сейсмически активных зон нарушений [20]. Наконец, черным цветом представлены местоположение и протяженность более крупных офиолит-радиоляритовых комплексов, которые рассматриваются как признак существования зон палеорифтов. Поскольку происходящие из верхней мантии

магмы офиолитовых комплексов поднялись по глубинным и долгоживущим зонам разломов в коре, пространственное их протяжение (и прежде всего продольное распространение наблюдаемых ныне офиолитовых комплексов) должно быть связано с ориентировкой крупных разрывных структур коры, даже если офиолитовые комплексы позднее были тектонически выжаты и отчасти даже перемещены тектоническим путем.

В то время как здесь рассматриваются предполагаемые соотношения между суперрегиональной сетью разломов коры и пространственным появлением офиолитовых комплексов, связь местоположения, ориентировки главных простирающихся нарушений и большинства четвертичных и современных сейсмических зон нарушений с суперрегиональной сетью разломов можно считать совершенно очевидной [109, 163]. Более того, возможно, должны также приниматься во внимание зональные осложнения и структурные аномалии внутри региональных единиц складчатых сооружений Ирана, связанные с разломами суперрегиональной сети. Так, тектоническая интерпретация фотосхемы «Лэндсат» показывает, что в региональных складчатых поясах среднего и восточного Ирана складчатые структуры снова отклоняются от общей ориентировки оси В, что в единицах складчатых сооружений к зонам определенных направлений приурочиваются аномалии складчатости, частные складки и нарушения, которые не вписываются в обычную картину региональной складчатости (рис. 172). Локальный пример такого явления дает рис. 173. В пределах единицы складчатого сооружения к северу от Кермана прослеживаются две одинаково ориентированные зоны с тектоническими осложнениями (изгибание складчатых структур, мелкая складчатость, нарушения). В средней части снимка по линейным элементам местности и смещениям в складчатой структуре распознается система нарушений, которая протягивается параллельно аномальным тектоническим зонам. Она срезается у левого края снимка современным нарушением. Аномальные зоны относятся к доминирующим направлениям суперрегиональных разрывных структур, простирающихся по азимуту 290°. Последние представляют собой один из главных трендов в суперрегиональной сети разломов коры в Иране.

Следует принять, что показанное на рис. 172 изгибание региональных складчатых поясов и повторные изгибы частных отрезков складчатого сооружения в направлении, хотя и отклоняющемся от генерального простирающихся осей В, но ясно вырисовывающемся и повторяющемся в аномальных зонах, обусловлено системами разломов всей суперрегиональной сети разломов, которые предопределены ослабленными зонами и поверхностями перемещений коры, существовавшими уже перед началом тогдашней региональной складчатости. В зависимости от ориенти-

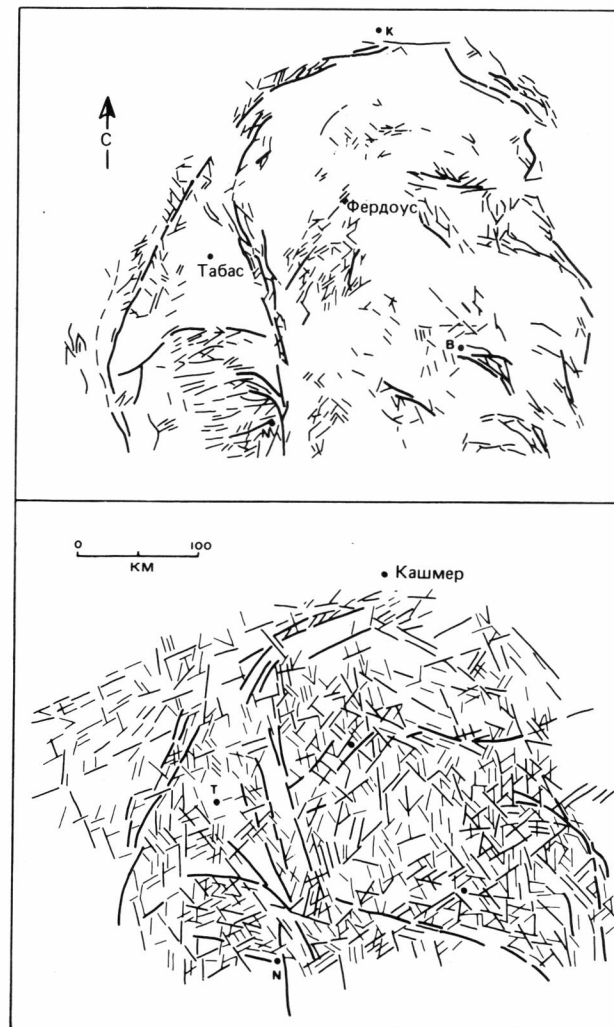


Рис. 168. Имеющиеся на Геологической карте Ирана (1:1 000 000) нарушения и зоны нарушений в районе блока Табас и северной части блока Лут, северо-восточный Иран (верхний рисунок), и картирующиеся на снимках «Лэндсат» того же района крутые разрывные структуры (нарушения, зоны нарушений, зоны трещиноватости) в масштабе 1:1 000 000 (по [163]).

ровки относительно последующего регионального или локального плана деформаций они были использованы или активизированы различным образом (с различной механической функцией). Такие соотношения были выявлены полевыми наблюдениями Хейнриха [109] в северо-восточном Иране. Аналогичные наблюдения были сделаны в ФРГ Хейнрихом [108], Мором, Гюнтером и Кронбергом [208] и Гюнтером [96].

Многочисленные примеры картирования суперрегиональных разрывных структур и суперрегиональных сетей разломов коры по снимкам «Лэндсат» самых разных стран и их роли для региональных и

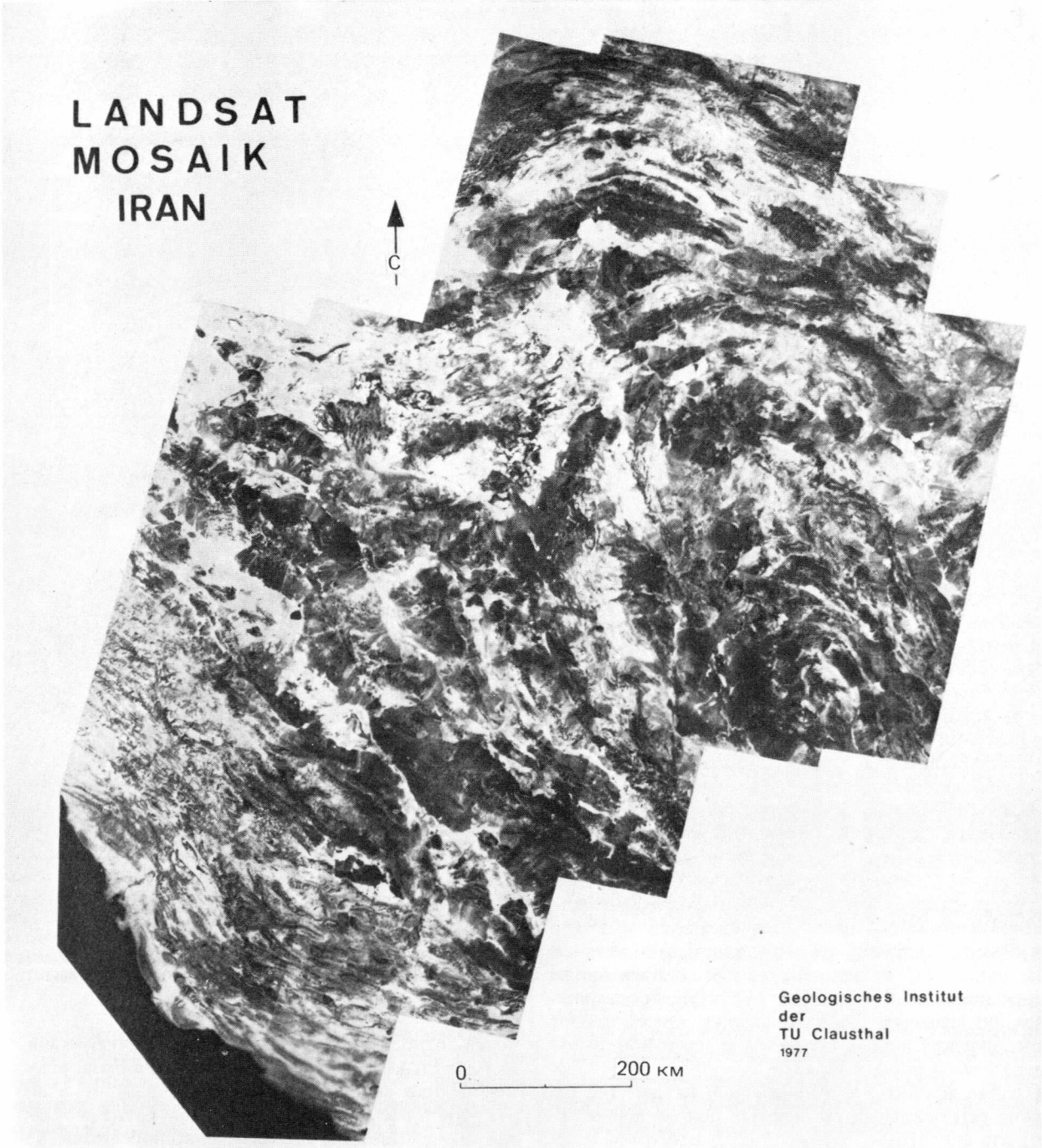


Рис. 169. Фотосхема «Лэндсат» района геотраверса через Иран и его обрамления (составили Гюнтер и Розе, Геологический институт Технического университета, Клаусталь). Слева внизу – горы Загрос, справа в середине – северная часть блока Лут.



Рис. 170. Карта разрывных нарушений, зон нарушений и систем нарушений, откартированных по фотосхеме «Лэндсат» рис. 169. Карта составлена в масштабе 1:2 000 000 (по [163]).

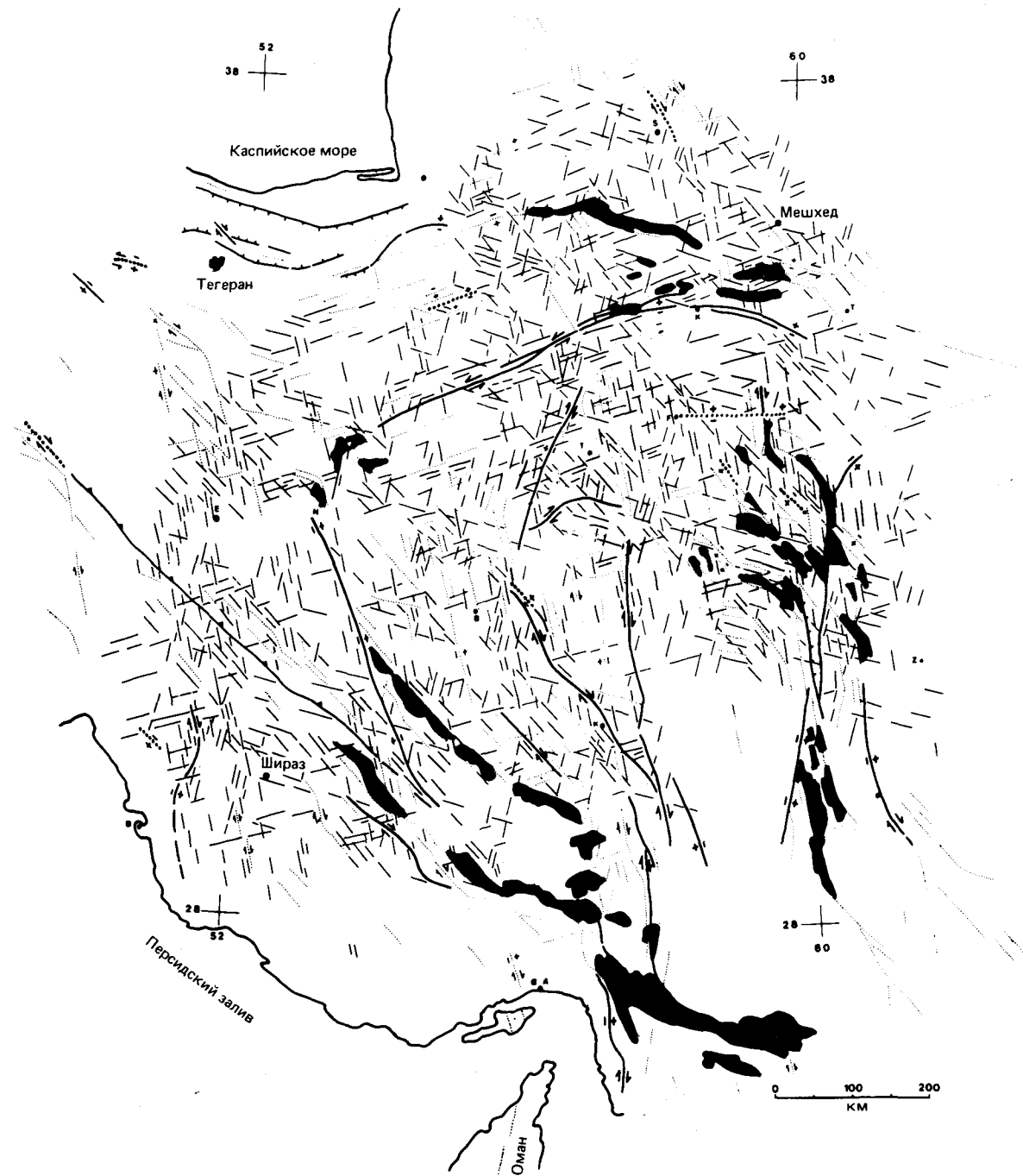


Рис. 171. Предполагаемые связи между откартированным по фотосхеме «Лэндсат» планом разрывов (тонкие прямые линии) и известными по полевым наблюдениям нарушениям альпийского возраста (линии мелкими точками), сейсмически активными в четвертичном периоде зонами нарушений (более жирные линии) и современными сейсмически активными нарушениями (линии крупными точками). Распространение наиболее крупных офиолитовых комплексов показано черным цветом (по [163]).

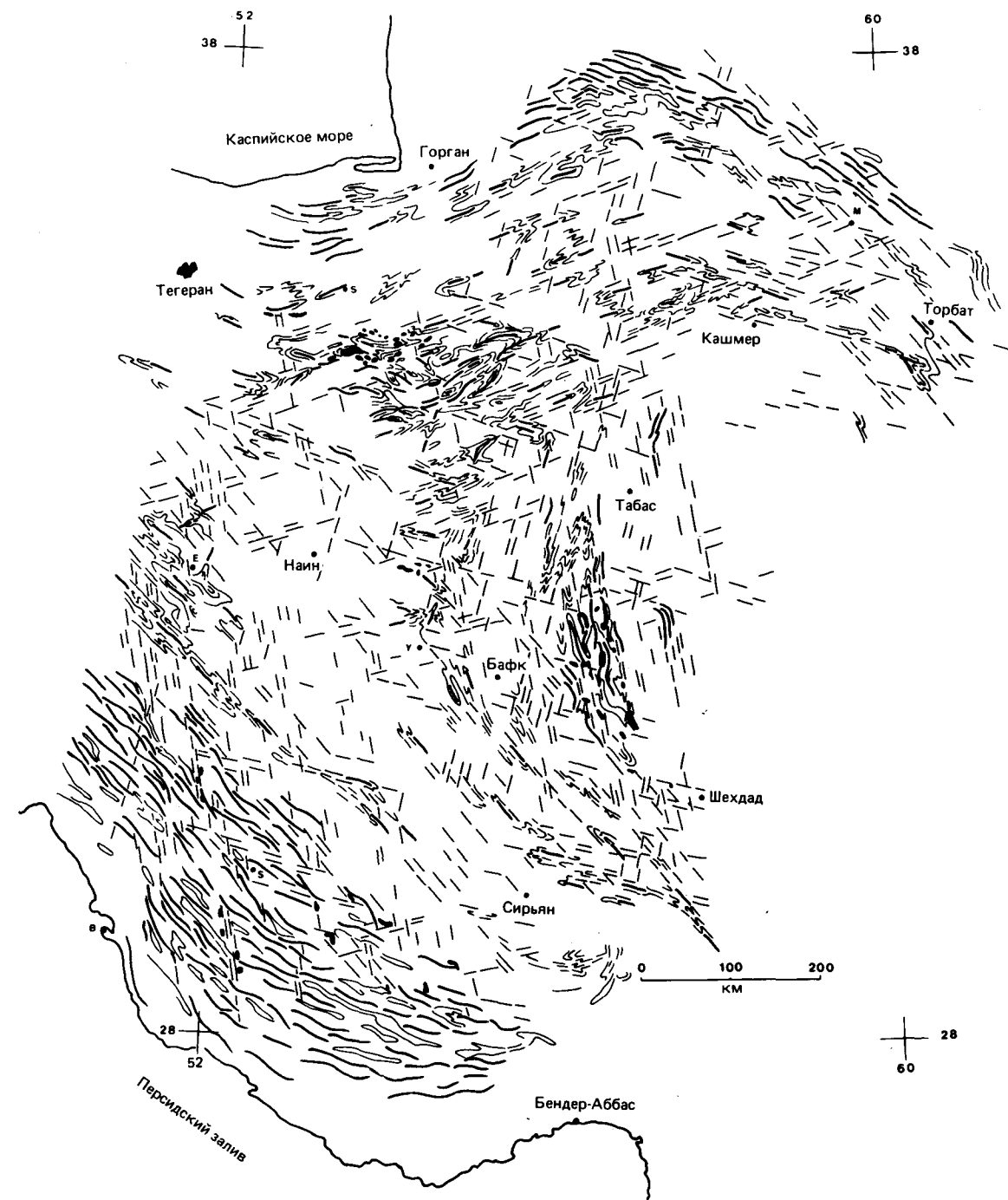


Рис. 172. Возможные связи между суперрегиональными важнейшими направлениями плана разрывов коры, отраженного на фотосхеме «Лэндсат», и ориентировкой региональных и локальных складчатых поясов и осей складок. Важны изменения ориентировки осей складок в определенных зонах. Черные пятна – расположение соляных структур (по [163]).



Рис. 173. Аномальные (расположенные под углом к общему простиранию осей складок) структурные зоны в складчатом сооружении севернее Кермана, Иран. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1093-06164).

локальных геологических процессов и развития содержатся в 1-м и 2-м томах публикаций Международных конференций по тектонике основания (Salt Lake City, 1974; Newark, 1976).

Во многих районах Земли синоптическое перекрытие весьма крупных площадей целых стран и континентов снимками «Лэндсат» впервые дало возможность связанного картирования региональных единиц складчатых сооружений. Рис. 174 показывает отрезок складчатой зоны юго-восточного Загроса с хорошо выраженными антиклинальными и синклиналичными структурами преимущественно в третичных осадочных сериях. В ядрах антиклиналей местами вскрыты меловые и юрские осадочные пакки. В середине восточной части снимка темным серым тоном из окружающей складчатой структуры выделяется несколько соляных штоков кембрия (по Геологической карте Ирана масштаба 1:1 000 000). Рис. 174 и

последующие рисунки показывают несколько схем с примерами вариаций структурного стиля единиц разных складчатых сооружений. Добавляемые структурные карты призваны проиллюстрировать, какую информацию можно получить путем тектонического картирования снимков «Лэндсат».

Рис. 175а (канал 6) показывает складчатые структуры частного района гор Макдоннелл в Центральной Австралии. Здесь в варисийскую эпоху смяты в складки отложения ордовика, девона и карбона. В складчатой структуре бросаются в глаза широкие мульды и узкие антиклинали. Удастся закартировать простирания слоев, изгибы простираний, погружения осей, воздымания шарниров и зоны погружения шарниров складок (рис. 175б). Наблюдаемая в верхней части снимка в широкой долине кольцевая структура трактуется как импактная структура (астрооблема Госсис-Блаф). В центральной части кольцевой струк-



Рис. 174. Антиклинальные и синклиналичные структуры в юго-восточной части складчатой зоны Загроса, Иран. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1438-06330).

туры виден кольцевой вал из вздернутых песчаников (по [282]).

Рис. 176а должен проиллюстрировать, какую региональную и какую локальную информацию можно получить со снимков «Лэндсат» хорошо обнаженных областей, как могут быть выделены и разграничены региональные единицы на изображении «Лэндсат», какое положение в рамках региона могут иметь локальные геологические единицы (литофации, тектонические структуры). Рис. 176а показывает отрезок юго-западной части хребта Антиатлас, Марокко. В левой нижней половине снимка, в районе побережья, и у верхнего края снимка можно видеть несколько куполообразных воздыманий значительного протя-

жения, с пологим до средней крутизны падением слоев (полосчатые темные и светлые слоистые толщи). В ядрах сводообразных поднятий выступают кристаллические породы докембрия, не расчлененные детальнее. Вокруг древних ядер слой за слоем залегают более молодые, предположительно метаморфические серии (докембрийские?). Они хорошо отделяются друг от друга градациями серого фототона, особенностями рельефа и прослеживаются по опорным горизонтам (волнистая штриховка на рис. 176а). Совсем иной структурный стиль обнаруживает палеозойский осадочный чехол. В средней части снимка он смят в широкие, а далее к юго-востоку во все более узкие антиклинали и синклинали, погружение шарни-



Рис. 175а. Складчатые структуры одного из районов гор Макдоннелл, Центральная Австралия. Видимая сверху средней части снимка округлая структура трактуется как импактная. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1373-00364).

ров которых обуславливает зигзагообразный рисунок куэст, сложенных темнее окрашенными песчаниками. Переслаивающиеся глинистые слоистые пачки в значительной степени уничтожены размывом. Далее к югу, непосредственно перед сквозной куэстой, образованной слоями, падающими к юго-востоку под средними углами, появляются кулисообразные складки. Простирающаяся на восток куэста у нижнего края снимка маркирует северный край примыкающего с юга бассейна Тиндуф.

Различные регионально-геологические единицы можно увидеть также на следующем рисунке (рис. 177), изображающем район с относительно густой растительностью, глубже проникшим выветриванием и более интенсивным землепользованием. Отпрепарированные эрозией гребни песчаников обрисовывают интенсивную складчатую структуру Аппалачских гор с ее крупными, выдержанными по простиранию макроантиклиналями и макросинклиналями, усложненными мелкими складками на отдельных участках в шт. Пенсильвания (рис. 177а). Расположенные между гребнями слоев узкие или более широкие пространства долин обозначают зоны выходов слоистых пачек и отчасти известняков, менее устойчивых к процессам выветривания. Различная ширина выходов опорных горизонтов отражает разницу в углах падения слоев, в целом вергентных к северо-западу

складчатых структур. Многочисленные нарушения рассекают главные и дополнительные складчатые структуры (рис. 177б). Местами видны надвиги, протягивающиеся параллельно общему простиранию. Непосредственно ниже центра снимка по линейным врезам долин и определенной приуроченности аномалий серого тона как будто намечается линейная структура глубинного фундамента. В антиклинории Блу-Ридж (темнее окрашенная горная гряда в юго-восточной части снимка) в конфигурации линейной структуры наблюдается явное левостороннее нарушение, которое с видимым смещением рассекает докембрийские комплексы (кристаллические породы, метаморфиты). В самих же Аппалачах не установлено крупных нарушений, которые можно было бы причислить к упомянутой структурной зоне. Однако в складчатом строении отмечаются некоторые особенности (зоны погружения шарниров складок). Нагорье в левой части снимка образовано слабо смятыми в складки осадочными сериями Аллеганского плато, которое по крутому уступу граничит с примыкающей с востока Провинцией долин и хребтов. В более ровных районах местности на юго-востоке снимка сквозь мелкую сетку используемых в сельском хозяйстве участков проступают складчатые структуры и несколько крупных нарушений.

Иной стиль строения, чем Аппалачи, обнаружива-

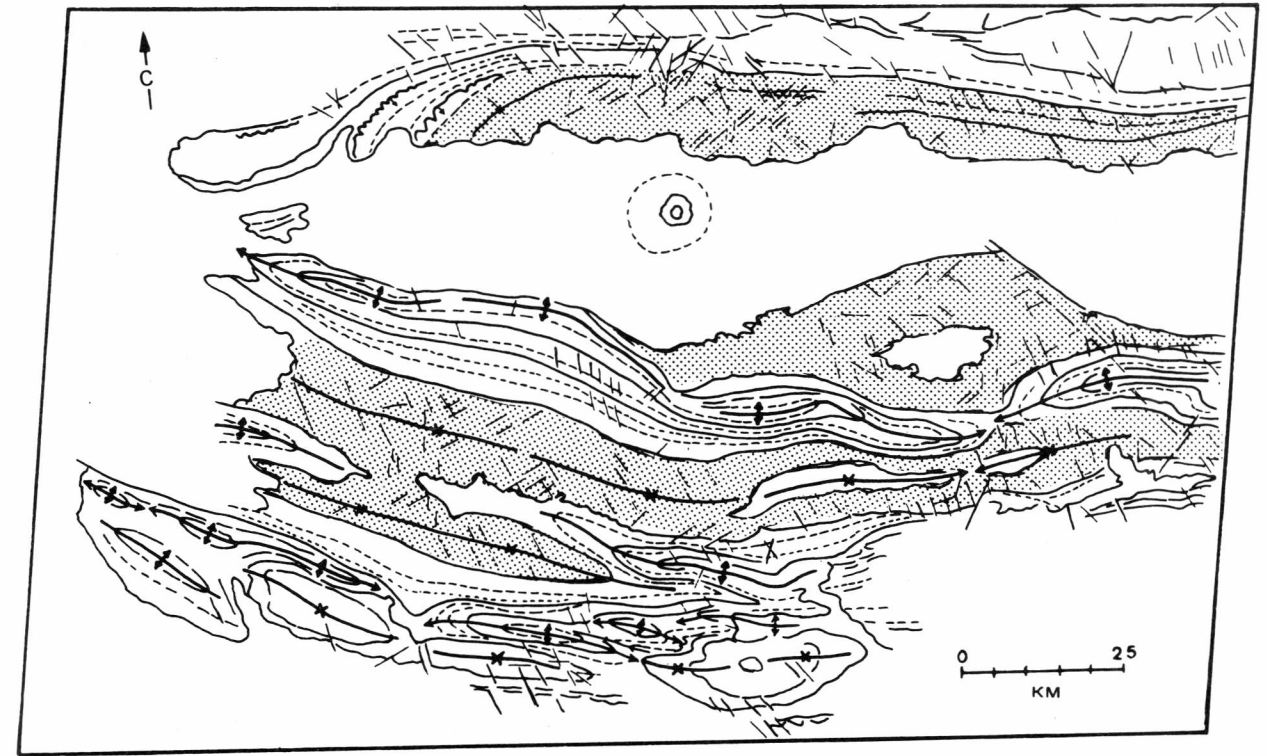


Рис. 175б. Структурная карта района, изображенного на рис. 175а.

ют горы Уошито в Оклахоме. На фрагменте рис. 178 в средней и восточной части снимка преобладают протяженные синклинальные структуры. При этом и здесь протяжение гребней песчаников маркирует как частные структуры, так и общее строение. При более близком рассмотрении оказывается, что некоторые из синклиналей и складчатых комплексов срезаются нарушениями (крутые и пологие надвиги), протягивающимися в соответствии с общим простиранием. Такие нарушения наблюдаются, например, ниже структурно-денудационных уступов некоторых песчаниковых куэст. К северу проявляется более спокойное складчатое строение. Конфигурация тени при низком стоянии солнца подчеркивает структуры и зоны выходов различных комплексов пород (съемка в конце ноября). К югу палеозойские комплексы складчатых сооружений погружаются под несогласно налегающие меловые осадки. Переходная область между обоими комплексами заметна благодаря различиям в рельефе и различиям серого тона, которые в свою очередь обусловлены различиями растительности или землепользования. Области складчатых сооружений на севере густо залесены. Область, сложенная полого залегающими отложениями, интенсивно используется в сельском хозяйстве. Соответственно она отображается мелкой сеткой серого тона. Протягивающаяся через нижнюю часть снимка темнее окрашенная полоса отмечает

лесистый структурно-денудационный уступ.

Зимний снимок на рис. 179а (канал 7, 6 февраля 1973 г.) показывает отрезок альпийской горной цепи на границе Восточных и Южных Альп с Динаридами, а рис. 179б – схему общей тектонической ситуации площади снимка (по Тектонической карте Европы масштаба 1:1 500 000). Протягивающиеся выше середины снимка в общем запад-северо-западном направлении крупные криволинейные зоны нарушений расположены на восточном продолжении линии Пустерталь–Гайльталь. Они являются частными зонами так называемой Альподинарской линии [99]. Расположенные севернее этих зон нарушений горные районы Гурктальских Альп, южных Зауальпе, Коральпе и гор Бахер принадлежат к Восточно-Альпийскому комплексу. Они сложены палеозойскими образованиями (зона граувакк) и древними кристаллическими породами (кристаллический фундамент). Комплекс восточно-альпийских единиц тектонически раздроблен, перемещен на различные расстояния, но еще относительно автохтонен (по [99]). Более пологие, мелко расчлененные эрозией районы в правой верхней части снимка (к северу, востоку и югу от Марибора – на рисунке М.) относятся уже к третичному бассейну Граца. Клагенфуртский бассейн, а также заполненная третичными образованиями зона нарушений долины Лаванта скрыты за пеленой тумана.

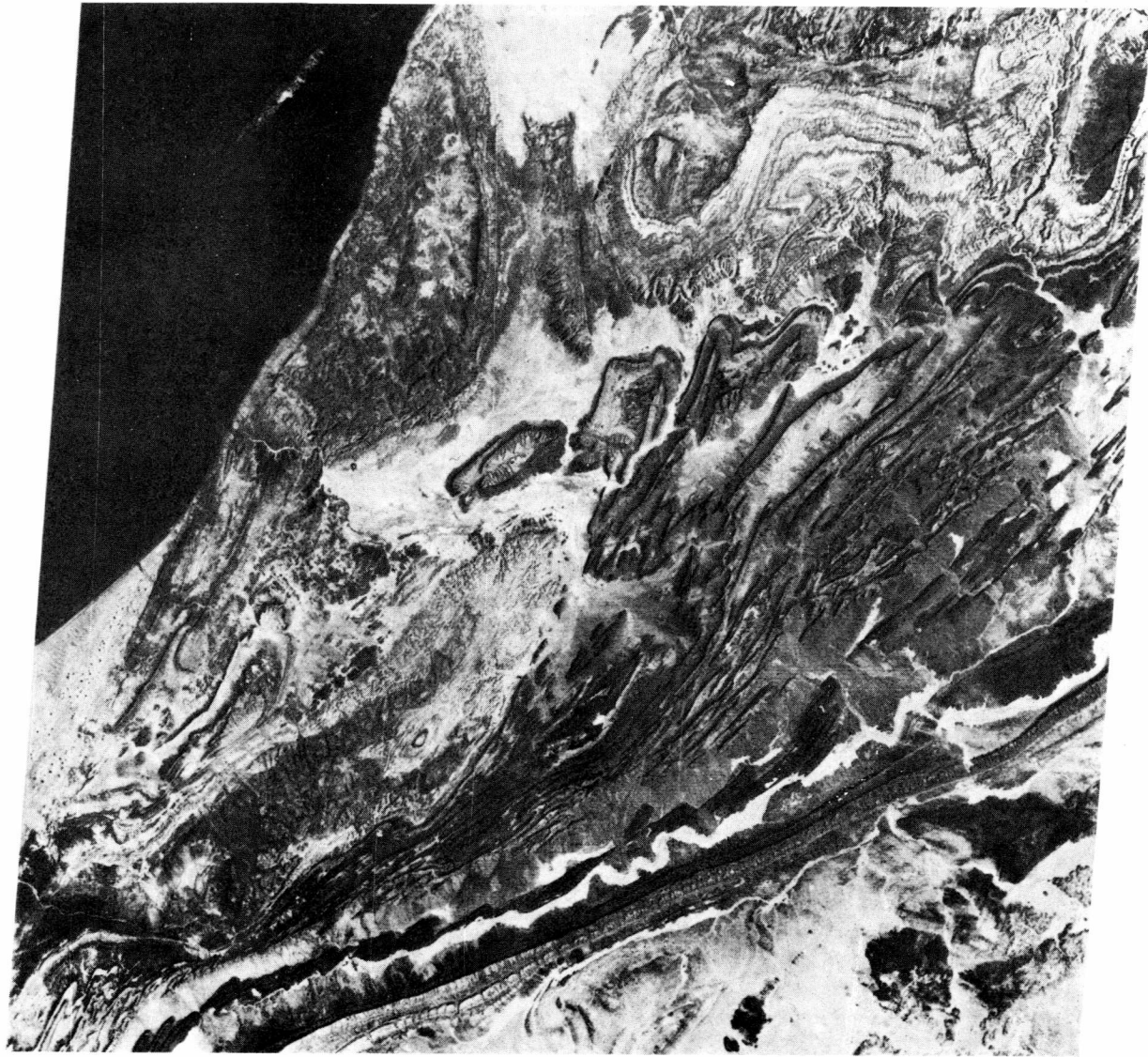


Рис. 176а. Протяженные своды и сжатая, сложная складчатая структура в юго-западной части Антиатласа, Марокко. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1247-10420).

Южнее Клагенфуртского бассейна наблюдается широтная горная гряда Караванке. Здесь южная вергентность и пологие надвиги характеризуют тектоническое строение частично палеозойских, но в основном мезозойских осадочных толщ. К Южно-Альпийскому комплексу относятся слоистые осадочные толщи к западу и востоку от Любляны (на рисунке L.). Местность на нижней половине снимка относится уже к внешним зонам Динарид, для которых отчетливо устанавливается северо-западный тренд. Юго-западная вергентность, крутые и пологие надвиги характеризуют стиль строения появляющихся здесь юрских, меловых и третичных слоистых толщ (см.

также Геологическую карту Европы масштаба 1:1 500 000).

Картирование литофациальных единиц на снимке «Лэндсат» (рис. 179а) без знания местности или дополнительных полевых маршрутов – не простое дело, несмотря на то что полого падающие лучи зимнего солнца подчеркивают различия рельефа и границы многих петрографических комплексов. Из-за эффекта взаимодействия света и тени и из-за снежного покрова отсутствуют дифференцированные ступени серого тона, которые на весенних и летних снимках этой области, несомненно, могли бы дать многочисленные доказательства разделения и разграничения различ-



Рис. 176б. Структурная карта территории, показанной на рис. 176а.

ных комплексов пород. Все же сравнение с Геологической картой района (рис. 180) делает более отчетливыми некоторые крупные литофациальные (либо литостратиграфические) комплексы. Сопоставление показывает также, что данные этой карты не везде точны. Интерпретация многократных мультиспектральных данных по области дала бы для некоторых частных районов дополнительные данные для более надежного проведения границ, для лучшего отображения соотношений на местности, чем на Геологической карте масштаба 1:1 500 000.

Напротив, для структурно-геологического картирования вполне подходит зимний снимок, поскольку

полого падающие солнечные лучи подчеркнуто ясно отображают морфологические крупные и мелкие формы, но прежде всего дренажную сеть и эрозионное расчленение. Если сравнить тектонические данные Геологической карты масштаба 1:1 500 000 (рис. 180) с результатами тектонического картирования снимка «Лэндсат» (рис. 179а), то становятся отчетливо видны региональные системы нарушений и разломов, не выраженные на Геологической карте и иных до сих пор опубликованных картах региона. Это, например, разрывные структуры, проявляющиеся на всей площади снимка и рассекающие все региональные единицы, простирающиеся по азимуту 100°. Возраст и

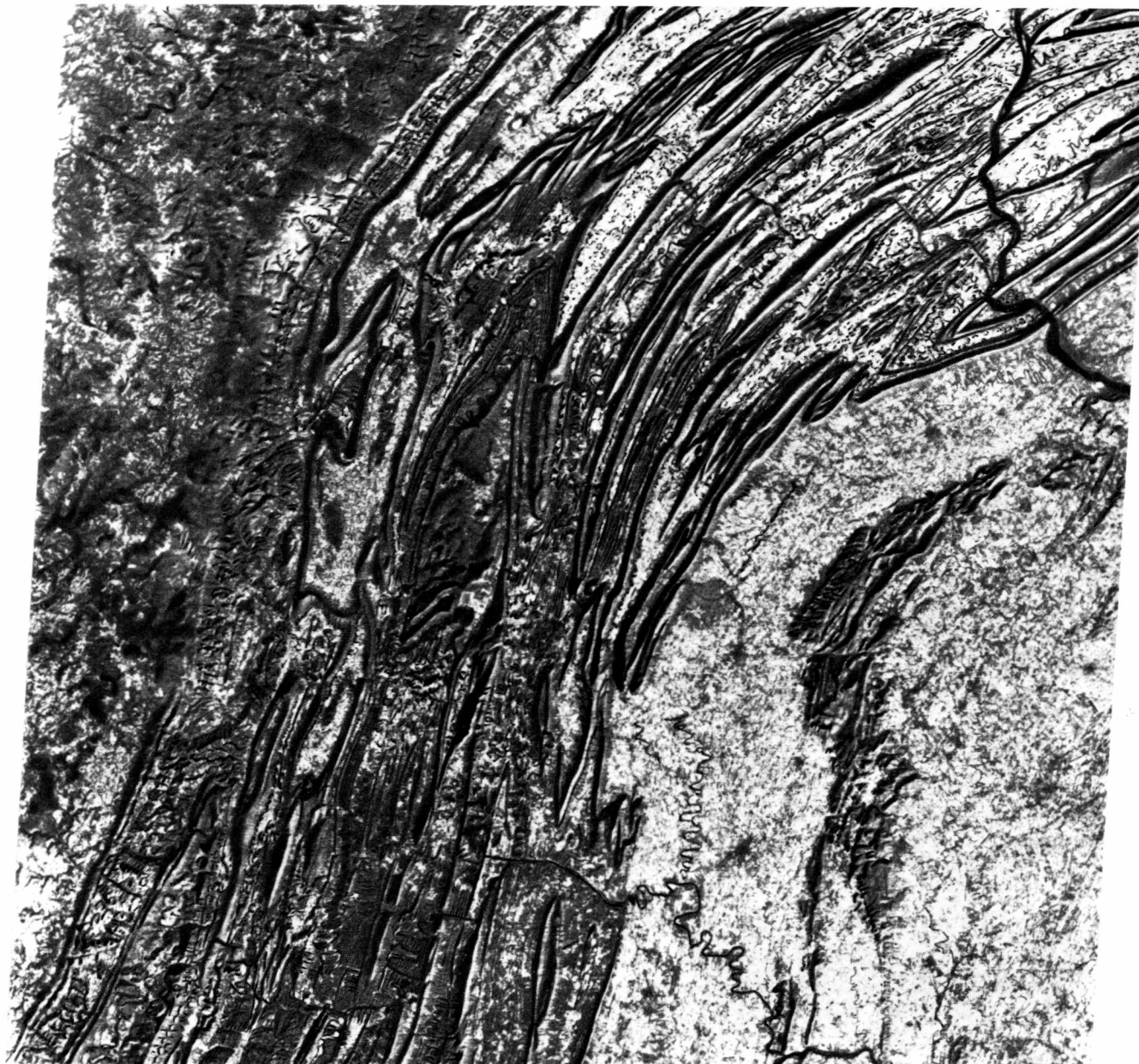


Рис. 177а. Антиклинали и синклинали, воздымания и погружения шарниров складок, нарушения и линеamentная зона на снимке «Лэндсат» в средней части Аппалачей, Провинция долин и хребтов, Пенсильвания. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1495-15222).

причина возникновения этой системы до сих пор неизвестны. Более того, снимок «Лэндсат» предоставляет новые данные и новую точку зрения на тектонику нарушений и разломов отдельных районов, на отношения между локальной тектоникой и региональным структурным планом. Этот пример может служить подтверждением того, что даже в геологически интенсивно изученных и часто описываемых в

литературе регионах благодаря интерпретации снимков «Лэндсат» возможно получение новой тектонической информации и структурных данных по протяженным площадям, которые могут иметь значение в аспекте плитной тектоники, а также и для поисков месторождений полезных ископаемых.

Геологическая интерпретация снимков «Лэндсат» и фотосхем «Лэндсат» оказалась полезной как раз в

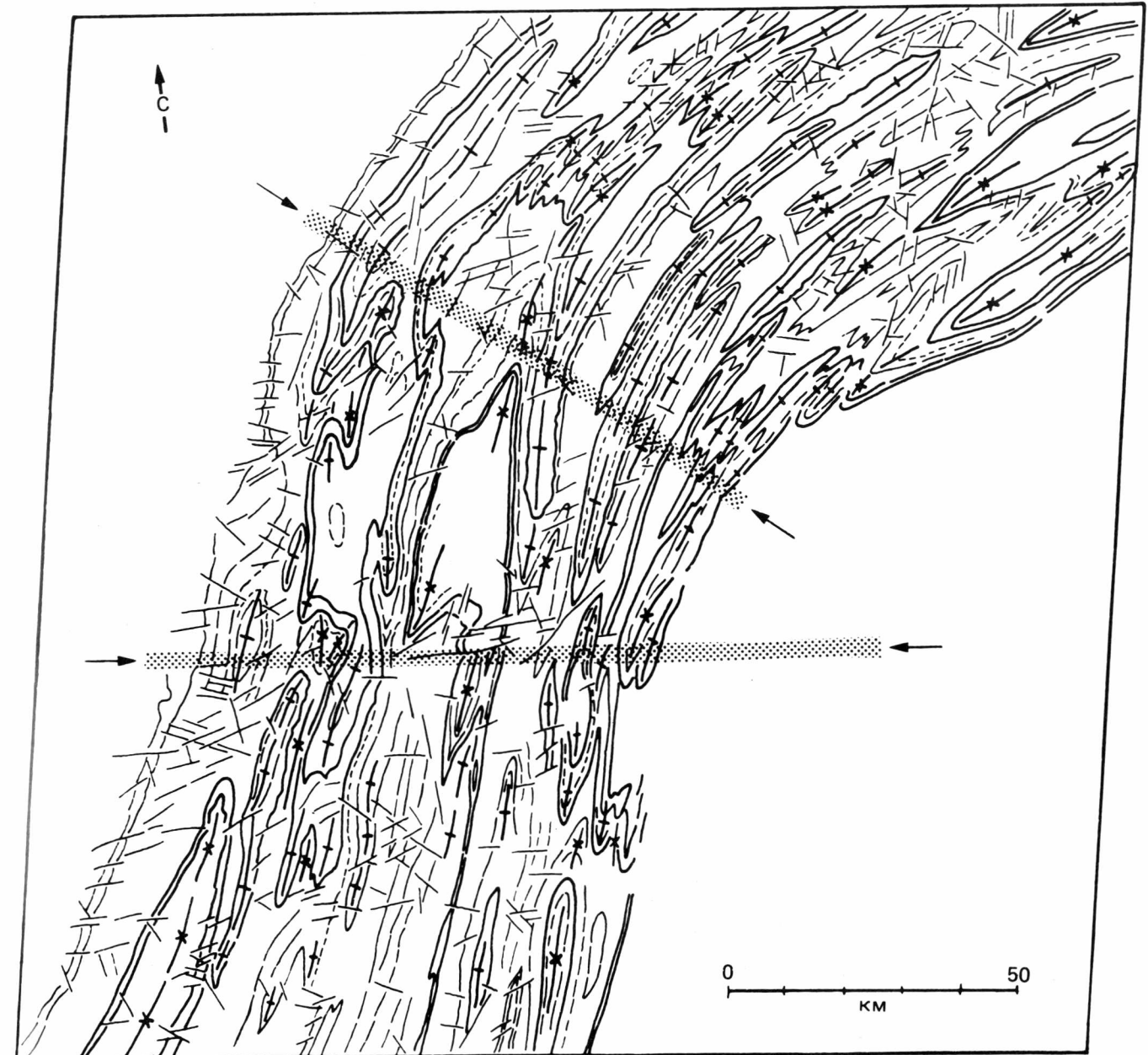


Рис. 177б. Структурная карта района, показанного на рис. 177а. В полосе между стрелками проявляются признаки наличия линеamentной зоны.

проектах исследований, ставящих вопросы в духе плитной тектоники. В них, как правило, дело касается крупноплощадной инвентаризации и сравнительной интерпретации пространственного развития определенных литофациальных комплексов и тектонических структур, корреляции геологических явлений от регионального до суперрегионального и локального масштабов.

Впадина Афар, расположенная в основном в Эфиопии (рис. 181), с плитно-тектонической точки зрения является одной из интереснейших областей Земли. Здесь сочленяются рифтовые структуры Красного моря, Аденского залива и Восточно-Африканской зоны грабенов в виде так называемого тройного сочленения. В то время как процессы растяжения коры и спрединга океанического дна вдоль Красного

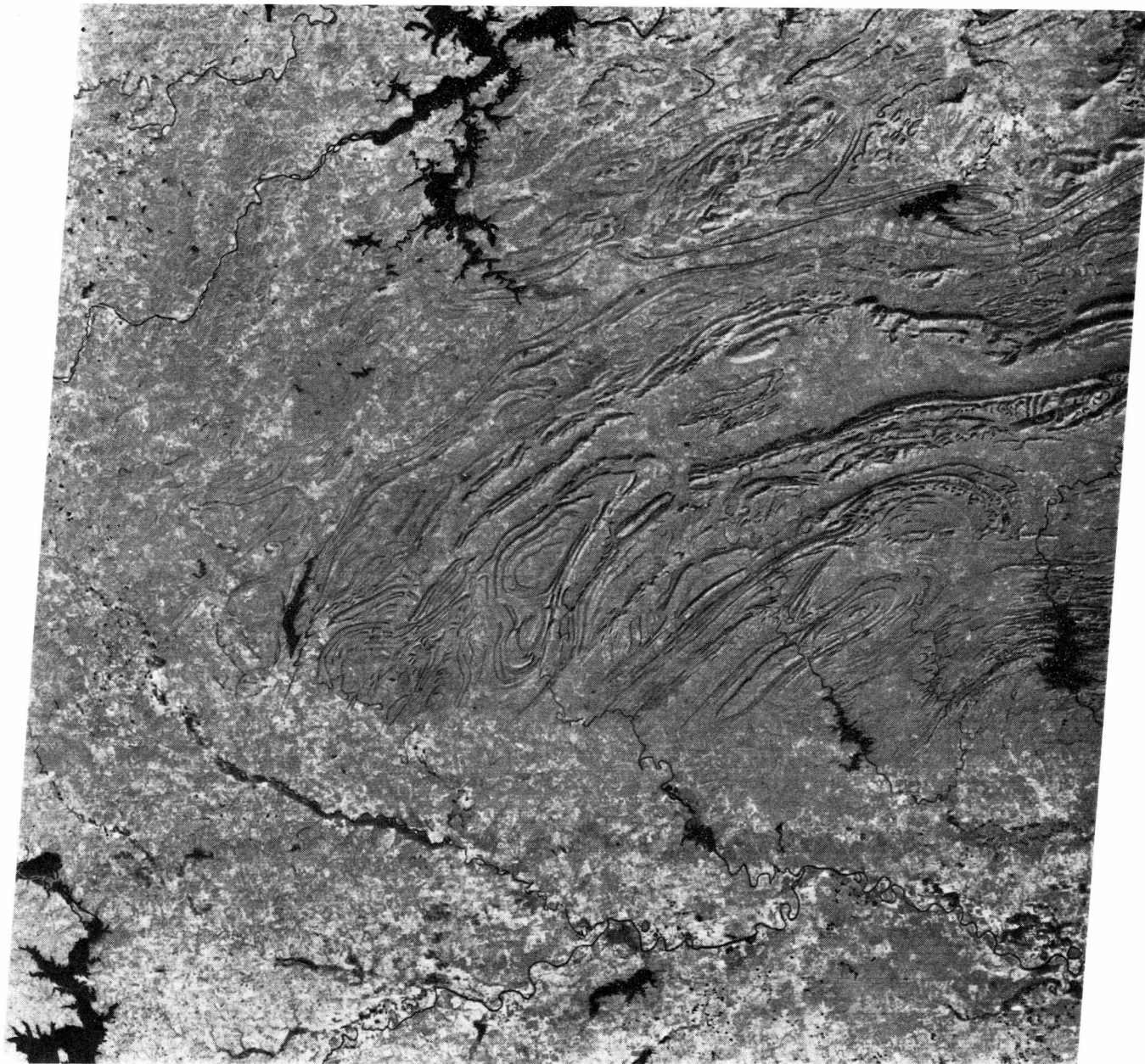


Рис. 178. Тектоническое строение гор Уошито, шт. Оклахома, на снимке «Лэндсат». К югу складчатый палеозойский комплекс пород погружается под несогласно налегающие меловые осадки. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1128-16300).

моря и Аденского залива привели к разрыву континентальной коры, отплыванию друг от друга Аравийской и Африканской плит и к образованию океанической коры в центральной зоне этих рифтовых систем, развитие в области Афар характеризуется по меньшей мере растяжением и утонением коры. В результате этого кора оказалась раздробленной на множество глыб и блоков, которые двигались и

перемещались относительно друг друга по многочисленным нарушениям. Тектонику Афара характеризуют сбросы, ступенчатые сбросы, равно как и структуры горстов и грабенов самых различных размеров. В результате растяжения коры в третичное и особенно в четвертичное время по глубинным нарушениям внедрились крупные массы базальтовых магм, которые слагают обширные районы Афара в виде



Рис. 179а. Снимок «Лэндсат» пограничной области Восточных и Южных Альп и Динарид. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1198-09221).

лавовых покровов мощностью в несколько тысяч метров с прослоями туфов и игнимбритов. Поскольку процессы растяжения коры имели место и после образования лавовых покровов и действуют доныне, базальтовые покровы разбиты по системам разломов различных направлений на мозаику из множества отдельных глыб. Мощные базальтовые покровы Афара пронизаны мелкими и крупными центрами излия-

ния риолитовых магм (лавовые купола и потоки, игнимбриты, туфы). В так называемой вулканической центральной зоне впадины Данакиль (северная часть Афара) на поверхности залегают крупные комплексы излившихся в субаквальных условиях в четвертичный период базальтовых потоков, которые со своей стороны во многих местах прорваны или перекрыты более молодыми базальтами и средни-

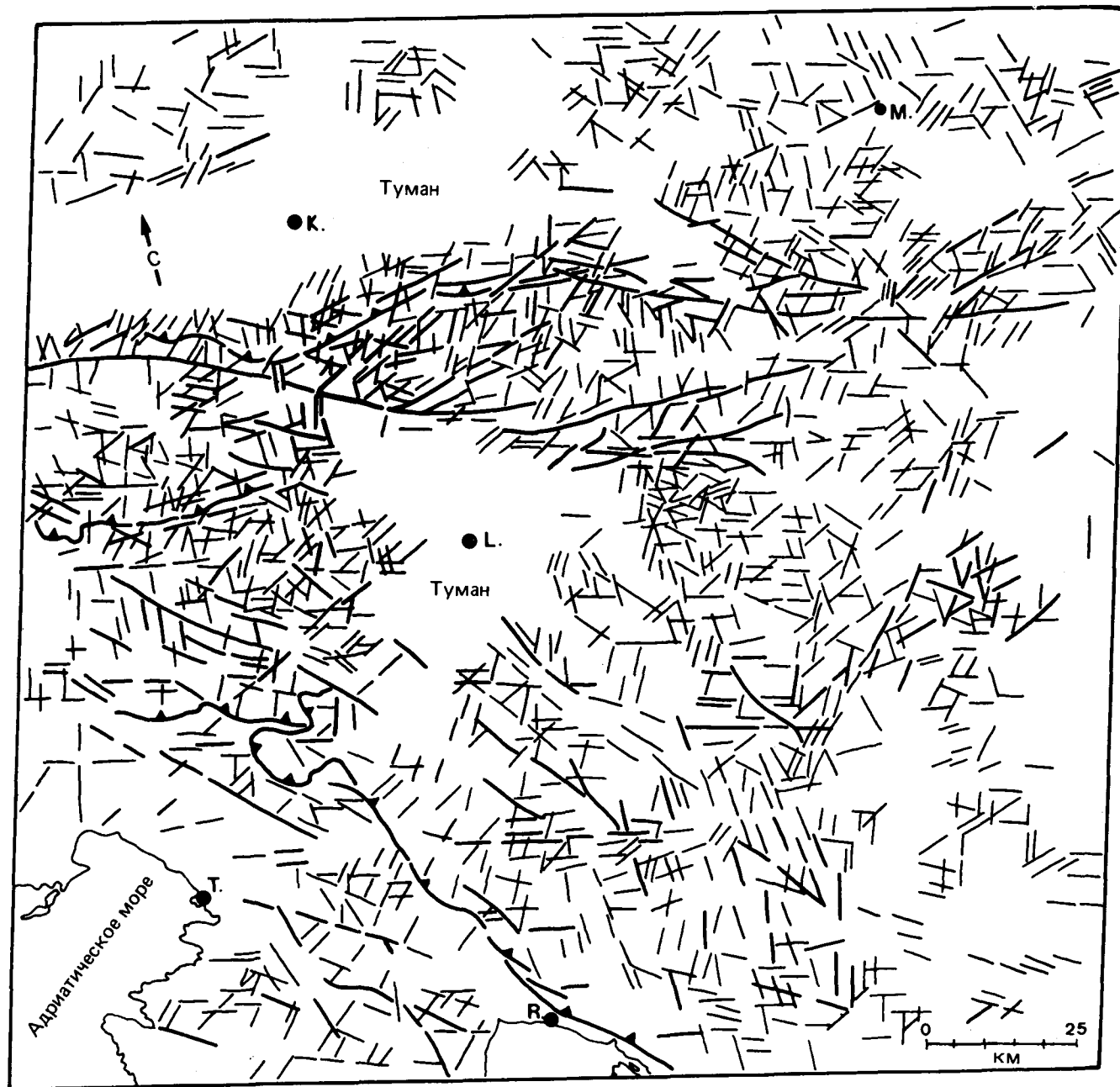


Рис. 1796. Откартированные по снимку «Лэндсат» (рис. 179а) наиболее крупные зоны нарушений (толстые линии) и другие разрывные структуры (крутые нарушения, системы нарушений, зоны трещиноватости).

ми лавами (трахитами) (по Барбери и др.).

Афар как модель демонстрирует ряд геологических и геофизических явлений, которые происходят благодаря плитно-тектоническим процессам или связаны с ними. Наше современное знание геологии Афара складывается в основном из результатов геологических, петрографических, вулканологических и геофизических исследований в рамках Проекта верх-

ней мантии (конец 1960-х – начало 1970-х гг.). Афар представляет собой негостеприимный и труднодоступный район. Поэтому до конца 60-х гг. имелись лишь локальные естественно-научные наблюдения и генерализованная корреляция данных наблюдения по весьма удаленным друг от друга областям. Благодаря фотогеологическому дешифрированию аэрофото-снимков отдельных районов и геологической марш-

рутной съемке уровень познания геологии Афара повысился. Запуск «Лэндсат-1» в 1972 г. впервые дал возможность получить изображение Афара и примыкающих областей – Эфиопского плато, или нагорья, на западе и плато Сомали на юге – и полно оценить его экономически. Примерно из 30 снимков «Лэндсат» была составлена фотосхема в масштабе 1:1 000 000 для территории, которая по площади приблизительно равна ФРГ. Рис. 182 показывает фотосхему в сильно уменьшенном виде. У левого края снимка особой расчлененностью поверхности (хорошо развитая дренажная сеть) выделяется восточный край Эфиопского плато, который уступом обрывается к Афару. Отчетливой сменой форм ландшафта и крутым склоном в сторону южного края Афара выделяется северный край Сомалийского плато. В юго-западном углу Афара наблюдается окончание Восточно-Африканской системы грабенов. На рис. 181 представлен географический обзор местности. Рис. 183 изображает полученную благодаря фотогеологическому картированию отдельных мультиспектральных снимков «Лэндсат» карту литофациальных комплексов Афара и его окружения. Карта составлена фотогеологической группой Геологического института Технического университета в Клаустале в рамках проекта NASA ERTS 1 Proposal SR 351. Картирование литологических комплексов Афара облегчалось знанием территории, которое сотрудники Клаустальского геологического института приобрели в течение многолетних полевых работ, прежде всего в южной части Афара ([232]; Schönfeld, 1985; Christiansen et al., 1975; Juch, 1975; Schäfer, 1975). В рамках исследовательских планов НАСА (ERTS 1, Sr. 351) наряду с литологическим картированием были также составлены карты тектонических поверхностных структур и карта поверхностного дренирования Афара и его обрамления (Kronberg et al., 1974 и [166]). Рис. 184 показывает положение и доминирующие направления крупных разрывных структур Афара в том виде, в каком они картируются на снимках «Лэндсат».

На рис. 185 показаны результаты геологической интерпретации снимка «Лэндсат» района центрального Афара вокруг озера Аббе. Изображенный на рис. 186 снимок «Лэндсат» примерно покрывает площадь карты на рис. 185. Севернее озера главные разрывные структуры, подходящие из впадины Данакиль (там простирающиеся примерно параллельно Красному морю), изгибаются в юго-восточном, а затем в восточном направлении. Простирающиеся и зоны обрушения крупных, заполненных аллювием грабенов (точечный растр) распознаются на отдельных снимках и фотосхемах «Лэндсат» (рис. 187). Вследствие регионального растяжения коры мощные толщи третичных и четвертичных базальтов (серый тон средней интенсивности) серий Афар и Аден раздроблены в бесчисленное множество отдельных глыб, испытавших взаимные подвижки. Стиль строения верхней коры опре-

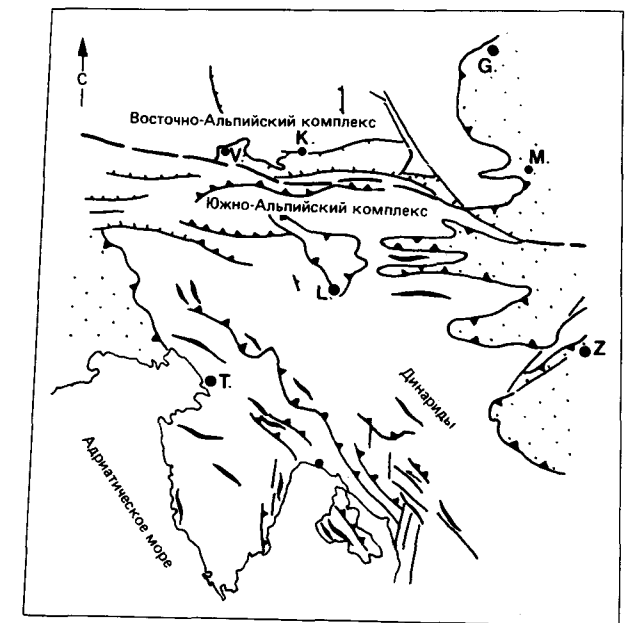


Рис. 180. Структурное строение территории рис. 179а по Геологической карте Европы масштаба 1:1 500 000 (Федеральное ведомство по наукам о Земле и сырью и ЮНЕСКО, Ганновер, 1972).

деляют сбросы, горстовые и грабеновые структуры всех размеров. Базальтовые покровы выделяются явно более светлым серым тоном среди лавовых куполов и игнимбритов риолитового состава (показаны галочками). Местами из-за своего темного тона отчетливо видны центры излияния совсем молодых базальтов, которые фиксируют продолжение вплоть до нашего времени плитно-тектонических процессов в Афаре (в данном случае – растяжение и утонение коры).

На рис. 188 показана частная область вулканической центральной зоны южной части грабена Данакиль (канал 7). Здесь в верхней половине снимка выделяются более темным серым тоном и почти овальными контурами три крупных поля излияния базальтовых лав. Залегающие ныне на поверхности суши лавовые потоки излились [12] в неогене в подводных условиях. Каналы подъема этих лав повторно использовались извержениями базальтовых лав; подводящие каналы выделяются черным тоном. Эти молодые (до современных) базальты наблюдаются вместе с лавовыми потоками среднего состава прежде всего в центральной области развития базальтового комплекса. Совершенно очевидно, что здесь под влиянием продолжавшегося растяжения коры открывались новые пути подъема магмы по древним структурным направлениям и зонам. Бровки зон обрушения и грабенов в нижней половине снимка, заполненных молодыми продуктами размыва, харак-

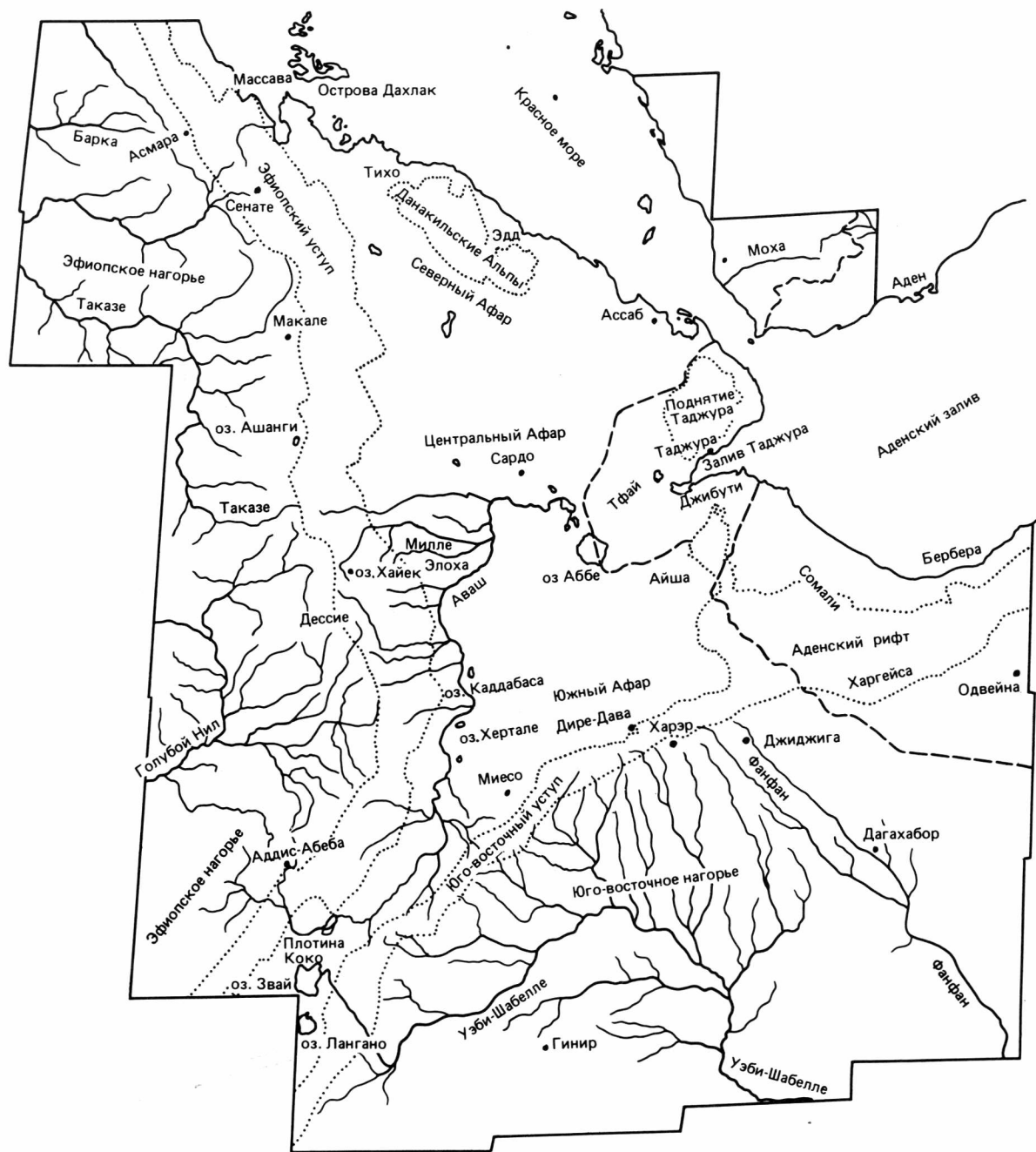


Рис. 181. Географическая схема расположения Афар, Данакильских Альп, Эфиопского и Сомалийского (Юго-Восточного) нагорий и уступов нагорий к впадине Афар.

теризуют доминирующие направления разрывной тектоники, которые располагаются параллельно рифтовой зоне Красного моря и понимаются как параллельные ей структуры. Между грабенем Данакиль и Красным морем находится горст Данакиль (ср. рис. 187). Светло-серым тоном ниже середины снимка

выделяется место выхода риолитовых лав. На снимке справа сверху по своему серому тону средней интенсивности и формам рельефа распознается представленный несколькими вулканами центр излияния риолитовых лав. Следующий центр излияния риолитов располагается слева в средней части снимка. Он



Рис. 182. Фотосхема «Лэндсат» Афара и граничащих с ним областей (масштаб оригинала 1:1 000 000, здесь — около 1:8 000 000).

расположен у западного уступа, у крутого склона Эфиопского плато, которое сложено здесь метаморфическими и магматическими породами. Между плато и грабенем Данакиль видна линия выхода крупного краевого нарушения.

На рис. 189 (канал 5) виден уступ — переходная область от Эфиопского нагорья к Красному морю (западнее Массавы). Опушенные глыбы фундамента перекрыты здесь молодыми осадками, а на юге также плиоценовыми базальтами. В краевой зоне в докемб-

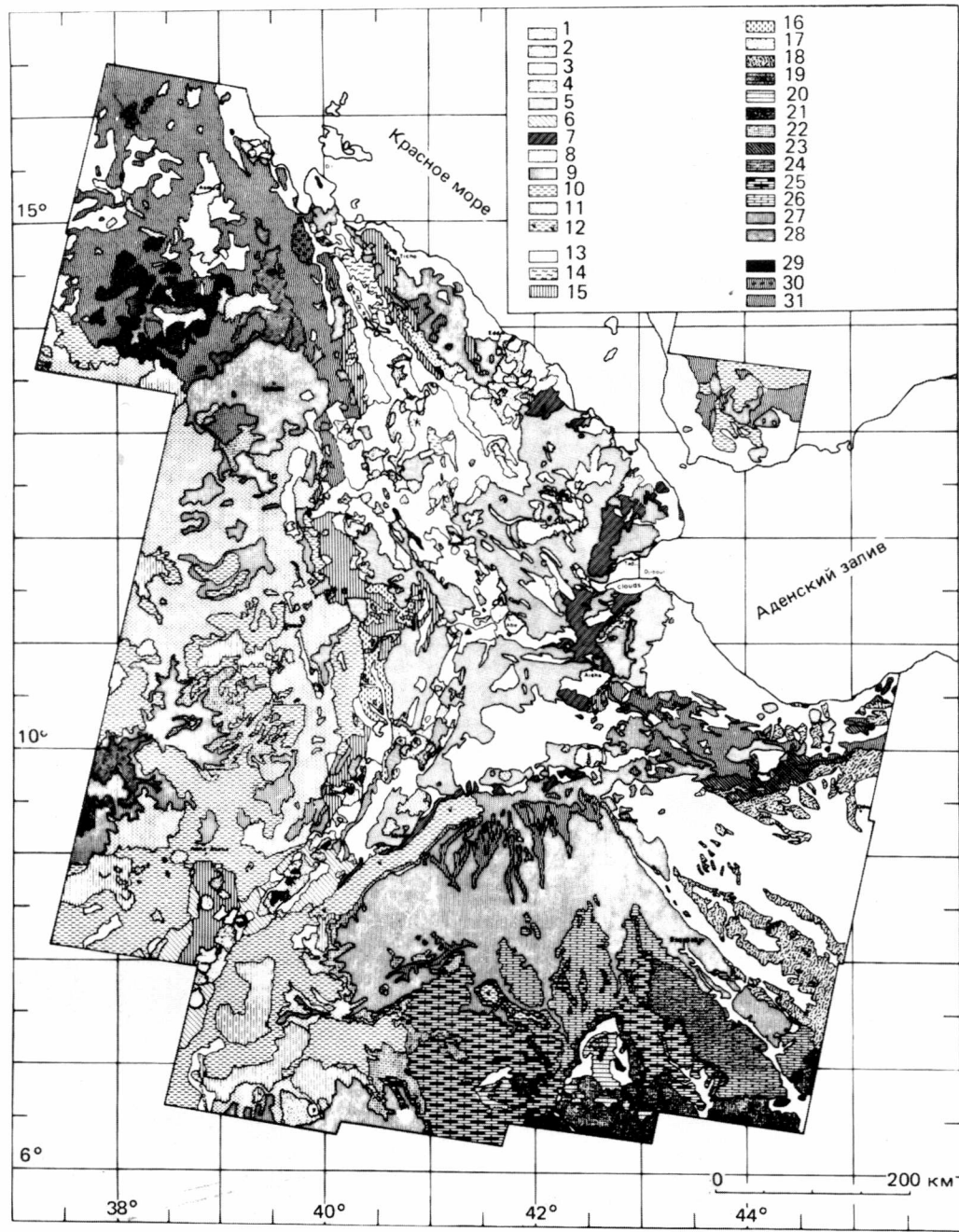


Рис. 183. Карта литофациальных комплексов Афар и смежных областей, составленная по снимкам «Лэндсат» масштаба 1:1 000 000 [166]. Условные обозначения: 1–12 – вулканогенные образования (третичные и четвертичные). Плейстоцен – современные:

1 – кислые, серия Аден; 2 – молодые базальты, серия Аден; 3 – древние базальты, серия Аден. Плиоценовые: 4 – кислые, серия Афар; 5 – базальты, серия Афар; 6 – слоистые (кислые и базальты) лавы Главного Эфиопского рифта; 7 – вулканогенные и осадочные образования нижнего плиоцена; 8 – крупные щитовые вулканы нагорий (плиоцен и древнее). Эоцен (?) – миоценовые: 9 – кислая трапповая серия; 10 – верхние члены трапповой серии; 11 – нижние члены трапповой серии; 12 – трапповая серия, нерасчлененная; 13–28 – осадочные породы. Четвертичные: 13 – аллювиальные, озерные, эоловые (s – соляная корка); 14 – морские (плейстоцен); 15 – аллювиальные (плейстоцен). Третичные: 16 – плиоцен-плейстоценовые озерные; 17 – аллювиальные и морские серии Данакиль (миоцен-плиоценовые (?) – плейстоценовые); 18 – третичные нерасчлененные. Меловые: 19 – песчаники, серия Мустахиль; 20 – мергели, серия Мустахиль; 21 – главные гипсовые мергели, мергели, известняки, гипс; 22 – в основном песчаники (Верхний песчаник); 23 – нерасчлененный мел (на севере Сомали). Юрские: 24 – известняки, серия Габреда; 25 – мергели, серия Габреда; 26 – известняки, серия Габреда; 27 – группа Антало (включая песчаник Адригат в Харэре); 28 – песчаник Адригат (триас – лейас). 29–31 – фундамент. Докембрий: 29 – верхний комплекс фундамента; 30 – гранитный фундамент; 31 – фундамент.

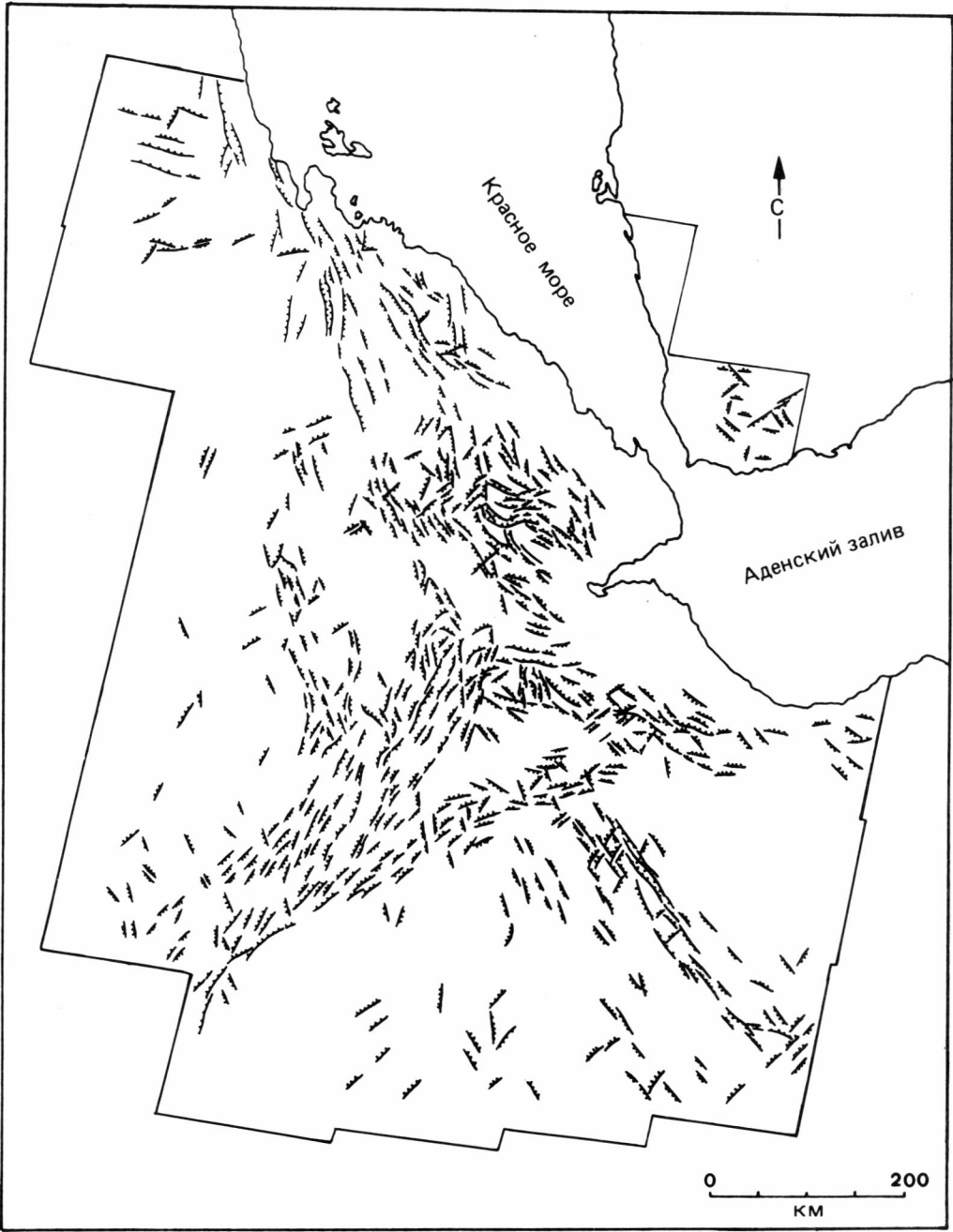


Рис. 184. Нарушения и зоны нарушений Афар, откартированные по снимкам «Лэндсат» масштаба 1:1 000 000.

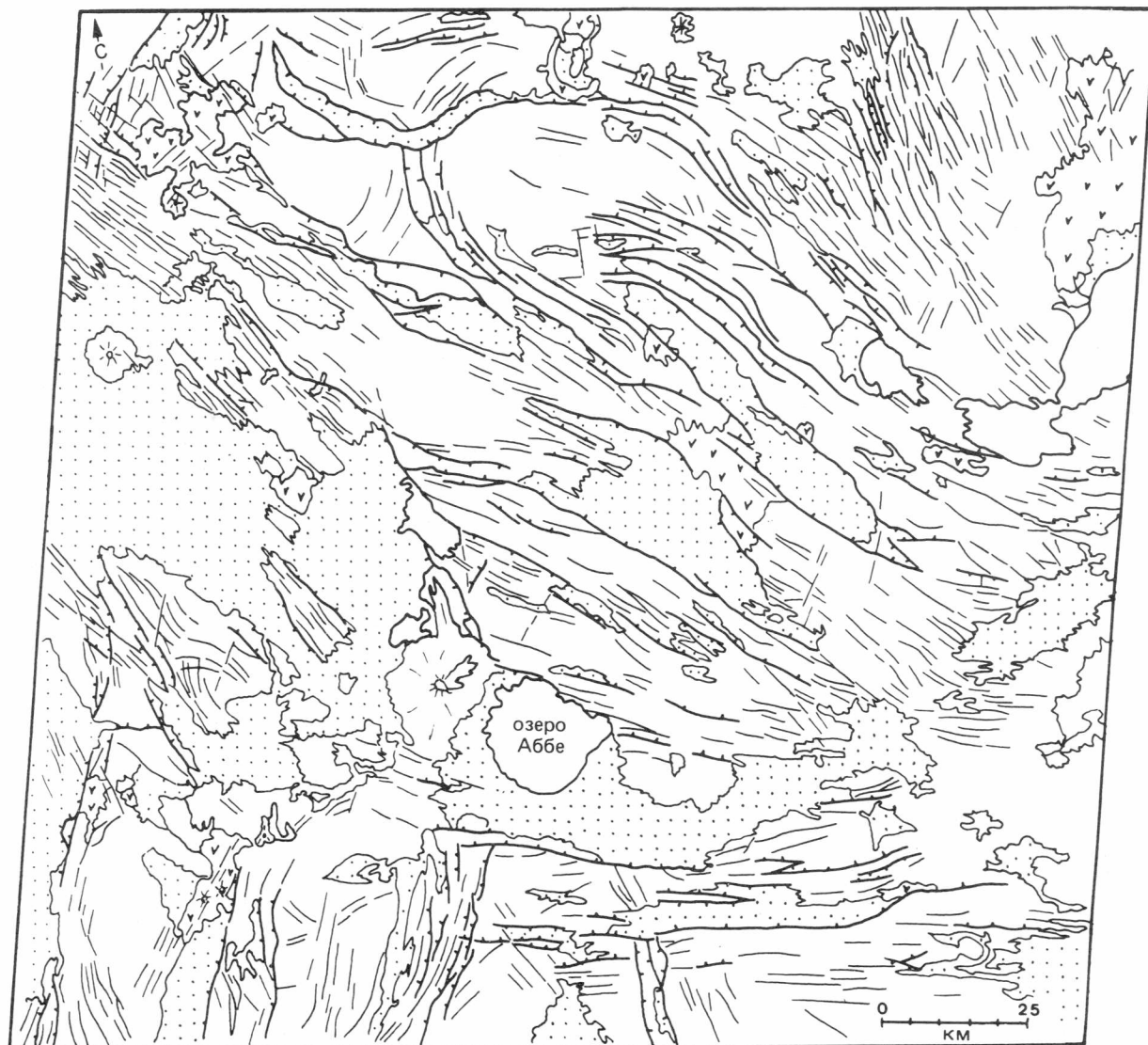


Рис. 185. Геологическая карта района озера Аббе (центральный Афар), составленная на основании фотогеологического картирования снимка «Лэндсат» в масштабе 1:1 000 000.

рийском фундаменте появляются системы ступенчатых разломов, параллельные рифтовой системе Красного моря. Формы ландшафта остальных районов снимка определяются литофациальным составом и тектоническими структурами докембрийского кристаллического фундамента. В юго-восточном районе фундамент перекрыт третичными трапповыми базальтами, отделяющимися от окружающего фундамента крутыми ступенями, структурно-денудационными уступами и платообразной поверхностью — соответственно светлым и более темным серым тоном.

На рис. 190 (канал 5) представлен район Суэцкого залива рифтовой зоны Красного моря. Горные цепи

по обе стороны залива сложены докембрийскими комплексами высокометаморфизованных гнейсов и интрузий гранитного состава, выделяющихся в виде округлых структур. К северу фундамент трансгрессивно и несогласно перекрыт полого залегающими осадками, преимущественно меловыми и палеогеновыми, но местами также и палеозойскими. Переходная зона от фундамента к осадочному чехлу выделяется различиями серого тона, формами рельефа и дренажной сетью. Суэцкий залив маркирует протяжение зоны грабенов в породах фундамента. Вследствие растяжения кора здесь раздроблена на несколько глыб. Хорошо распознаются краевые нарушения комплексов фундамента. Краевые ступени глыбовой

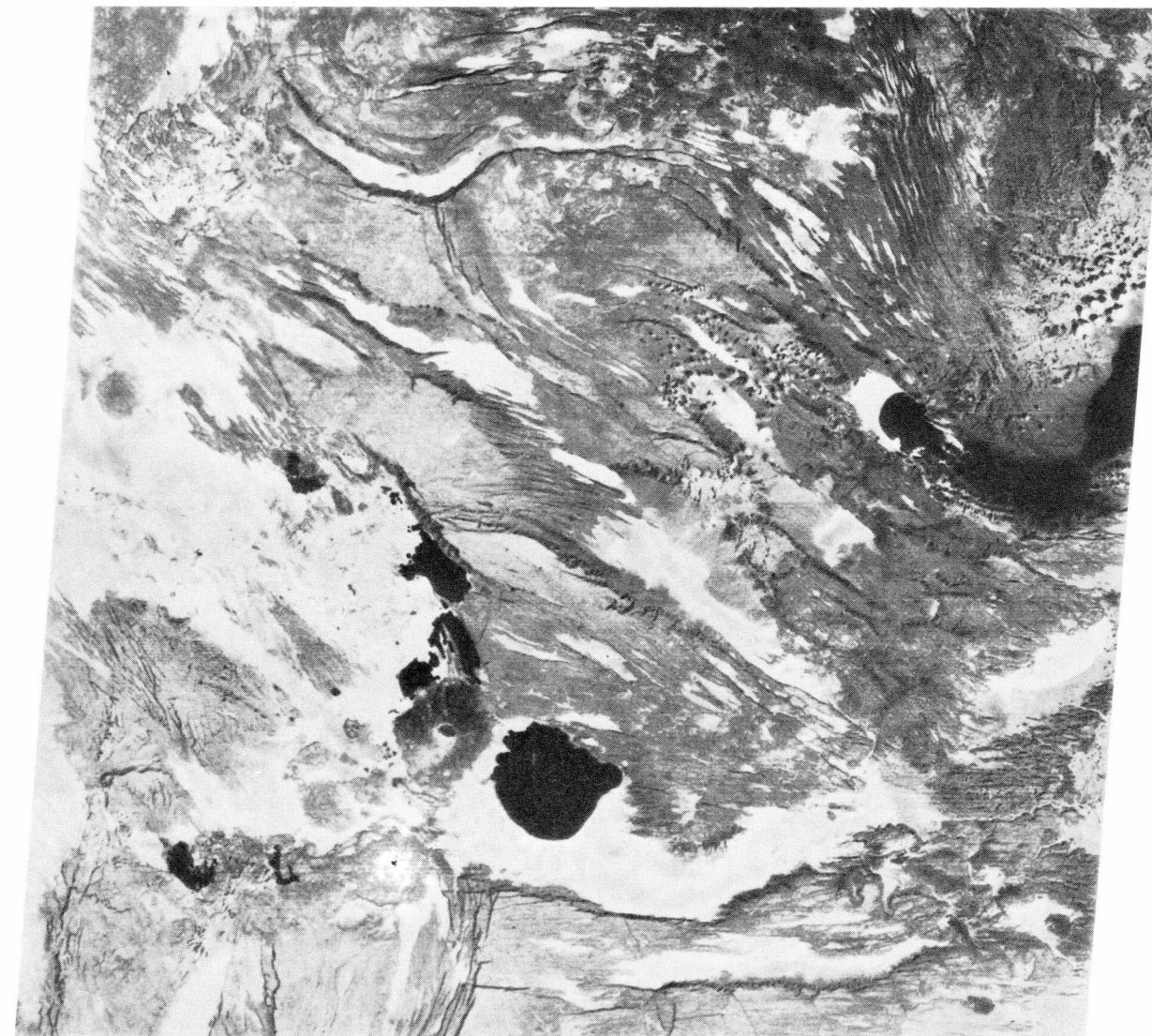


Рис. 186. Снимок «Лэндсат» района, изображенного на рис. 185 (с незначительным смещением). Пояснения в тексте. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1954-07025).

мозаики по обе стороны залива в значительной степени перекрыты четвертичными отложениями. На северо-восточном берегу залива устанавливается горст, ограниченный параллельными грабену нарушениями. Темная полоса близ берега представлена глыбой кристаллических пород, а более светлая полоса холмов сложена меловыми и третичными отложениями, которые затронуты разрывно-глыбовой тектоникой. Здесь фиксируется обрушение зоны грабенов в середине третичного периода. Узкие поднятые глыбы кристаллических пород находятся также на противоположном берегу залива (узкие более темные серые зоны). Они видны также на снимке «Джемини» (рис. 191), дающем хороший обзор геологической

ситуации у северного окончания рифта Красного моря.

На рис. 192 дана обзорная картина рифтовой зоны Красного моря. Рис. 193 в виде схематического наброска изображает плитно-тектоническую ситуацию в районе Красного моря и его обрамления. Южная часть Красного моря и Аденский залив изображены на снимке «Джемини» (рис. 194). Подобные снимки под косым углом дают очень хороший обзор местности. Они позволяют также увидеть многие интересные детали геологии. Однако для тематического картирования косые снимки менее пригодны из-за быстрых изменений масштаба и убывающего пространственного разрешения от ближнего к даль-

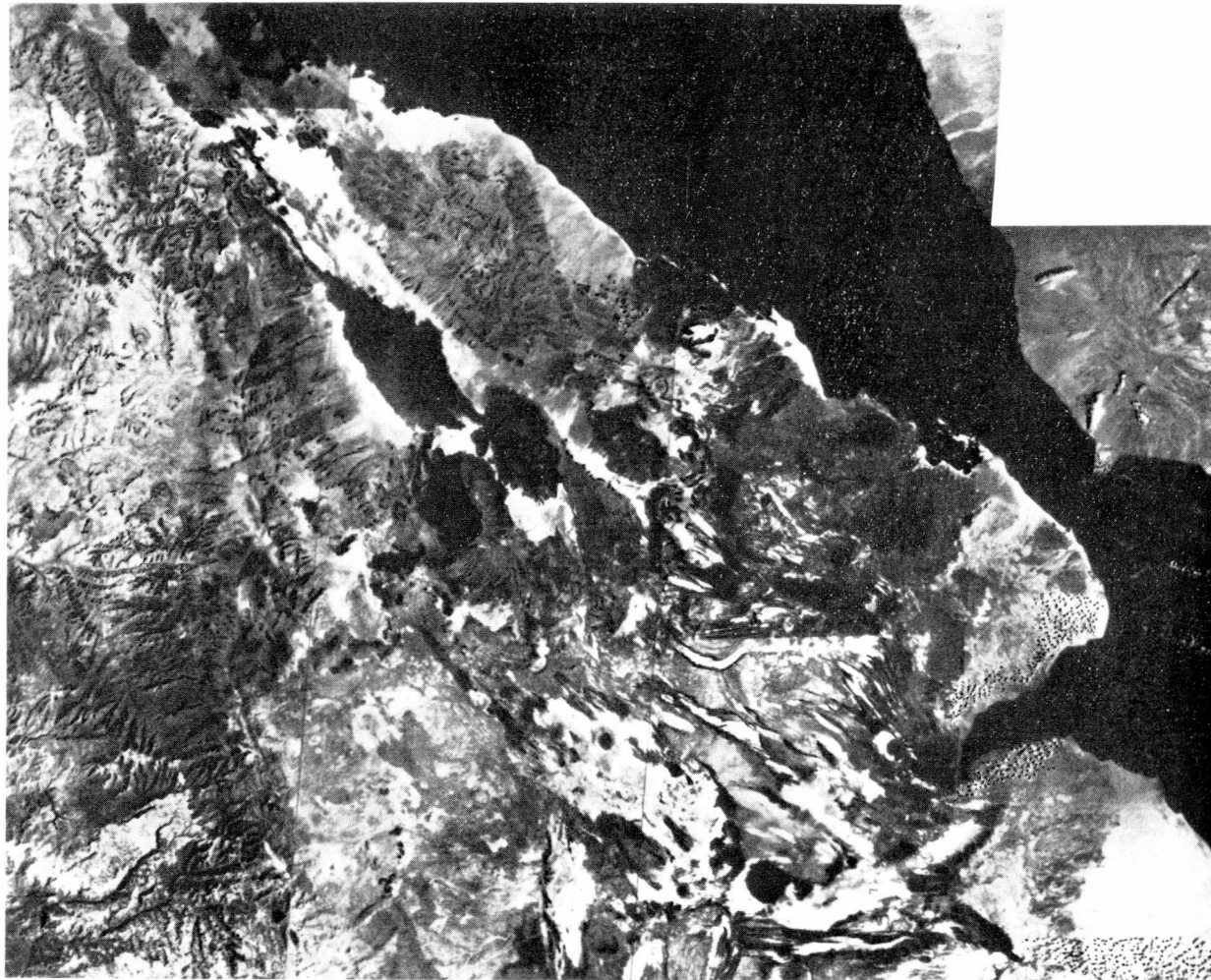


Рис. 187. Фрагмент фотосхемы «Лэндсат» с рис. 182 – район центрального Афра и грабена Данакиль. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:3 000 000.

нему плану. Напротив, снимки и фотосхемы «Лэндсат» оказались весьма подходящими для фиксации особенностей тектоники и сравнительной интерпретации областей суши по обе стороны рифтовой зоны.

Рис. 195 и 198 изображают два фрагмента структурно-геологической карты области Красного моря, которая была составлена Клаустальской рабочей группой по фотогеологии и дистанционному зондированию по данным картирования снимков «Лэндсат» в масштабе 1:1 000 000.

Рис. 195 показывает откартированные по снимкам «Лэндсат» тектонические структуры и главные структурные направления у северного окончания зоны рифта, которая здесь переходит в структурные зоны Суэцкого залива и залива Акаба. Наряду с параллельными рифту структурами бросаются в глаза несколько других важных структурных направлений, которые

под различными углами к главной рифтовой системе проявляются в комплексах фундамента Синай, на западном берегу Суэцкого залива и на берегу залива Акаба в Саудовской Аравии. Примечательно, что они представлены и в докембрийском фундаменте Судана и Саудовской Аравии.

В окрестностях залива Акаба наиболее рельефно выступают разрывные структуры, простирающиеся в меридиональном или северо-северо-восточном направлении. Они маркируют основную ориентировку крупной и активной в плитно-тектоническом смысле структурной зоны, которая тянется через рифтовую зону Иорданского грабена и Северо-Ливанскую зону нарушений и зафиксирована на снимке «Аполлон», (рис. 191) и на рис. 196 и 197а. По шовной зоне [172], заложенной предположительно в докембрийское время и рассеянной раннекембрийскими дайками, наблюдалось левостороннее смещение на десятки кило-

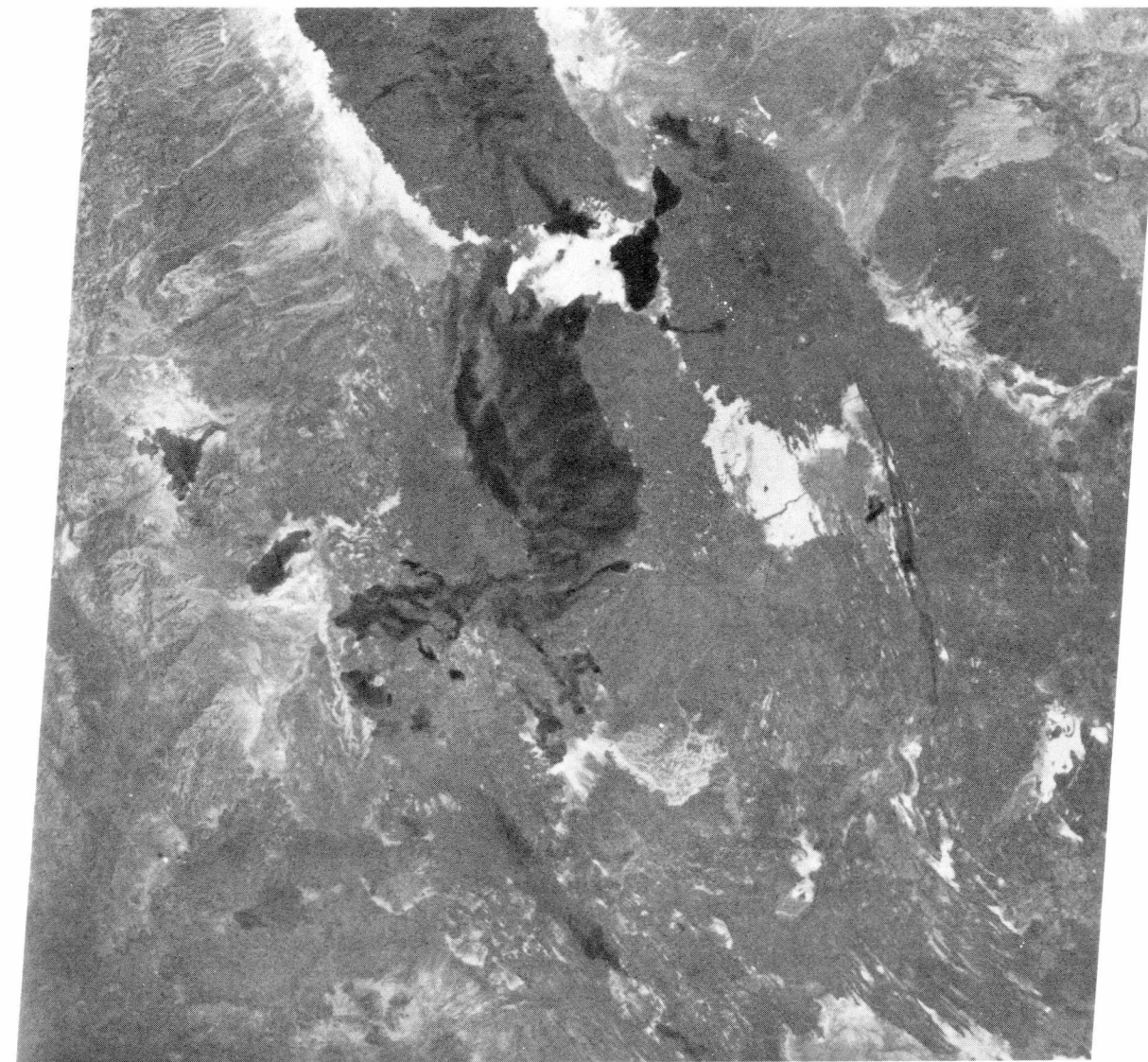


Рис. 188. Снимок «Лэндсат» района грабена Данакиль. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1101-07080). Положение фрагмента можно установить по рис. 187.

метров как результат дрейфа Аравийской плиты к северу в ходе третичного раскрытия рифта Красного моря (ср. с Геологической картой на рис. 193). В ходе процессов молодой плитной тектоники здесь были также активизированы структуры древнего заложения.

Рис. 196 (канал 5) показывает часть Иорданского рифта в Вади-Акаба (у северного края снимка еще можно видеть южный берег Мертвого моря). По восточному краю грабена морфологически выражено краевое нарушение. Здесь вскрыто преимущественно докембрийское основание, на котором к востоку и северу лежат палеозойские и более молодые осадки.

Параллельные рифту зоны нарушений особенно хорошо видны в комплексах фундамента. Рисунок иллюстрирует, что структурное направление древнего заложения, которое по данным Ленца и др. [178] зафиксировано в докембрийских образованиях благодаря кембрийским эрозионным формам докембрийского фундамента и дайкам, раннекембрийским основным, а также средним и кислым, протягивающимся параллельно современному рифту, было активным до самого последнего времени. Об этом говорит тот факт, что третичное и даже четвертичное осадочное заполнение рассекается четко выраженной зоной нарушения. Она выделяется в области грабена как

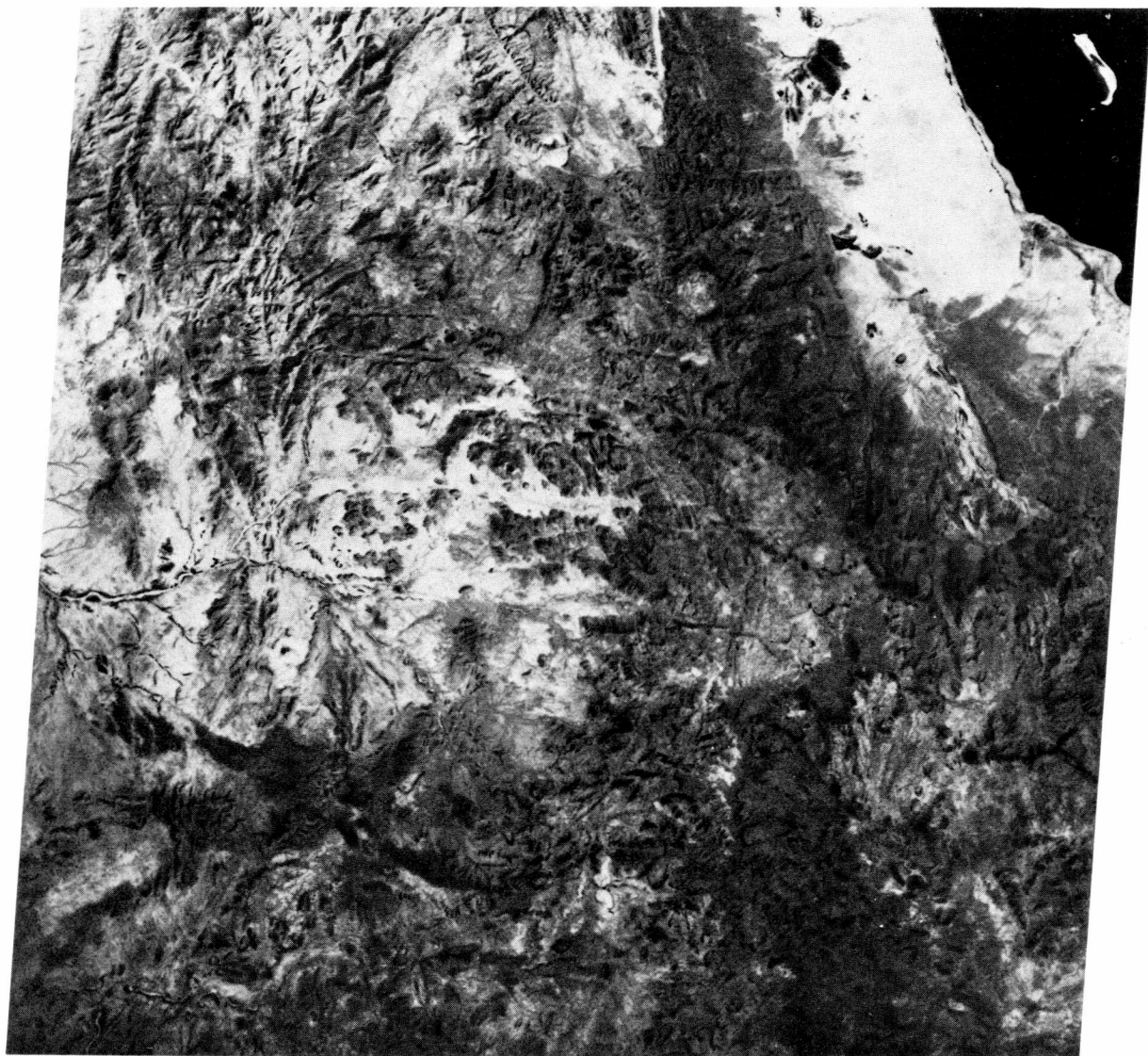


Рис. 189. Снимок «Лэндсат» одного из районов Эфиопского нагорья у Асмэры. Масштаб около 1:1 000 000. Пояснения в тексте (NASA, E-1103-07185).

линейный элемент фотоизображения (линейные различия серого тона). Ниже центра снимка это молодое нарушение поворачивает в отклоняющуюся в юго-западном направлении зону нарушения, протягивающуюся под острым углом к общему простиранию грабена; восточная глыба грабена представляется опущенной. Параллельно этой весьма молодой зоне нарушений несколько разломов (древнего заложения) в докембрийском фундаменте протягиваются восточнее краевого нарушения и разрывных структур в палеозойских и мезозойских осадочных слоях чехла. Это показывает скрупулезный анализ ориентировки поверхностного дренажа районов в правой части

середины снимка, но прежде всего в его нижней половине. Несомненно, дело касается здесь активизации древних систем разломов и отражения древних структур фундамента в молодом осадочном чехле.

Рис. 197а (канал 7) показывает северный участок Северо-Ливанской зоны нарушений. Своими нижним, средним и верхним частными отрезками она следует структурным направлениям, которые в докембрийском основании восточнее грабена Иордана (нижняя часть снимка на рис. 200) отвечают направлениям главных простираний. В рамках молодых плитно-тектонических явлений здесь могли также активизиро-



Рис. 190. Снимок «Лэндсат» района Суэцкого залива. Масштаб около 1:1 000 000. Пояснения в тексте (NASA, E-1109-07493). Расположение изображенной области см. на рис. 191.

ваться главные региональные структурные направления древнего заложения. Сравнение направлений и корреляцию пространственного проявления и ориентировки структурной сети на большие расстояния (в данном случае свыше 350 км) на базе снимков «Лэндсат» удастся провести быстро и надежно, тем более что по краю каждого снимка указаны координаты.

Низкое стояние солнца при съемке (1 января 1973 г.) подчеркивает протяжение Ливанской зоны нарушений и признаки структурного строения окружающих областей. Становятся отчетливыми складчатые структуры, и зоны разломов различных направ-

лений и размеров для всех комплексов области могут быть отображены на карте.

Рис. 198 перекрывает прибрежную полосу суши примерно между Рас-Банасом и Рас-Абу-Ябисом (Судан). Карта дает типичный пример структурного строения обширных частей докембрийского фундамента по обе стороны Красного моря. Она позволяет видеть, что в докембрийском фундаменте проявляются некоторые преимущественные структурные направления, отчасти рассеянные по площади, отчасти сконцентрированные в узких зонах. Это структуры, протягивающиеся параллельно главному направлению Красного моря, простирающиеся меридиональ-



Рис. 191. Литофациальные комплексы и главные структуры в районе Синайского полуострова и его окружения (NASA S-66-54893).

но, широтно или в восточно-северо-восточном направлении. Судя по полевым наблюдениям, структуры этих направлений имеют древнее заложение в докембрийском фундаменте и были активизированы в ходе последующего геологического развития в регионе (см. [73, 274, 275, 300]). Древние структурные планы континентальной коры совершенно явно оказывают влияние на структурное заложение и ориентировку более поздней рифтовой зоны Красного моря и на внутреннее тектоническое строение отдельных областей, равно как и на тектоническое расчленение океанической коры в районе центральной зоны Красного моря [275]. Рис. 199 показывает положение и ориентировку некоторых докембрийских зон скола, систем нарушений и параллельно ориентированных

третичных разрывных структур в районе центрального грабена Красного моря (откартированы на батиметрической карте центрального грабена, опубликованной в работе Бэккера и др. [10]; см. также [275]).

Рис. 200 изображает положение и ориентировку крупных разрывных структур и разрывных систем районов Красного моря, откартированных по фотосхеме «Лэндсат» масштаба 1:2 000 000. Подобное картирование при сравнительно малых затратах денег и времени целиком может быть проведено одним сотрудником или небольшой рабочей группой.

Снимок «Лэндсат» на рис. 201а показывает частный район Калифорнии, который благодаря своей

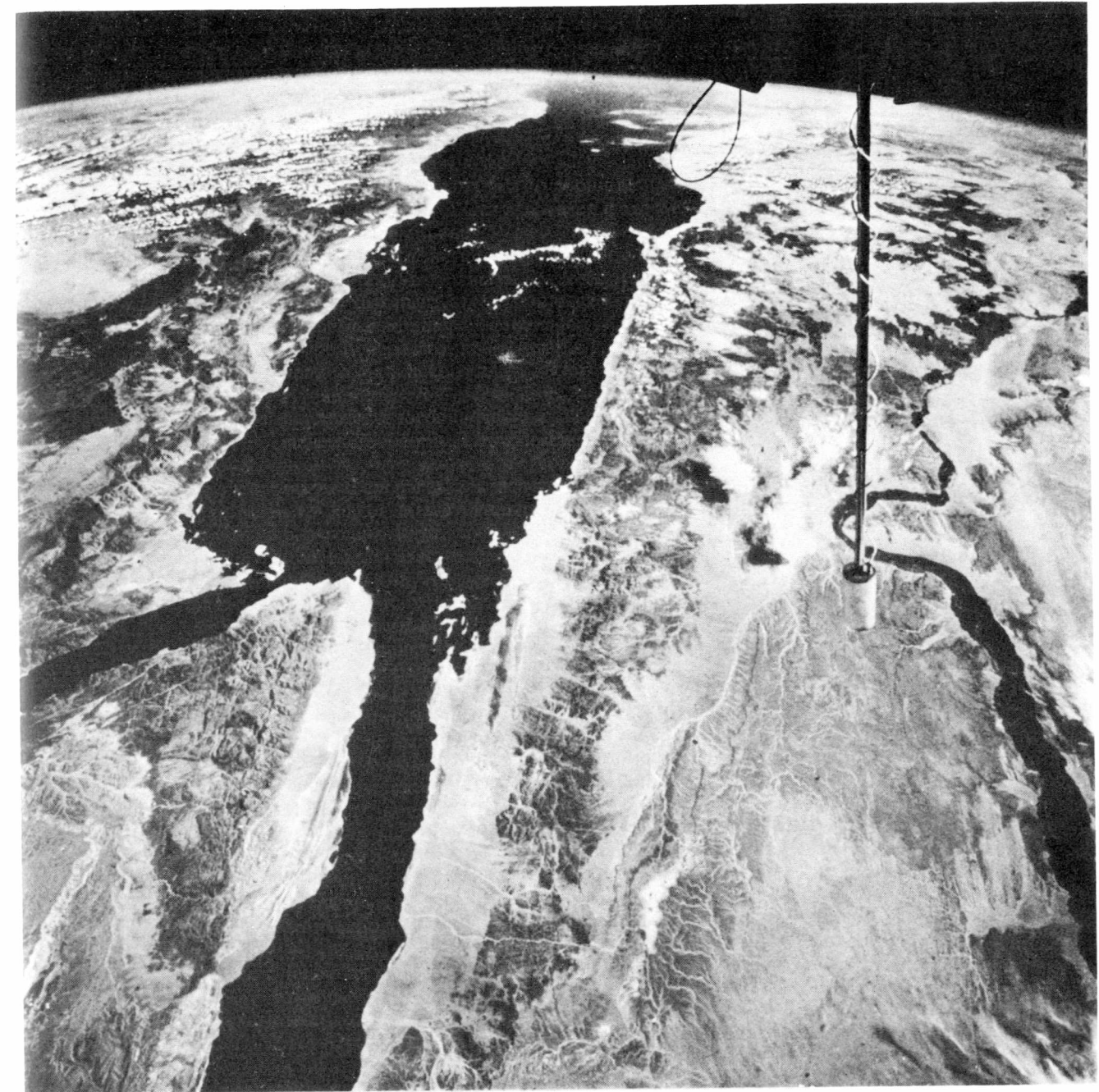


Рис. 192. Зона рифта Красного моря на снимке со спутника (NASA).

особой плитно-тектонической позиции и продолжающейся вплоть до настоящего времени сейсмической активности был и остается объектом многочисленных геологических и геофизических исследований (см. [6]). Нижнюю половину снимка занимают горные районы береговых цепей и так называемых Поперечных хребтов. В нижней правой части снимка можно

узнать район города Лос-Анджелеса. Горный хребет в левой части верхней половины снимка является отрогом Сьерры-Невады. Он отделяет пустыню Мохава от долины Сан-Хоакин (слева вверх). Рис. 202 показывает важнейшие зоны и системы нарушений заснятой области и ее обрамления. Главной структурой является зона разлома Сан-Андреас, которая

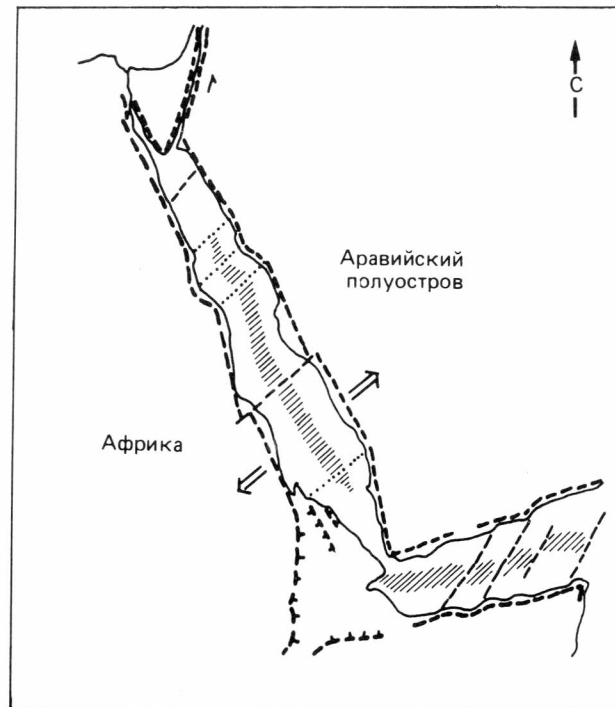


Рис. 193. Схема плитной тектоники в районе Красного моря и его обрамления (по [84]).

рассекает Калифорнию на протяжении более 1000 км. По ней береговая глыба, судя по полевым наблюдениям, движется в северо-западном направлении относительно Американской плиты, расположенной восточнее нарушения. Таким образом, разлом Сан-Андреас является правосторонним нарушением, по которому происходили и происходят преимущественно горизонтальные подвижки. Это направление движения отчетливо видно на аэрофотоснимках региона по соответствующему изгибу линий дренирования непосредственно в зоне нарушения. Разрывные структуры, протягивающиеся параллельно разлому Сан-Андреас, видны на тектонической карте в районе береговых цепей, пустыни Мохаве и в отрогах Сьерры-Невады. Как показывает рис. 202, разлом Сан-Андреас в области севернее Лос-Анджелеса меняет свое простираие. Он отклоняется от общего северо-северо-западного простираия к северо-западу. К тому же в главное нарушение утыкается в этой области оперяющая зона разлома Гэрлок, который расчленяется на несколько частных отрезков (ср. рис. 201а и 201б) с левосторонним смещением. Кроме того, в прибрежных горах к северу от Лос-Анджелеса появляются простирающиеся на восток зоны нарушений и сопровождающие их системы разломов, которые удалось откартировать также в пустыне Мохаве. Различные интерпретаторы связывают их с зоной разрыва Меррей – соответствующим образом ориентированной

структурой Тихоокеанской плиты. Пересекающиеся системы нарушений являются наряду с прочим выражением сложных соотношений напряжений и деформаций в зоне изгиба разлома Сан-Андреас в районе между разломом Гэрлок на севере и горами Сан-Бернардино на юге. Здесь проявляется сжатие, которое привело, по Вильсону, к образованию структур сжатия и к возникновению так называемых Поперечных хребтов. Современная тектоническая ситуация в районе снимка и его окружения изображена на тектонической схеме на рис. 202 (внизу) (по [6]). Сравнение данных рис. 201б и 202 показывает, что множество картируемых на снимке «Лэндсат» фотолинементов следует относить к главному направлению систем нарушений, играющих определяющую роль в региональном масштабе.

6.3.3. О работе со снимками и фотосхемами «Лэндсат» в ходе геологического картирования. Благодаря большому площадному перекрытию отдельных снимков «Лэндсат» (185 × 185 км) часто бывает достаточно уже нескольких смежных снимков, чтобы они закрыли всю площадь крупной исследуемой области. Из составления нескольких или многих снимков «Лэндсат» получается фотосхема «Лэндсат», которая в синоптическом изображении показывает геологические реалии площадей в масштабах страны или континента. Пространственное разрешение и информационное содержание фотосхемы «Лэндсат» меняется в зависимости от масштаба, равно как и от спектрального канала, изображения которого смонтированы в фотосхему. Применяемые для составления фотосхемы снимки должны относиться к одному времени года и примерно соответствовать один другому серым тоном, чтобы избежать резких перепадов по краям снимков или на переходах от снимка к снимку. Подобные скачки серого тона являются помехой при тематической интерпретации фотосхемы. Часто фотосхема «Лэндсат» составляется из снимков канала МСС 7, поскольку они обнаруживают большую резкость, лучшую дифференциацию растительности, чем, например, дают снимки каналов 4 или 5, и четко отображают границу между водой и сушей. В других случаях для составления фотосхемы предпочтительнее снимки канала 5, поскольку они особенно контрастно отражают различия пород и почв ландшафта. Если позволяют средства, то окупается составление фотосхемы «Лэндсат» из цветных отпечатков (при сочетании снимков каналов 4, 5 и 7), поскольку подобные ложноцветные схемы часто отображают геологически важные особенности местности в более легкочитаемом виде, чем черно-белые фотосхемы «Лэндсат». Для фотогеологической интерпретации наиболее пригодны фотосхемы «Лэндсат», которые составлены из снимков в оригинальном масштабе, т.е. 1:1 000 000. При обработке весьма обширных площадей из практических соображений

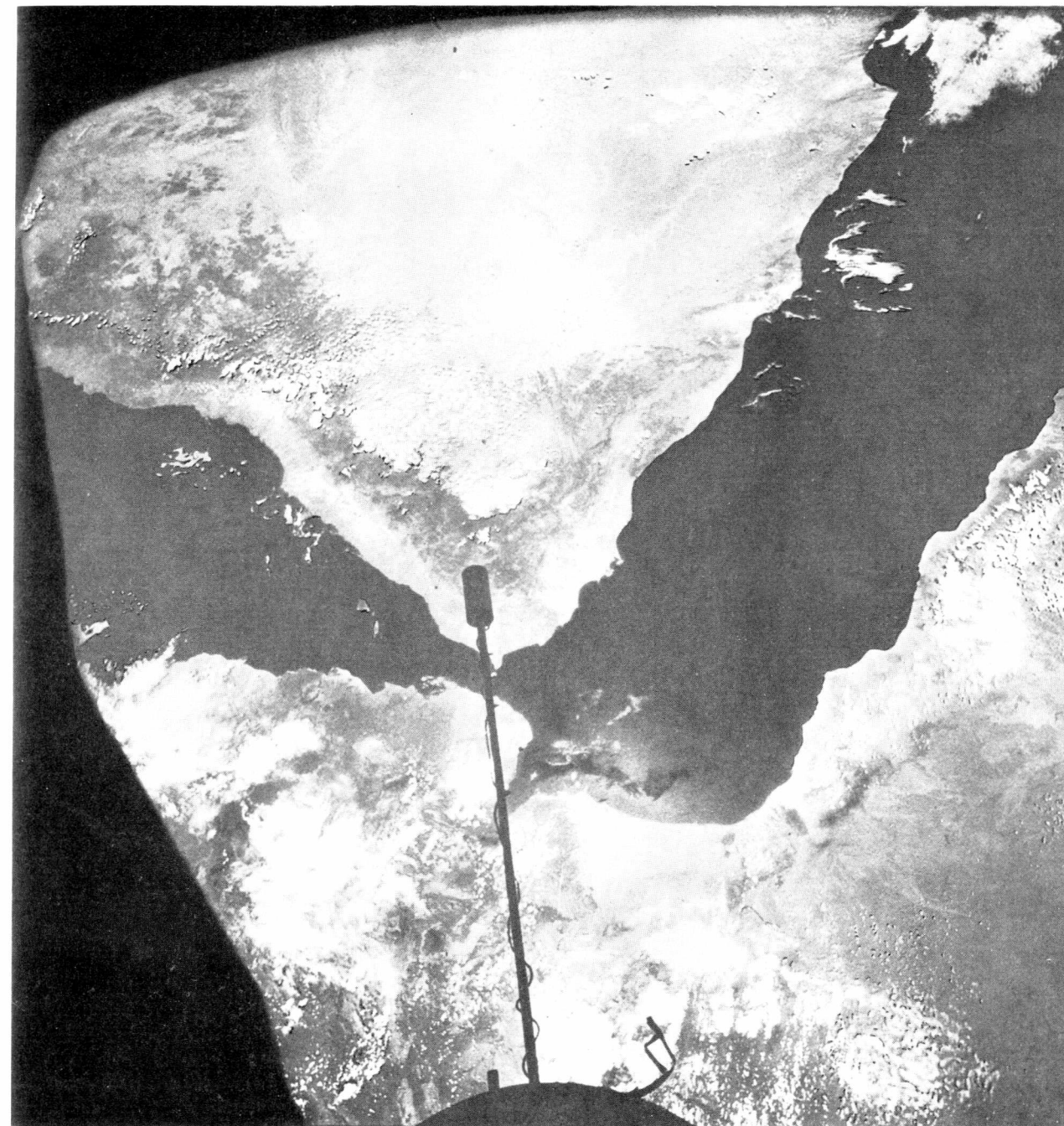


Рис. 194. Аденский залив и южная часть Красного моря на снимке со спутника (NASA).

рекомендуется сперва составить фотосхемы частных областей в масштабе 1:1 000 000, затем перенести оригиналы этих схем фотопутем и перед окончательным монтажом уменьшить их до желательного масштаба. Для фотогеологического картирования преимуществом является проведение первого картирования

фотосхемы на отдельных фрагментах в масштабе 1:1 000 000, чтобы получить в достаточном объеме детальную геологическую информацию, поскольку с уменьшением масштаба уменьшается разрешение и картируемыми остаются лишь более крупные геологические единицы и структуры.

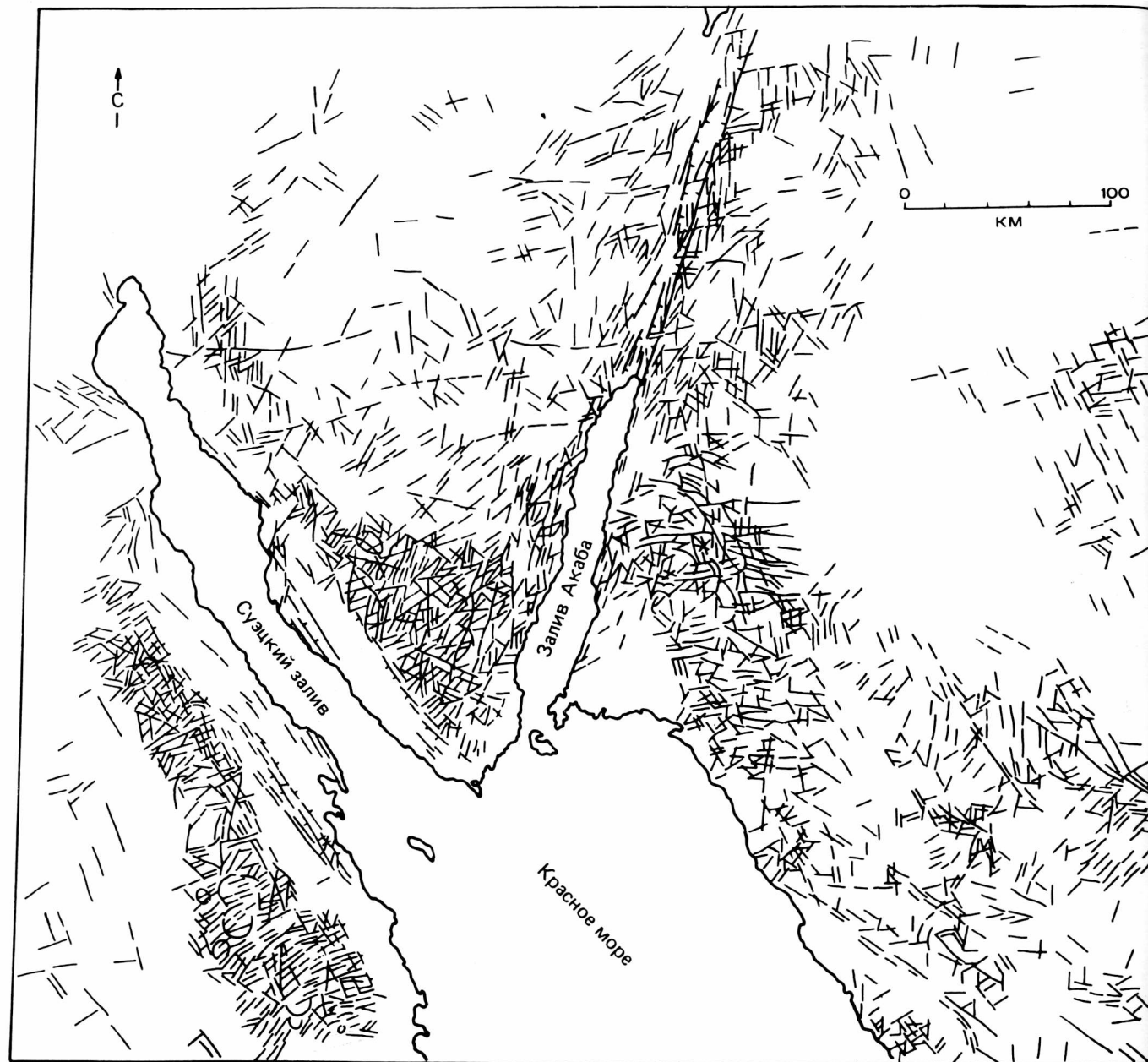


Рис. 195. Откартированные по снимкам «Лэндсат» разрывные структуры в районе Синайского полуострова и примыкающих областей (ср. с рис. 191).

С другой стороны, на уменьшенной фотосхеме «Лэндсат» (например, в масштабе 1:2 500 000) иногда отчетливо видны такие тектонические структуры или структурные связи, которые остались незамеченными на оригинальных снимках. Многие протяженные тектонические структуры (например, линейные зоны значительной глубинности проникновения) и макрорегиональный структурный план

вообще становятся отчетливыми лишь при синоптическом картировании фотосхем «Лэндсат».

С 1985 г. для составления фотосхем «Лэндсат» стали доступны также мультиспектральные снимки с помощью камеры «Тематический картограф» (ТМ) со спутников «Лэндсат-4» и «Лэндсат-5». Для каждой сцены «Лэндсат» ТМ поставляет снимки по семи спектральным каналам, причем площадное покрытие

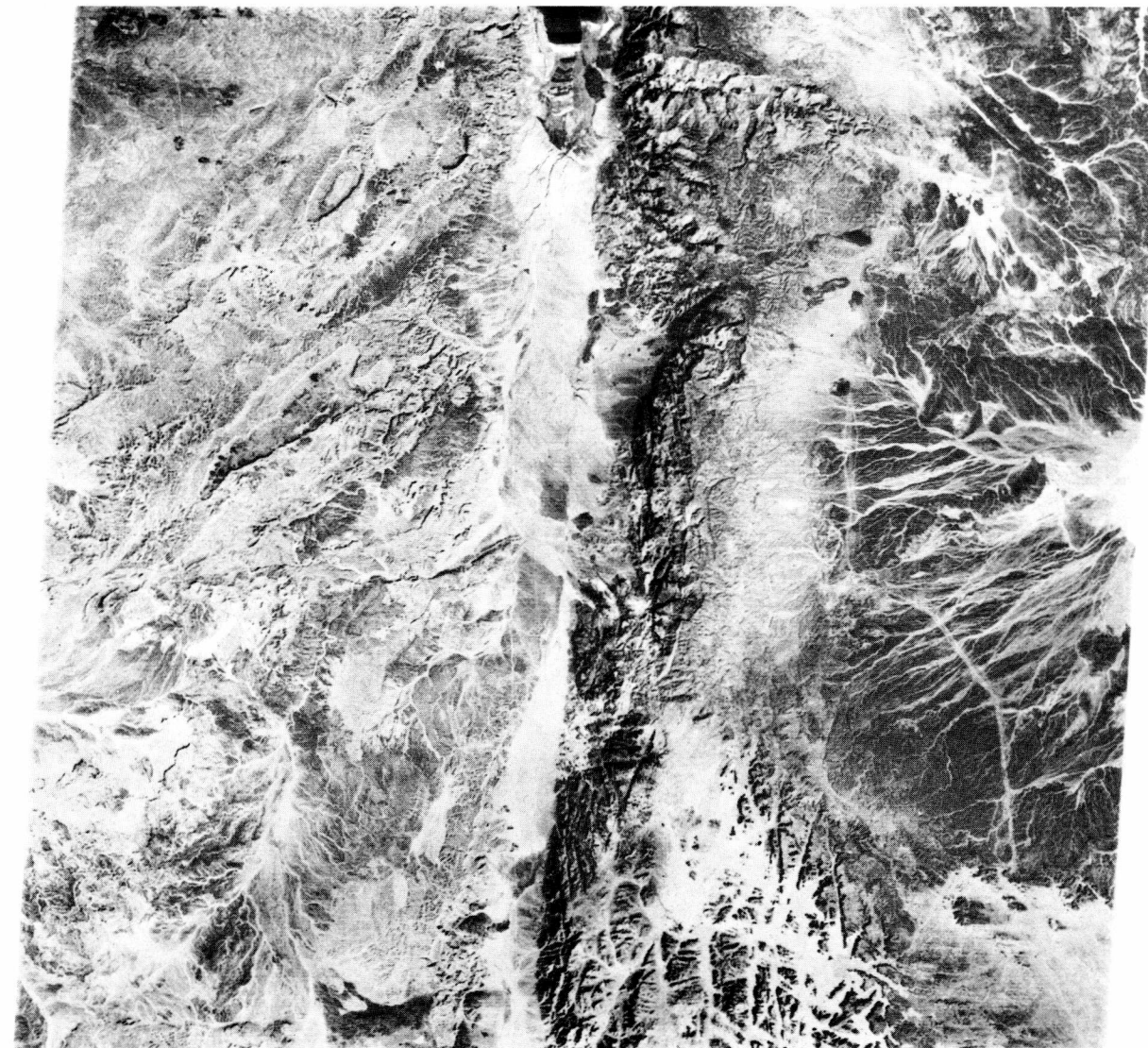


Рис. 196. Иорданский грабен и его обрамление на снимке «Лэндсат». Пояснения в тексте. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA E-1162-17431).

снимка соответствует покрытию снимка МСС. Преимуществом для тематических интерпретаций или картирования является то, что пространственное разрешение сцены ТМ по сравнению со сценой МСС выше более чем в два раза. Преимуществом является и то, что снимки ТМ можно получить в виде стандартных фотографических материалов в масштабе 1:1 000 000 (полный снимок) и в виде четверти снимка в масштабе 1:500 000. Таким путем интерпретатор получает возможность большей гибкости при составлении своей схемы «Лэндсат». Перед составлением фотосхем играет роль выбор того спектрального канала, снимки которого позволяют ожидать получение максимального информационного содержания в

интересах проводимой тематической интерпретации, и того масштаба изображения, который наилучшим образом соответствует изображенной или обрабатываемой площади.

В дополнение к интерпретации фотосхемы «Лэндсат» проводится дифференцированное картирование литологических комплексов и тектонических структур по узкозональным снимкам отдельных сцен «Лэндсат». При этом следует принимать во внимание отчасти весьма разное содержание данных снимков различных спектральных каналов МСС или ТМ. Для разработки частных проблем оказались пригодными увеличения снимков «Лэндсат» МСС и ТМ до масштаба 1:500 000, а при благоприятных особен-

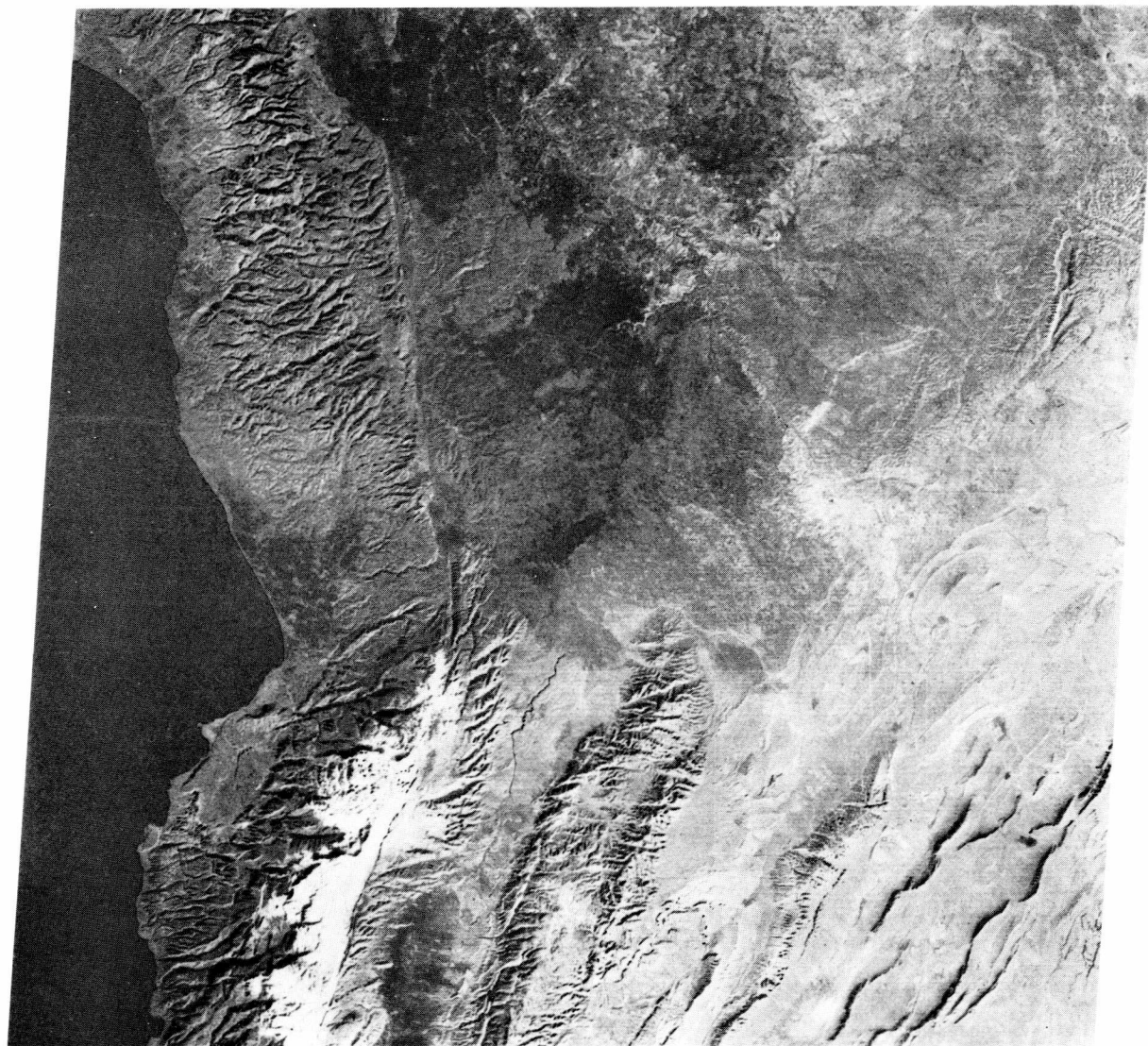


Рис. 197а. Северо-Ливанское нарушение на снимке «Лэндсат». Масштаб около 1:1000000 (NASA E-1162-7420).

ностях рельефа—даже до масштаба 1:250000.

Для разработки специальных вопросов (например, разведки месторождений, гидрогеологических или инженерно-геологических задач) рекомендуется дополнительное фотогеологическое дешифрирование мелкомасштабных аэрофотоснимков ключевых и (или) наиболее сложных отдельных районов обрабатываемой области. Заключительной частью работ по картированию являются маршрутные исследования для ревизии и дополнения фотогеологического картирования снимков «Лэндсат» и аэрофотоснимков, т.е. для определения петрографической и литостратиграфической принадлежности картируемых комплексов, для отбора образцов и для получения полевых текто-

нических данных. Вид и объем полевых наблюдений определяются имеющимися в распоряжении транспортными средствами (мулы, вездеходы, вертолеты) и условиями местности. Решающим является также время. Во всяком случае в качестве эффективной методики разработки геологических проблем на обширных площадях рекомендуется сочетание интерпретации снимков со спутников, покрывающих значительные площади, фотогеологического картирования представительных или наиболее сложных частных районов и детальных полевых работ на выбранных критических участках местности.

6.3.4. О применении снимков «Лэндсат» при sedi-



Рис. 197б. Структурная схема области, изображенной на рис. 197а.

ментологических, гидрологических и экологических исследованиях в наземных и прибрежных водах. В заключение следует упомянуть, что синоптические снимки «Лэндсат» могут предоставить ценную информацию также для изучения современных геологических процессов в крупных внутриконтинентальных водоемах и в прибрежных водах. Это утверждение касается учета и контроля таких динамических процессов, как поведение потока, перенос и отложение осадков поверхностными водами. Принесенный взвешенный осадок изменяет спектральные свойства воды. На поверхности воды и до определения глубин «тучи» и «хвосты» содержащегося в воде осадка отражают падающее световое излучение. Поэтому

воды, содержащие осаждаемые частицы, на черно-белых снимках «Лэндсат» всегда выделяются более светлыми серыми тонами по сравнению с темным серым тоном свободной от взвешенного осадка воды (ср. разд. 3.5).

Преимуществом при использовании снимков «Лэндсат» является и то, что МСС спутников «Лэндсат», как и ТМ, выдает снимки одной и той же области вод или побережья в различных диапазонах спектра. Как уже изложено в разд. 3.5, световое излучение может проникать в воду до определенной глубины и отражаться от находящихся в воде взвешенных частиц. Поэтому находящиеся в воде массы осадков и их пространственное распределение могут

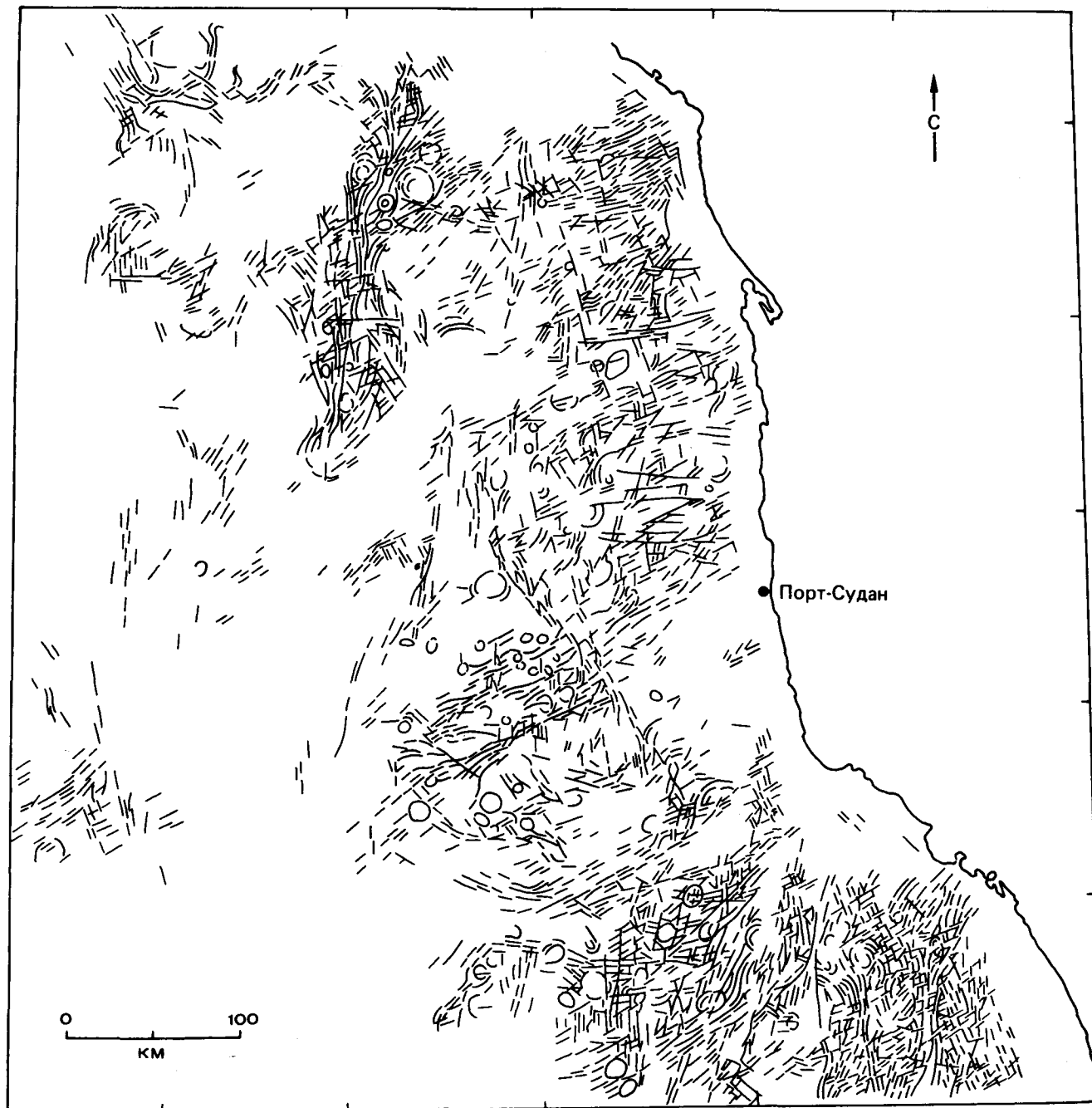


Рис. 198. Структурная карта кристаллического фундамента в области между Рас-Банасом и Рас-Абу-Ябисом, Судан.

улавливаться и фиксироваться на снимках МСС в каналах 4 и 5. Попадающее световое излучение в ИК-диапазоне, напротив, полностью поглощается водой. Поэтому на снимках каналов 6 и 7 лишённая осадочных частиц вода представлена черным тоном. Лишь весьма значительные концентрации осадков на поверхности воды уменьшают абсорбцию и отража-

ют в определенном объеме также ИК-излучение. Поэтому такие области проявляются на черно-белом снимке «Лэндсат» канала 6 или 7 более светлыми серыми тонами или светлыми синеватыми тонами в условном цвете. Напротив, границы воды и суши весьма четко отображаются даже в районах с весьма мелководным покрытием. Это становится ясно при

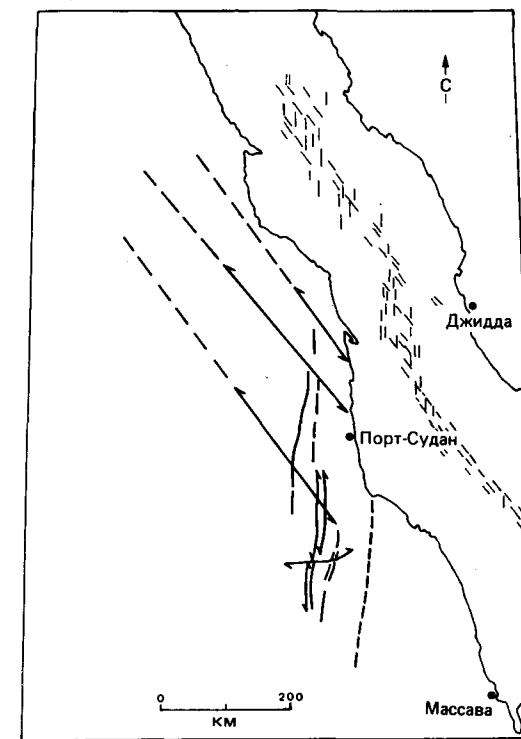


Рис. 199. Положение и ориентировка некоторых докембрийских зон скола и систем нарушений в фундаменте Судана и параллельно ориентированные третичные разрывные структуры в области центрального грабена Красного моря [275].

рассмотрении рис. 203а и 203б, показывающих один и тот же район побережья (внешние отмели, Северная Каролина) на снимке в каналах 5 и 7. На снимке канала 5 видны области с различной глубиной воды, желоба течений и области с различным содержанием осадков. На снимке канала 7 картируются границы воды и суши, которые на снимке канала 5 едва ли можно предполагать. Картирование только снимка канала 5 с неизбежностью привело бы к ложным интерпретациям.

На увеличенном фрагменте снимка «Лэндсат» восточной части Гельголандской бухты (около 1 : 500 000) присутствуют формы побережья в приливной зоне западного берега Шлезвиг-Гольштейна. На снимке канала 6 (рис. 204а) видны водный покров и границы воды и суши во время съемки (отлив). На одновременно снятом снимке в канале 5 (рис. 204б) морфологические формы приливной зоны отражены весьма дифференцированно. Здесь более темным серым тоном выделяются водные проходы и русла

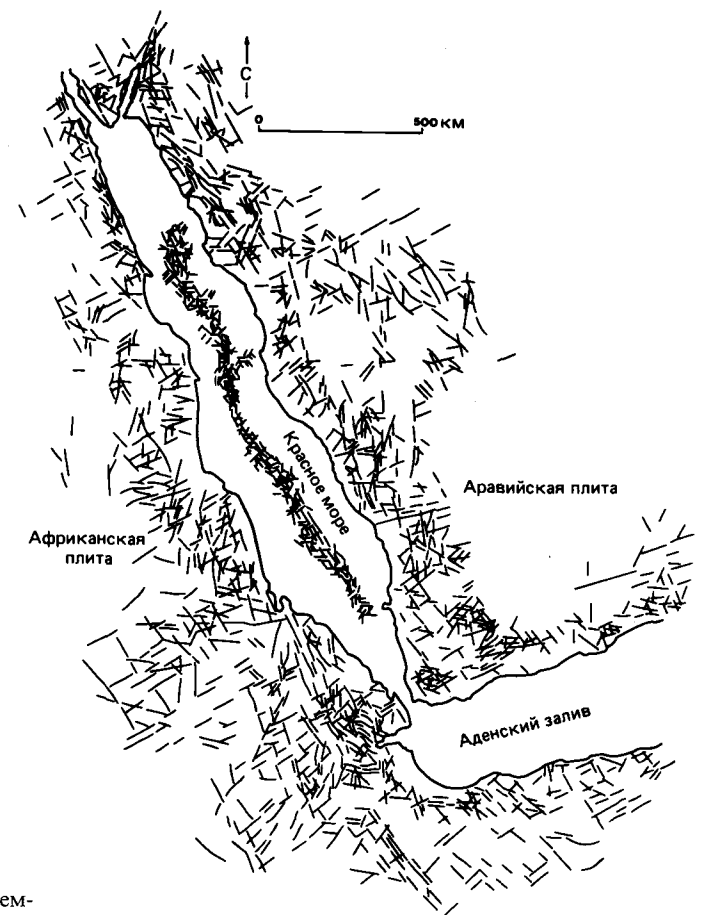


Рис. 200. Крупные разрывные структуры области Красного моря, откартированные по фотосхеме «Лэндсат» масштаба 1 : 2 000 000 [275].

маршевой низменности в районе прибрежной отмели на мелководных и возвышающихся над водой площадях. Южнее островов Зилт и Амрум и западнее Пельворма наблюдаются песчаные отложения, образовавшиеся вследствие переменного воздействия параллельных побережью приливных течений и течений отлива. В различных районах побережья распознаются также песчаные отмели.

Прёбер [237] изучал возможности применения снимков «Лэндсат» для картирования ваттов в охваченной рис. 204 области и установил, что распределение градиаций серого тона в зоне приливов и отливов и определенные типы ваттов довольно хорошо коррелируются. Через классификационные программы удалось представить в виде карты распределение сухих краевых песков, песчаных ваттов, илистых песков и ила. Однако высокое содержание воды в осадках ваттов вызвало определенные затруднения при классификации. На снимке канала 5, дающем возможность ознакомиться с мелководьем, выделяются более



Рис. 201а. Снимок «Лэндсат» области севернее Лос-Анджелеса: хорошо видны отдельные отрезки разломов Сан-Андреас и Гэрлок. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1090-18012).

темным серым тоном, прежде всего в прибрежных районах, области развития илстых песков. Области ваттов более светлого тона следует относить к песчаным ваттам, например район севернее и западнее острова Фёр. В остальном исследования Конечны (1980 г.) показали, что снимки областей ваттов в каналах 4 и 5 МСС, равно как 6 и 7, коррелируются более чем на 90%. Поэтому обработка более двух каналов «Лэндсат» не принесет дополнительной информации. На этом можно экономить машинное время. Колоух (1978 г.) сообщает об опыте классификации особенностей побережья в районе Гельголандской бухты.

Бина и др. [23] сообщают о результатах попыток

автоматической классификации и картирования крупных орографических структур и вариаций почвенных покровов в области коралловых рифов Филиппинского архипелага на основе данных «Лэндсат».

Снимки «Лэндсат» имеют значение для исследований как процессов течений и переноса, так и процессов отложения в устьях крупных рек. Это иллюстрируют рис. 205 и 206. Они показывают устья Евфрата и Тигра в Персидском заливе (каналы 5 и 7) и дельту Миссисипи (также каналы 5 и 7).

Перед устьем Миссисипи на снимке канала 5 (рис. 206а) своим светлым серым тоном выделяются мощные «тучи» осадков (ил и алевроит). Форма и распределение осадков в «туче» дают указание на

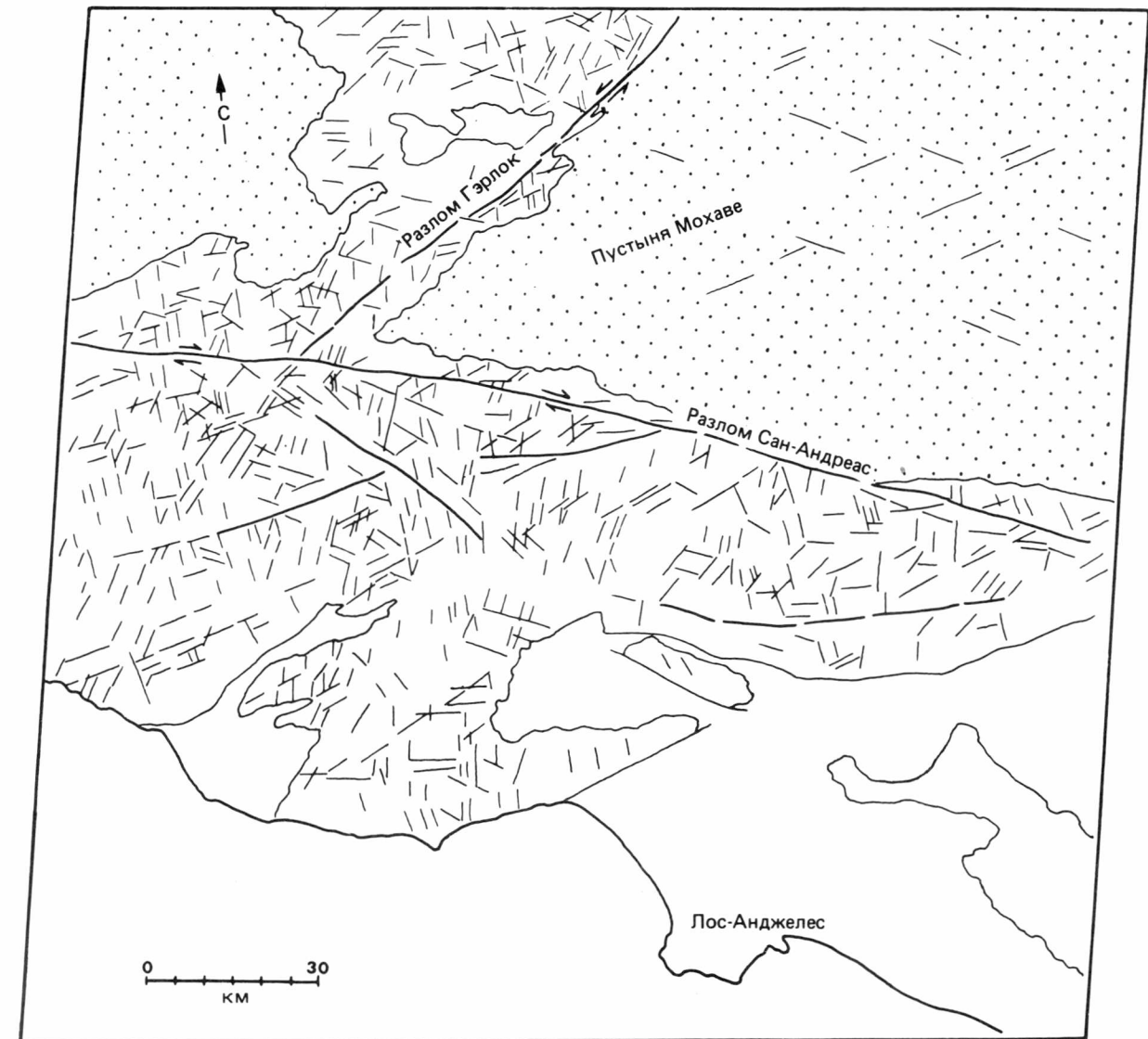


Рис. 201б. Крутые разрывные структуры, откартированные по снимку «Лэндсат», приведенному на рис. 201а.

процессы переноса, ведущие к наращиванию дельты в сторону моря. Снимок МСС в канале 7 (рис. 206б), на котором отражаются лишь приповерхностные концентрации осадков и приповерхностные области осаднения заново принесенных осадков, дает еще более дифференцированную картину района самого устья. Здесь отчетливо видны острова, песчаные отмели и бары по фронту дельты. Цепь островов в правой верхней части снимка возникла благодаря повторному нагромождению более древних дельтовых отложений волнами и течениями. Прибрежные равнины в тылу современной дельты типа «птичья лапа» сложены осадками прежней дельты.

Возможность постичь процессы течения, переноса

осадков и отложения их в прибрежных водах благодаря интерпретации снимков «Лэндсат» иллюстрируют рис. 207 и 208. Рис. 207 изображает район итальянского побережья Адриатики между Пезаро и Пескара. После периода поступления повышенного количества осадков и усиления стока дождевых вод стекающие с Апеннин реки обогащаются осадочным материалом. В прибрежной зоне отчетливо видны впадения рек и течения вод, несущих осадки. Изгибание «хвостов» осадков в юго-восточном направлении указывает на соответственным образом направленные и параллельные берегу течения в приповерхностных прибрежных водах. На снимке канала 5 (рис. 207б) места впадения рек и процессы перемещения или течения

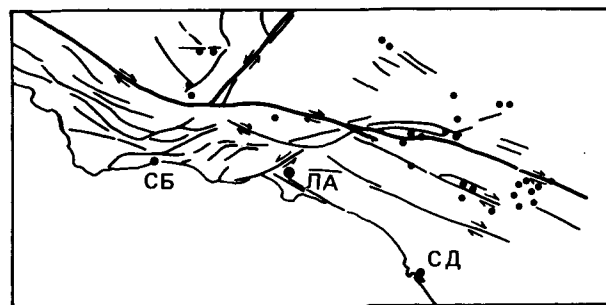
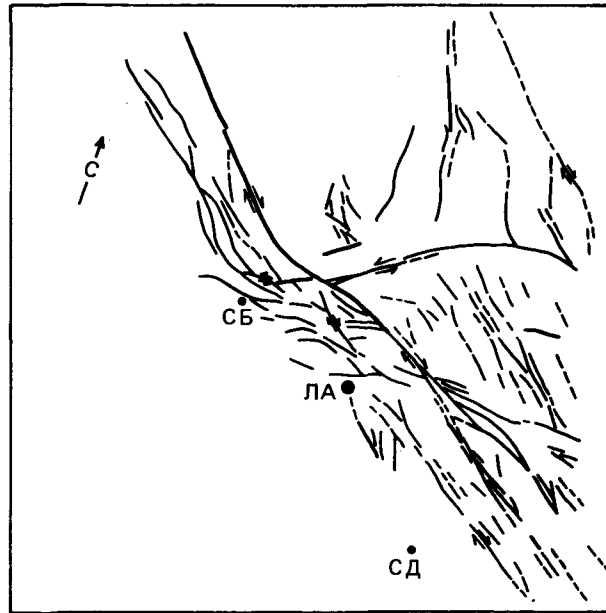


Рис. 202. Вверху – нарушения (жирные линии), по которым в период после 1838 г. проявлялись землетрясения, преимущественно с магнитудой 6–7. Внизу – тектоническая ситуация в южной Калифорнии в настоящее время характеризуется сжатием в дуге зоны нарушения Сан-Андреас северо-западнее Лос-Анджелеса. Местоположения новейших землетрясений обозначены точками. (По [6].) СБ – Санта-Барбара; ЛА – Лос-Анджелес; СД – Сан-Диего.

близповерхностных водных масс, транспортирующих осадки, отражены достаточно дифференцированно. Снимок канала 4 (рис. 207а) позволяет заглянуть и на некоторую глубину. На этом снимке вырисовываются различные процессы течения и распределения осадков в прибрежных и удаленных от берега районах, а также в более и менее глубоких прибрежных водах. В совокупности выделяется зона шириной 15–25 км, параллельная берегу, с осадками или взвешью и локальными выступами.

На рис. 208, а–208, г представлены моментальные снимки взаимоотношения и распределения осадков перед албанским побережьем севернее залива Влэн (дата съемки 16 октября 1972 г.). ИК-снимки каналов

7 и 6 (0,8–1,1 или 0,7–0,8 мкм) показывают места впадения рек, влекущих осадки, и распределение осадков на поверхности воды, причем бросаются в глаза различия в размере «туч» осадков или их «хвостов» на обоих снимках. Эти различия вызваны разницей в соотношении отражения и поглощения, которая зависит от длины волны. На снимке канала 6 намечается изменение течений, переносящих осадки, от прибрежного южного до северо-западного в более удаленных от берега районах. Соотношения течений и переноса или распределения осадков на снимке в канале 5 (0,6–0,7 мкм) еще отчетливее. Благодаря изменению серого тона в направлении к морю здесь наблюдается также уменьшение содержания осадков или опускание переносимых осадков на более значительную глубину, а северо-западнее залива также и расслоенность их распределения. Наконец, снимок канала 4 (0,5–0,6 мкм), позволяющий наблюдать самые глубокие уровни прибрежных вод, дает еще более дифференцированную информацию о содержании осадков на расстоянии около 35 км от побережья. Распознаваемые уже простым глазом на черно-белых стандартных отпечатках снимков «Лэндсат» особенности могут еще дифференцированней и контрастнее быть представлены с помощью разных методов обработки снимков (например, равноплотностный способ, цветокодирование). Подробные изложения возможностей использования снимков «Лэндсат» для изучения соотношения течений и переноса осадков в прибрежных районах и описание методов представления можно найти у Гирлоф-Эмдена [80], Дойча и др. [8], Кракнелла [6] и в «Manual of Remote Sensing» (1983).

6.4. Тепловые снимки

(Геологическое содержание изображения, примеры интерпретации.)

Съемки с помощью теплового сканера проводятся в рамках решения разнообразных геологических задач: для выявления геотермических аномалий и картирования различных литофациальных комплексов, при структурной съемке и изучении свойств почв и геологических особенностей залегающего близко от поверхности фундамента, для локализации выходов пресных вод в прибрежных зонах и для изучения процессов течения и смещения внутренних вод.

Понятна возможность применения тепловых сканеров в районах повышенных температур почвы и пород, проявляющихся, например, в вулканически активных областях. Здесь обычны излияния лавы, лавовые озера, шлаковые и пепловые конусы, выходы вулканического пара и фумарол и другие явления вулканической активности. С помощью радиометров проводились локальные замеры пород, лав и выходов вулканического пара. Не хватало возможности синхронной поверхностной или пространственной реги-

страции температур поверхности исследуемой области и возможности повторных площадных измерений температур, чтобы постичь изменения температурного режима во времени и пространстве и тем самым вместе с другими геологическими и геофизическими данными получить более полный обзор протекающих процессов. Иногда это может иметь значение для предсказания вулканического извержения.

На рис. 209 вверху показан панхроматический аэрофотоснимок района вершины Килауэа – одного из крупных стратовулканов острова Гавайи, приуроченных к рифтовой зоне и извергающих базальты. Кальдера имеет диаметр около 4 км. Ее дно сложено застывшей лавой, излившейся после 1954 г. Аэрофотоснимок сделан в 1962 г. На дне кратера, в левой части его кольцевой структуры, наблюдается кратер Халемаумау, который был активен в течение примерно 20 лет. Долгое время он был заполнен жидкой лавой. Однако к моменту съемки она застыла, по крайней мере сверху. В кратере видны кольцеобразные структуры обрушения. В правый нижний угол снимка попадает Килауэа-Ики – вулканический кратер, который во время грандиозного извержения в 1959 г. заполнился лавой. На левой стенке кратера Килауэа-Ики отмечаются паразитические кратеры: туфовые и шлаковые конусы, отчасти с пневматолитовыми изменениями и вулканическими налетами (светлые пятна на левом борту кратера). Килауэа возник в течение нескольких фаз извержений в 1959–1960 гг. Верхняя часть лавового озера (глубиной около 110 м) ко времени съемки уже застыла [15].

Тепловой снимок центральной части вулкана Килауэа (рис. 209, внизу) сделан 28 января 1962 г. с высоты 1800 м в 7 ч утра местного времени. Детектор ИК-сканера уловил излученный вулканической областью тепловой поток в интервале волн длиной 4,5–5,5 мкм. Светлоокрашенные части снимка отображают районы с высоким тепловым излучением. Темнее окрашенные участки снимка соответствуют районам с относительно низкими температурами поверхности. Следует при этом напомнить, что в диапазоне 4,5–5,5 мкм улавливаются лишь источники излучения весьма высоких собственных температур.

При рассмотрении теплового снимка сперва привлекают внимание светлые округлые участки в районах кратера Халемаумау и Килауэа-Ики. В первом случае светлый участок отвечает области жерла извержения в июле 1961 г., т. е. примерно за 6 месяцев до съемки. На ИК-изображении сканера вырисовывается застывшая на дне кратера, однако еще весьма горячая лава. По Фишеру и др. [15], на высоте примерно 1 м над дном кратера была замерена температура 100 К. О толщине лавовой корки ничего не сообщается. Извержение Халемаумау произошло в 1961 г. в том месте, где юго-западная рифтовая зона на Гавайях пересекает стенку кратера. На тепловом

снимке (внизу) сквозь овальное светлое пятно на дне кратера Килауэа-Ики вырисовывается пепловый конус извержения 1959 г. Лавовая корка на лавовом озере Килауэа-Ики, образующем дно кратера, по наблюдениям Фишера и др. ко времени съемки (1962 г.) имела мощность около 15 м. Расплавленная лава под коркой достигала температуры примерно 1065 К.

В центральной части снимка отдельными светлыми участками дугообразной или почти круглой формы вырисовываются более древние участки жерла и лавовый бассейн, возникшие в конце прошлого века. Криволинейные и более или менее вытянутые площади и полосы теплового снимка маркируют места выходов водяного пара и горячих газов, которые известны по маршрутным обследованиям, но никогда картографически в таком виде не представлялись. Следует упомянуть, что оригинал теплового снимка со своими ступенями серого тона выглядит намного дифференцированней, чем представленная в настоящем издании копия – оригинальное изображение предоставляет дополнительную информацию об относительных различиях поверхностных температур на дне кратера. Абсолютные поверхностные температуры и их изменения в заснятом районе можно было бы представить себе, если бы при съемке одновременно регистрировались показания эталонного излучения, а на дне кратера были проведены измерения температур отдельных представительных участков.

Публикация Фишера и др. [15], на которой базируются приведенные выше выводы, содержит другие примеры и данные тепловой съемки вулканов на Гавайях. Весьма активно интерпретацией тепловой съемки в областях действующих вулканов (в том числе – Этны, Сёртсей, Сент-Хеленс) занимался Фридман, посвятив этому ряд публикаций. Фридман с сотрудниками изучали также возможности количественной интерпретации данных тепловой съемки для измерения повышенного теплового потока в активных вулканических областях, в том числе на примере вулкана Сент-Хеленс (Friedman et al., 1970 [66], Friedman et al., 1969 [67, 68]). Рис. 210 дает сопоставление аэрофотоснимка и теплового снимка Этны (съемка 19 июня 1961 г., 14 ч 57 мин, высота полета 8100 м).

Аэрофотоснимок (диапазон съемки 0,51–0,68 мкм) показывает эффузивную деятельность вулканов: выходы газов, свежезлившиеся и изливающиеся лавы, движущиеся вниз по склону. Изображение теплового сканера (диапазон съемки 4,5–5,5 мкм) показывает тепловое излучение новых лавовых потоков, центрального и бокового кратеров, причем последний на аэрофотоснимке не выделяется. На тепловом снимке различаются активные и неактивные потоки. Поверхность неактивных потоков упрочнена (образование корки), так что тепловое излучение происходит прежде всего через трещины и фумаролы (по [70]).



а

Рис. 203а и 203б. Снимок «Лэндсат» побережья Северной Каролины (внешние отмели) в канале 5 (рис. а) и канале 7 (рис. б). Пояснения в тексте. Масштаб 1:1 000 000 (NASA, E-1637-15085).

Тепловой снимок на рис. 211 показывает места выходов горячих источников и газов, прогретые почвы в окрестностях этих мест в Йеллоустонском национальном парке в северной части Скалистых гор (время съемки 2 ч утра местного времени). От более холодных окружающих поверхностей термические аномалии отличаются светлыми серыми тонами. Даже вода небольшой речки теплее, чем окружающие площади суши, поскольку она также выделяется своим светлым тоном. На снимке в диапазоне 8–14 мкм ореол излучения сильных аномалий перекрывает смежные площади. Однако улавливаются и отражаются даже мелкие различия теплового излучения. На

снимке в диапазоне 4,5–5,5 мкм (рис. 211, внизу) термические аномалии существенно меньше. Здесь выделяются лишь собственно выходы высокотемпературных термальных вод и паров. Как уже упоминалось в разд. 4.3.2, пик излучения излучающего объекта (черные или серо-черные тела) смещается с повышением температуры в более коротковолновый диапазон. Таким образом, многозональная съемочная техника дает возможность получения в тепловом ИК-диапазоне различных съемочных данных и тем самым разной информации в частных диапазонах длин волн. На снимке в канале 4,5–5,5 мкм отражены лишь источники излучения с высокой собственной

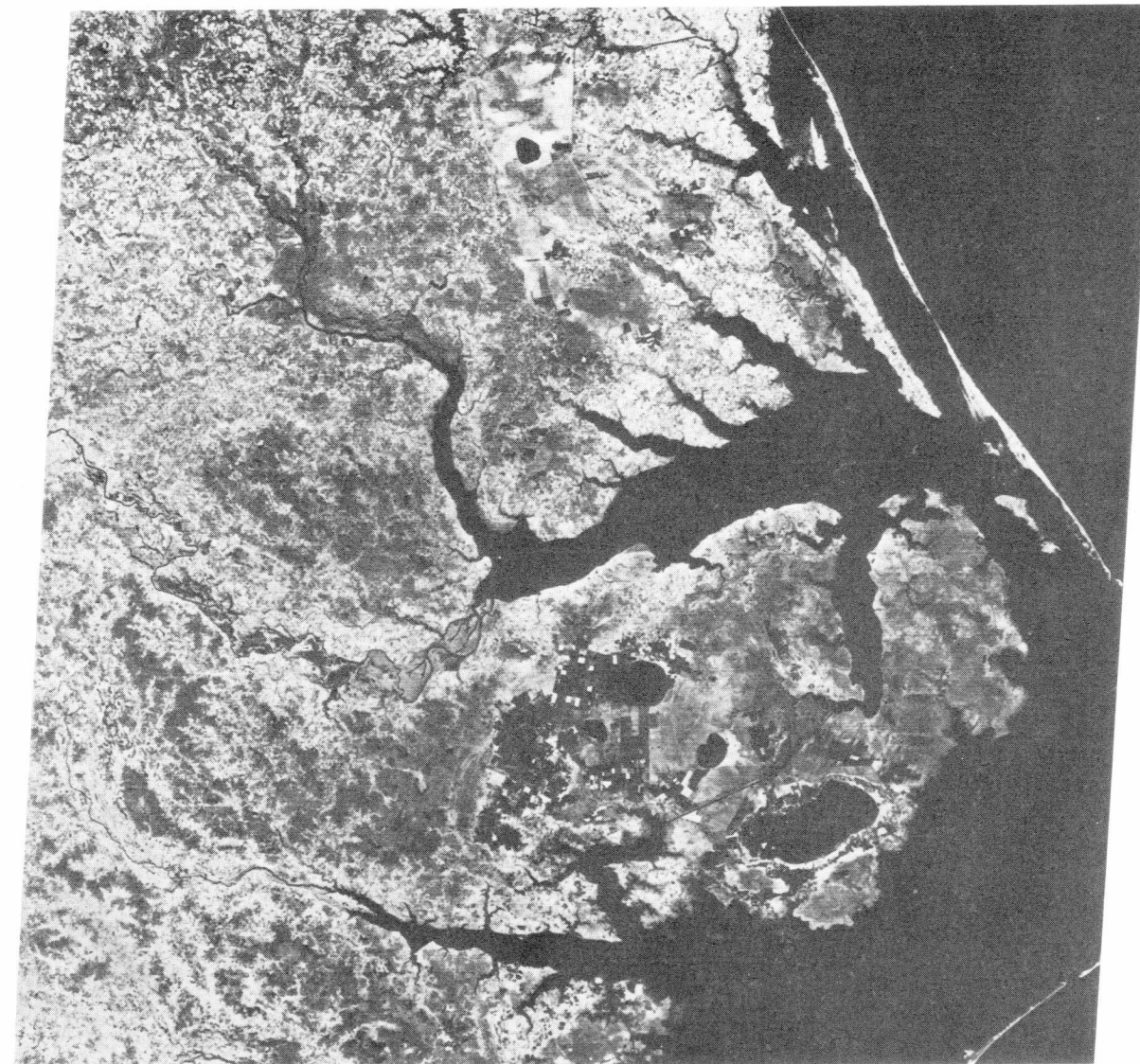


Рис. 203б.

температурой. Напротив, на снимке в канале 8–14 мкм (рис. 211, сверху) в районах термических аномалий в их окружении вырисовываются также более мелкие относительные различия поверхностных температур. Так, на рис. 211 (вверху) по средним и более темным ступеням серого тона распознаются области низкой поверхностной температуры (врезы долин, более мощные почвенные покровы, а также более влажные районы), которые на рис. 211 (внизу) совсем не выражены. Таким образом, при планировании тепловой съемки следует иметь в виду, что снимки в диапазоне от 4,5 до 5,5 мкм и от 8 до 14 мкм охватывают и представляют разные особенности

местности и объекты с разной температурой излучения.

В последнее время были снова изучены крупные геотермические аномалии с точки зрения их пригодности в качестве энергетических источников. В связи с этим в увеличенном объеме была проведена тепловая съемка. При благоприятных условиях съемки на ИК-изображении сканера удастся выявить некоторые экономически интересные геотермические аномалии. Рис. 212 показывает интересное с точки зрения экономики тепловое поле в юго-западной Исландии, где осевая зона Срединно-Атлантического хребта выходит на сушу [70]. Тепловое изображение было снято

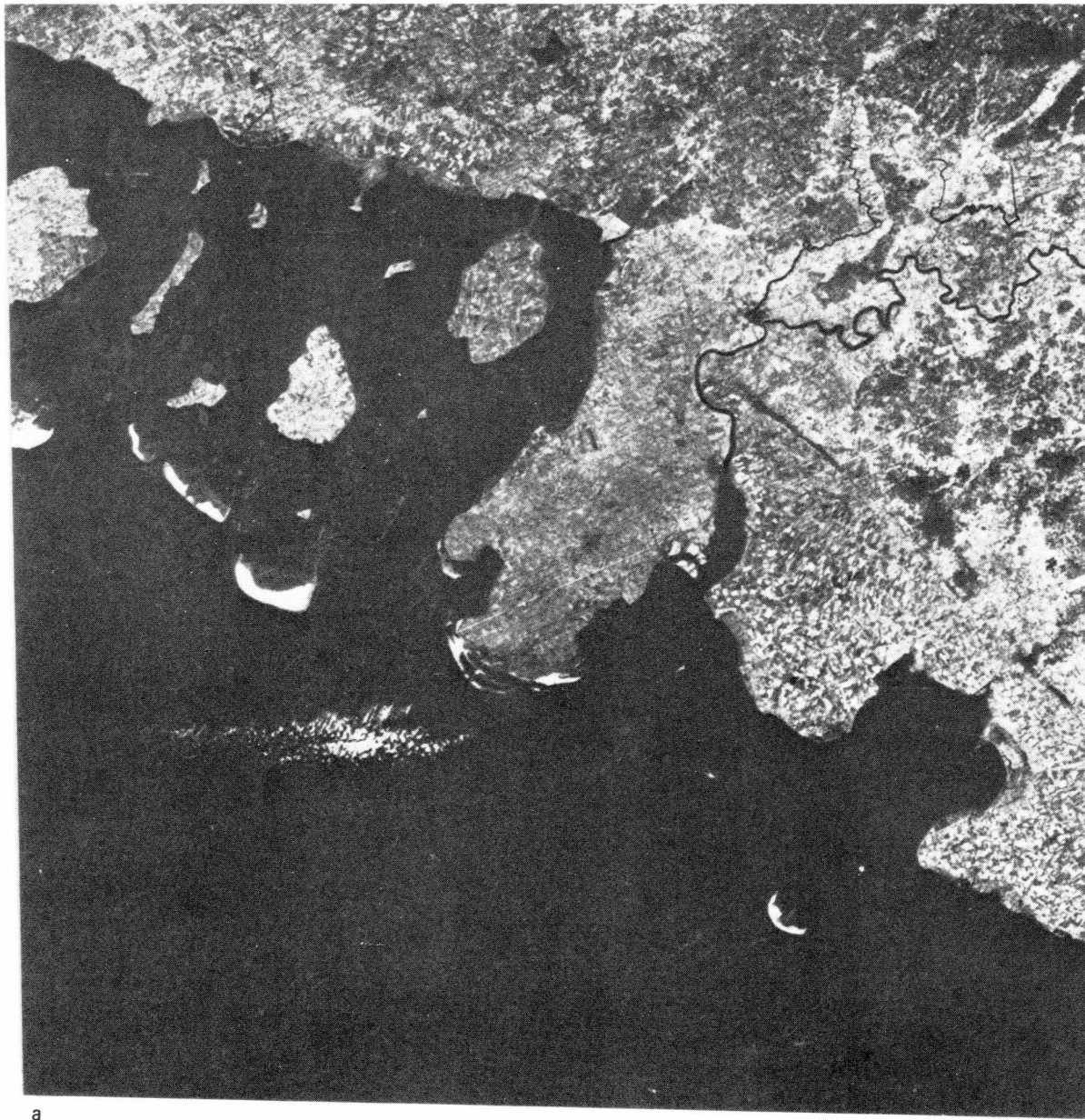


Рис. 204а и 204б. Формы побережья и прибрежные осадки в приливной зоне западного побережья Шлезвиг-Гольштейна на снимке «Лэндсат» в канале 6 (рис. а) и канале 5 (рис. б). Масштаб 1:1 000 000 (NASA, E-2274-06323).

20 августа 1966 г. с высоты примерно 3300 м в диапазоне 4,5–5,5 мкм. Сильные землетрясения и тектонические подвижки по нарушениям (на снимке распознается крупная зона нарушений с отчетливой термической аномалией) привели здесь в 1967 г. к усиленной тепловой активности на поверхности Земли. Именно в Исландии были начаты залеты с тепловым сканером с целью картирования и изучения тепловых полей. Площадное распространение и интенсивность

тепловой аномалии вместе с другими геофизическими данными дают представление об ожидаемом здесь энергетическом потенциале. Кроме того, на ИК-изображении сканера по положению и очертанию отраженной тепловой аномалии можно установить или предположить ее связь с тектоническими структурами на поверхности Земли. Подобная информация имеет огромное значение при выборе намечаемых разведочных скважин.

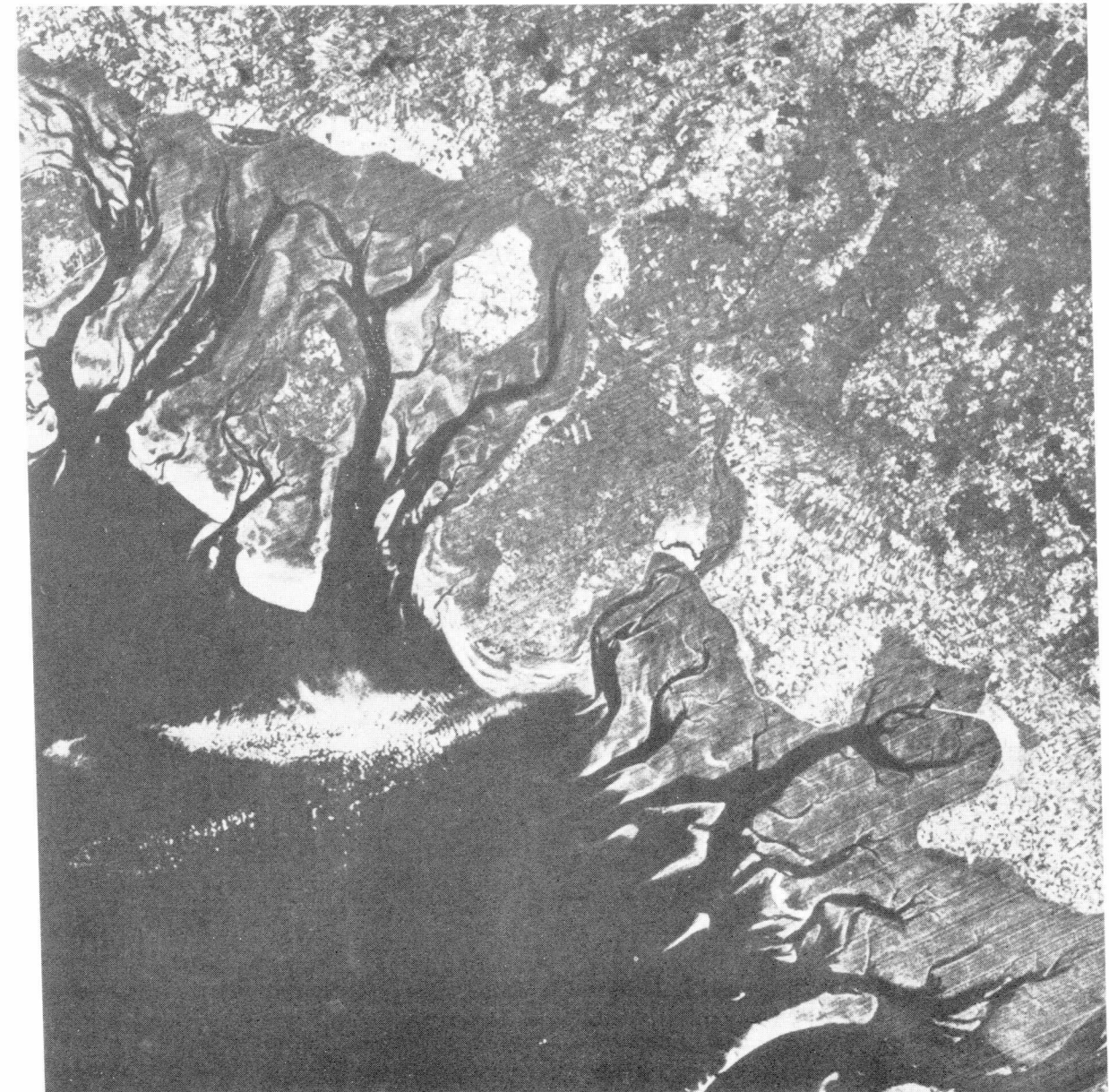
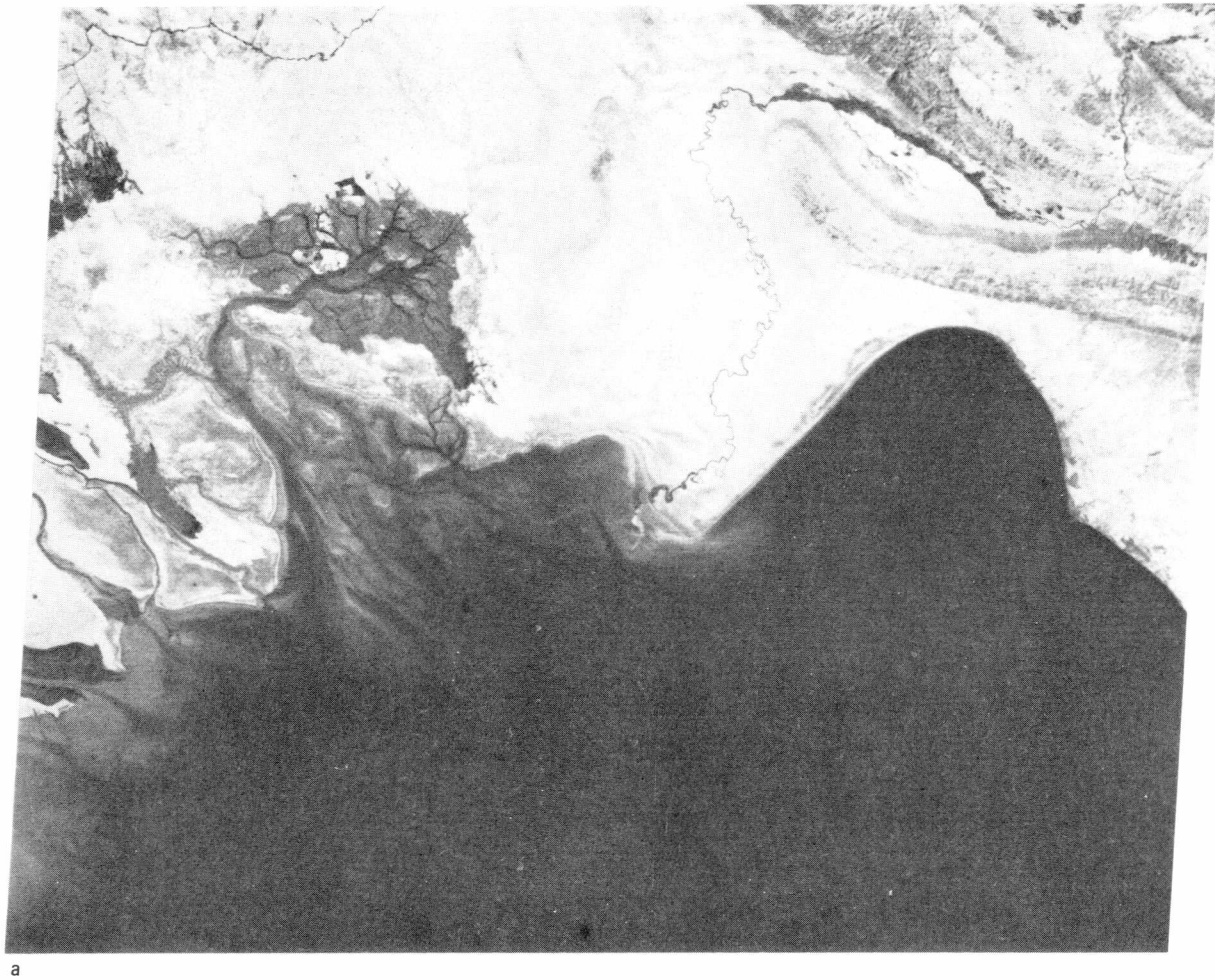


Рис. 204б.

Однако разведка экономически важных тепловых аномалий с помощью тепловых снимков часто проблематична и не всегда успешна. Это показали, например, исследования на модели района известной по разведочному бурению и полевым измерениям термической аномалии на острове Лесбос в Эгейском архипелаге [97]. В центре аномалии юго-восточнее местечка Полихнитос температура воды термального источника достигает 87 °С, а на некоторой глубине –

91,5 °С. Несомненные проявления геотермальной активности обнаруживаются на площади размером 150 × 150 м. Тепловые измерения в 26 скважинах на глубине между 50 и 150 м указывают на наличие термически аномальной зоны размерами примерно 1 × 3 км [100].

Рис. 213 показывает оригинал полосы теплового изображения, а рис. 214 – его увеличенный фрагмент. Различные поверхностные температуры объектов



а

Рис. 205а и 205б. Седиментация и прибрежные формы в районе устьев Евфрата и Тигра на снимке «Лэндсат» в канале 5 (рис. а) и канале 7 (рис. б). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-2274-16023).

местности (воды, почвы, растений, дорог, каменных стен, строений) во время съемки отражаются на тепловом снимке разными градациями серого тона. Области выхода термальных вод (слева на середине снимка, близ темных зданий) и ручей, в который стекают термальные воды, выделяются из своего окружения почти белыми тонами. При этом ореол излучения тепла перекрывает на изображении ближайшие участки в такой степени, что точное положение мест выхода терм на тепловом снимке нельзя установить. Сходный эффект можно было видеть уже на полосе изображения Йеллоустонского национального парка на рис. 211. Однако благодаря дополнительной съемке в диапазоне 4,5–5,5 мкм там удалось разделить расположение весьма высоких поверхностных температур. На тепловом снимке на рис. 213 или 214 бросается в глаза, что слева ниже термальных источников выступает несколько обширных, почти белых пятен, которые имеют незаконо-

мерные ограничения, однако резко отделяются от своего окружения. Это пруды, обнаруживающие почти ту же тональность, что и термальные источники, хотя температура их воды ко времени съемки была около 10 °С, т.е. почти на 70 К ниже, чем температура термальных вод. Причина этого слабо дифференцированного отражения температурных различий лежит в ограниченности фотографической широты пленки, использованной для регистрации данных излучения. В настоящее время принимаемая детектором теплового сканера интенсивность излучения записывается почти исключительно на магнитную ленту, чтобы иметь возможность оптимально использовать всю динамическую зону теплового сканера для последующего представления изображения и для его интерпретации оптимальным образом [227]. Если бы при съемке были замерены калибровочные данные для сканера и на поверхности Земли, то были бы возможны количественные определения записанных на магнитную

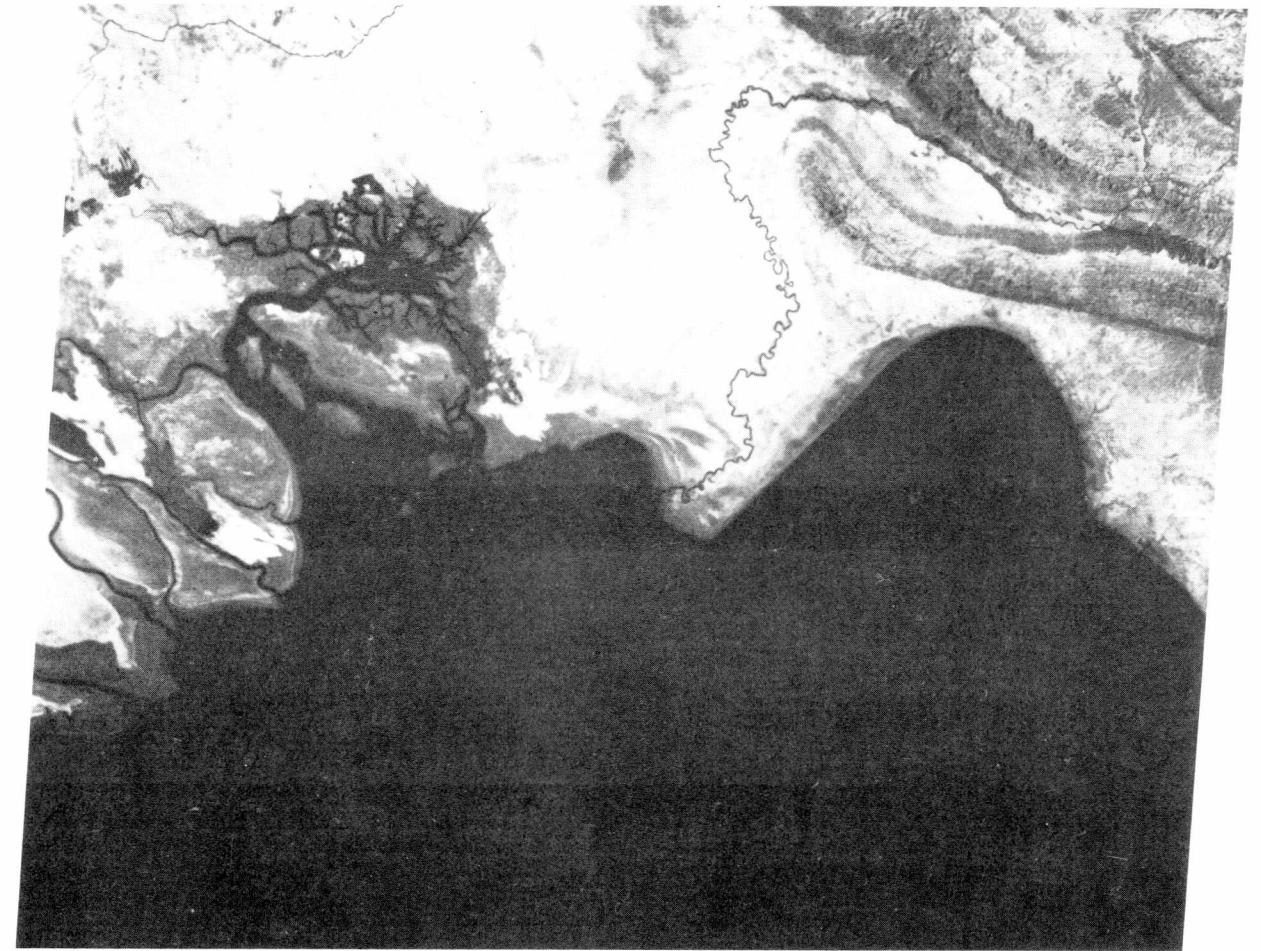


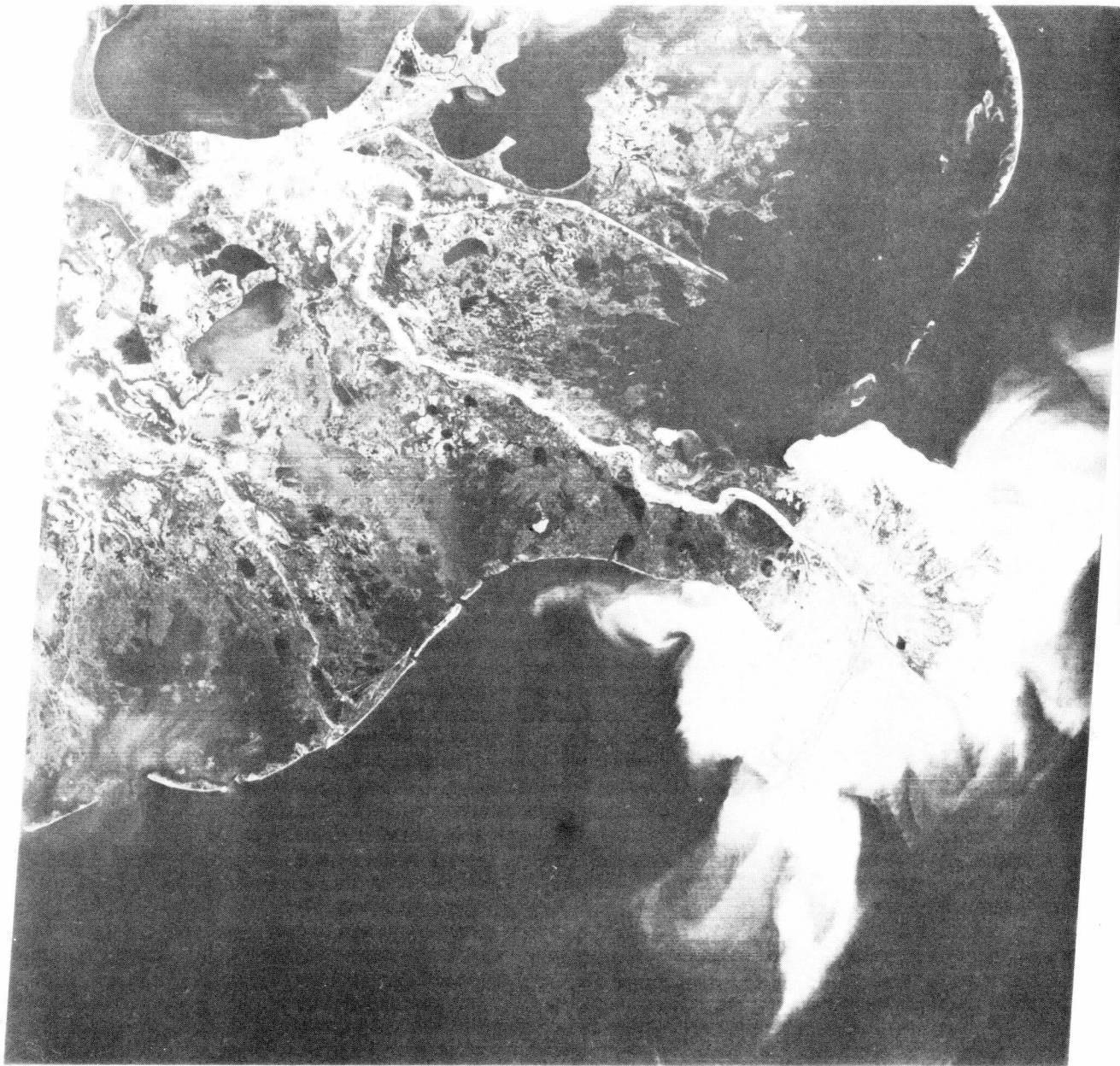
Рис. 205б.

ленту поверхностных температур объектов территории, а в случае выраженных геотермических аномалий – количественные характеристики теплового потока [67].

Светлый серый тон в области терм и в разветвлении обоих ручьев также обусловлен прогревом почвы снизу. Для центральной части аномалии по результатам зондирования почвы и радиометрическим замерам ИК-излучения на поверхности почвы в ходе различных по длительности периодов измерений по профилю длиной 170–200 м всегда получались повышенные температуры почвы в сравнении с окружением [97]. По радиометрическим измерениям примерно в 7 м от термального источника поверхностная температура почв в среднем за день на 4 К выше, чем в смежных термически нейтральных областях. Это способствует повышению теплового потока в 530 раз. Следует упомянуть, что дифференциация температур, т.е. обнаруженный при поисках геотермических ано-

малий контраст температур поверхности почвы между термически аномальными и нейтральными областями, в период проведения замеров в марте 1973 г. днем и ночью оставалась практически одинаковой. Несмотря на это, предпочтительнее тепловая съемка в ночное время (перед восходом солнца), поскольку в этом случае помехи замеров, возникающие вследствие солнечного излучения, имеют наименьшее значение.

Облет рассматриваемой области Полихнитос имел место 22.03.1973 между 5 и 6 ч утра, перед восходом солнца, долготными залетами во вполне благоприятной обстановке – небо ясное, почти штиль. В дни перед залетом дождей почти не было. Съемка проводилась с использованием теплового сканера типа “Supercyklop” в канале 8–14 мкм (самолет и сканер IGN). Аэросъемочный маршрут проходил на высоте 600 м, а повторный – на высоте 800 м. Сканерные данные не тарировались, однако в ходе проведе-



а
Рис. 206а и 206б. Седиментация в районе дельты Миссисипи на снимке «Лэндсат» в канале 5 (рис. а) и канале 7 (рис. б). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1177-16023).

ния маршрута были проведены радиометрические замеры представительных наземных точек для увязки ступеней серого цвета на тепловом изображении с температурами.

Опыт съемки площади Полихнитос показал, что различия поверхностных температур в заснятой области, обусловленные различными термическими свойствами вещества поверхности и параметрами окружающей среды (в том числе: влажностью почвы,

наличием или отсутствием растительности, видом, плотностью и высотой растительности уклонами склонов, топографическим положением), столь велики, что они могут перекрывать эффект повышенного теплового потока в районе геотермической аномалии.

Чтобы показать проявления разницы в тепловых свойствах объектов местности и некоторых параметров окружающей среды и чтобы продемонстрировать изображение соотношений местности на тепловом

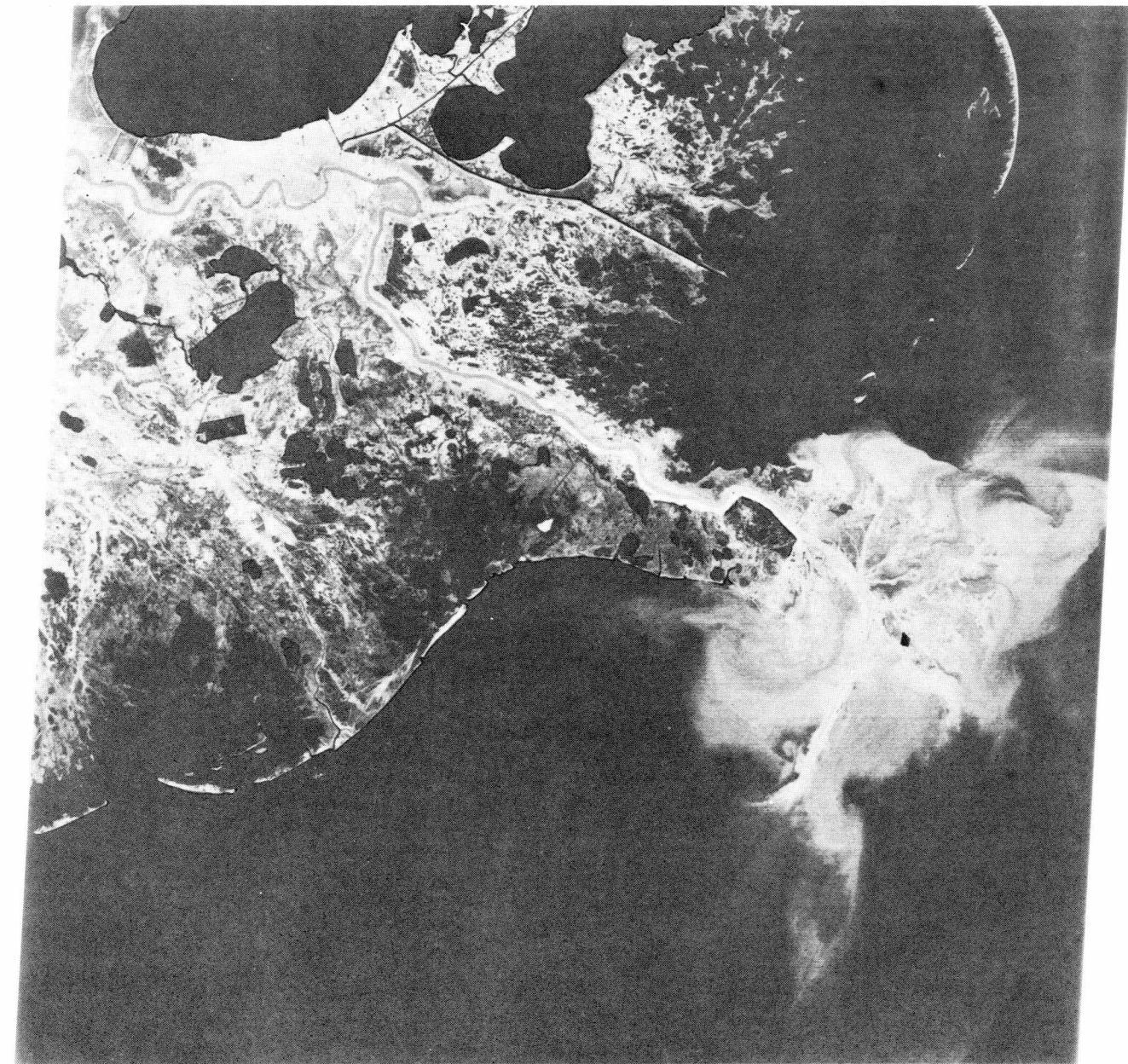
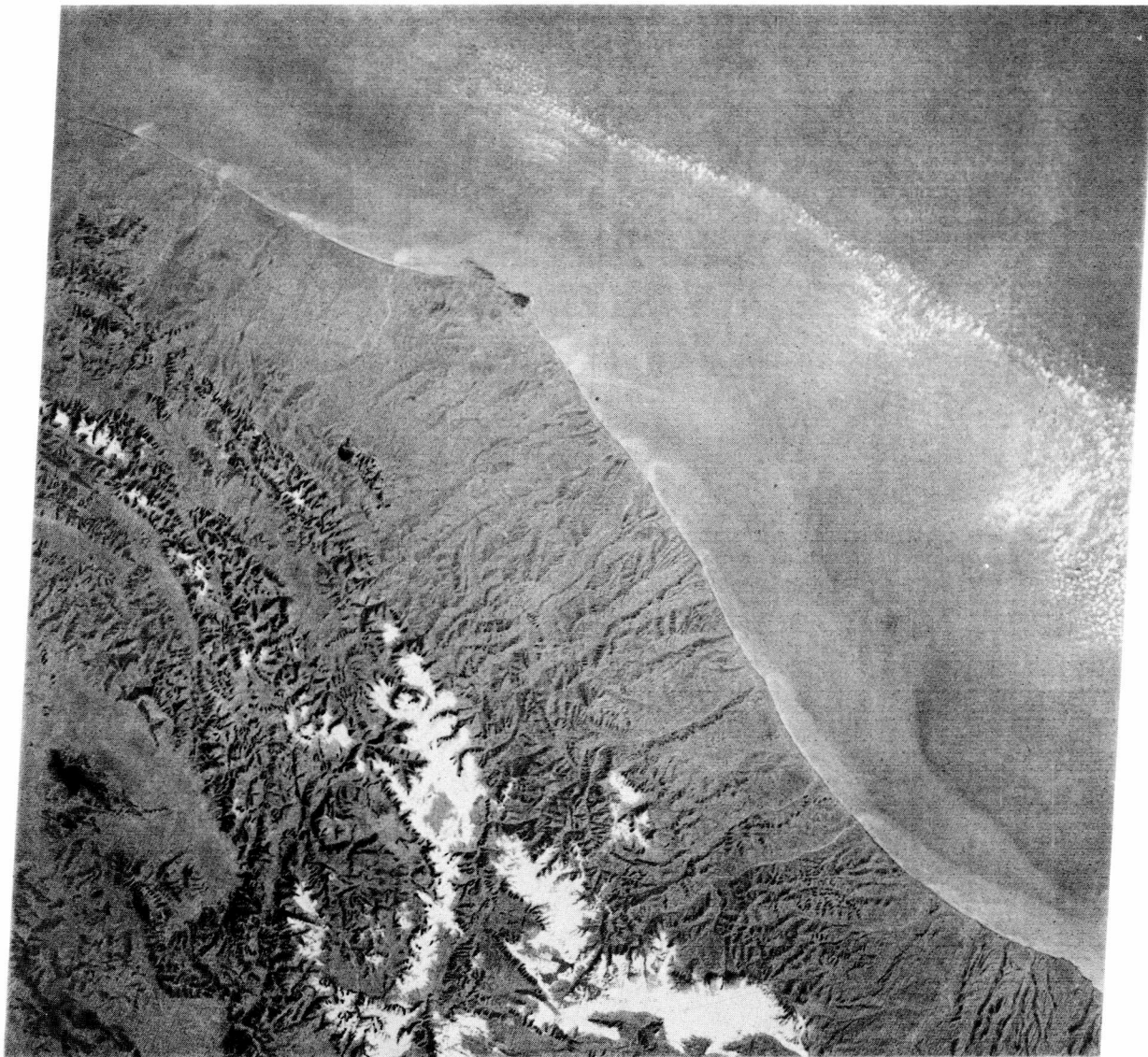


Рис. 206б.

снимке, на рис. 214 и 215 даны в сопоставлении тепловой снимок и панхроматический фотографический снимок района аномалии и его обрамления.

На рис. 215 ниже середины снимка видны корпуса бань, которые на тепловом снимке расположены выше термальных источников. Они выделяются на изображении теплового сканера темным серым тоном, поскольку их крыши ко времени залета были холоднее, чем окружающие объекты. Перед корпусами течет

ручей (на рис. 215 слева направо), в который стекают термальные воды. Лишенные растительности светлые области слева от разветвления ручья маркируют выходы источников и их обрамление. Справа за банями наряду с кипарисом видны две большие сосны, которые на ИК-изображении сканера справа выше терм выражены как два округлых пятна благодаря их явно более высокой собственной температуре. Распознаваемые на заднем плане деревья (большой частью



а

Рис. 207а и 207б. Перенос и отложение осадков вдоль итальянского побережья Адриатики на снимке «Лэндсат» в канале 4 (рис. а) и канале 5 (рис. б). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1198-09230).

оливы) являются причиной светлого пятнистого рисунка в верхней части теплового изображения. Поля и луга, расположенные в долине и на смежных, полого поднимающихся участках, ко времени съемочных залетов отчасти были лишены растительности, отчасти же их покрывала низкая или редкая растительность (трава, пшеница и прочее). Открытые участки почвы за ночь сильно охладились. Они выражаются на изображении сканера весьма темными серыми тонами. Заросшие площади в совокупности отражаются несколько более светлыми серыми тонами, поскольку за ночь они меньше остыли. Видимые на рис. 215 каменные ограды сильно охладились в течение ночи;

соответственно они проявляются на изображении теплового сканера в виде темных линий. Напротив, вода протекающего в углублении ручья выделяется весьма светлым серым тоном, поскольку она теплее окружающей почвы и воздуха.

Площадь серого тона средней интенсивности, находящаяся ниже терм или под ручьем, проходящим ниже центра снимка на рис. 214, на которой видны линии темного серого тона каменных стен, соответствует площади переднего плана рис. 215. Эта пологая площадь поросла терновником высотой около 50 см. На участке средней серой тональности на тепловом снимке видны многочисленные темные пят-



Рис. 207б.

на незакономерной конфигурации. По наблюдениям на местности — это лишённые растительности участки почвы. Они выделяются на тепловом изображении темным серым тоном, так как в течение ночи могли отдать больше тепла, чем поросшие терновником покатые склоны. Поэтому заросшие площади перед утренними сумерками были сравнительно теплее, чем открытые участки почвы.

Исходя из опыта исследования области Полихитос, качественная интерпретация данных теплового сканирования без контрольных данных по замерам и наблюдениям ко времени аэросъёмочного маршрута, а в известном случае и до того, невозможна. Интер-

претация сканерного ИК-изображения проблематична даже тогда, когда меняющиеся поверхностные свойства смежных площадей (тип и влажность почвы, неровность поверхности, растительность) вызывают колебания температуры. Равным образом и различия топографического положения или сам рельеф местности могут создать эффект довольно сильно повышенного теплового потока, который, как в изученной области, наложится на основную картину, и это может привести к ошибочной интерпретации. Не представляет проблемы точная локализация термальных источников. Напротив, очень сложно (прежде всего в районах с почвенным и растительным покровом)

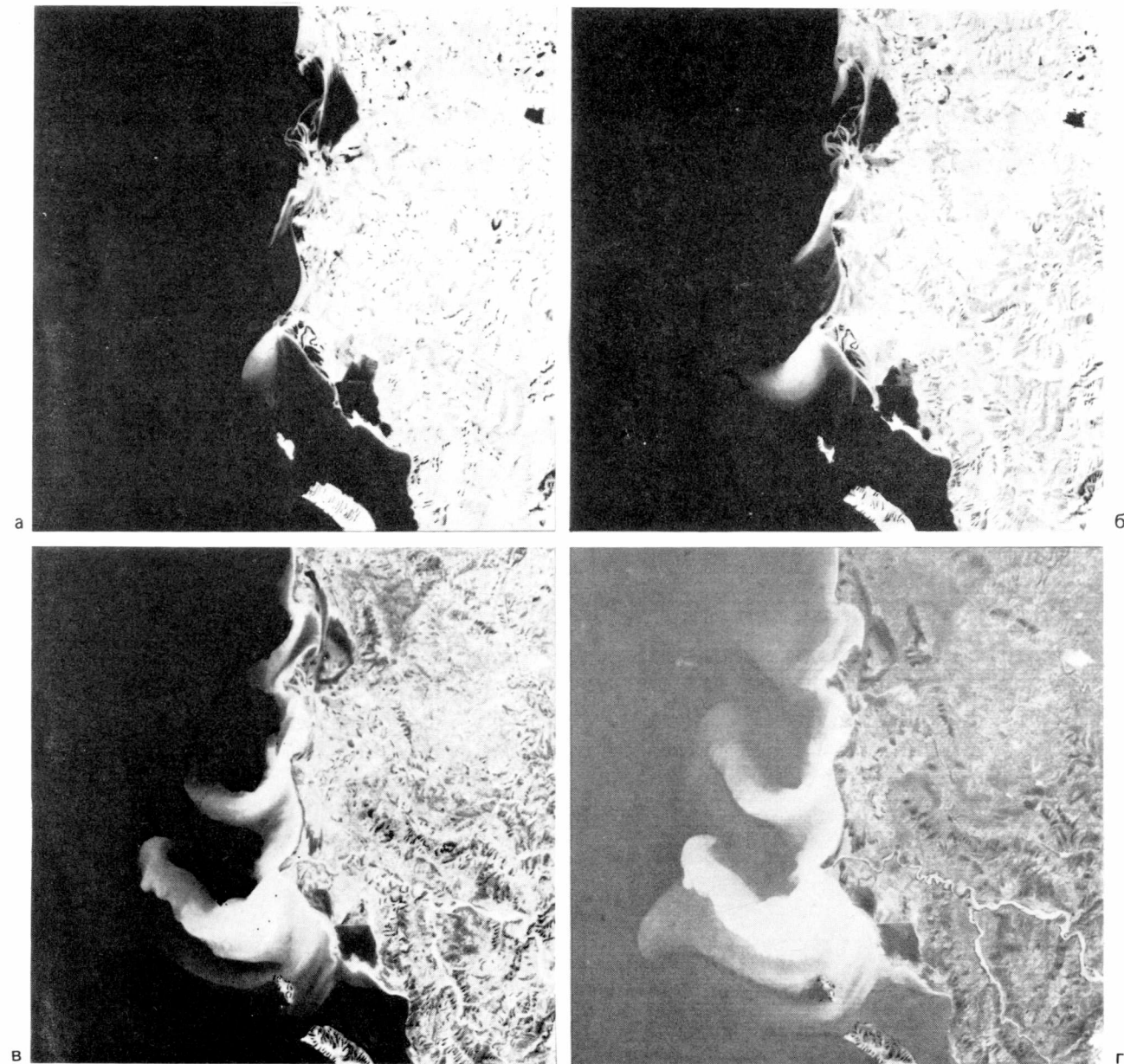


Рис. 208. Перенос осадков у албанского побережья Адриатики на четырех узкозональных снимках «Лэндсат» МСС: в канале 7 (а), канале 6 (б), канале 5 (в) и канале 4 (г). Масштаб около 1:1 000 000 (NASA, E-1085-08543).

выделить площадь геотермической аномалии как температурную аномалию поверхности рельефа на тепловом сканерном изображении. Поэтому пригодность тепловой съемки для поисков геотермических аномалий вопреки многочисленным высказываниям следует воспринимать с осторожностью. Наоборот, надежные данные о наличии и протяжении геотермической аномалии на местности дают измерения интенсивности излучения ИК-радиометром, проведенные по трассам и по сетке. Эти измерения легки для

проведения и недороги. Они дают количественные данные, которые необходимы для расчетов на модели (ср. [97]). Опыт комбинированного применения аэрофотоснимков и тепловых снимков при изучении геотермических явлений в аномальном поле Мексики описан Валле и др. [301].

При картировании литологических комплексов залеты с тепловым сканером применяются реже, чем обычные методы, и, как правило, лишь для прояснения частных локальных вопросов. В качестве примера

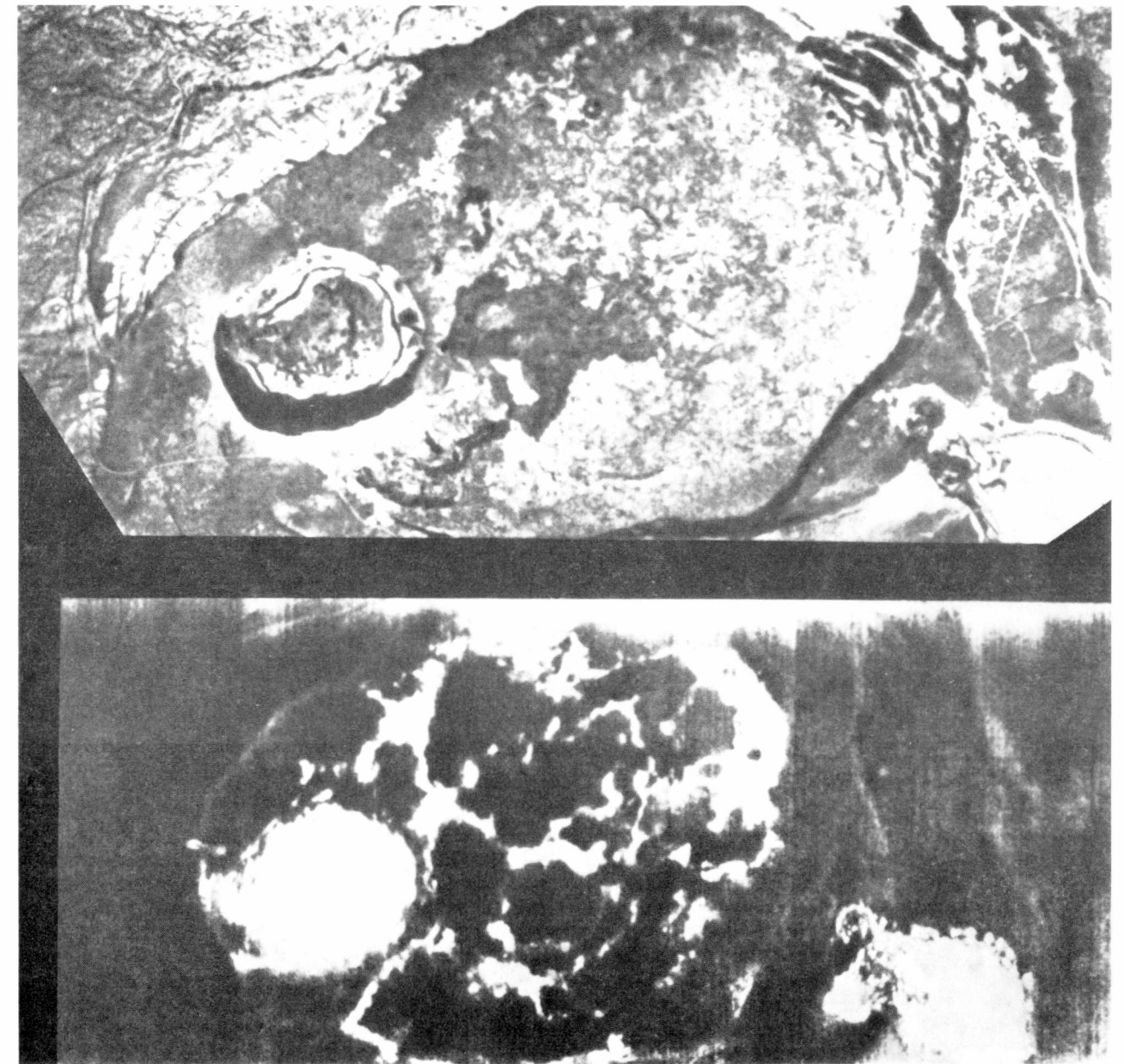


Рис. 209. Панхроматический аэрофотоснимок вершинной области Килауэа (вверху) и тепловой снимок той же области (внизу). Диапазон съемки теплового сканера 4,5–5,5 мкм. Пояснения в тексте [15].

можно привести разделение доломитов и известняков, которое на панхроматических аэрофотоснимках, равно как и на многозональных снимках, можно видеть далеко не всегда, а большей частью просто невозможно. Роуэн и др. [258, 259] установили при рекогносцировочных облетах гор Арбакл, шт. Оклахома, что можно разделить выходы доломитовых и известняковых комплексов по изображениям, полученным с помощью ИК-сканера перед восходом солнца. В это время доломиты исследованной области

были чуть теплее, чем известняки, поэтому они излучали тепло сильнее и выделились на изображении сканера светлым серым тоном (рис. 216, вверху). Наоборот, более холодные выходы известняков отображаются более темными серыми тонами. По Роуэну и др., малое альbedo (вследствие выветривания поверхности доломитов) и повышенная термальная инерция (благодаря составу пород) обуславливают сравнительно более высокую температуру поверхности доломитов на протяжении ночи. На предполо-

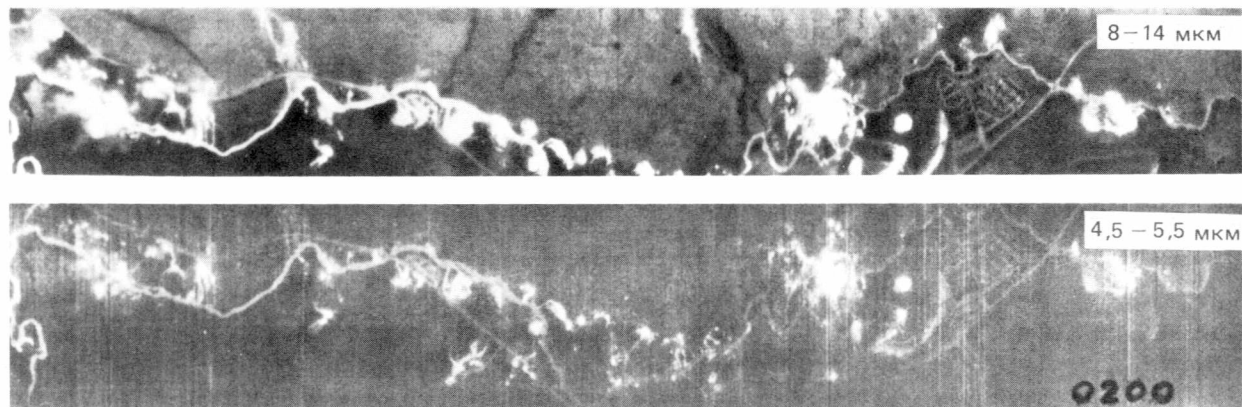


Рис. 210. Аэрофотоснимок (а) и тепловой снимок (б) Этны, Сицилия. Пояснения в тексте [70].

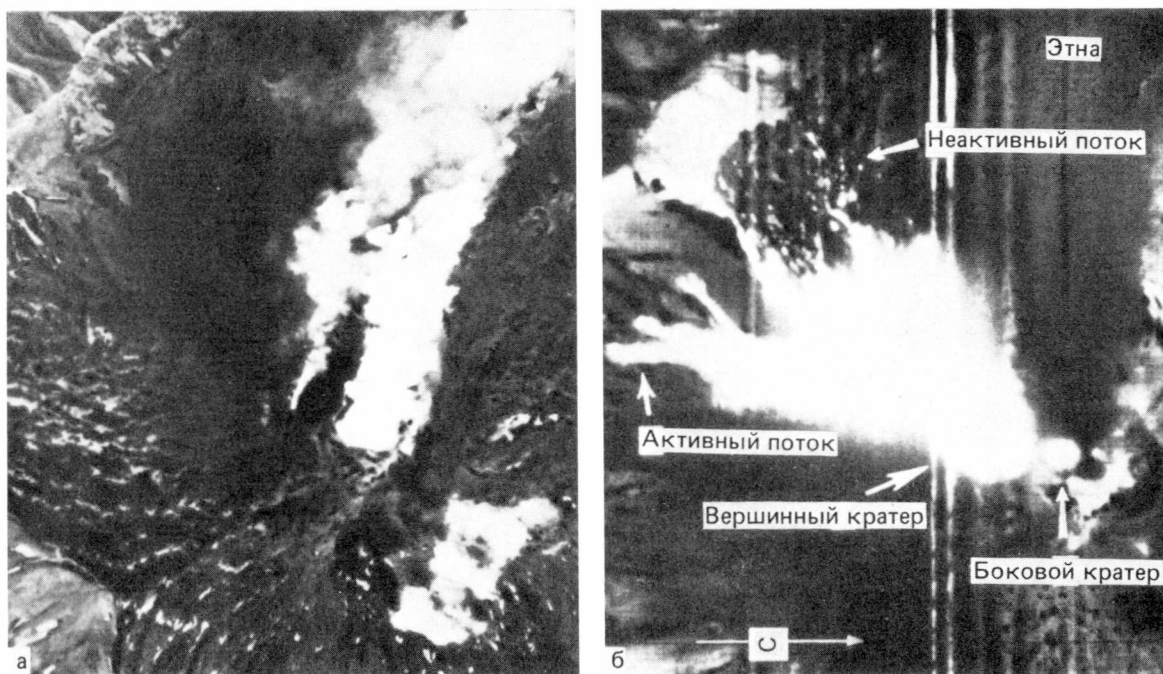


Рис. 211. Места выходов горячих вод, газов и прогретых почв в окрестностях источников в Йеллоустонском национальном парке, США, на тепловых снимках. Снимок в диапазоне 4,5–5,5 мкм (внизу) улавливает и соответственно отображает лишь объекты или площади с высокой собственной температурой. Обратите внимание на различное отражение одних и тех же участков местности на полосах изображений в двух разных диапазонах теплового ИК-излучения. Дальнейшие пояснения в тексте (снимок Геологической службы США).

денном снимке (11 ч местного времени) доломиты и известняки уже неразличимы (рис. 216, внизу). Днем оба параметра воздействуют друг на друга: более высокая термальная инерция удерживает температуру доломита ниже, а более низкое альbedo вызывает повышение его температуры на протяжении всего дня. Поэтому разница температур доломитов и известняков недостаточна для разделения этих типов пород. По Роуэну и др., максимальный температурный контраст различных типов пород можно ожидать

на ночном изображении ИК-сканера, если эти породы обнаружат сочетание максимальных различий альbedo и термальной инерции (в предположении, что более низкое альbedo сочетается с более высокой термальной инерцией). Если же, напротив, сочетаются высокое (или низкое) альbedo и высокая (или низкая) термальная инерция, то можно ожидать проявления максимального контраста между двумя комплексами пород на изображениях дневных залетов, полученных с помощью ИК-сканера. Однако при

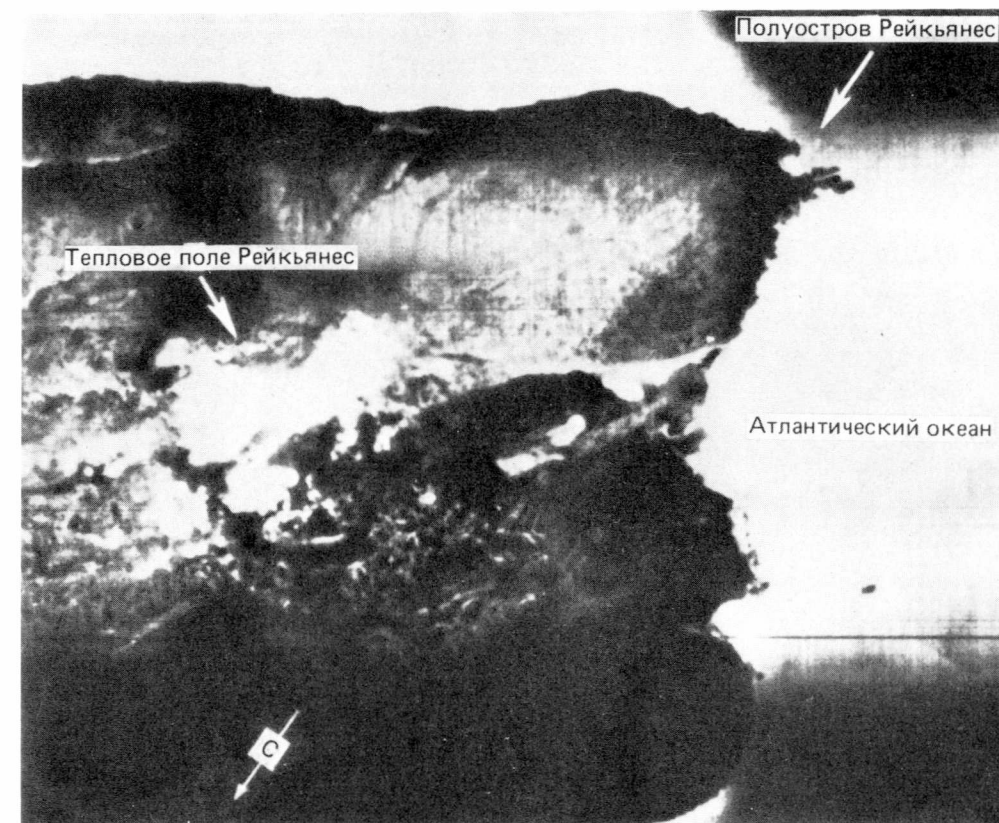


Рис. 212. Тепловой снимок полуострова Рейкьянес, Исландия. Диапазон съемки 4,5–5,5 мкм. Пояснения в тексте [70].

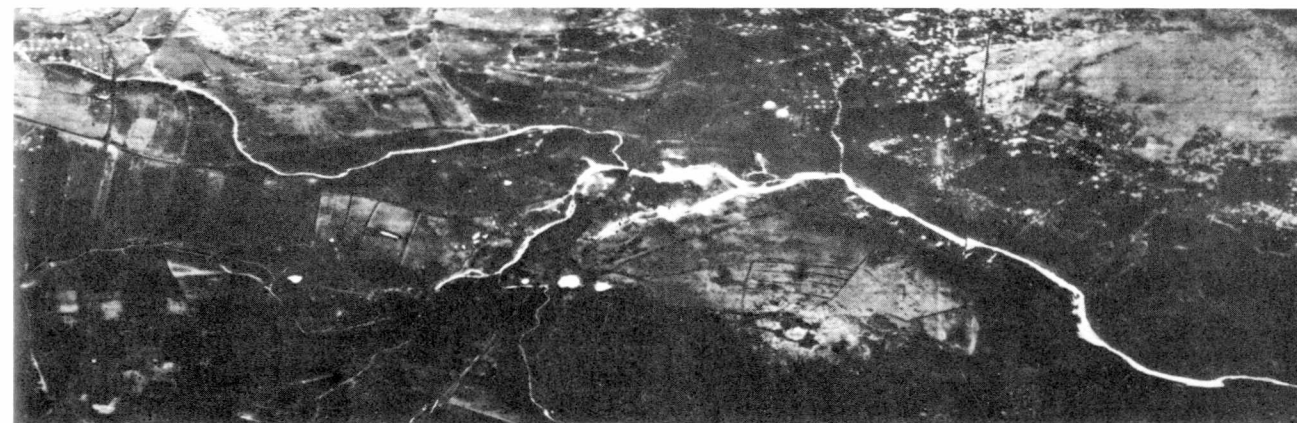


Рис. 213. Полоса оригинального изображения тепловой съемки геотермической аномалии Полихнитос, остров Лесбос. Диапазон съемки 8–14 мкм. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:170 000 (снимок IGN).

этом в качестве предпосылки требуется, чтобы топографические эффекты не перекрывали проявления температурной разницы поведения пород.

На дневных снимках и прежде всего на снимках утренних и предполуденных часов топографический рельеф выступает в более контрастном виде, поскольку

ку обращенные к солнцу и отвращенные от него поверхности получают либо больше, либо меньше солнечного излучения и в соответствии с этим по-разному прогреваются. В зависимости от своих поверхностных температур обращенные к солнцу склоны выражаются на сканерном изображении светлыми, а

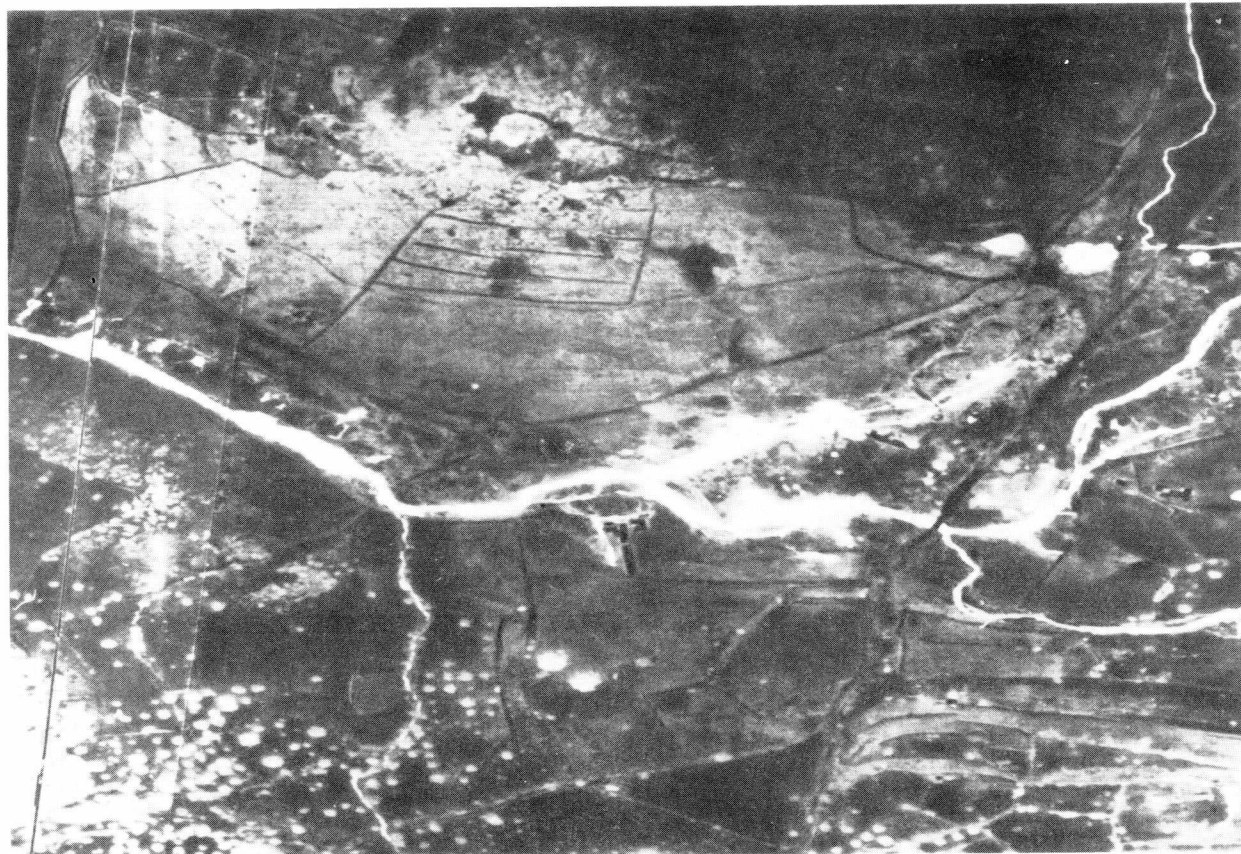


Рис. 214. Увеличенный фрагмент полосы изображения рис. 213. Масштаб около 1:55 000.

отвращенные от солнца – темными серыми тонами («тепловые тени» – по-английски thermal shading). Этот эффект, подчеркивающий рельеф, становится явным уже при сравнении снимков теплового сканирования рис. 217, на которых изображен пологоволнистый ландшафт с превышениями высот порядка 30 м. На предполуденном снимке видны детали слоистости и структурного строения, которые на снимке перед восходом солнца не отражены или лишь намечены. На утренних снимках ландшафтов с весьма пологим рельефом «тепловые тени» выделяют даже небольшие различия рельефа ландшафтных или структурных зон, которые на условиях аэрофотоснимках часто не распознаются. Оффилд [223] сообщает об аналогичном опыте структурного картирования утренних снимков в форланде Скалистых гор у Денвера.

Используя различимость комплексов пород на тепловых снимках местности с умеренным рельефом (с превышением до 60 м), Роуэн и др. [258] в своих исследованиях показали, что на дневных снимках детали слоистости на обращенных к солнцу склонах выражаются более четко (ср. рис. 217). Изображения ИК-сканера, полученные при съемке утром и в раннее послеполуденное время, обнаруживают отчетливые

различия в отображении топографических и геологических деталей. Последние четко видны на предполуденном снимке (11 ч местного времени). На снимке в середине дня (14 ч местного времени), напротив, распределение серых тонов определяется скорее различными поверхностными температурами крупных топографических форм – «тепловой тенью» на ИК-изображении сканера. Таким образом, топографические тепловые эффекты зависят от времени дня. Впрочем, от дневного времени, или времени съемки, зависит также отображение на тепловом снимке крутых трещин и нарушений, прежде всего если линии выхода разрывных нарушений подчеркнуты расчлененным рельефом местности благодаря процессам эрозии.

Интересным и имеющим большое значение для геологической практики является тот опыт, что на тепловых снимках областей пологоволнистого или более или менее плоского рельефа при определенных условиях обнаруживаются в картируемом виде зоны разломов и складчатые структуры близкого к поверхности фундамента, которые на дневной поверхности (при наземных маршрутах) или на панхроматических аэрофотоснимках едва ли можно было обнаружить или вообще предположить. Рис. 218 показывает фото-



Рис. 215. Фотоснимок области геотермической аномалии Полихнитос и ее окрестности (снимок Гюнтера).

схему тепловых снимков территории в Трансваале, которую подстилают пологопадающие доломитовые свиты. Ясно видны как литофациальное (стратиграфическое) строение свит, так и их простирание и направление падения, а также значительное число нарушений и зон трещиноватости различной длины и ширины. Линии или зоны выхода преимущественно крутых разрывных структур выделяются на фоне окружающих пород серым, почти черным тоном. Темный серый тон в зонах от линейного до криволинейного очертаний указывает на понижение температуры, т. е. зоны выходов разрывных структур заметно холоднее, чем примыкающие скальные породы. Последние в соответствии со своими более высокими температурами обнаруживают более сильное излучение (светлые серые тона). Более высокая влажность почв вдоль зон разломов уменьшает поверхностную температуру. Эффект может усилиться благодаря испарению. Полосчатая градация серого тона доломитовых свит (с известковистыми, кремнистыми и мергелистыми прослоями) отражает перепады температур между отдельными пластами и прослоями, вызываемые различными тепловыми свойствами соответствующих пород. Округлые темные пятна показы-

вают положение небольших замкнутых впадин карстового происхождения – долин, которые из-за более высокой влажности почвы и углубления (прохладный воздух) выделяются среди окружающих скальных пород в виде холодных аномалий. Светлые точки на рисунке справа внизу – деревья, которые дают положительные тепловые аномалии.

Рис. 219 изображает фотосхему панхроматических аэрофотоснимков, которая покрывает тот же участок местности, что и рис. 218. На аэрофотоснимке видны некоторые черты землепользования, а также долины. Справа на снимке благодаря своим светлым серым тонам заметны также несколько плоских выходов скальных пород. Литофациальное строение, слоистая структура и разрывные нарушения близкого к поверхности фундамента, напротив, не распознаются (или только намечаются), поскольку рыхлый и тонкий почвенный покров перекрывает фундамент. На снятом перед восходом солнца тепловом изображении сканера сквозь тонкий почвенный покров просвечивают относительные температурные различия под почвой пород и температурные различия между более влажными зонами разломов и смежными скальными массивами. Бэккер и др. [11] сообщают, что литофа-

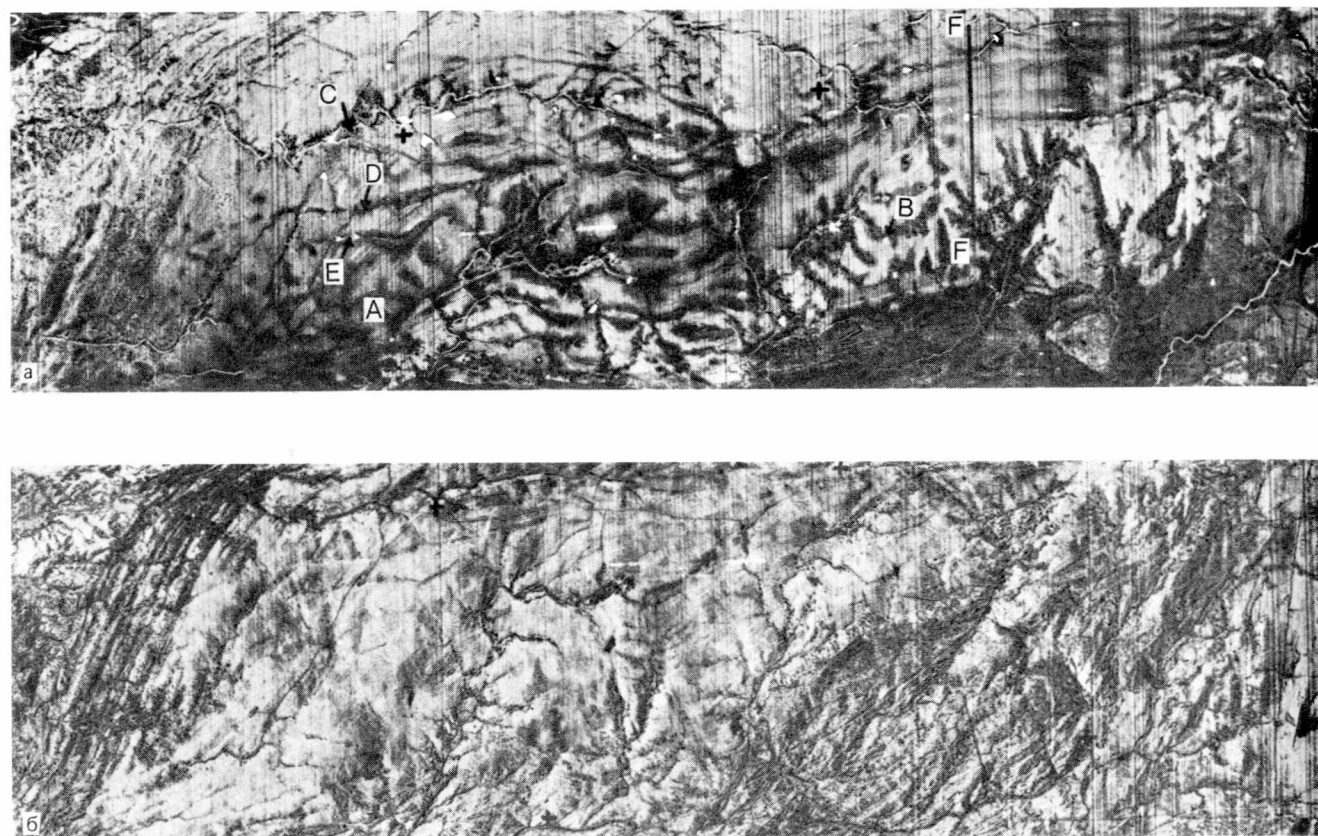


Рис. 216. Тепловой снимок района гор Арбакл, шт. Оклахома.

a – съемка перед восходом солнца, 6 ч местного времени. В точке *A* видна фациальная граница между известняком (темный серый тон) и доломитом (светлый серый тон); *b* – предполуденная съемка, 11 ч. Известняки и доломиты не разделяются более по различиям серого тона. Дальнейшие разъяснения в тексте (по [259]).

циальные и структурные детали или изменения близкого к поверхности фундамента могут улавливаться тепловым сканированием через покров толщиной примерно 20 см. Однако это справедливо только для случая сухой рыхлой песчаной почвы. В районах с влажной глинистой или суглинистой почвой ИК-изображения сканера, напротив, не дают никакой сопоставимой информации о соотношениях в фундаменте. В Южной Африке (и в сопоставимых областях) сухой сезон более всего подходит для аэросъемки тепловым сканером. В это время почвы сухие, а растительность, и без того скудная, не создает никаких помех.

Поскольку в Южной Африке обширные районы покрыты рыхлыми песками и щебнем, геология фундамента маскируется этим почвенным покровом. Положительный опыт применения тепловых сканеров привел к тому, что тепловые снимки используются в рамках работ по региональной съемке и прежде всего в рамках поисков месторождений для обнаружения выходов и для прослеживания особенно интересных литофациальных комплексов или опорных горизонтов. Прежде всего это относится к районам со страти-

формными или приуроченными к определенным структурам рудными сгущениями (см. [11]). На ИК-изображениях ночных залетов выходы пород всегда выделяются среди окружающих почв, поскольку непористые скальные породы, как правило, являются лучшими проводниками тепла, чем несцементированные пески и щебень. Аэросъемка тепловым сканером позволяет, по Бэккеру и др. [11], быстро локализовать все выходы пород на территории, в общем-то перекрытой почвой и молодыми отложениями, которые затем отыскиваются на местности для идентификации и картирования. На тепловых снимках степных и полупустынных районов удается также выделить те участки, в которых лишь тонкий почвенный покров залегает на скальных породах фундамента, которые можно подвергнуть более тщательным наблюдениям или исследованиям. Аналогичные исследования провел Сабинз [261] в характерном районе Калифорнии. ИК-снимок сканера плоской полупустынной области показывает синклинальную структуру и крупное нарушение, которые на аэрофотоснимках области не распознаются, поскольку фундамент замаскирован

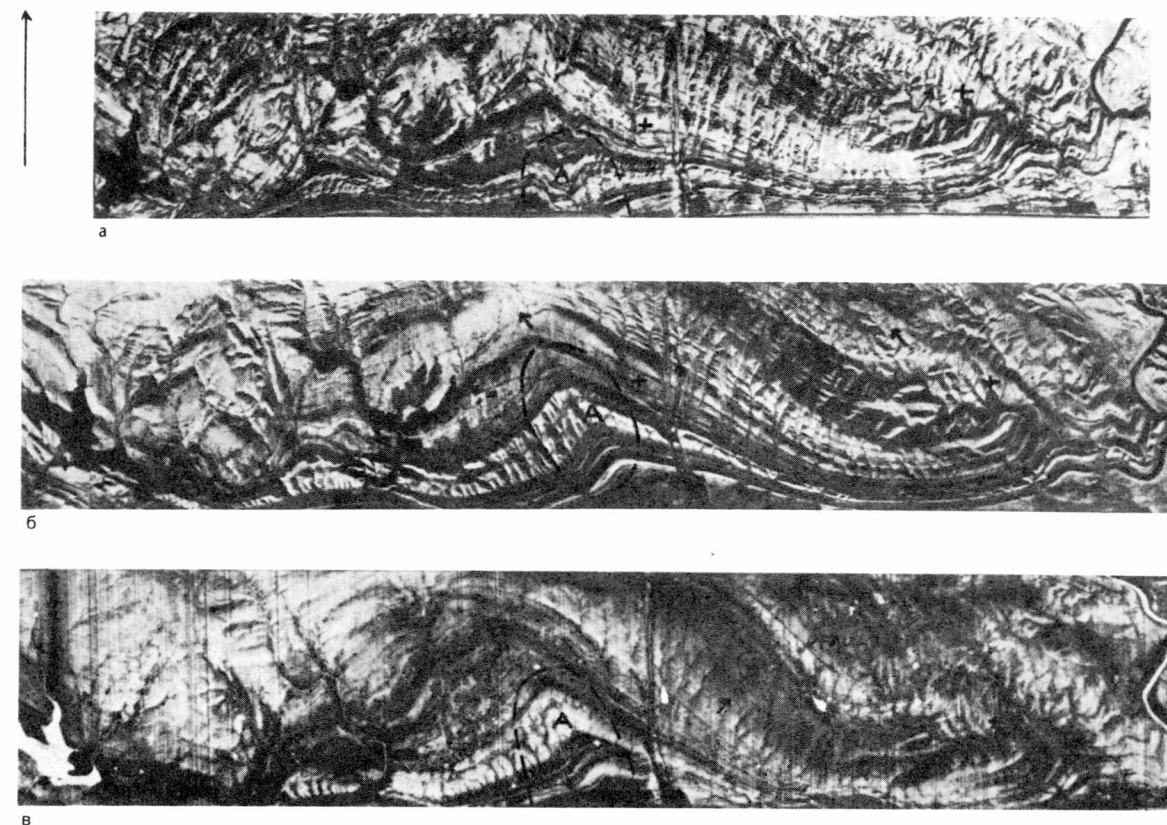


Рис. 217. Различное отображение литофаций и слоистости на тепловых снимках, снятых в различное время дня. *a* – съемка в 11 ч местного времени; *b* – съемка в 14 ч; *c* – съемка в 6 ч (перед восходом солнца) (по [259]).

тонким почвенным покровом. Применение аэросъемки тепловым сканером в аналогичной местности может привести к получению важной информации и к значительной экономии рабочей силы и времени. В рассмотренных выше областях Южной Африки внешние условия могут быть особенно благоприятными для применения теплового сканера при геологическом картировании и разведочных работах. По Бэккеру и др. [11], снимки теплового сканера могут применяться как для мелкомасштабной (от 1:25 000 до 1:50 000), так и для крупномасштабной (1:1000) съемки.

Особую ценность применение ИК-сканирования может иметь при инженерно-геологических работах, в которых решающее значение имеют данные по геологии и гидрогеологии близкого к поверхности фундамента. Плотность вещества на поверхности и влажность приповерхностных образований оказывают решающее влияние на величину излучения и тем самым на ступени серого тона поверхности района на ИК-изображении сканера. С учетом устанавливаемых на ИК-изображении и аэрофотоснимках иных поверхностных явлений (изменение растительности, рельеф поверхности, свойства и влажность почвы) при благо-

приятных внешних условиях и достаточном опыте интерпретатора на ИК-изображении сканера в соответствующей области удастся откартировать комплексы скальных пород и тектонические структуры близкого к дневной поверхности фундамента, разделить области с тонким и более мощным почвенным покровом, равно как и высказать определенные суждения о гранулометрии и степени уплотнения рыхлых пород чехла. Бэккер и др. [11] дают в своей публикации множество соответствующих примеров из Южной Африки. Авторы, впрочем, указывают на пользу стереоскопического изучения ИК-снимков сканера. Возможность подобного стереоскопического рассмотрения возникает тогда, когда смежные полосы изображений сняты примерно с 60%-ным боковым перекрытием.

На рис. 220а и 220б на следующем примере из Южной Африки сопоставляется различие информационного содержания тепловых снимков и панхроматических аэрофотоснимков. Тонкий почвенный чехол в области съемки отражает падающее световое излучение. Аэрофотоснимок (рис. 220б) отображает почвенный покров более или менее равномерным серым тоном. Определенные изменения почвенного слоя



Рис. 218. Фотосхема из тепловых снимков одного из районов Трансвааля, ЮАР. Съемка перед восходом солнца. Пояснения в тексте (по [11]).

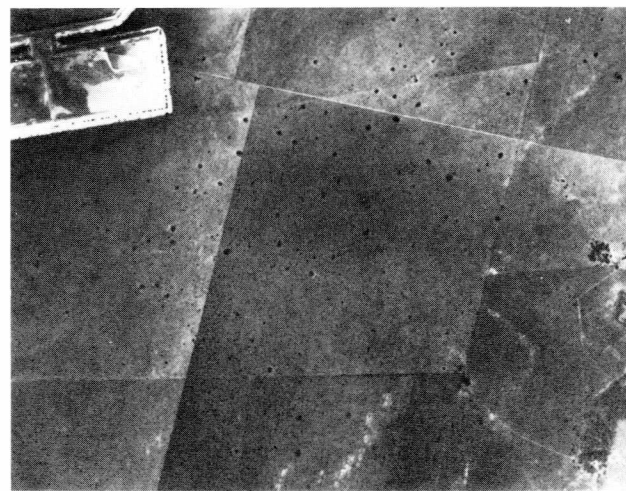


Рис. 219. Фотосхема из панхроматических аэрофотоснимков территории, изображенной на рис. 218. Масштаб около 1:33 000 (по [11]).

распознаются по вариациям серого тона. Сведений о геологической ситуации в фундаменте панхроматический аэрофотоснимок не дает. Напротив, на ИК-изображении сканера (рис. 220а) распознаются находящиеся под тонким почвенным покровом комплексы пород и разрывные структуры в скальном основании. Выделяющиеся линии серого тона маркируют крупные зоны нарушений, а также сеть трещин в доломи-тах. Области с относительно мощным почвенным покровом выделяются более темным серым тоном, который отображает топографическое положение, а также указывает на более высокую влажность. Точки пересечения крупных нарушений представляют собой критические области с точки зрения инженерно-геологических проблем (мощность рыхлых пород, устойчивость, дренаж, закарстованность и т. п.). Интерпретация теплового изображения сканера позволяет выделить те критические области, которые надлежит изучить детальнее. Таким образом, ИК-изображение сканера в приведенном примере дает сведения, которые вообще отсутствуют на панхроматическом аэрофотоснимке. Как раз в областях, в основании которых залегают закарстованные известняки и мергели, для строительных проектов (дороги, строения, прокладка труб), а также в аспекте проблем окружающей среды (водозабор, удаление сточных вод) решающее значение имеют данные по геологическим и гидрологическим соотношениям в основании. На ИК-изображении сканера рис. 221 ясно вырисовываются вызванные закарстованностью долины и линейные карстовые обрушения. Расположение долин А–С однозначно связано с крутыми разрывными нарушениями, которые по данным интерпретатора (Spectral Africa Ltd.) не видны на панхроматическом аэрофотоснимке данной области. Светлые серые тона некоторых до-

лин вызваны стоячими водами в основании этих форм. Темные серые тона долин указывают на повышенные концентрации влажности. Проявления процесса провалов можно ожидать вдоль зон разломов (например, *E* и *F*) и на их продолжении. Наблюдаются также зоны возможного распространения долин (точечные границы). Определенное значение для проблем окружающей среды и планирования заселения заснятой области имеет то, что некоторые из закарстованных разрывных структур (*H*) протягиваются вплоть до зон застройки.

Поскольку влагоемкость рыхлых пород и почв существенно влияет на их термическое поведение (ср. разд. 3.3.2), по эмиссионной способности соответствующих веществ или по присущему им серому тону на ИК-изображении сканера можно сделать вывод о степени влажности основания. Отсюда появляется возможность выделения и картирования на тепловых снимках тех областей, в которых из-за значительного притока воды или из-за блокирования оттока проявляется подпор воды. На рис. 222а показана подобная ситуация на примере разлома Сан-Андреас. На снятом перед восходом солнца изображении видно, что его среднюю часть пересекает нарушение. По распределению серого тона на ИК-изображении видно также, что это нарушение действует как барьер на пути грунтовых вод. Подтекающая с площади в верхней части снимка вода подпруживается у нарушения. Подпруживание вызывает повышенное увлажнение почвы и приповерхностной зоны. Это тоже уменьшает поверхностную температуру, о чем свидетельствует темный серый тон на изображении сканера. В районах с выраженными сезоном осадков и сухим сезоном уровень грунтовых вод и их перемещения колеблются на протяжении сезонов. Подобные вариации подзем-



Рис. 220а. Тепловой снимок территории района в Южной Африке. Съемка перед восходом солнца. Масштаб около 1:20 000 (по [11]).

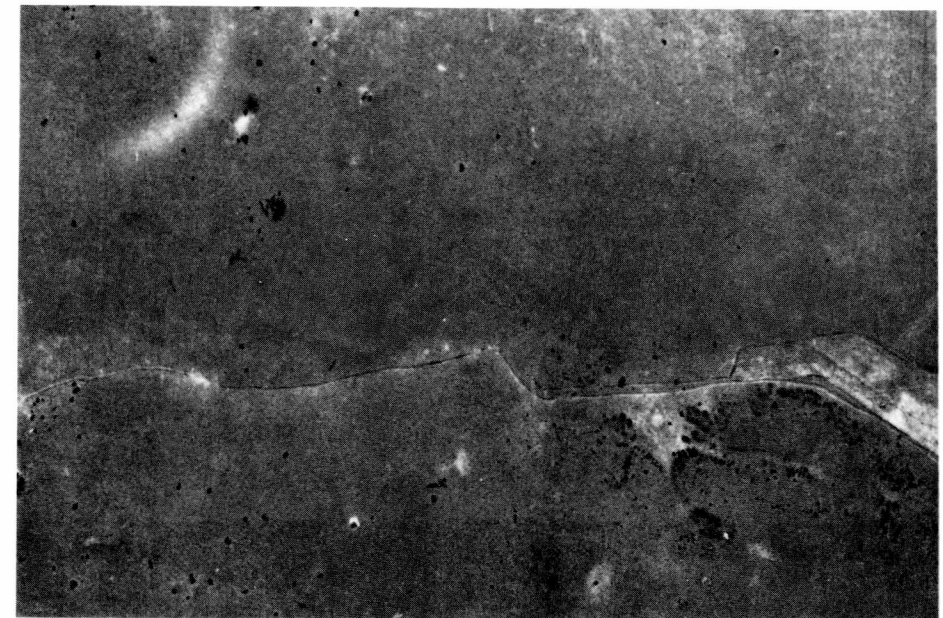


Рис. 220б. Панхроматический аэрофотоснимок района, показанного на рис. 220а. Масштаб около 1:20 000 (по [11]).

ных гидрологических условий приводят и к изменениям явлений в соответствующих областях. Это следует иметь в виду при аэросъемке тепловым сканером. Локально блокирование перемещения вод в приповерхностном основании подчас проявляется как следствие (непредвиденное!) строительных проектов,

например прокладки дорог. Тепловые снимки во многих случаях могут предоставить сведения (и прежде всего вместе с другими данными наблюдений), которые внесут вклад в прояснение и устранение возникающих или ожидаемых проблем.

В заключение следует еще упомянуть, что тепло-

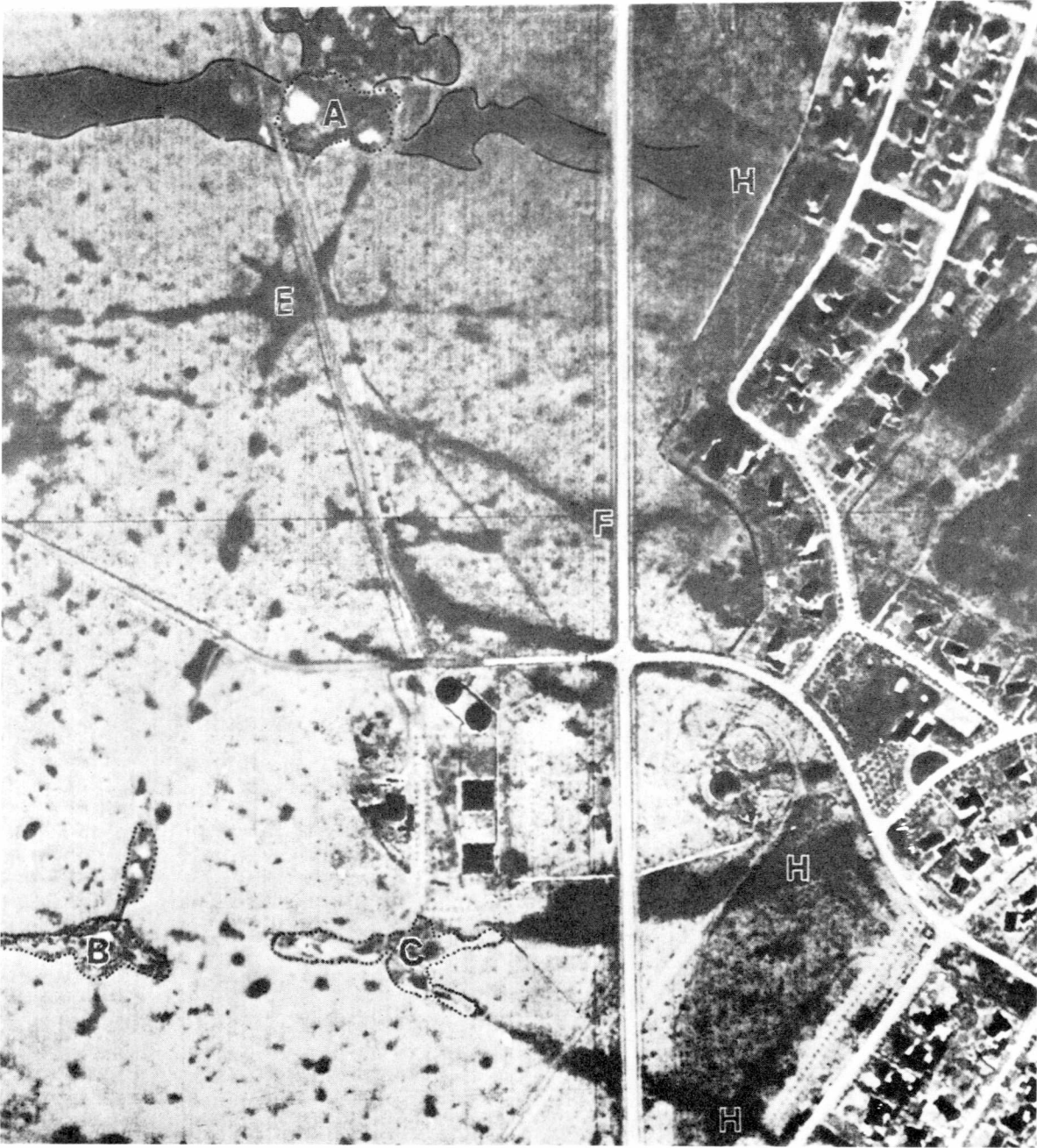


Рис. 221. Карстовые впадины (дóлины), зоны разломов и трещин на тепловом снимке района Южной Африки. Пояснения в тексте (по [11]).

вые снимки внутриматериковых и прибрежных вод могут быть полезны для геолога. Водные массы с различной температурой или водная поверхность с разной температурой из-за различия излучений отображаются на ИК-изображениях сканера разными серыми тонами. Это иллюстрирует рис. 223, на котором впадающие в море пресные воды из-за более

низкой температуры выделяются в морской воде, более теплой и потому имеющей более светлый серый тон. Возможность выявления с помощью аэросъемки тепловым сканером выходов пресных вод в прибрежных областях позволяет по-новому подойти к балансу подземных вод прибрежных районов суши. Крупные

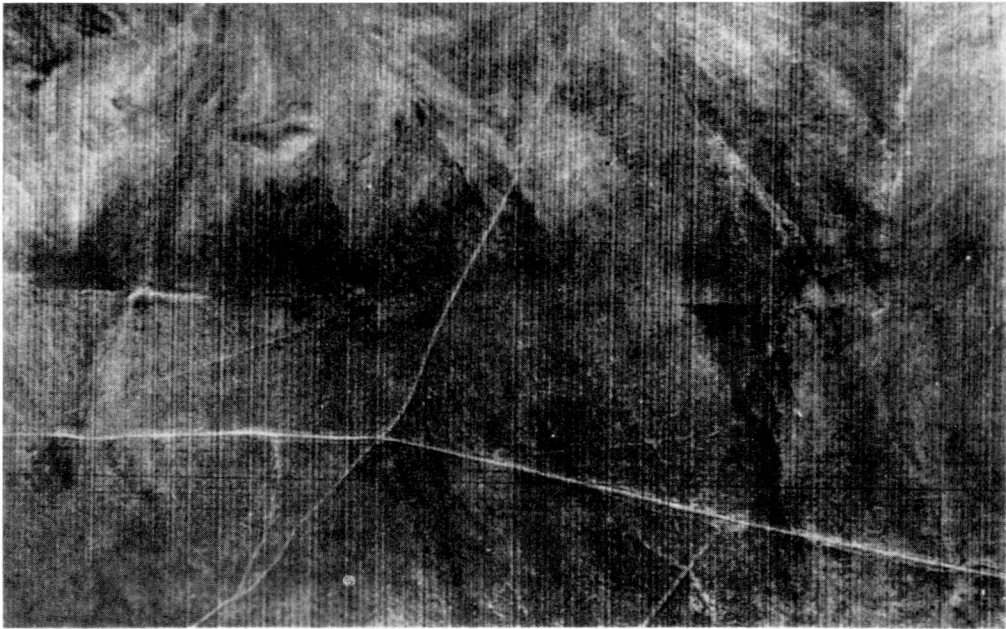


Рис. 222а. Тепловой снимок отрезка разлома Сан-Андреас. Полоса темного серого тона маркирует подпор грунтовых вод вдоль разлома (по [311]).

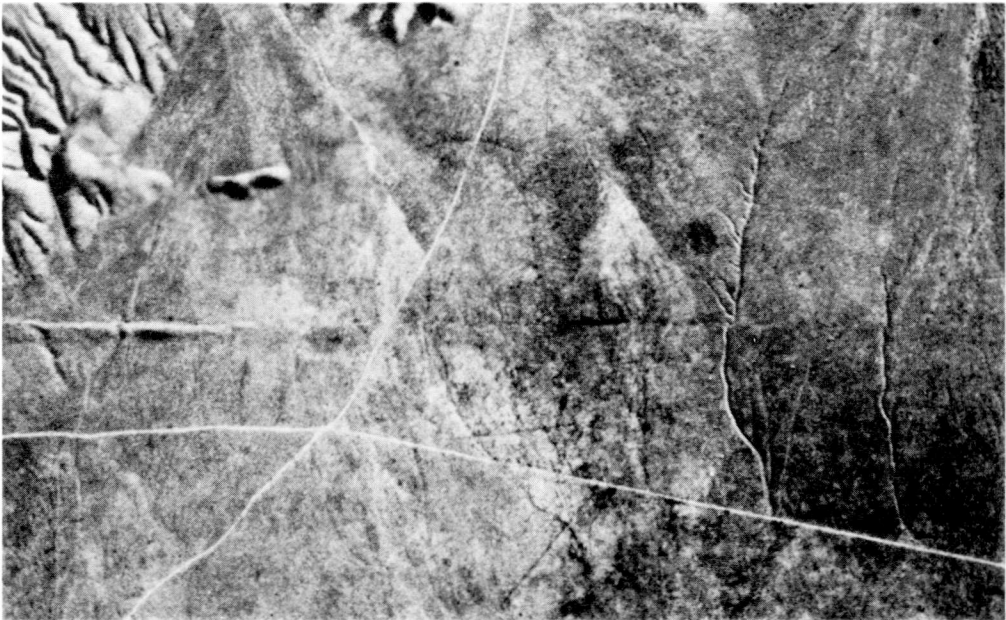


Рис. 222б. Панхроматический аэрофотоснимок выявляет следы разлома Сан-Андреас на поверхности, однако не содержит никаких указаний на подпор грунтовых вод вдоль нарушения; ср. с рис. 222а.

источники пресных вод часто наблюдаются на побережье и в прибрежной зоне просто оптически благодаря цветовым отличиям вод, что большей частью известно местным жителям. Однако наряду с немногими крупными подводными выходами источников,

например вдоль закарстованного известнякового побережья Средиземного и Эгейского морей, существует множество до сих пор не выявленных источников вод. Данные о них могут иметь большое значение для изучающего гидрогеологию подобной прибрежной

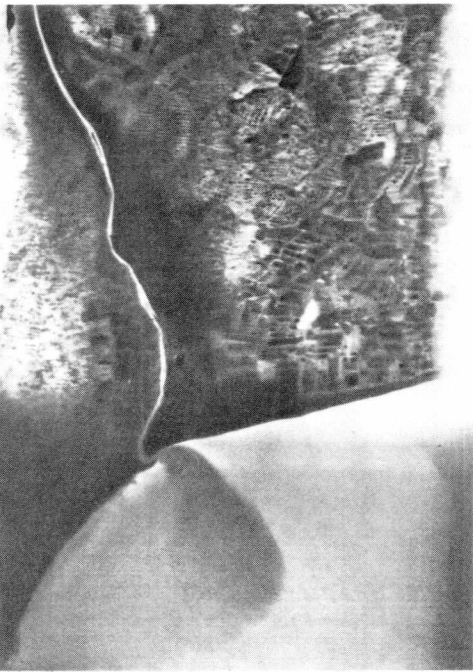


Рис. 223. Впадающие в более теплое море пресные воды выделяются на тепловом снимке более темным серым тоном. Съемка перед восходом солнца. Масштаб около 1:170 000 (снимок IGN).

области и ее тыловых районов, тем более что по площади выявленных районов с источниками (и по дополнительным исследованиям в море) можно сделать обратные выводы о количестве вытекающей пресной воды. Представление о стекающих в море объемах водных масс должно использоваться при оценке существующих запасов подземных вод районов побережья и тыловых областей. Для подобных количественных оценок следует, однако, проводить повторные аэросъемки с помощью теплового сканера, чтобы учесть периодические и прежде всего сезонные колебания притока вод.

Повторные ИК-съемки требуются также в том случае, когда изучаются процессы перемещения и смешения поверхностных вод. Подобные исследования имеют значение с гидрогеологической и во всевозрастающей степени с экологической точек зрения (подвод сточных и охлаждающих вод).

6.5. Радиолокационные снимки

(Геологическое содержание изображений, примеры интерпретации.)

Как показывают рис. 225, 226, 228, охваченная аэросъемкой радиолокатором бокового обзора (РЛСБО) полоса суши отражается на радиолокационном изо-

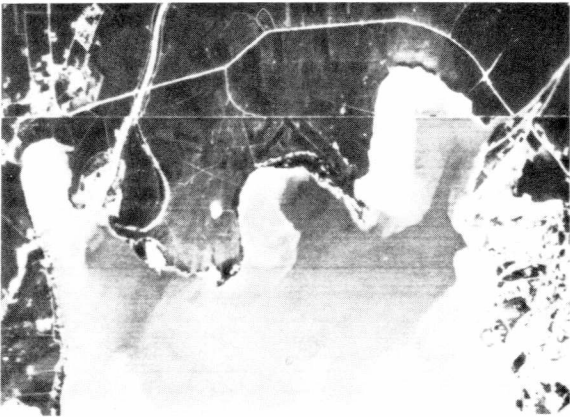
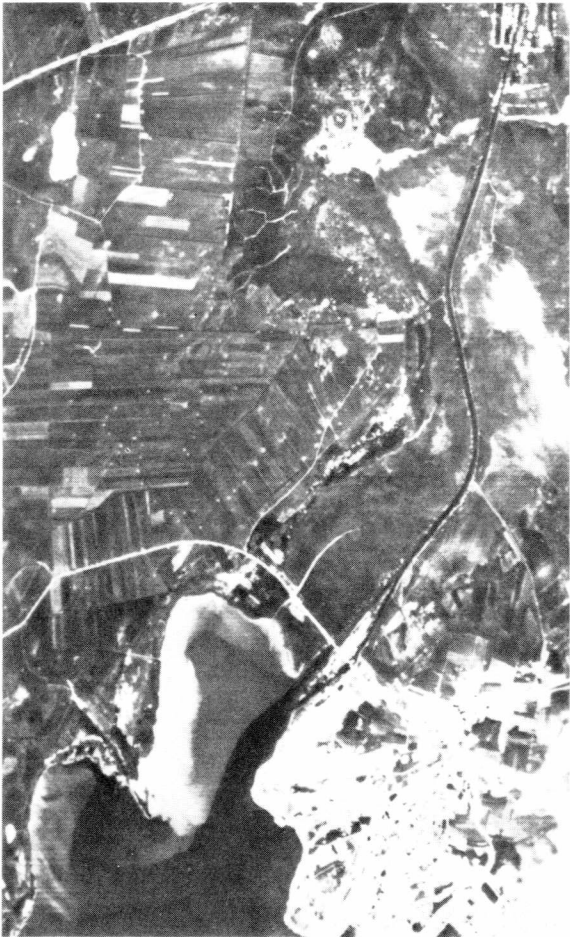
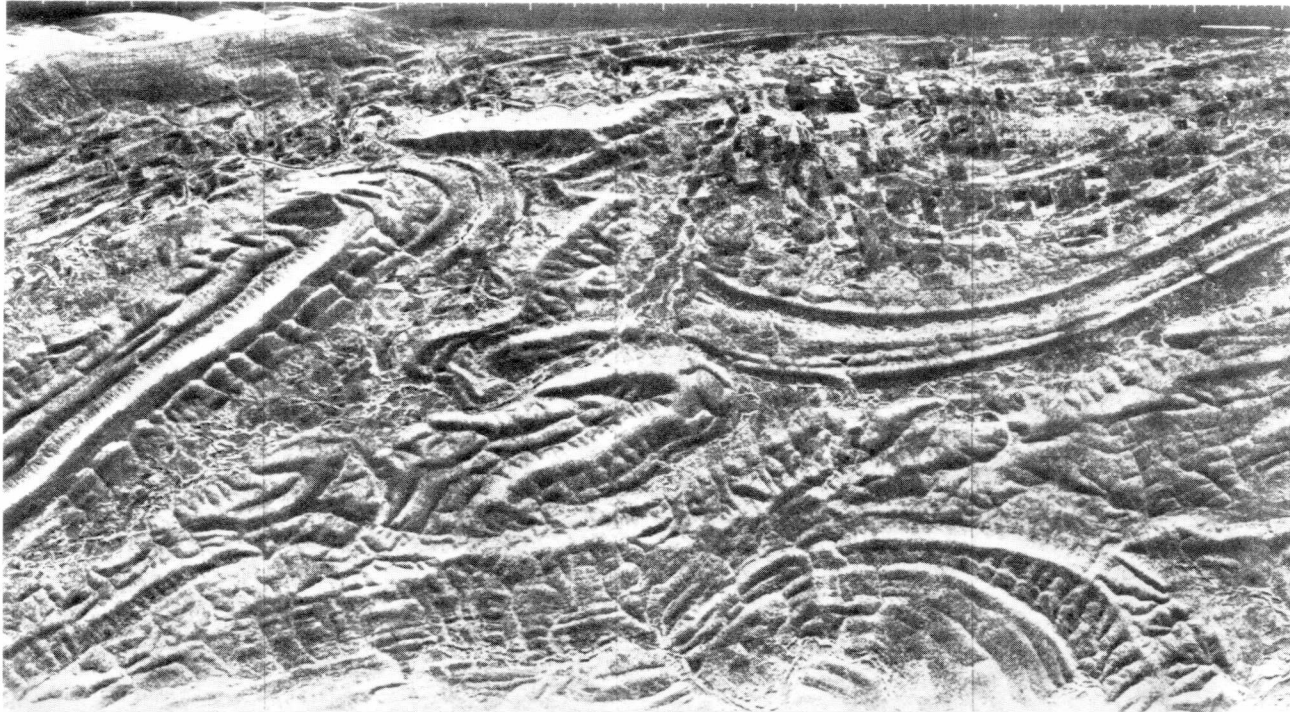
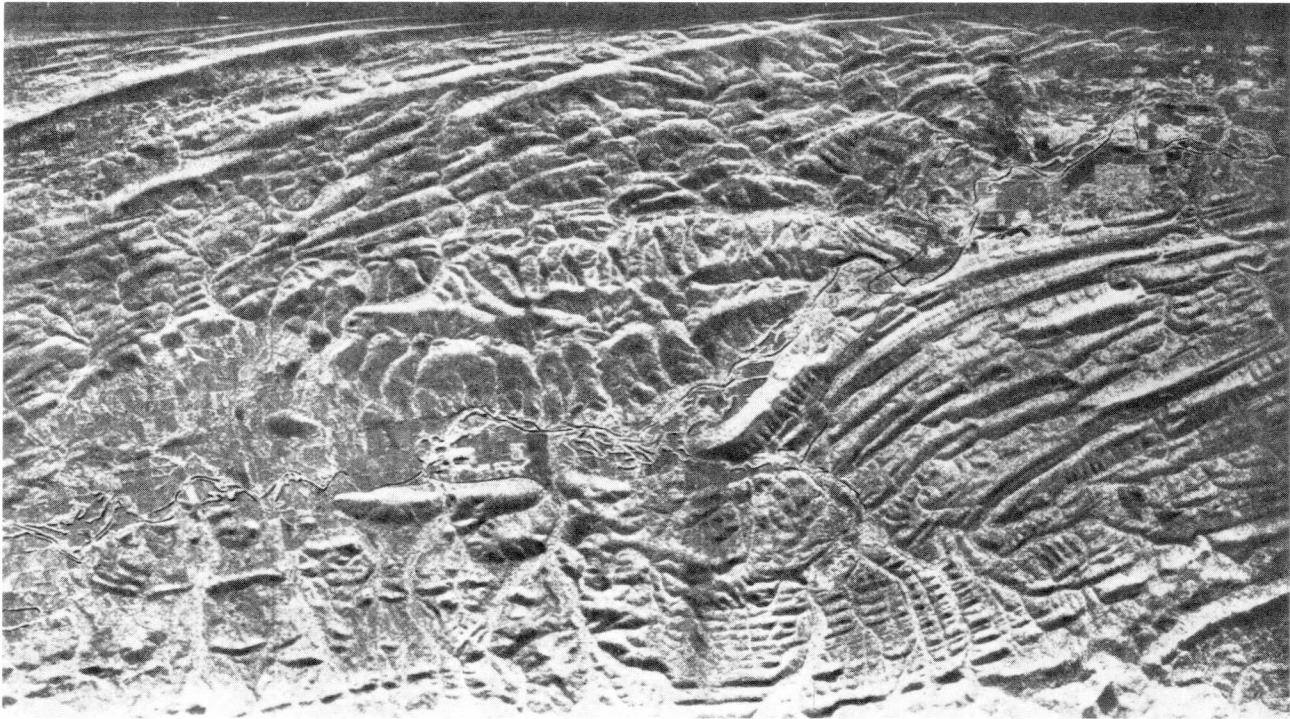


Рис. 224. Различные температуры водных масс озера Коксель распознаются по градациям серого тона, которые по-разному распределены на обоих тепловых снимках, снятых в разные дни. В прибрежной зоне вода теплее – более светлый тон, чем в области впадения Лорзаха и в средней части озера (канал 11 мультиспектрального бендикс-сканера M²S), время съемки 20 ч 28 мин (вверху) и 19 ч 58 мин (внизу). Обратите внимание на контрасты температур полей, дорог, зданий. Масштаб около 1:70 000 (FMP, DFVLR, Freig. d. Reg. Oberbay.).



а



б

Рис. 225а и 225б. Литофациальные комплексы и тектонические структуры ландшафта юго-запада США на радиолокационном изображении. Рис. б примыкает к рис. а справа. Масштаб около 1:200 000 (съемка Геологической службы США).

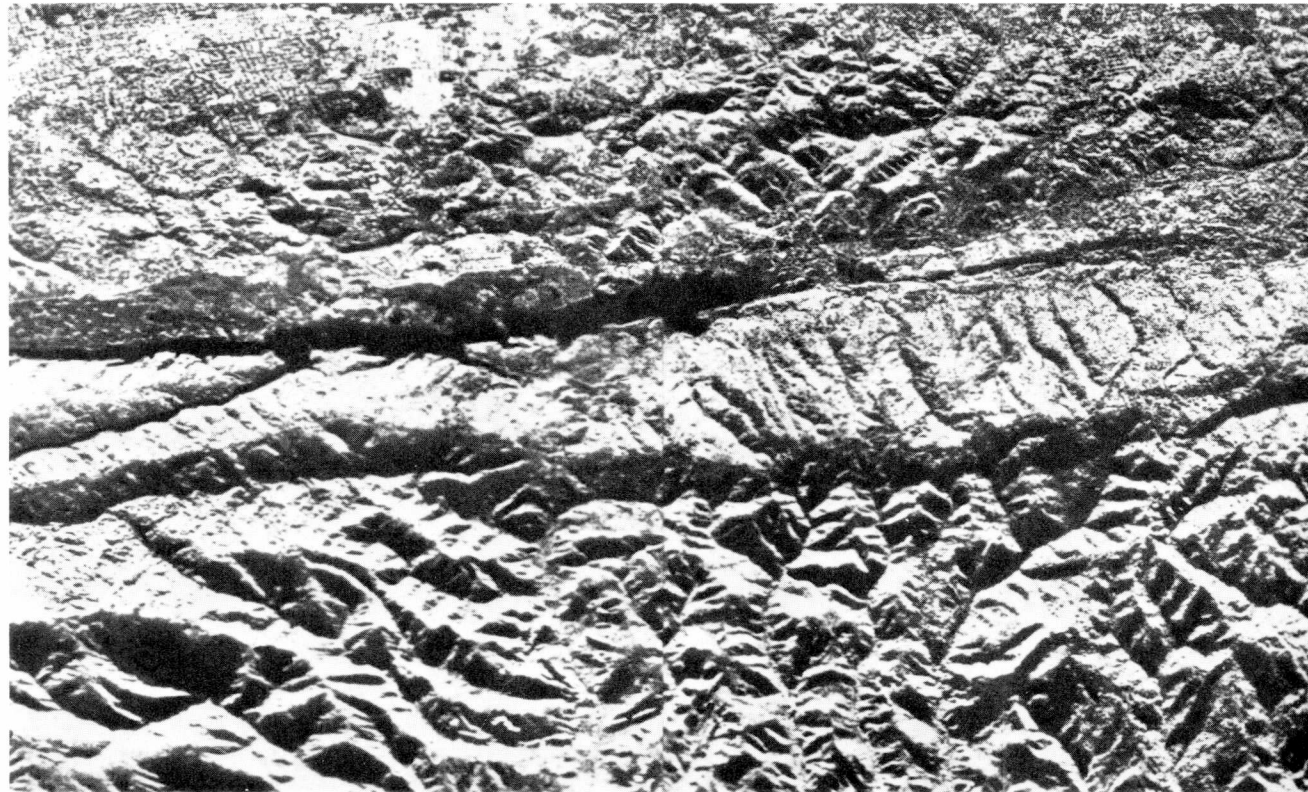


Рис. 226. Радиолокационное изображение района в окрестностях Сан-Франциско. Четко выделяется след зоны разлома Сан-Андреас на поверхности Земли. Пояснения в тексте (снимок Геологической службы США). Масштаб около 1 : 250 000.

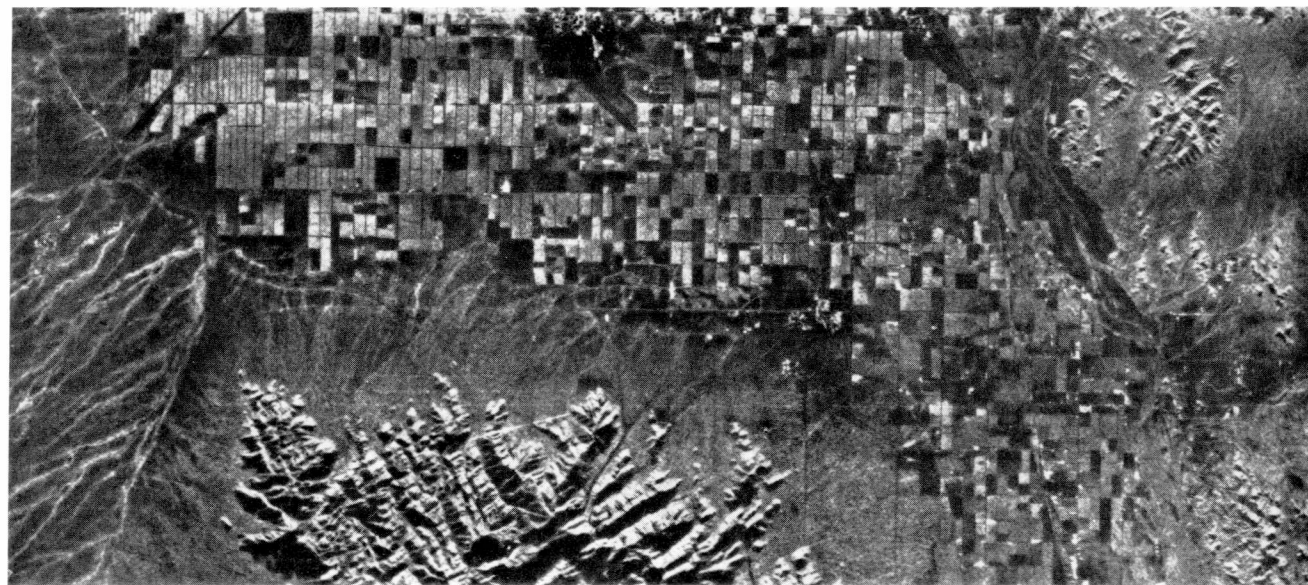


Рис. 227. Радиолокационное изображение ландшафта в Аризоне, близ Финикса. Пояснения в тексте. Масштаб около 1 : 400 000.

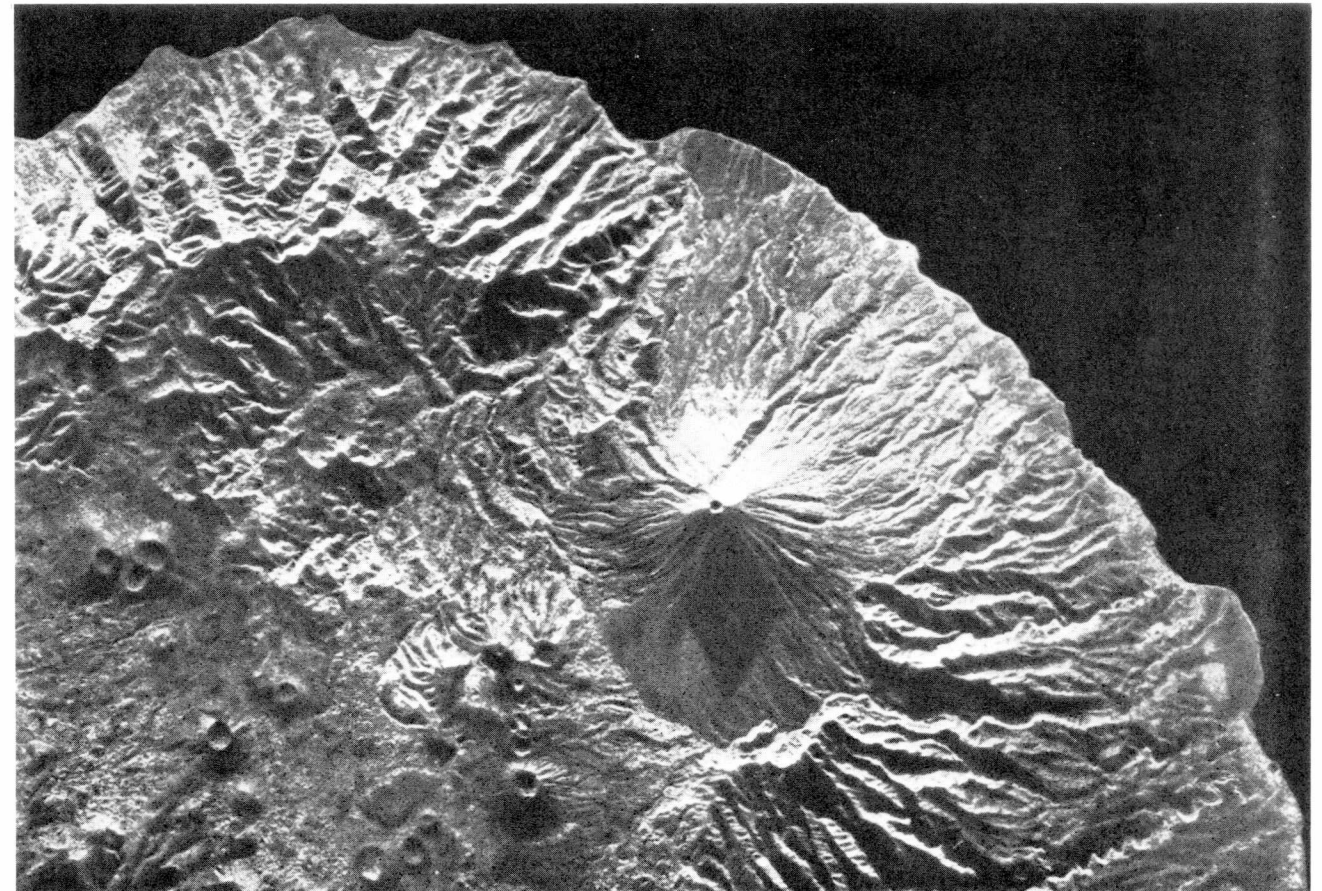


Рис. 228. Формы рельефа острова вблизи острова Бали. Пояснения в тексте (Good Year Aerospace/Aero Service Corp.).

бражении с подчеркнутой контрастностью рельефа. Обращенные к радиолокационной системе склоны и поверхности получают больший импульс, чем отраженные от приемника, и потому предстают на радиолокационном изображении более светлыми, чем последние. Интенсивность сигнала, отраженного от поверхности ландшафта или объекта, зависит прежде всего от угла падения радиолучей, от неровности поверхности, но особенно от соотношения длины волн приходящего излучения, неровности поверхности и диэлектрической постоянной облучаемого вещества поверхности (ср. разд. 4.7.2.5.3). Градации серого тона радиолокационного изображения указывают по меньшей мере, какие поверхности отражают поступающие сигналы сильнее и какие слабее. Серые тона радиолокационного изображения не всегда увязываются с веществом и редко со спецификой его состава, тогда как формы рельефа заснятого ландшафта наряду с прочим имеют решающее влияние на взаимодействия между приходящим излучением и поверхностями ландшафта или конкретным веществом. Ступени серого тона поверхности района или

данного вещества в радиолокационном изображении зависят также от длины волн.

Объем полезного для геолога информационного содержания радиолокационных изображений в рамках локальных и региональных исследований и анализа зависит от того, насколько распознаваемо на этих изображениях вырисовывается геология основания по формам рельефа, по его главным и мелким чертам, по изменениям растительности, по свойствам и влажности почвы, т.е. по поверхностным особенностям, приводящим к появлению градаций серого тона и текстуры.

На рис. 225а и 225б формы рельефа рассматриваемого ландшафта на юго-западе США определяются прежде всего различной устойчивостью пород к выветриванию и изменениями особенностей напластования обнажающихся осадочных толщ песчаников, известняков, глин и мерглей. Светлые серые тона появляются там, где поступающий сигнал отражается оптимально: на наклонных поверхностях, плоскостях напластования и куэстах, направленных к антенне. Густая в общем растительность в заснятой области



Рис. 229. Мозаика радиолокационных изображений ландшафта в Венесуэле. Пояснения в тексте. Масштаб 1 : 620 000 (Good Year Aerospace/Aero Service Corp.).

оказывает существенное влияние на распределение серого тона на изображении. В первую очередь в долинах и на равнинах наблюдаются отчетливые и обусловленные растительностью различия серого тона благодаря различиям растительности на склонах, равнинах, участках вдоль течения рек и ручьев, на полях. Петрографические различия обнажающихся комплексов пород и тектонические структуры засня-

той местности отражаются на изображении РЛСБО в картируемом виде. Однако петрографический характер и стратиграфическое положение осадочных серий, различающихся на радиолокационном изображении, должны уточняться маршрутами на местности и просмотром образцов. С точки зрения структурного картирования следует упомянуть, что на равнине у верхнего края снимка видно ядро синклинали

складки, которое в этой относительно ровной области отображено на радиолокационном изображении в подчеркнутом виде.

Радиолокационное изображение рис. 225 представляет собой геометрически не скорректированное изображение в развертке по наклонной дальности, в котором проявляются различия масштабов ближнего и дальнего планов и сжатие у верхнего края снимка, обращенного к антенне (ср. рисунки в разд. 4.7.2.2). Полоса снимка охватывает площадь длиной около 70 км и шириной 15 км. Аэросъемка РСЛБО проводилась в Ка-диапазоне ($\lambda = 0,86$ см, ГГ-поляризация).

Рис. 226 показывает снимок РЛСБО (Ка-диапазон, ГГ-поляризация), изображающий в развертке по наклонной дальности частный район Береговых хребтов к юго-востоку от Сан-Франциско. В контрастно передающем рельеф радиолокационном изображении отчетливо выделяется протягивающееся вдоль площади снимка нарушение Сан-Андреас. Ниже относительно прямолинейно проходящей зоны нарушения выделяются, имея криволинейные очертания, две крупные зоны нарушений—это протягивающиеся почти через всю площадь снимка нарушение Пиларситос и в левой части снимка нарушение Сан-Матео. Массивные формы рельефа в нижней левой части снимка отвечают выходам гранитов и гранодиоритов. Сильнее расчленены долинами районы, сложенные метасадками и ортогнейсами. В целом темнее окрашенная и в основном пологая прибрежная полоса у верхнего края изображения подстилается молодыми, едва сцементированными осадками. В горных районах (прежде всего ниже нарушения Сан-Андреас) благодаря линейным врезам долин становятся заметными крутые разрывные структуры различной ориентировки.

Рис. 227 показывает фрагмент полосы изображения Аризоны (радиолокация в X-диапазоне с синтетической апертурой, $\lambda = 3$ см, однородная ГГ-поляризация, изображение с разверткой по горизонтальной дальности). Радиоволны длиной около 3 см и менее применительно к естественным поверхностям обладают лишь ограниченной способностью проникновения. На природных поверхностях они отражаются и поглощаются с довольно различной интенсивностью. Это доказывает дифференцированное отображение отдельных полей возделываемых земель. Различия серого тона показывают положение полей, покрытых растительностью и лишенных ее, различные способы хозяйственного использования территории, различия свойств поверхности, равно как и различия влажности почвы. Аллювиальные отложения выделяются по своему топографическому положению в долинах и в окружении крупных и мелких выходов метаморфических комплексов пород (гранито-гнейсы) по неровности поверхности (гранулометрия) и диэлектрической постоянной более светлыми и более темными серыми тонами. Светлые серые тона дренажной сети в левой

части изображения могут представлять собой эффект рельефа (бровки долин). Однако они могут объясняться и скоплениями растительности (кустарник) в сухих долинах. Формы рельефа горного комплекса нижнего края снимка позволяют распознать крутопадающую слоистость (поверхности z), простирающиеся слоистости гнейсов, равно как и положение крутых разрывных структур (нарушения, зоны трещиноватости).

Отображение форм рельефа суши на радиолокационном снимке особенно четко представлено на рис. 228, показывающем соседний с Бали остров (SAR, X-диапазон, ГГ-поляризация). Наряду с крупным стратовулканом слева на изображении распознаются многочисленные более мелкие вулканические постройки различного типа. В окрестностях некоторых вулканов своими типичными формами рельефа выделяются лавовые потоки (базальт). Более древние формации вулканитов подстилают сильно размытую горную область в левой верхней части изображения. В левой нижней части изображения отсутствует поверхностный дренаж. Здесь, очевидно, осадки просачиваются в проницаемые толщи вулканитов. Различия в сообществах растительности на площади изображения отмечаются по различиям серого тона и особенно текстуры. На изображении отчетливо видно направление освещения во время аэросъемки.

Как уже упоминалось, из смежных полос радиолокационных изображений, полученных при параллельных залетах, можно составить радиолокационную фотосхему (ср. разд. 4.7.6). Для геологических и геофизических разведочных и съемочных работ в районах, покрытых тропической растительностью (джунглях), слабо доступных и потому недостаточно изученных областях Земли, картографически освоенных лишь в общих чертах или вообще не охваченных, радиолокационная фотосхема нередко служит единственной основой для ориентировки и картирования.

Рис. 229 показывает фрагмент радиолокационной фотосхемы для Венесуэлы. Схема составлена в масштабе 1 : 250 000 и издана в виде листов, подобных изданию стандартной карты (размером $1^\circ \times 1,5^\circ$). Фотосхема при составлении была согласована лишь с редкой сетью геодезических контрольных пунктов и потому может в отдельных районах еще содержать определенные ошибки в привязке (полууточненная фотосхема, X-диапазон, ГГ-поляризация). Показанный здесь фрагмент изображения имеет масштаб примерно 1 : 620 000. Формы рельефа горных районов и топографические детали равнинных площадей дают массу геологической информации. Нагорье в левой части снимка сложено протерозойскими песчаниками. Превышения рельефа достигают 1000 м. В правом нижнем углу еще видны останцы песчаниковой свиты (размытые эрозией в остальных областях). Горные районы со средней и дробной расчлененностью релье-



Рис. 230а. Мозаика радиолокационных изображений ландшафта в пограничной области Бразилии, Венесуэлы и Гайаны между горами Рорайма и Серра-Сапора (проект РАДАМБразил). Масштаб 1:550 000. Пояснения в тексте.

фа (и соответственным развитием долин) подстилаются архейскими гнейсами (грубая текстура) и метасадочными образованиями (тонкая текстура). Препятствия рельефа фундамента были выровнены перед отложением песчаников (пенеплен). Прямолинейные и криволинейные врезы долин различной

длины маркируют линии выходов крутых разрывных структур (разрывы, зоны разрывов, зоны трещиноватости). Различия серого тона равнинных областей отражают различия растительности, а местами также и различия увлажненности.

Рис. 230 показывает район на границе Бразилии,

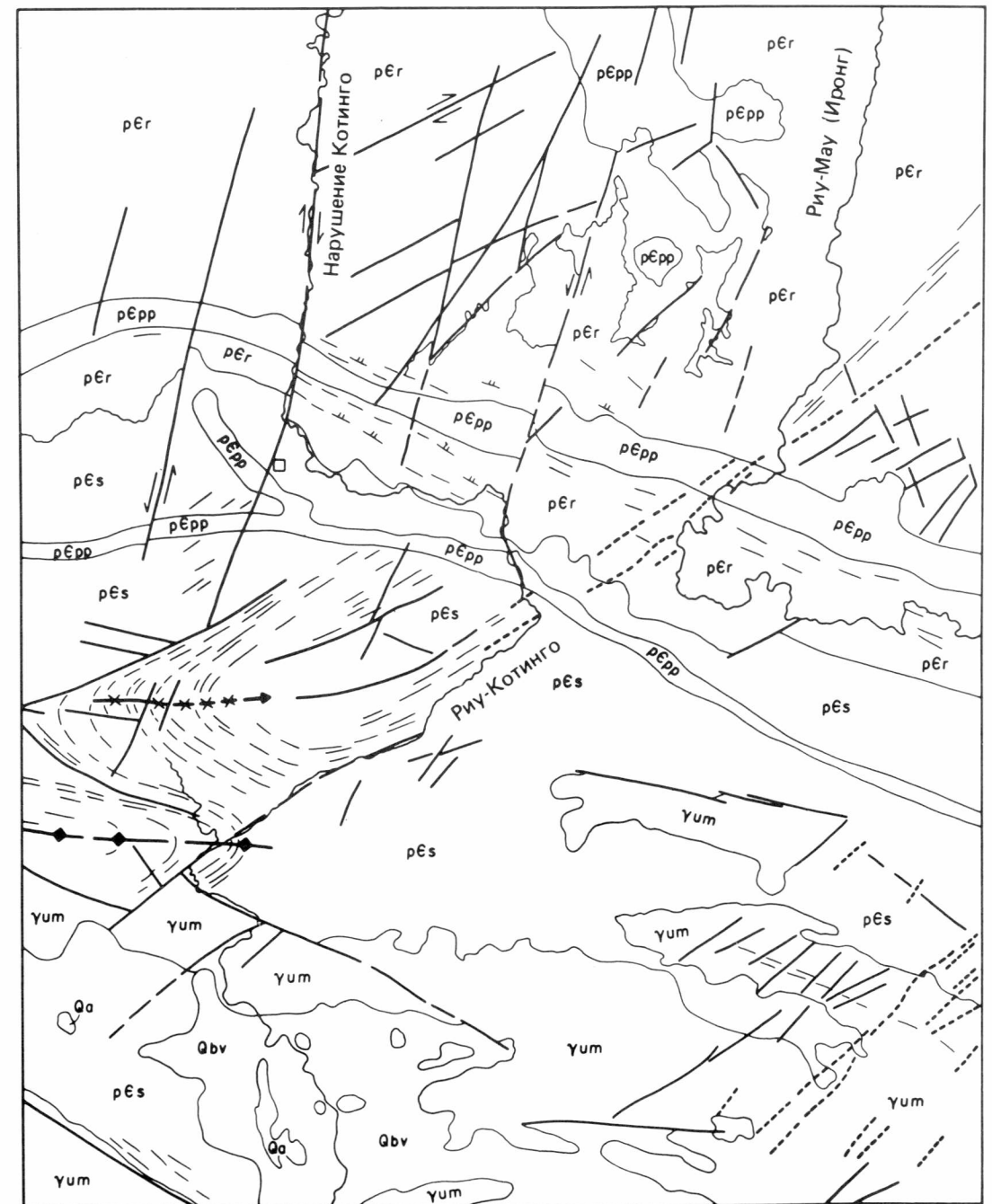


Рис. 230б. Геологическая карта площади схемы рис. 230а (картирование Н. Quade, по проекту РАДАМБразил, Vol. 8).

Венесуэлы и Гайаны (лист NB. 20 Рорайма) с отрогами гор Рорайма на севере и Серра-Сапора на юге. Радиолокационная фотосхема составлена по долготно ориентированной полосе изображений. Радиолокационные «тени» позволяют увидеть, что «освещение» местности при залете было направлено к западу.

Контрасты подчеркнутых радиолокационным изображением форм рельефа позволяют распознать различия литологического и тектонического строения охваченной территории. В южной части площади снимка высокие гряды Серра-Сапора с интрузивными породами от гранодиоритов (оловоносных) до грани-

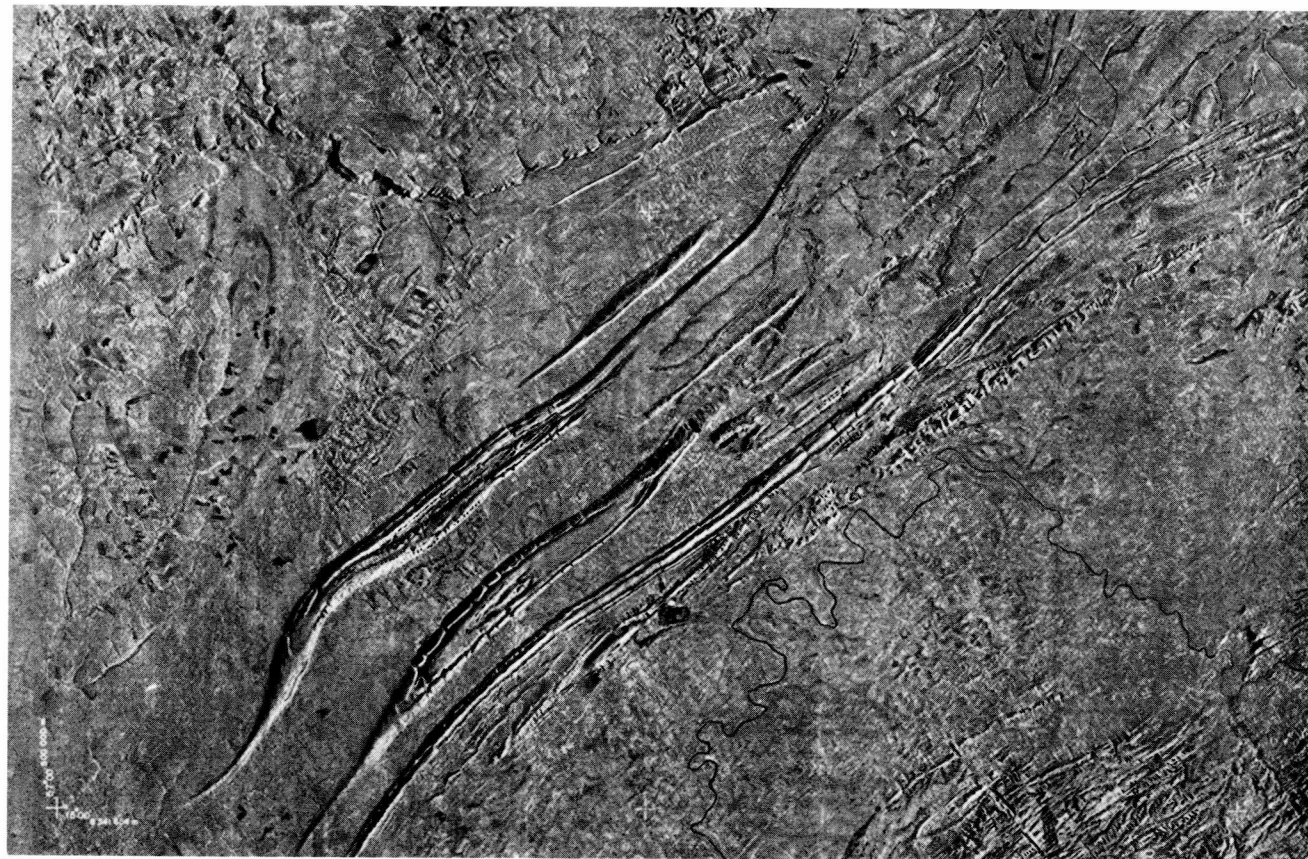


Рис. 232а. Мозаика радиолокационных изображений ландшафта штата Мату-Гросу, Бразилия, с фрагментом Серра-ду-Томбадор северо-западнее Куябы (проект РАДАМБразил). Масштаб около 1:550 000. Пояснения в тексте.

длина волны посылаемого импульса, пространственная ориентировка объектов и поверхностей местности относительно радиолокационной антенны (об остальных параметрах и взаимодействии радиолокационного излучения и природных поверхностей см. в разд. 4.7.2).

Воздействие геометрии и вещественного состава поверхности природных объектов на обратное рассеяние радиолокационных сигналов до сих пор систематически не изучалось. Не выяснена также оптимальная для нужд топографических исследований геометрия освещения при стереоскопических радиолокационных залетах.

С пилотируемого спутника в ноябре 1981 г. была впервые применена радиолокационная система с синтетической апертурой (РЛСА) с борта «Спейс шаттл Колумбия» (Shuttle Imaging Radar System, сокращенно SIR). Задачей первых экспериментов программы SIR было получение данных РЛСА для представительных ландшафтов различных климатических зон Земли, ландшафтов с различными условиями происхождения и различным геологическим строением (имеются в виду породы, тектонические структуры,

геоморфология) и изучение возможностей использования данных SIR для зондирования Земли.

Данные SIR-A были получены с орбиты высотой 259 км. Примененная радиолокационная система работала в L-диапазоне ($\lambda = 23,5$ см). Ширина диапазона составляла 6 МГц, длительность импульса 30,4 мкс, при ГГ-поляризации сигналов. Угол падения луча составлял $50 \pm 3^\circ$. Ширина полосы снимка 50 км. Рис. 234 дает обзор положения заснятой при эксперименте SIR-A полосы изображений, которая вследствие наклона орбиты в 38° располагается в поясе между 45° с.ш. и 30° ю.ш. Пространственное разрешение полосы изображения SIR-A составляет 40×40 м. Данные SIR-A можно получить через National Space Science Data Center (NSSDC); Code 601.4; Goddard Space Flight Center; Greenbelt, Maryland 20771 (USA).

Форд и др. [19] сообщают о первом опыте геологической интерпретации полосы изображений SIR-A. Они сопоставляют информационное содержание изображений SIR-A с содержанием снимков «Лэндсат» МСС и изображениями «Сисат» РЛСА. Последние отображают те же районы местности иначе, чем

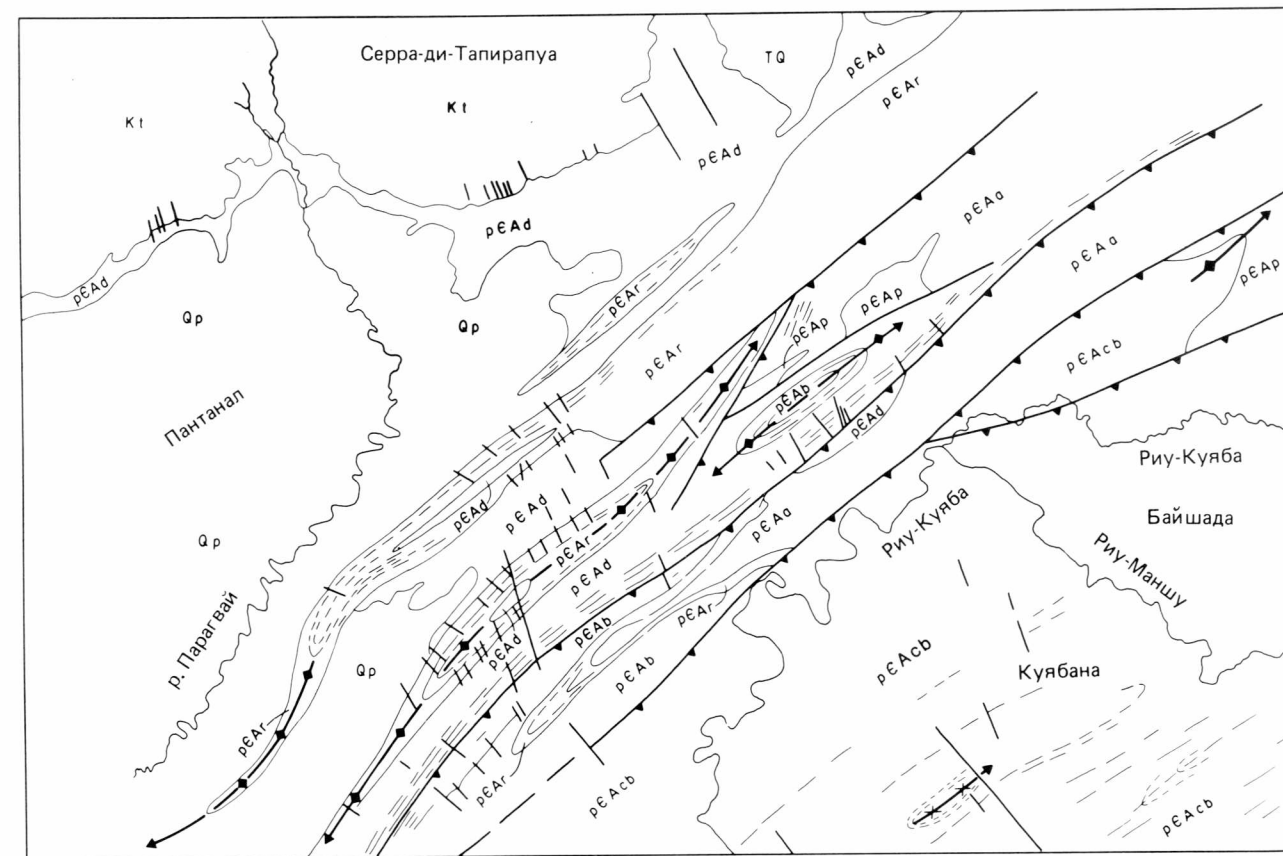


Рис. 232б. Геологическая карта площади, изображенной на мозаике радиолокационных снимков рис. 232а (картирование Н. Quade, по Геологической карте Бразилии масштаба 1:1 000 000, лист SD. 21 Куяба).

SIR-A, поскольку «Сисат» РЛСА действовал при иных условиях: высота полета 795 км, наклонение орбиты 108° , ширина диапазона 19 МГц, длительность импульса 33,4 мкс, ГГ-поляризация, угол падения луча 23° , ширина полосы обзора 100 км, пространственное разрешение 25×25 м. РЛСА снимала, как и SIR, в L-диапазоне ($\lambda = 23,5$ см). Данные «Сисат» РЛСА на наземных станциях в цифровом виде записывались на магнитную ленту, а данные SIR-A, напротив, воспринимались оптически на борту космического летательного аппарата.

Рис. 235 показывает снимок SIR горного района в Пакистане. Обращенные к антенне склоны имеют в общем светлый тон. Крупные петрографические комплексы, как и локальные особенности слоистой структуры, проявляются в картируемом виде различными формами рельефа, которые так же, как особенности структуры, показывают разницу в слоистом залегании осадочных толщ. Разрывные структуры разных направлений выражаются линейными и криволинейными врезами долин. Как всегда бывает на радиолокационных снимках, на рис. 235 появляются геометрические искажения радиолокационного изображе-

ния, которые могут вызвать затруднения при картировании горных районов с большими превышениями рельефа (разд. 4.7.5.2 и 4.7.5.3).

Особое значение при разведке и картировании снимки типа SIR имеют прежде всего для влажных и жарких тропических областей Земли, в значительной степени покрытых девственными лесами, а потому мало известных и слабо изученных. Картирование в этих областях усложняется и тем, что из-за почти постоянной облачности здесь не могут быть проведены аэрофотосъемка и сканерная съемка в видимой части спектра. Снимки «Лэндсат» МСС этих регионов поддаются интерпретации в основном также лишь в небольших, не закрытых облаками районах. Длинноволновое радиолокационное излучение в L-диапазоне, напротив, пронизывает облачный покров. Поэтому радиолокационные системы в тропиках большей частью дают единственно возможный для применения способ разведки.

Рис. 236 показывает фрагмент суши в провинции Ириан-Джая, остров Новая Гвинея, в значительной степени покрытой растительностью. Несмотря на это, рельеф местности на изображении SIR дает

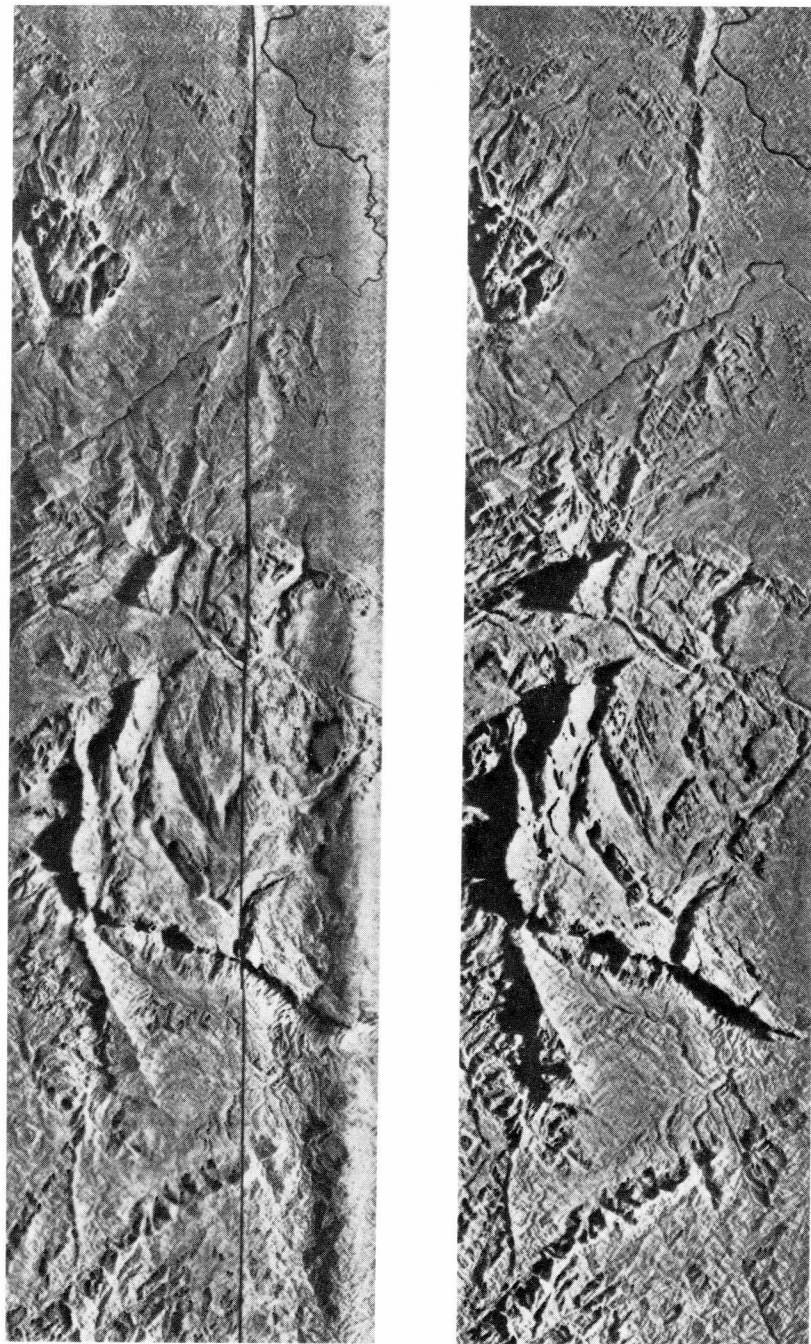


Рис. 233. Пример стереоскопических радиолокационных снимков юго-восточной Венесуэлы. Масштаб около 1:500 000 (Good Year Aerospace/Aero Service Corp.).

региональные и локальные геологические данные о литофациальном и тектоническом строении основания. В левом нижнем углу снимка параллельное берегу простирание горного хребта (складчатый пояс Ленггуру) маркирует общее простирание слагающих его осадочных толщ, смятых в складки. Северо-запад-

нее покрытой тропическим лесом равнины (покрыты точками на рис. 236б), сложенной молодыми и предположительно слабо сцементированными осадками, формы рельефа обнаруживают литологические различия обнажающихся там осадочных пород. Форма и протяжение куэст и структурно-денудационных ус-

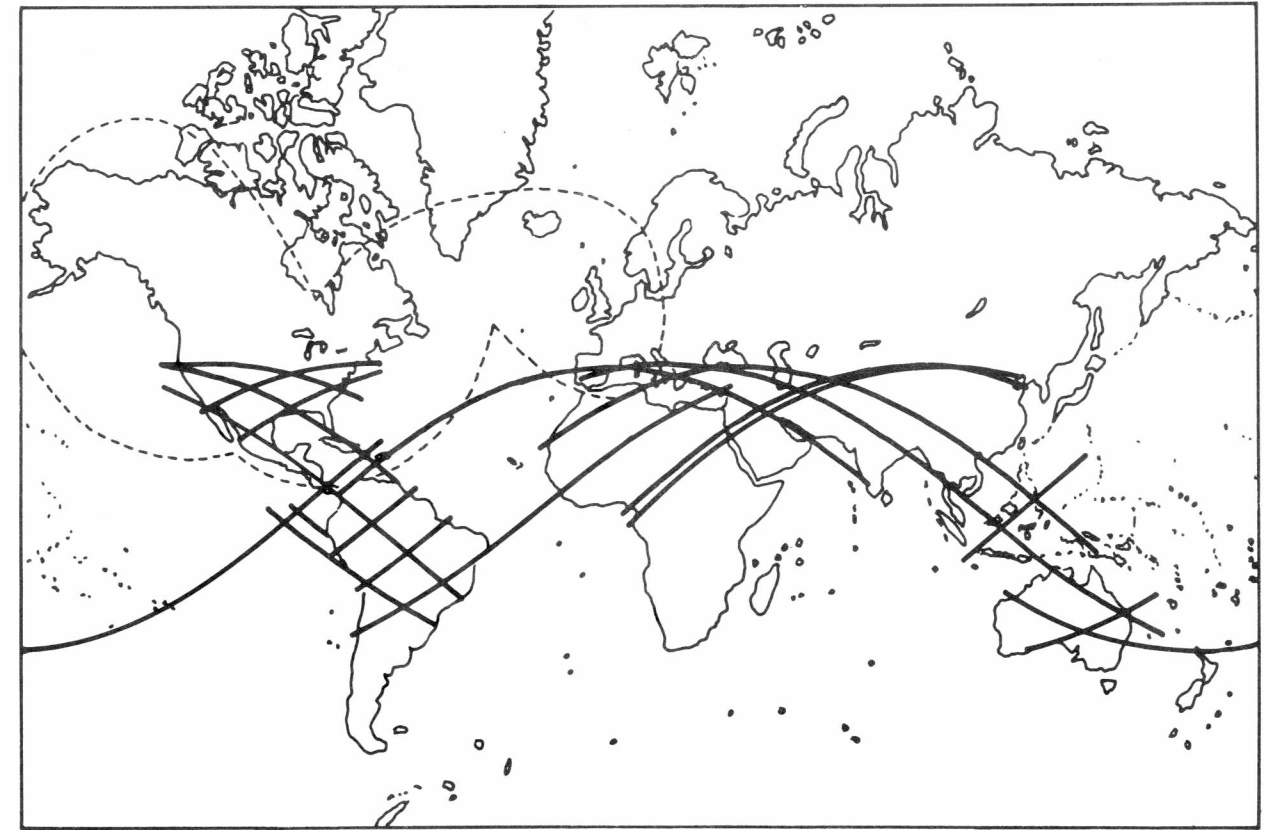


Рис. 234. Полоса съемки по программе эксперимента SIR-A (линии). Области съемки, которые покрывает «Сисат», ограничены штриховой линией (по [19]).

тупов дают указания на различные условия залегания, на направление простирания и падения слоев, на положение осей сжатых и более широких складчатых структур. Прямолинейные и криволинейные врезы долин и уступы рельефа маркируют линии выхода крутых разрывных структур. Область плато (Р) в правой нижней части снимка явно подстилается мощными и полого залегающими здесь известняками. Об этом говорят устанавливаемые на изображении SIR проявления карста, фиксирующиеся в мелких формах рельефа (поля долин). Пространственное разрешение изображения SIR составляет 40×40 м.

Рис. 237 показывает тропический лес в зоне дождей и мангровые заросли на полосе побережья провинции Ириан-Джая. Водные поверхности отображаются на радиолокационном изображении черным тоном. Несколько более темные градации серого фототона отвечают площадям прибрежной равнины с мангровыми зарослями, а светлые тона присущи несколько выше расположенным областям тропических лесов зоны дождей. Таким образом, обусловленное различиями растительности распределение серого тона дает определенную информацию о топографической ситуации в прибрежной области и в ее тылу

(ширина заснятой полосы около 50 км). Прямолинейные отрезки рек (или с угловатым изломом) могут указывать на структурные (тектонические) тенденции основания (зоны нарушений) и могут иметь значение при разведочных работах на нефть или газ. Данные аэромагнитной съемки могли бы в этих случаях дать дополнительную либо контрольную информацию об особенностях соотношений в основании. По Форду и др. [19], для заснятой области существует лишь несколько снимков «Лэндсат», и на всех облачность закрывает не менее 70% площади. Таким образом, для этих районов региональную геологическую информацию можно почерпнуть лишь из радиолокационных снимков (см. также Sabins, 1983).

Первые интерпретации снимков SIR-A аридных и семиаридных областей показали, что радиолокационные снимки земной поверхности, полученные с управляемого космического летательного аппарата или с оперативного разведочного спутника, даже и в этих сравнительно хорошо обнаженных областях могут дать важную информацию, дополняющую данные по изображениям других типов. Рис. 238 изображает местность на юго-востоке Омана. Куэсты и структурно-денудационные уступы проясняют литологическое

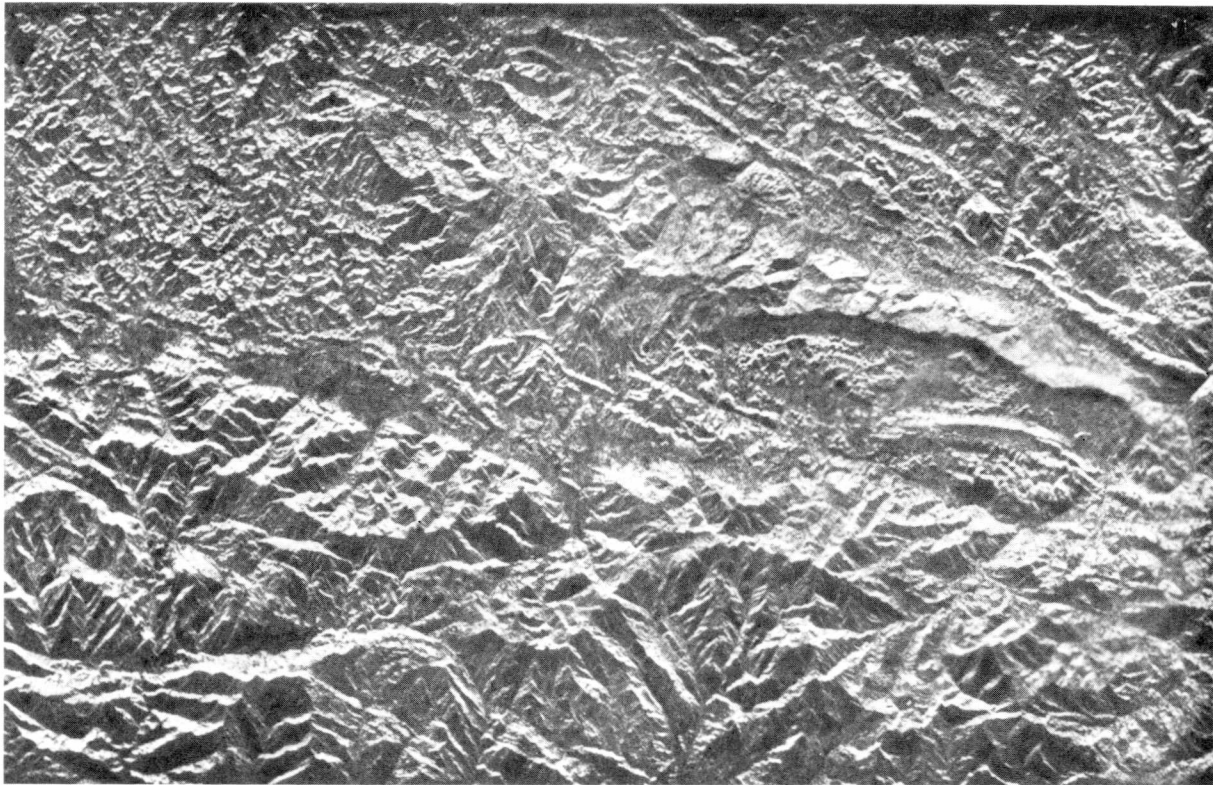


Рис. 235. Снимок SIR-A полосы местности в Гималаях, Пакистан (NASA/JPL). Масштаб около 1:500 000.

расчленение обнажающихся осадочных серий. Различия форм рельефа и градаций серого тона позволяют наметить от двух до трех комплексов скальных пород. Ширина выхода, простирающие слои и изменения падения складчатых серий распознаются четко. Позицию и протяжение нескольких крупных нарушений можно определить по различным соотношениям залегания и структурных форм отдельных областей. На равнинах долин и в обрамлении гор или же некоторых выступающих горных массивов светлые, средние и темные ступени серого тона отражают различия вещественного характера обнажающихся рыхлых пород (неровность поверхности, гранулометрия). Поскольку все долины водотоков ко времени залета были сухими, степень влажности рыхлых пород не могла оказать никакого влияния на процессы отражения. Определяющей во взаимодействии падающего излучения и поверхностей отложений была в этом случае неровность поверхностей (ср. рисунки в разд. 4.7.2.5.3). Грубые продукты выветривания, грубый щебень и обломки могли выступать в роли рассеянных отражателей. Напротив, песчаные и алевритовые отложения представляют собой (применительно к длине волн L-диапазона, $\lambda = 23$ см) гладкие поверхности, зеркально отражающие волны. Поэтому от поверхностей мелкозернистых рыхлых осадков назад

в сенсор поступала меньшая энергия сигнала. В результате этого площади с темным тоном отображают области развития грубообломочных рыхлых осадков. Таким образом, распределение серого тона и различия текстуры отдельных районов соответствуют различиям вещества. Они маркируют сухие ко времени съемки магистрали дренажа и делают видимыми направление и протяженность переноса вещества (продуктов выветривания). Здесь надо упомянуть, что поверхности подобных долин, заполненных продуктами сноса, и межгорных бассейнов, как правило, очень сильно отражают падающее световое излучение, и потому на снимках «Лэндсат» МСС или РБВ семиаридных областей они часто отображаются светлыми, слабо дифференцированными серыми тонами. В этих случаях дополнительную информацию о гранулометрии или различиях вещественного состава и распространения рыхлых осадков могут дать радиолокационные изображения, которые поэтому могут иметь значение для гидрологических и морфодинамических исследований.

В пределах долин во многих местах посреди рыхлых осадков наблюдаются выходы скальных пород, в значительной степени выровненные эрозией (например, ниже середины изображения и слева внизу). Излучение в диапазоне волн длиной 23 см может

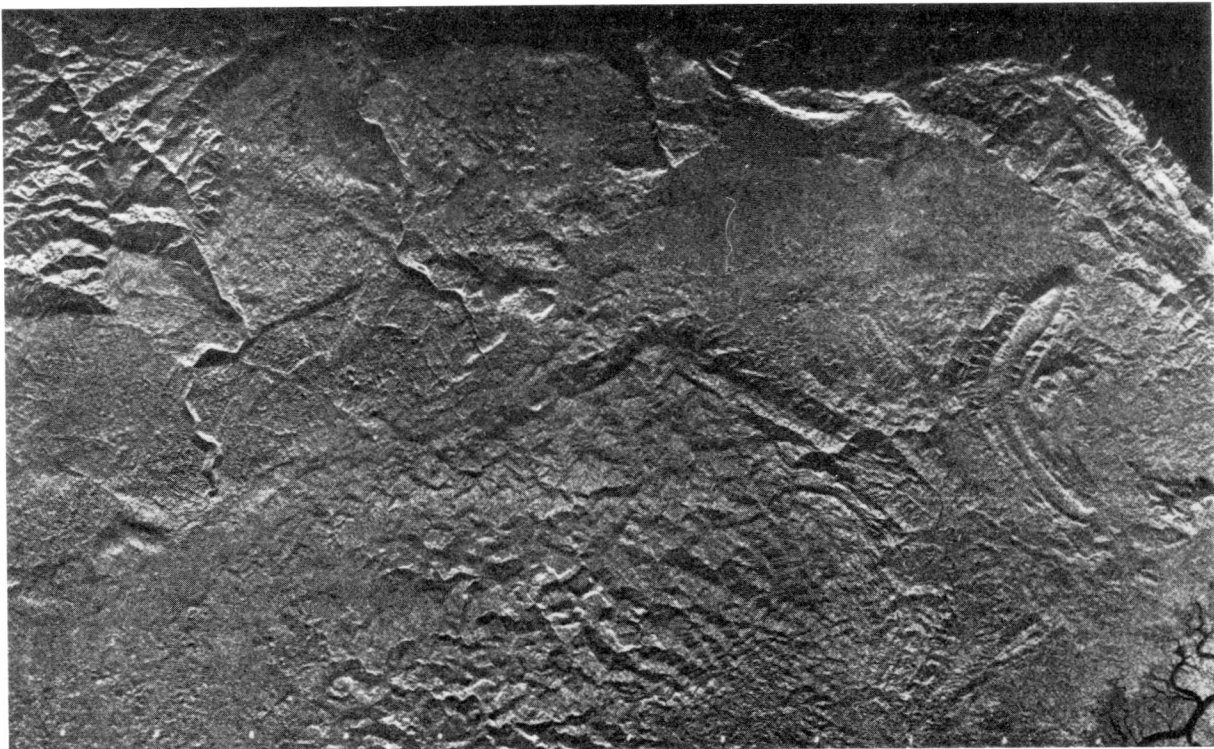


Рис. 236а. Снимок SIR-A полосы местности на северо-западе провинции Ириан-Джая (Фогелькоп Ириан-Джая, Новая Гвинея). Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL). Пояснения в тексте.

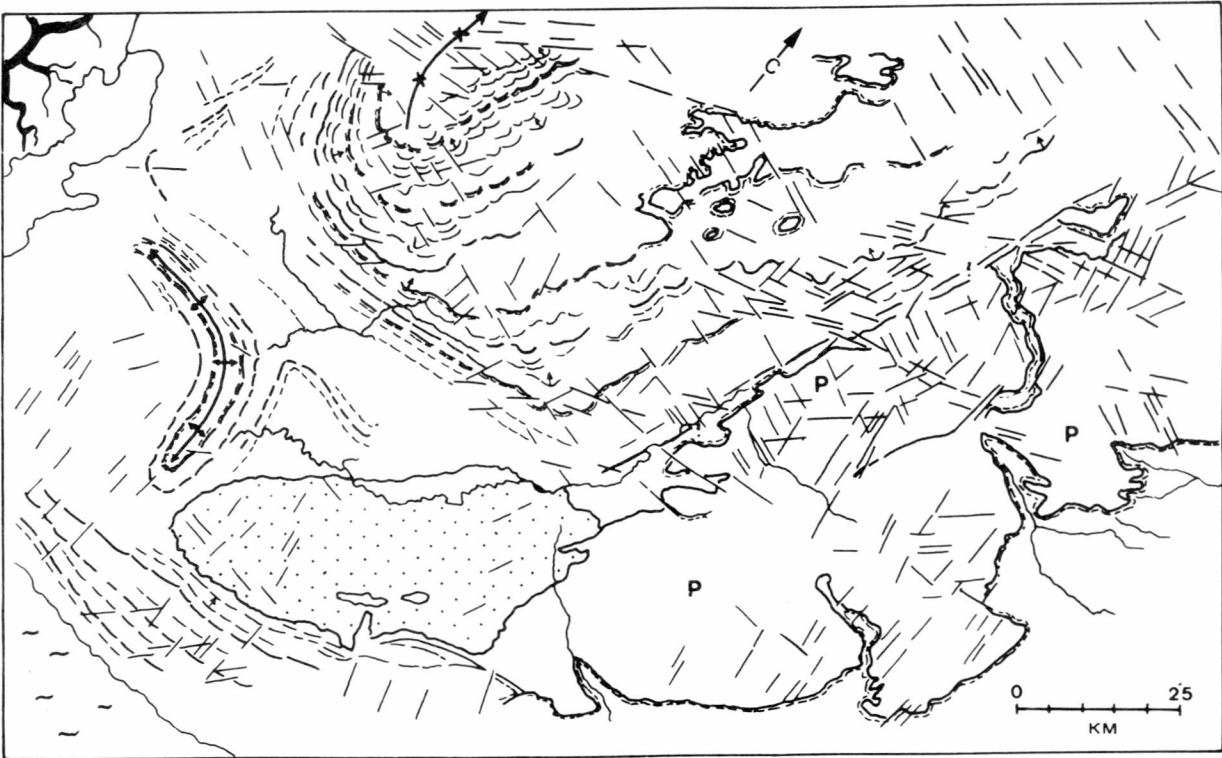


Рис. 236б. Фотогеологическая карта территории рис. 236а.

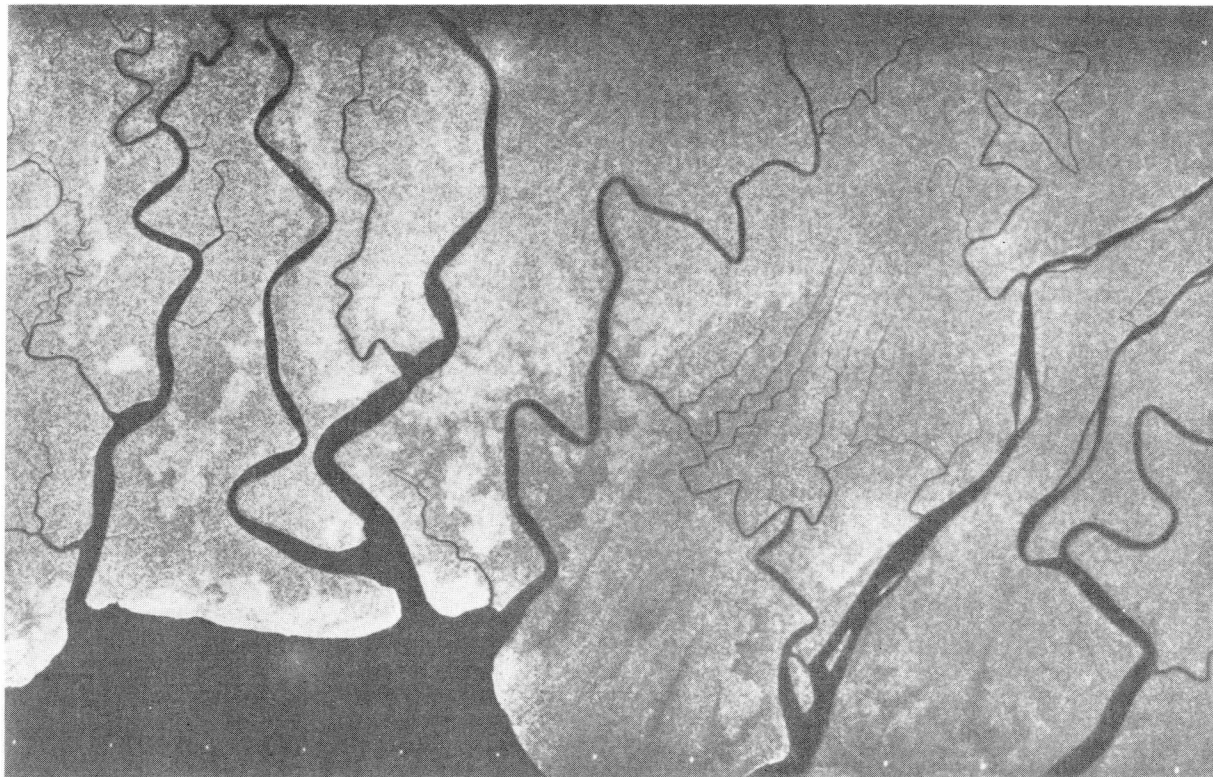


Рис. 237. Снимок SIR-A побережья юго-западной части провинции Ириан-Джая, Новая Гвинея. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).



Рис. 238. Снимок SIR-A местности на юго-востоке Омана. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

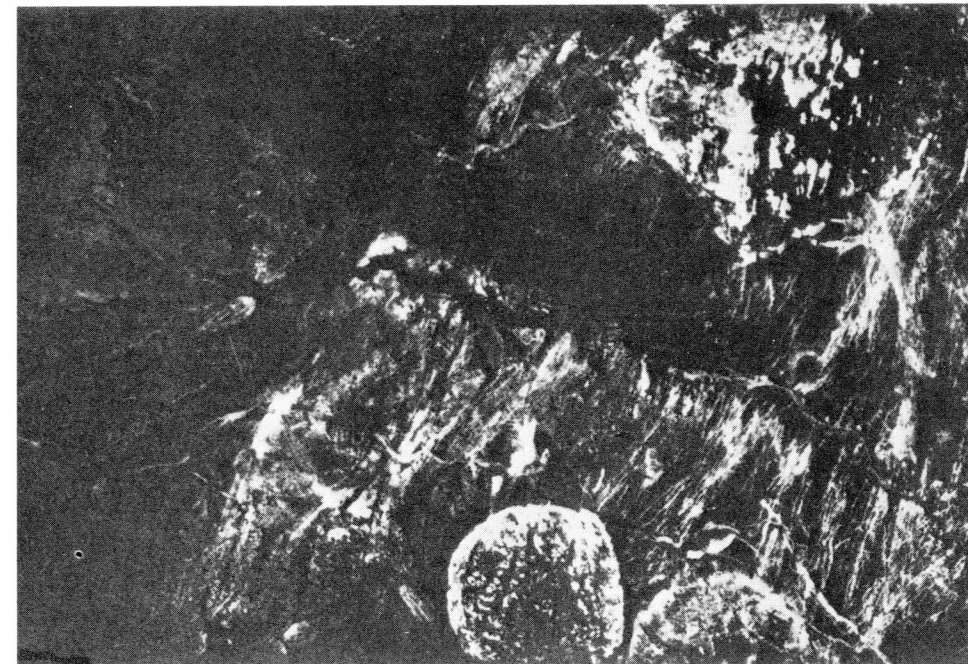


Рис. 239а. Снимок SIR-A района плато Адрар-Ифорас, Мали. Масштаб около 1:625 000. Пояснения в тексте (NASA/JPL).

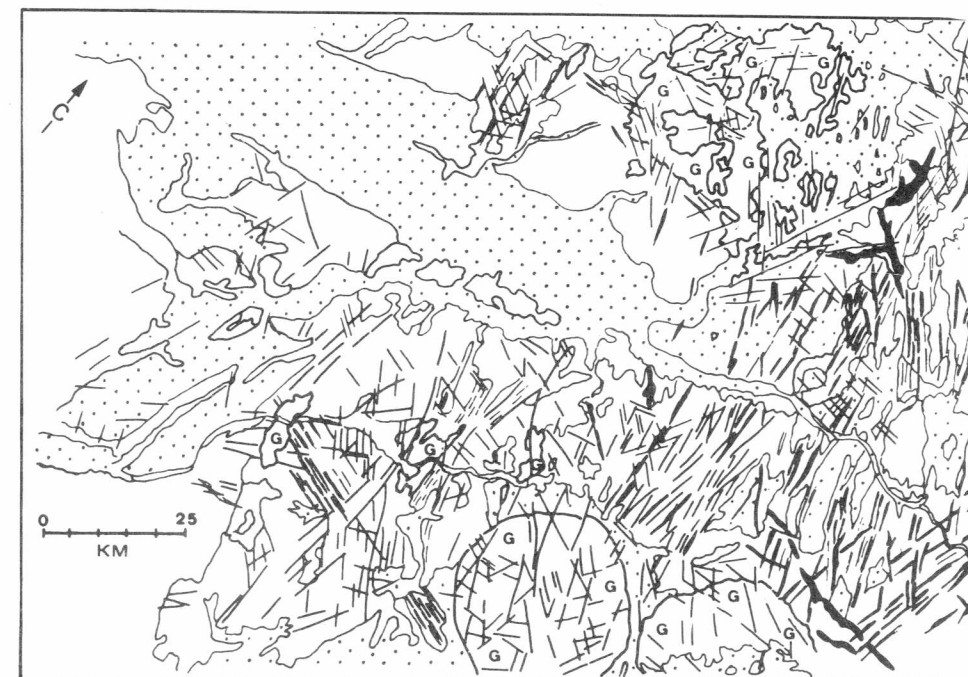


Рис. 239б. Фотогеологическая карта площади рис. 239а.

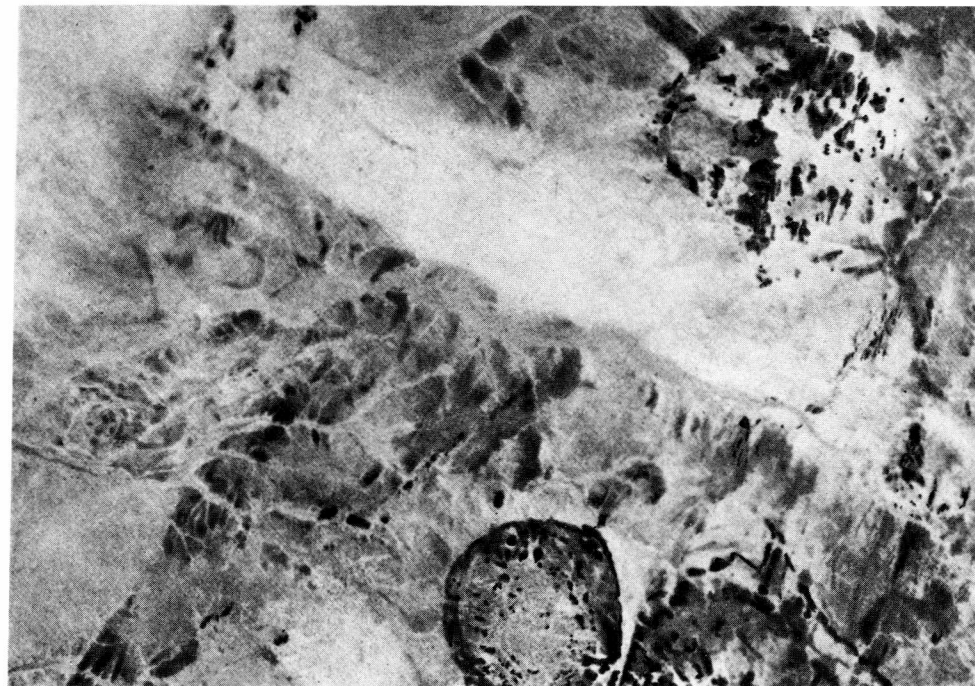


Рис. 240. Снимок «Лэндсат» района, изображенного на рис. 239 (канал 7 МСС). Масштаб 1:625 000 (NASA).

проникнуть в сухие рыхлые пески (например, в подвижные пески или делювий) до глубины несколько дециметров. Благодаря этому на радиолокационном изображении в L-диапазоне могут быть выявлены близкие к поверхности кровли залегающих здесь скальных пород. Однако сама глубина залегания поверхности скальной породы под песчаным покровом должна устанавливаться дополнительными полевыми наблюдениями. Это показывает сравнение снимков SIR-A (рис. 239а) и «Лэндсат» (канал 7 МСС) одного и того же участка местности в Адаре, область Ифорас на северо-востоке Мали (рис. 240). На снимке «Лэндсат» видно, что обширные районы заснятой области перекрыты подвижными песками. Удастся выделить как участки, на которых покров подвижных песков налегает на скальные породы основания лишь в виде тонкого чехла, так и иные районы, в которых покров подвижных песков явно более мощный. Долины заполнены здесь щебнем выветривания и продуктами сноса. Несколько округлых структур указывают на местоположение интрузивных массивов гранитов. Обнажения скальных пород отличаются от рыхлых осадочных образований светлого тона более темными ступенями серого фототона (пустынный загар?), но отчасти также и морфологически. Напротив, изображение SIR-A в весьма дифференцированном виде показывает особенности скальных пород и их тектонические структуры также и в тех районах, которые по данным снимков «Лэндсат» прикрыты подвижными песками. Линии светлого се-

рого тона маркируют на плато позицию и протяжение многочисленных гранитных жил. Они как узкие гребни, выступающие на местности, сильнее отражают приходящие радиолокационные сигналы, чем окружающие гнейсы докембрийского фундамента. Многочисленные нарушения различной ориентировки (которые на снимках «Лэндсат» также не распознаются) вырисовываются на изображении SIR-A линейными вариациями серого тона: темными линиями там, где зоны нарушений размывы и заполнены отложениями подвижных песков, и линиями светлого серого тона там, где в зоны нарушений внедрились дайки, образуя при выветривании на местности узкие стенки. Районы, в которых песчаные отложения имеют слишком большую мощность, чтобы быть пронизанными радиолокационными сигналами, отражаются на изображении SIR темным серым тоном. Часть падающей энергии сигнала была здесь поглощена, но большая часть зеркально отражена. Оба интрузивных комплекса у нижнего края снимка возвышаются над окружающим плато примерно на 200 м [19]. Они выделяются очень светлым серым тоном. Поверхность же плато образует местное топографическое понижение, покрытое песчаными отложениями, которые вызывают появление на изображении SIR темных, а на снимке «Лэндсат» светлых тонов (ср. рис. 240).

Сравнение рис. 241 и 242а особенно четко показывает выигрыш в информации при использовании для аридных областей радиолокационных снимков в

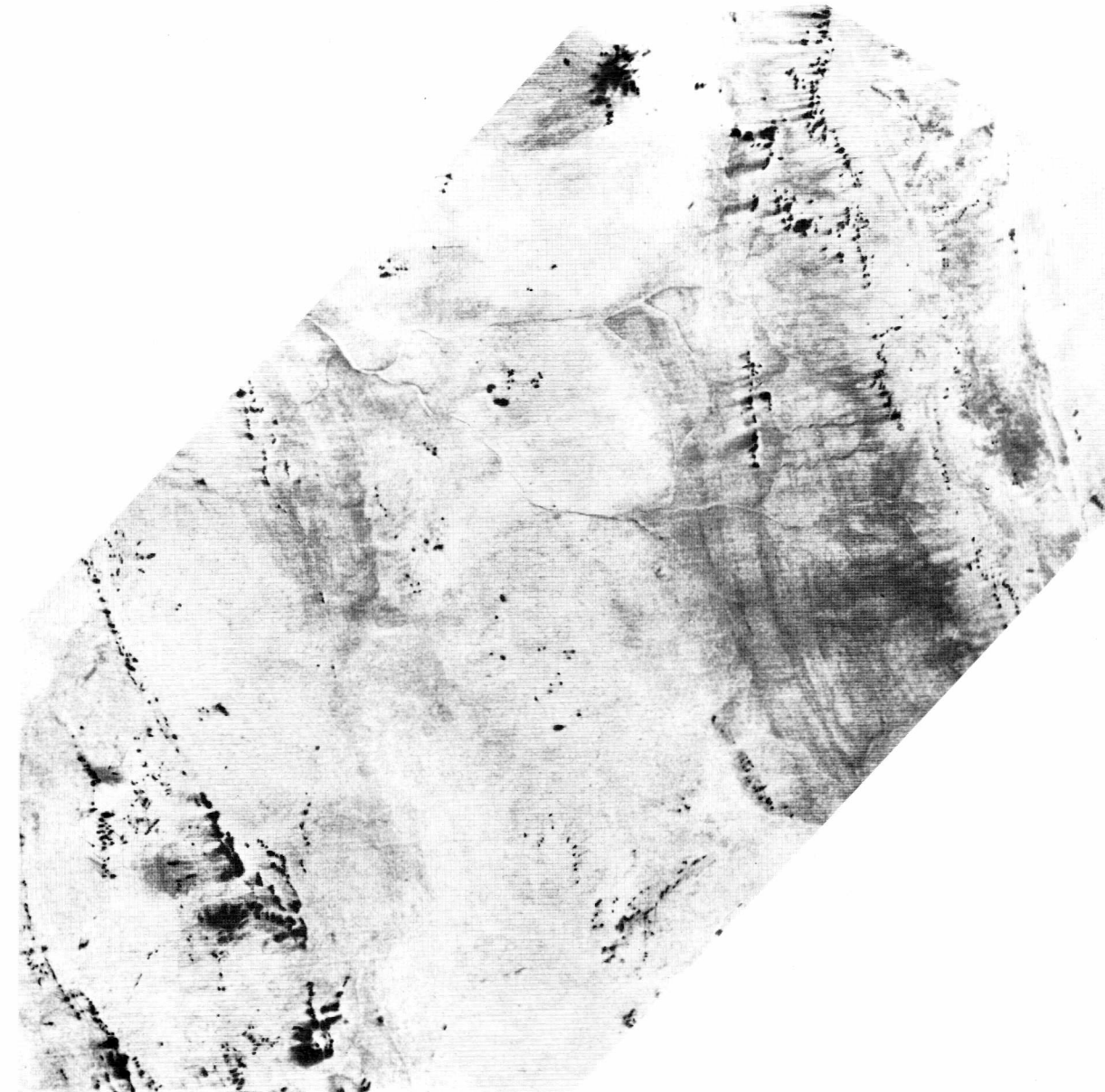


Рис. 241. Снимок «Лэндсат» участка нагорья Ахаггар, Алжир. Масштаб около 1:500 000 (NASA).

L-диапазоне. Отображение выявленного ландшафта на снимке «Лэндсат» (рис. 241) базируется исключительно на спектральном отражении падающего светового излучения поверхностью местности. Изображение МСС позволяет увидеть, что обширные районы пологоволнистого ландшафта покрыты рыхлыми осадками (продукты сноса и прежде всего подвижные пески). При этом в правой части снимка сквозь тонкий чехол подвижных песков и почвенный покров просвечивают определенные структурные тенденции и литофациальные различия основания. В

средней и левой частях изображения песчаный покров явно более мощный. Здесь по снимку «Лэндсат» никакой информации по геологии основания получить нельзя. На радиолокационном же изображении (рис. 242а), напротив, границы литофациальных комплексов, залегание слоев и разрывные структуры основания вырисовываются ясно и в картируемом виде. Оказалось, что длинноволновое радиолокационное излучение может проникнуть сквозь песчаный покров. Падающее радиолокационное излучение было отражено лишь поверхностью кристаллических пород. О мощности осадочно-

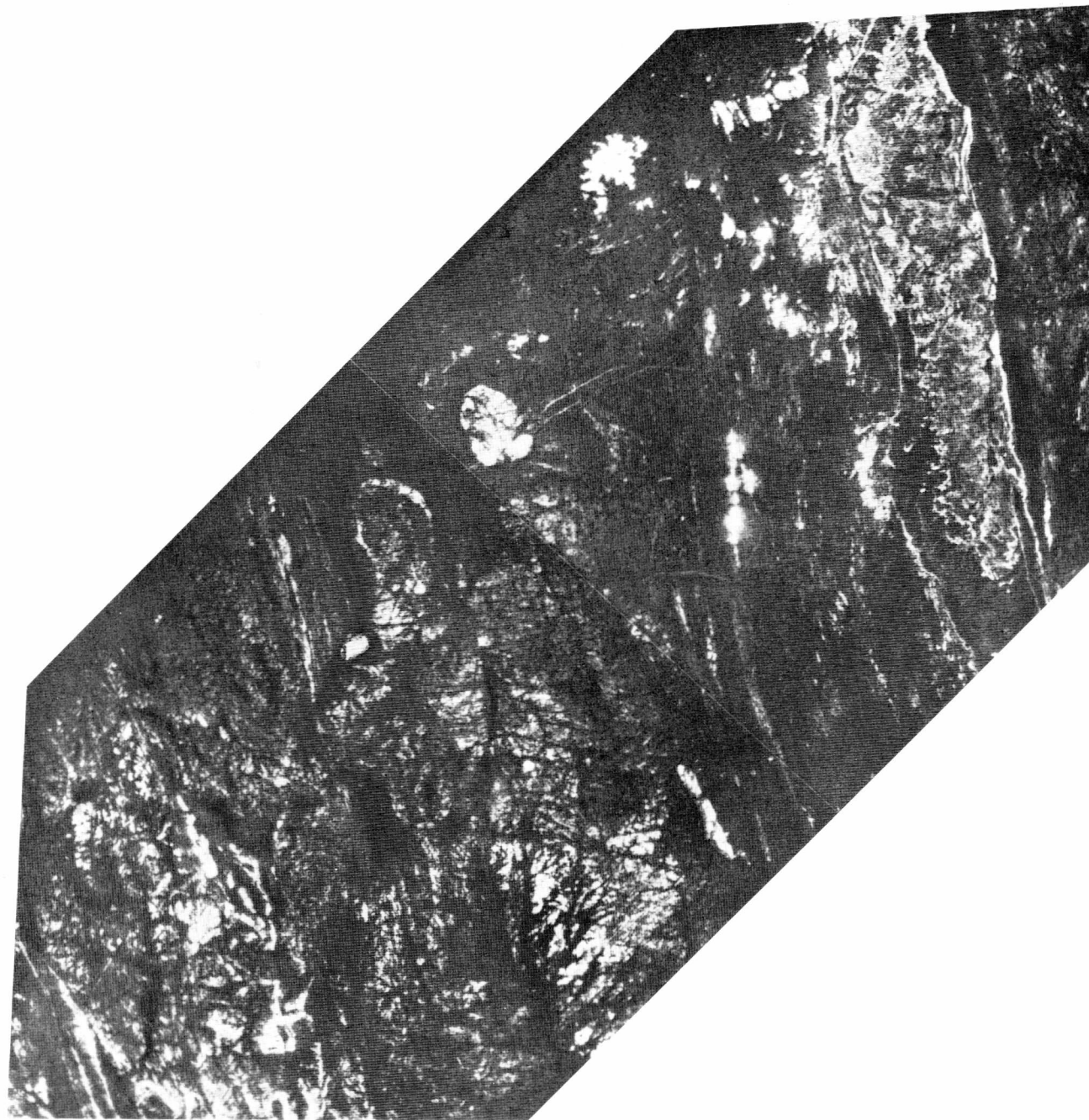


Рис. 242а. Снимок SIR-A территории, изображенной на рис. 241. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

го перекрытия ничего не известно. Однако она может достигать нескольких дециметров, возможно даже превышать 1 м. Области более значительных мощностей осадков, в которых радиолокационное излучение более не достигало поверхности кристаллических пород, на рис. 242б покрыты крапом. Карта позволя-

ет также представить себе рельеф поверхности кристаллического основания под осадками. На значительных площадях по характерным формам рельефа удастся выделить граниты (G), залегающие в крутопадающих свитах метаморфических пород (g—гнейсы, кварциты, амфиболиты). Переходы между гранитами

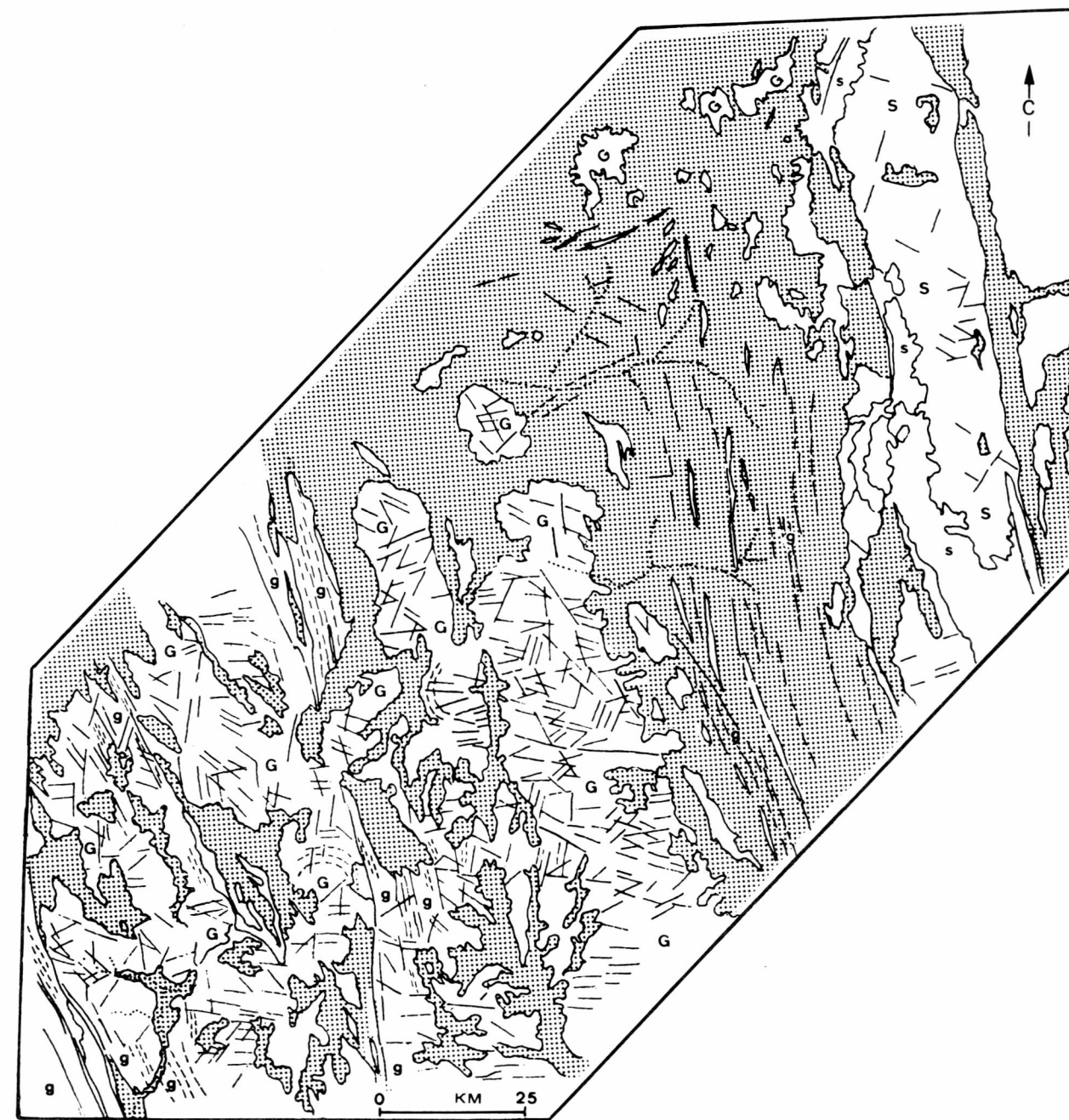


Рис. 242б. Фотогеологическая карта территории с рис. 242а.

и гнейсами позволяют предполагать, что в случае с более крупными гранитными комплексами речь идет о синтетектонических гранитах, хотя местами и отмечаются дискордантные контакты. Две небольшие и округлые интрузии гранитов в верхней части изображения на рис. 242а, судя по их дискордантному кон-

такту, должны быть более молодыми. В правой верхней части снимка выделяется трансгрессивно залегающая на метаморфических сериях свита осадков (S и s; ср. рис. 242б).

На другом примере из семиаридной области (рис. 243) показано, сколь дифференцированно выра-

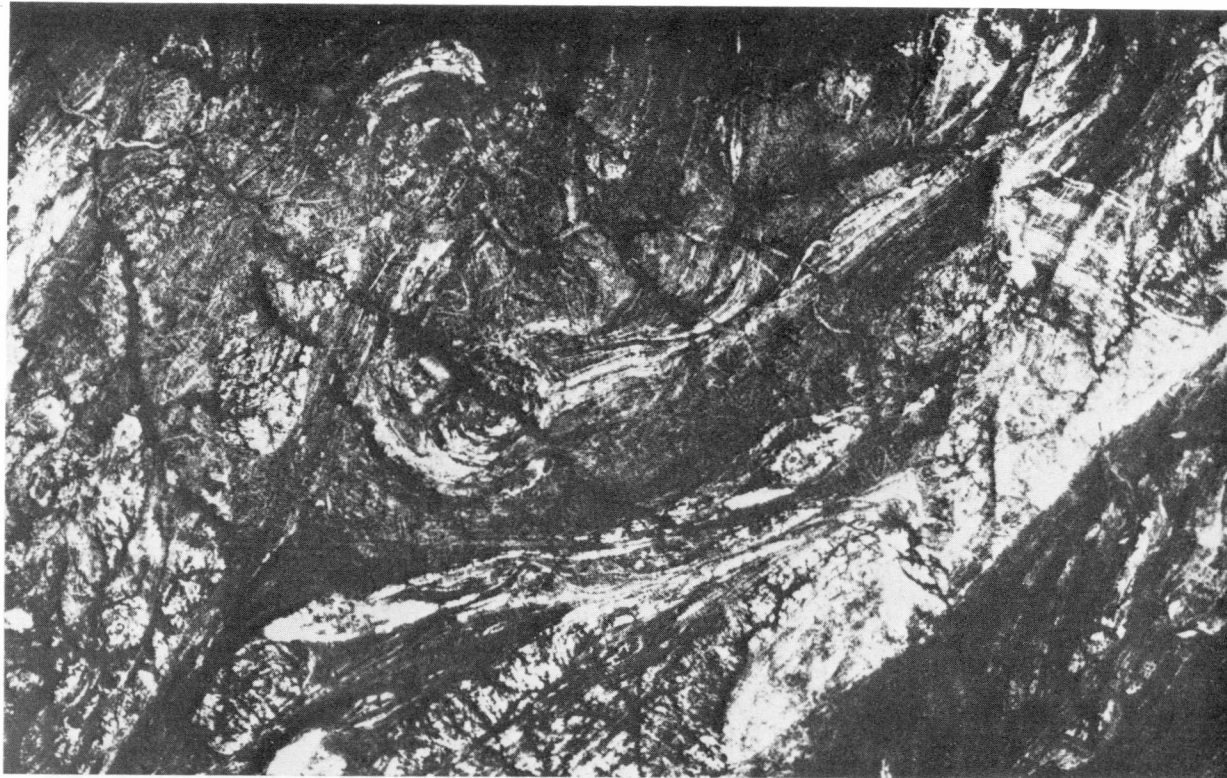


Рис. 243. Снимок SIR-A полосы местности в Мали, плато Адрар-Ифорас. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

жаются литофациальные различия и тектонические структуры на изображении SIR, если они выражены в рельефе местности, равно как и в различиях свойств поверхности рельефа. Здесь это гнейсы и тектонические структуры докембрийского фундамента, в которых располагаются дискордантные (?) интрузии (округлые структуры). Внутри гнейсовых единиц, в которых распознаются слоистость и крутое залегание, наблюдаются площади выходов гранитных комплексов с характерным рельефом поверхности и конкордантными контактами. Обрамление их явно тектонически переработано. Граниты могут иметь синтетектонический характер. Выделяющиеся прямолинейные и криволинейные полосы серого тона маркируют нарушения. Темные серые тона в долинах грубо разветвленной сети рек указывают на песчаные и алевритовые отложения, светлые серые тона — на грубые рыхлые осадки (гравий, щебень), которые рассеянно отражают излучение в L-диапазоне.

Рис. 244 и 245 показывают, насколько по-разному может быть представлена дренажная сеть ландшафта на снимках SIR. На рис. 244 внизу река резко выделяется среди окружения черным тоном, равно как и ее притоки и небольшие водоемы стоячих вод. Долины, бывшие ко времени съемки сухими, на радиолокационном изображении выделяются весьма светлыми

серыми тонами, если гравий и галька в русле реки интенсивно рассеивают поступающие радиолокационные сигналы или если сухие долины заросли кустарником, который также обуславливает сильное рассеянное отражение. На рис. 245 дренажная сеть отображена весьма темными серыми тонами. Снимок относится к семиаридной области на границе между Саудовской Аравией и Ираком. Долины древней гидрографической сети, по Форду и др. [19], покрыты мощными золовыми отложениями. Относительно гладкие поверхности песка и алеврита (применительно к длине волн излучения в L-диапазоне) отражают лишь малую толику энергии сигнала и потому отображаются на изображении SIR темными серыми тонами. При более детальном рассмотрении на оригинале изображения в более широких долинах временных потоков видны также и более светлые серые тона, указывающие на наличие грубых продуктов размыва и переноса в русле реки. Окружающий ландшафт по Форду и др. должен подстилаться известняками и доломитами, неровный поверхностный рельеф которых вызывает рассеянное отражение радиолокационных сигналов, следствием чего являются светлые тона на радиолокационном изображении.

Дренажная сеть ландшафта в субтропической саванной климатической области показана на

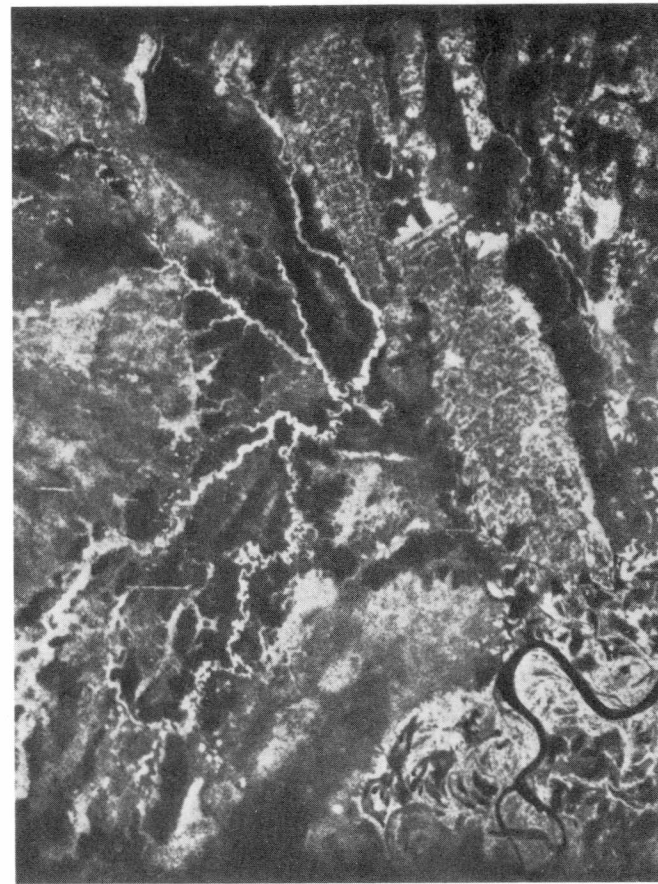


Рис. 244. Снимок SIR-A местности близ Асунсьона, Парагвай. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

рис. 246а (Минас-Жерайс, Бразилия). Природная растительность характеризуется травянистыми, кустарниковыми и низкодереветными сообществами. Местами видны ограниченные участки, используемые в сельском хозяйстве. Основание на значительную глубину подверглось выветриванию. В гидрографической сети пологоволнистых пенепленов четко распознаются различия в ориентировке, расчлененности и плотности, которые позволяют сделать заключения о литофациальных различиях и тектонических структурах основания. Точечные линии на рис. 246б отвечают приблизительным границам разных водосборных бассейнов. Одновременно эти линии ограничивают районы различного микрорельефа и различной текстуры. Четко выражено различие между относительно разреженной речной сетью в нижней части середины снимка на рис. 246а (здесь хорошо заметны отрезки, прямолинейные и сочленяющиеся под углом) и прилегающей справа областью с явно более густой и ветвисто расчлененной дренажной сетью. Разреженная речная сеть развивается на ровных мощных

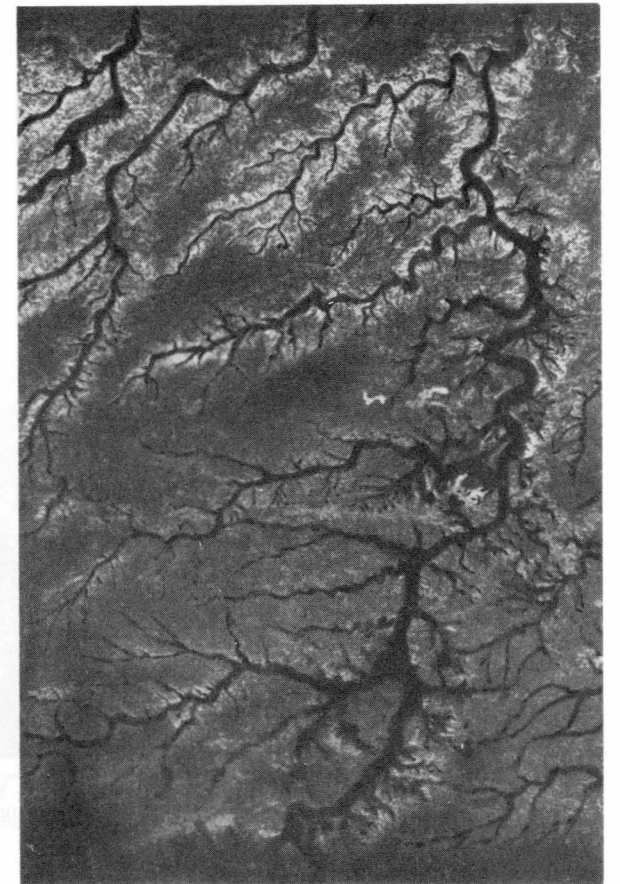


Рис. 245. Снимок SIR-A полосы местности на границе Саудовской Аравии и Ирака. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

покровов латеритов, несколько более густая — на метаморфических сланцах. Благодаря линейно проявляющимся отличиям серого тона, но прежде всего благодаря линейным врезам долин прямолинейные и сочленяющиеся под углом отрезки рек отрисовывают своими очертаниями на снимке SIR-A крутые разрывные структуры основания, главным образом в области развития латеритных покровов. Рис. 246б показывает расположение и ориентировку наиболее заметных структур. В разрывном плане устанавливаются преимущественные направления разрывной тектоники, которые по данным аэромагнитных исследований частично следуют главным структурным направлениям более глубокого основания (ср. Тейлен-Виллиге [291]). Над уровнем поверхности пенеплена в верхней части середины снимка возвышаются в виде останцов кольцевые структуры Серра-Негра и Салитре. Это останцы двух крупных интрузивных комплексов перидотит-пироксенит-карбонатитового состава. Поскольку с этими интрузивными комплексами связаны экономически интересные месторождения (ниобий,

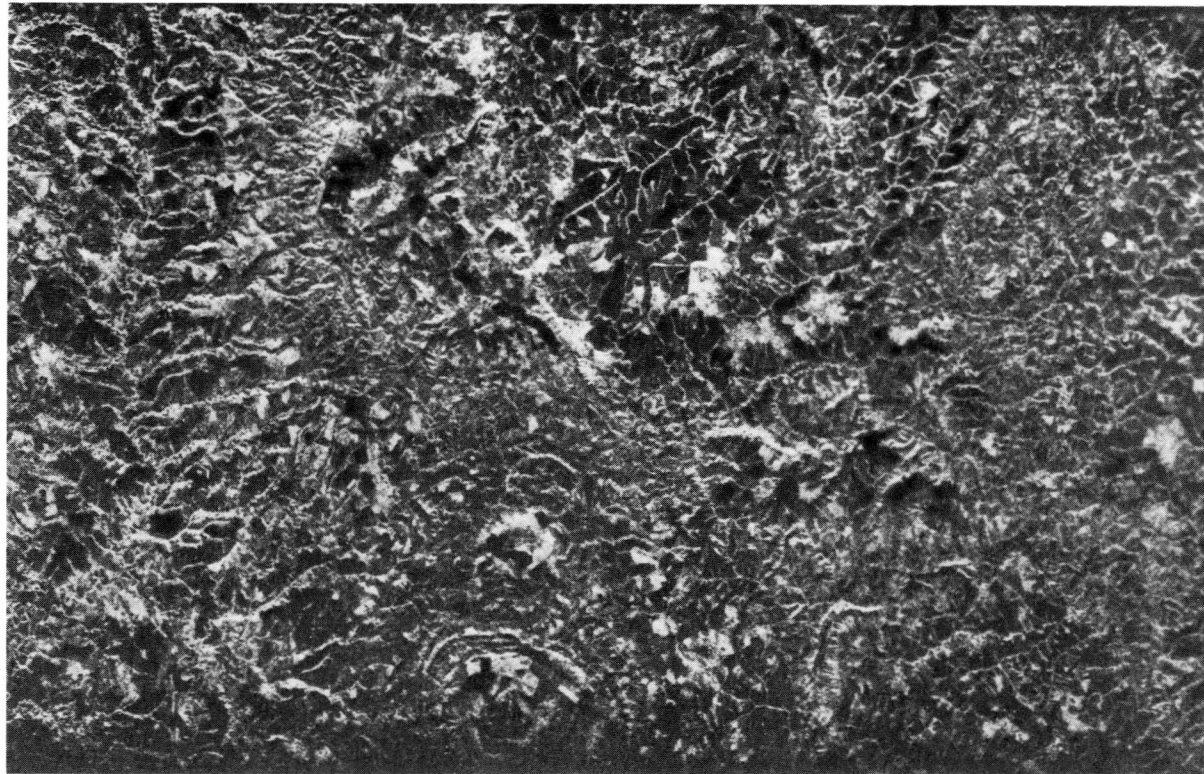


Рис. 246а. Снимок SIR-A полосы местности в штате Минас-Жерайс, Бразилия. Пояснения в тексте. Масштаб около 1:500 000 (NASA/JPL).

титан и редкие земли), заслуживает внимания то обстоятельство, что в площади снимка можно усмотреть несколько других округлых структур, представляющих интерес с точки зрения разведки на рудные полезные ископаемые. При прежних сравнительных исследованиях (Тейлен-Виллиге, 1983) эти округлые структуры не выделялись ни на снимках «Лэндсат», ни на аэрофотоснимках района. В данном случае детальное отражение рельефа охватываемого ландшафта на радиолокационном изображении со спутника добавляет важную дополнительную информацию к данным, которые удастся получить по другим материалам дистанционного зондирования и полевым работам.

В октябре 1984 г. НАСА осуществила второй эксперимент получения радиолокационных изображений «шаттл» (SIR-B) в ходе экспедиции STS-17. Высота орбиты составляла 230 км при наклоне орбиты к экватору 57°. Как и в эксперименте SIR-A, на «Спейс шаттл» была применена система РЛСА в L-диапазоне ($\lambda = 23,5$ см). Новым в этом эксперименте было то, что угол падения при залетах РЛСА мог меняться благодаря механическому изменению наклона антенны в интервале от 15 до 60°. Благодаря этому можно было, например, в течение следующих друг за другом шести дней снять под шестью различными углами

какую-либо полосу местности, изменяя каждый день угол съемки. В соответствующей полосе обзора может быть изучено влияние геометрии и свойств поверхности на обратное рассеяние радиолокационных сигналов как функция геометрии освещения. Впервые были также составлены в цифровом виде количественные (калиброванные) данные изображений под различными углами. Отсюда получаются новые возможности обработки, представления и интерпретации данных по изображениям спутников РЛСА. Поскольку в экспедиции STS-17 на борту была камера с высоким разрешением (крупноформатная камера – КФК), возможны сравнительные тематические интерпретации фотоотпечатков изображения (в видимом и ИК-диапазонах) и данных РЛСА для научных и прикладных исследований. Наконец, может быть установлена благоприятная для получения стереорадиолокационных изображений различных ландшафтов геометрия освещения.

Ширина заснятой при эксперименте SIR-B полосы местности бывает различной. В зависимости от угла падения она составляет от 35 до 50 км. Для картографических целей заснимались полосы шириной 250–300 км. Из смежных полос изображений можно составить радиолокационную схему.

После цифровой обработки данных съемки для

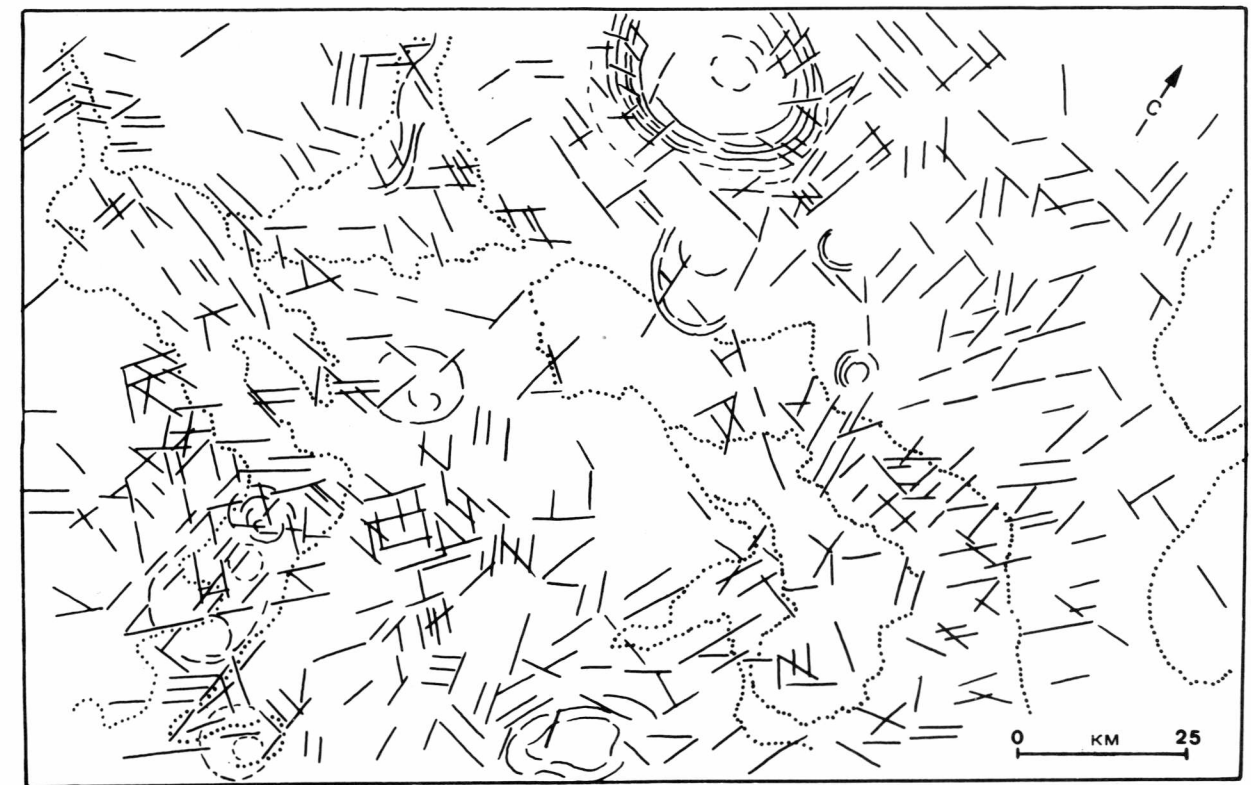


Рис. 246б. Структурно-геологическая схема к рис. 246а.

полосы изображений SIR-B в направлении съемки (в зависимости от угла падения при съемке) характерно пространственное разрешение между 55 м (при угле падения 15°) и 17 м (при угле падения 60°). Азимутальное разрешение составляет 25 м. Точность определения позиции полосы изображений SIR-B (соответственно максимальное отклонение точек изображения от положения на карте) также варьирует в зависимости от угла падения. В направлении азимута полета она составляет при угле падения 15° около 60 м и около 79 м при угле падения 60°. В направлении съемки (направлении освещения) точность определения положения должна составлять примерно 212 м для угла падения 15° и около 83 м для угла 60°. Данные SIR-B доступны с середины 1985 г.

На 1989 г. планируется экспедиция SIR-C, в которой со «Спейс шаттл» впервые будет использована многочастотная радиолокационная система. Планируемая радиолокационная система должна зондиро-

вать одну и ту же территорию одновременно в L-диапазоне (25 см), С-диапазоне (6 см) и Х-диапазоне (3 см). Предусмотрена изменяемая поляризация радиолокационных сигналов. Как и в эксперименте SIR-B, съемочные данные будут записаны и проанализированы в цифровом виде. Калибровка частных систем сделает возможной количественную интерпретацию данных съемки. Благодаря применению многочастотной системы должны улучшиться возможности разделения, разграничения и выделения поверхностных единиц с различными свойствами (породы, почвы и растительные сообщества разного типа и в различных состояниях). Благодаря зондированию одной и той же местности под различными углами (от 15 до 60°) должны быть установлены минимальные углы падения для съемки определенных районов территории или съемки для разрешения специфической тематической задачи.

7. ЛИТЕРАТУРА

7.1. Учебники, справочники, тематические сборники, атласы¹

1. Barrett E. C. & Curtis L. F. (1976): Introduction to environmental remote sensing.—New York (Wiley), 336 pp.
2. Bodechtel J., Beckel L. & Harfner H. (1978): Weltraumbild-Atlas—Deutschland, Österreich, Schweiz.—Braunschweig (Westermann), 88 S.
3. Collins W. E. & Genderen J. L. van (1978): Remote sensing applications in developing countries.—Reading, Engl. (The Remote Sensing Soc., Dept. of Geography, Univ. of Reading), 101 pp.
4. Colwell R. N. (ed.) (1983): Manual of Remote Sensing. Vol. I, Theory, Instruments and Techniques; Vol. II, Interpretation and Applications (2nd ed.).—Falls Church, Virginia (American Society of Photogrammetry), 2440 pp.
5. COSPAR (1982): Remote Sensing and Mineral Exploration, COSPAR Advances in Space Research.—New York (Pergamon).
6. Cracknell A. P. (ed.) (1981): Remote sensing in meteorology, oceanography and hydrology.—New York (Wiley), 542 pp.
7. Deepak A. (ed.) (1980): Remote sensing of atmospheres and oceans.—New York (Academic Press), 672 pp.
8. Deutsch M., Wiesnet D. R. & Rango A. (eds.) (1979): Satellite hydrology.—Proceed. 5th Ann. William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing, Sioux Falls, S. D.—Minneapolis (Am. Water Resources Ass.), 730 pp.
9. DIERCKE: Weltraumbild-Atlas.—Braunschweig (Westermann), 176 S. mit Textband.
10. Duna R. O. & Hart P. E. (1973): Pattern classification and scene analysis.—New York (Wiley), 482 pp.
11. Elachi C., Brown W. E., Cimino J. B., Breed C., Dellwig L., Dixon T., Evans D. L., England A., Ford J. P., McCauley J. F., Macdonald H., Martin-Kaye P., Masursky H., Sabins F., Saunders R. S. & Schaber G. (1982): Shuttle imaging radar experiment.—Science, 218 (4576): 996–1003.
12. Estes J. E. & Senger L. W. (1974): Techniques for environmental analysis.—Santa Barbara, Calif. (Hamilton), 339 pp.
13. Fagerlund E., Kleman B., Sellin L. & Svensson H. (1970): Physical studies of nature by thermal mapping.—Earth Science Rev., 6: 169–180.
14. Fischer J. (1983): Fernerkundung von Schwebstoffen im Ozean.—Hamburger Geophysik, Einzelschr., Reihe A, Wiss. Abh., 65: 105 S.

15. Fischer W. A. & Moxham R. M. (1964): Infrared surveys of Hawaiian volcanoes.—Sciences, 164 (3645): 733–742.
16. Fontanel A. & Voute E. (1982): Remote sensing on geology.—Photogrammetria, 37 (3–5): 201 pp.
17. Ford J. P. (1980): Seasat orbital radar imagery for geologic mapping: Tennessee–Kentucky–Virginia.—Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 64: 2064–2094.
18. Ford J. P., Blom R. G., Bryan M. L., Daily M. I., Dixon T. H., Elachi C. & Xenos E. C. (1980): Seasat views North America, the Caribbean, and Western Europe with imaging radar.—Pasadena, Calif. (NASA Jet Propulsion Lab., Calif. Inst. of Techn.), JPL-Publ. 80–67, 141 pp.
19. Ford J. P., Cimino J. B. & Elachi C. (1983): Space shuttle Columbia views the world with imaging radar: The SIR-A experiment.—Pasadena, Calif. (NASA Jet Propulsion Lab., Calif. Inst. of Techn.), JPL-Publ. 82–95.
20. Frayssé G. (1980): Remote sensing application in agriculture and hydrology.—Rotterdam (Balkema), 510 pp.
21. Geiger R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. – 4. Aufl. Braunschweig (Vieweg), 646 S.
22. Gierloff-Emden H. G. (1977): Orbital Remote Sensing of coastal and offshore environments.—Berlin (Gruyter), 176 pp.
23. Gower J. F. R. (ed.) (1981): Oceanography from space.—New York (Plenum), 998 p.
24. Guyot G. & Verbrugghe M. (eds.) (1983): Spectral signatures of objects in remote sensing.—Bordeaux (Proc. Colloqu. ISP C 7 WG 3).
25. Hodgson R. A., Gay S. P. & Benjamins J. Y. (eds.) (1974): Proc. 1st Int. Conf. on the New Basement Tectonics.—Utah Geol. Ass. Publ., 5, Salt Lake City, 636 pp.
26. International Symposium on Remote Sensing of the Environment.—Environmental Research Institute of Michigan. Ann Arbor.
27. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).—IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, Washington, D. C.
28. Jerlov N. G. (1968): Optical oceanography.—Amsterdam (Elsevier), 194 pp.
29. Johannsen C. J. & Sanders J. S. (eds.) (1982): Remote sensing for resources management.—Ankeny, Iowa (Soil Conservation Society of America), 665 pp.
30. Kahle A. B., Weill G. & Carter W. D. (1981). Session on remote sensing.—COSPAR Advances in Space Research, 1 (10), 341 pp.—New York (Pergamon).
31. Kronberg P. (1984): Photogeologie.—Eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern.—Stuttgart (Enke), 268 S.

32. Lillesand T. M. & Kiefer R. W. (1979): Remote sensing and image interpretation.—New York (Wiley), 612 pp.
33. Lynn D. & Allan J. A. (compilers) (1981): Matching remote sensing technologies and their applications.—Proc. 9th Ann. Conf. Remote Sensing Society.—Reading, Engl. (Dept. of Geography, Univ. of Reading), 550 pp.
34. NASA (1977): Skylab explores the Earth.—NASA SP 380.—Washington, D. C. (NASA), 517 pp.
35. Ostheider M. & Steiner D. (1979): Glossar zur Fernerkundung. Beitrag zum IGU Fachwörterbuch, 2. Aufl.—Ber. u. Skripten zur quant. Geographie.—Zürich (Geogr. Inst. ETH Zürich), 66 S.
36. Richardson B. F. (ed.) (1978): Introduction to remote sensing of the environment.—Dubuque, Iowa (Kendall-Hunt), 496 pp.
37. Sabins F. F. (1978): Remote sensing—principles and interpretation.—San Francisco (Freeman), 426 pp.
38. Sabins F. F. (1981): Remote Sensing Laboratory Manual and Instructor's Key for Remote Sensing Laboratory Manual. With a 35 mm slide set.—La Habra, Calif. (Remote Sensing Enterprises) (Loose leaf note book).
39. Sat-Map Bundesrepublik Deutschland 1:500 000 (1981).—Braunschweig (Westermann).
40. Schneider S. (1974): Luftbild und Luftbildinterpretation.—Bd. XI des Lb. d. Allg. Geographie.—Berlin, New York (Gruyter), 530 S.
41. Short N. (1982): The Landsat tutorial workbook.—NASA Reference Publication 1078.—Washington, D. C. (NASA), 553 p.
42. Shorth N. M., Lowman P. D., Freden S. C. & Finch W. A. (1976): Mission to earth: Landsat views the world.—NASA SP 360.—Greenbelt, Maryland (Goddard Space Flight Center, NASA), 459 pp.
43. Siegal B. S. & Gillespie A. R. (eds.) (1980): Remote sensing in geology.—New York (Wiley), 702 pp.
44. Stanley V. R. (1981): Landsat images of Canada.—Geol. Surv. Canada, Paper 80 (15): 102 pp.
45. Slater P. N. (1980): Remote sensing, optics and optical systems.—Reading, Mass. (Addison-Wesley), 575 pp.
46. Smith W. L. (ed.) (1977): Remote sensing applications for mineral exploration.—Stroudsburg, Pennsylvania (Dowden, Hutchinson & Ross), 391 pp.
47. Swain P. H. & Davis S. M. (eds.) (1978): Remote sensing—the quantitative approach.—New York (McGraw-Hill), 396 pp.
48. Taranik J. V. & Trautwein C. M. (1976): Integration of remote sensing techniques in subsurface analysis.—US Geol. Surv. Open-File Rep., 76–402: 80 pp.
49. Townshend J. R. C. (ed.) (1981): Terrain analysis and remote sensing.—Hemel Hempstead (Engl.) (George Allen & Unwin), 240 pp.
50. Ulaby F. T., Moore R. K. & Fung A. K. (1982): Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Vol. 2, Microwave Remote Sensing.—Reading, Engl. (Addison-Wesley), 628 pp.
51. Verstappen H. T. (1977): Remote sensing in geomorphology.—New York (Elsevier Scientific Publ.), 214 pp.
52. Wenderoth S. & Yost E. (1975): Multispectral photography for earth resources (2nd rev. Printing).—New York (Remote Sensing Information Center, Greenvale), 257 pp.
53. Williams R. S. & Carter W. D. (eds.) (1976): ERTS-1: A new window on our planet.—US Geol. Surv., Prof. Paper, 929: 362 pp.
54. Wolfe W. L. & Zissis G. J. (eds.) (1978): The infrared handbook.—Washington, D. C. (US Gvt. Printing Office).

7.2. Журналы

55. Canadian Journal of Remote Sensing.—Canad. Remote Sensing Society.
56. Landsat Data User Notes.—US Geol. Survey/NOAA/Sioux Falls, S. D.
57. Photogrammetria.—Intern. Soc. of Photogr. and Remote Sensing.
58. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.—Am. Soc. of Photogrammetry.
59. Remote Sensing of Environment.—Elsevier Scientific Publ. Co.

7.3. Цитируемая литература

1. Abrams M. J., Brown D., Lepley L. & Sadowsky R. (1983): Remote sensing for porphyry coppers in Southern Arizona.—Econ. Geol., 78 (4): 591–604.
2. Adler R. E. & Kronberg P. (1976): Vergleich von Satellitenbildern mit der Bruchtektonik unter Tage.—Glückauf Forschungsch., 37 (1).
3. AGFA (1970): AGFACONTOUR Professional.—Daten, Informationen (Prospekt).
4. AGFA-GEVAERT: AGFACONTOUR Professional in der Photographie.—Informationsschrift zur Anwendung des Äquidensiten-Verfahrens. Leverkusen (AGFA-GEVAERT AG), 44 S.
5. Allen W. A. & Richardson A. J. (1968): Interaction of light with a plant canopy.—J. Amer. Optical Soc., 58: 1023–1028.
6. Anderson D. L. (1976): The San Andreas Fault.—Hrsg. in: Continents adrift and continents aground (Readings from Scientific American).—San Francisco (Freeman), 87–102.
7. Ando K. J. (1983): The NASA Multispectral Linear Array (MLA) Program.—Digest IGARSS, 83 (FA-5): 5.1–5.6.
8. Ashley R. P. & Abrams M. J. (1980): Alteration mapping using multispectral images—Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada.—US Geol. Surv. Open-File Report, 80-367: 1–17.
9. Axelsson S. R. J. (1980): On the accuracy of thermal inertia mapping by infrared imagery.—Proc. 14th Int. Symp. Remote Sensing of Environment, 1: 359–278.
10. Bäcker H., Lange K. & Richter H. (1975): Morphology of the Red Sea Central Graben between Subair Island and Abul Kizaan.—Geol. Jb., D 13, 79–123.
11. Bakker P., Church D. J., Feuchtwanger T. F., Grootenboer J., Lee C. A., Longshaw T. G. & Viljoen R. P. (1978): Some practical applications of thermal infrared linescanning.—Mining Mag., 398–413.
12. Barberi F. & Varet J. (1972): Geologic map of the Erta'Ale volcanic range, 1:100 000.—C. N. R. S. (France) and C. N. R. (Italy).
13. Barberi F., Giglia G., Marinelli G., Santacroce R., Tazieff H. & Varet J.: Geological map of the Danakil Depression, 1:500 000.—C. N. R. S. (France) and C. N. R. (Italy).
14. Barger B. (1982): Automatische Klassifikation von Fernerkundungsdaten durch statistische und strukturelle Texturanalyse.—Diss. Fak. Elektrotechnik, Universität Karlsruhe, 220 S.
15. Barr D. (1968): Use of side-looking airborne radar imagery for engineering soil studies.—Final Tech. Rept. Geogr. Sci. Div., US Army Eng. Topogr. Lab., Ft. Belvoir, Virginia.
16. Battivala P. P. & Ulaby F. T. (1977): Estimation of soil moisture with radar remote sensing.—In: ERIN Proc. of the

¹ В тексте ссылки на работы из этого списка даны курсивом.

- 11th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 2: 1557–1566.
17. Baumgardner M.F., Kristof S.J. & Henderson J.A. (1973): Identification and mapping of soils, vegetation, and water resources of Lynn County, Texas, by computer analysis of ERTS MSS data—Symp. on Significant Results Obtained from ERTS-I.—NASA SP, 327 (1): 213–221.
18. Baumgardner M.F., Kristof S.J., Johannsen C.J. & Zachary A.L. (1970): Effects of organic matter on the multispectral properties of soils.—Proc. of the Indiana Acad. of Science for 1969, 79: 413–422.
19. Bayer H.-J. (1982): Bruchtektonische Bestandsaufnahmen der Schwäbischen Ostalb (Geländeuntersuchungen, Luftbild- und Satelliten-Bildauswertungen).—Diss. TU Clausthal, 235 S.
20. Berberian M. (1976): Seismotectonic map of Iran, 1:2 500 000.—Geological Survey of Iran, Report, 39.
21. Best R.G. & Smith J.R. (1978): Photographic contrast enhancement of Landsat imagery.—Photogr. Eng. and Rem. Sens., 44 (8): 1023–1026.
22. Biju-Duval B., Rivereau J.C., Lamperein C. & Lopez N. (1976): Esquisse photogéologique du domaine méditerranéen. Grands traits structuraux à partir des images du satellite Landsat-1.—Rev. Inst. Franç. Petrole, 31 (3): 365–400 (mit 2 Kartenblättern 1:1 000 000).
23. Bina R.T., Carpenter K., Zacher W., Jara R.S. & Lim J.B.R. (1978): Coral reef mapping using landsat data: follow-up studies.—Nat. Res. Management Center, Philippines, NPMC Monograph, 3, Series of 1978, 17 pp.
24. Black R. & Girod M. (1970): Palaeozoic to recent igneous activity in West Africa.—In: Clifford T.N. & Gass I.G., African Magmatism and Tectonics.—Edinburgh (Oliver & Boyd), pp. 185–210.
25. BMFT/DFLVR (1983): Experiment Reihenmeßkammer in der Spacelab-1-Mission (STS 9), 23 S.
26. Bodechtel J. (1978): European key applications for satellite remote sensing experiments with present systems-requirements for operational application.—Proc. Int. Conf. on Earth Observ. from Space and Management of Planet. Res., Toulouse, ESA SP, 134: 613–628.
27. Bodechtel J. (1981): Satellite Remote Sensing in Europe.—J. Remote Sensing Soc. Japan, 1st Int. Symp., Earth Resources and Space Age, pp. 95–120.
28. Bodechtel J. & Haydn R. (1976): Analog and digital processing of multispectral data for geologic applications.—In: Peel R.F., Curtis L.F. & Barret E.C. (eds.), Remote Sensing of the Terrestrial Environment.—London (Butterworths), 159–168.
29. Bodechtel J., Haydn R., Kaufmann H., Yamani S.A., Zilger J., Birner W., Hofmann M., Hofmann O., Klein G., Laucht H., Listmann H., Meissner D., Hiller K., Schwarz U., Seige P. (1983): MOMS—ein modularer optoelektronischer Multispektralscanner. Spezifikation und erste Ergebnisse der Mission auf STS 7.—Jb. Dt. Ges. f. Luft- und Raumfahrt, 14 S.
30. Bolle H.J. (1975): Physikalische Grundlagen der Fernerkundung.—Symp. Fernerkundung der DFVLR und DGP, Deutsche Ges. f. Luft- und Raumfahrt, Köln, S 11–25.
31. Bolle H.J. (1971): Einfluß der Atmosphäre auf die Erkundung von Erdoberflächen-Signaturen. In: Deutsche Ges. f. Luft- und Raumfahrt, DGLR-Symposium: Fernerkundung der Erdoberfläche. München 1971, DGLR-Mitt., 72–10: 43–95.
32. Bormann P. (1980): Erdfernerkundung.—Veröffentl. d. Zentralinst. f. Phys. der Erde, 65: 127 S.
33. Bottke H. & Polysos N. (1982): Die Altenbürener Störungszone und der nördliche Teil der Briloner Scholle im tektonischen Photolineationsmuster des nördlichen Sauerlandes (Rhein. Schiefergebirge).—Geol. Hbh. Hessen, 82: 50 S.
34. Bowers S.S. & Hanks R.J. (1965): Reflection of radiant energy from soils.—Soil Science, 100: 130–138.
35. Buchroithner F. (1983/84): Karte der Landsat-Bildlineamente von Österreich, 1: 500 000.—Inst. für Kartogr. Österr. Akad. der Wiss., Hrg. von der Geol. Bundesanstalt, Wien, in mehreren Tafeln.
36. Buchroithner M.F. (1982): Computer-aided evaluation of the major fracture pattern in Austria derived from Landsat data.—Jb. Geol. Bundesanst., 125 (1–2): 219–271.
37. Burger H. (1981): Untersuchungen zur Klassifizierung von Gesteinsoberflächen auf Landsat-Aufnahmen mit Hilfe von Signatur- und Texturparametern.—Berl. Geowiss. Abh., Reihe A, 35: 102 s.
38. Burger H., Dobbrick K., Hilt E., Köhler U., List F.K., Stefan M. & Weigelt A. (1982): Information from spectral and textural features for geological interpretation of Landsat imagery of the Eastern Sahara.—In: Env. Res. Inst. Milligan, Ann Arbor, Mi.: Int. Symp. On Remote Sensing of Environment, 1st Thematic Conference: Remote sensing of arid and semi-arid lands, Cairo, Egypt: pp. 1261–1267.
39. Burkhardt & Polysos N. (1981): Photolineationen des Ruhrgebietes und der Niederheinischen Bucht und ihre tektonische Interpretation.—Glückauf Forschungsh., 42: 187–193.
40. Brothers G.L. & Fish E.B. (1978): Image enhancement for vegetative pattern change analysis.—Photogr. Eng. and Remote Sensing 44 (5): 607–616.
41. Canney F.C. (1975): Development and application of remote-sensing techniques in the search for deposits of copper and other metals in heavily vegetated areas.—Status Report June 1, 1975, USGS Project Report (IR) NC, 48: p. 42.
42. Canney F.C., Cannon H.L., Cathrall J.B. & Robinson K. (1979): Autumn colors, insects, plant disease and prospecting.—Econ. Geol., 74: 1673–1676.
43. Carlle Ch. (1982): Satellite mapping—geometric correction of remote sensing images.—Inst. for Landmaling of Fotogrammetrie, Danmarks Tkn. Højskole, Medd., 12, 128 pp.
44. Carta Geologica do Brasil ao milionésimo. Folha Cuiabá (1979).—Min. Minas e Energia, DNPM, Rio de Janeiro.
45. Carter W.D. (1982): Remote sensing for exploration of precambrian mineral deposits.—In: The Development of Precambrian Mineral Deposits.—Natural Resources and Energy Division, U.N. Dept. of Techn. Coop. for Development. New York (Pergamon), 365–381.
46. Chafii A. (1980): Die Geologie des westlichen Anteils des Brockenmassivs.—Clausth. Geol. Diss., 2: 71 S.
47. Chan S.H. & Collins W. (1983): Confirmation of the airborne biogeophysical mineral exploration technique using laboratory methods.—Econ. Geol., 78 (4): 723–736.
48. CNES (1982): SPOT—satellite-based remote sensing system.—Toulouse (Centre National d'Etudes Spatiales), 16 pp.
49. CNES (1983): SPOT—un système spatial de télédétection de la Terre.—Toulouse (Centre National d'Etudes Spatiales), 4 p.
50. Collins W., Chang S.H., Raines G., Canney F. & Ashley R. (1983): Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits.—Econ. Geol., 78: 737–749.

51. Condit H.R. (1970): The spectral reflectance of American soils.—Photogr. Eng., 36 (9): 955–966.
52. Condit H.R. & Grum F. (1964): Spectral energy distribution of daylight.—J. Opt. Soc. Amer., 54: 937–944.
53. Conel J.E. & Southard G. (1980): Application of remote sensing methods in uranium exploration, Copper Mountain, Wyoming, USA.—26e Congr. Geol. Intern., Paris, Abstracts, 2, Section 11: 817.
54. Conel J.E., Abrams M.J. & Goetz A.F.H. (1978): Study of alteration associated with uranium occurrences in sandstone and its detection by remote sensing methods.—JPL-Publ., 1: 66–78.
55. Cordsen E. (1981): Zur spektralen und thermalen Erkundung von Böden.—Dipl.-Arbeit, Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Univ. Kiel.
56. Darch J.P. & Barber J. (1983): Multitemporal remote sensing of a geobotanical anomaly.—Econ. Geol., 78 (4): 770–782.
57. Dietz R.S., French B. & Oliveira M.A.M. (1973): Araguina Dome and Serra de Canghales (Goiás)—Probable astroblemes.—SGB, Nucl. da Bahia, XXVII Congr. Bras. Geol., Resumo des Comm., Sess. Têc., 1: 102–103.
58. Doerffer R. (1978): Zum Problem der Fernerkundung von Substanzen im Wasser mit dem Multispektralabtaster.—Bildmessung und Luftbildwesen, 4: 133–138.
59. Doerffer R. (1979): Untersuchungen über die Verteilung oberflächennaher Substanzen im Elbe-Ästuar mit Hilfe von Fernmeßverfahren.—Arch. Hydrobiol. Suppl. 43 (Elbe-Ästuar 4) (2/3): 119–224.
60. DFVLR (1979): Fernerkundung der Erde und Atmosphäre.—DFVLR, Forschungsbereich Nachrichtentechnik und Erkundung, Inst. f. Optoelektronik, Wiss. Bericht: 54–66.
61. Dowdell G. (1977): Eine Blockausgleichung für Abbildungen des seitwärtsschauenden Radar (SLAR).—Wiss. Arbeiten der Lehrst. f. Geodäsie, Photogrammetrie u. Kartographie an der TH Hannover, 76: 185 S.
62. Doyle F.J. (1979): A large format camera for shuttle.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 45 (1): 73–78.
63. Duplan M. (1973): Les grands linéaments de la France.—C.R. Acad. Sc., Paris, Sér. D, 276: 2947–2949.
64. Estes J.E. & Simoneit D.S. (1975): Fundamentals of image interpretation.—In: Reeves R.G. (ed.), Manual of Remote Sensing (1st ed.), Chapter 14.—Falls Church, Va. (Amer. Soc. of Photogrammetry).
65. Fraser R.S. (1975): Interaction mechanisms within the atmosphere.—In: Reeves R.G. (ed.), Manual of Remote Sensing (1st ed.), Chapter 12.—Falls Church, Va. (Amer. Soc. of Photogrammetry).
66. Friedman J.D. (1968): Thermal anomalies and geologic features of the Mono Lake Area, California, as revealed by infrared imagery.—NASA Technical Letter, 82.
67. Friedman J.D. & Frank D. (1980): Infrared surveys, radiant flux and total heat discharge at Mount Baker volcano, Washington, between 1970 and 1975.—US Geol. Surv., Prof. Paper, 1022-D.
68. Friedman J.D., Olhoeft G.R., Johnson G.R. & Frank D. (1981): Heat content and thermal energy of the June dacite dome in relation to total energy yield, May–October 1980. In: The 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington. US Geol. Surv.: 557–567.
69. Friedman J.D., Frank D., Kiefer H.H. & Sawatzky D.L. (1981): Thermal infrared surveys of the May 18 crater subsequent lava domes, and associated volcanic deposits.—In: The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, US Geol. Surv.: 279–293.
70. Friedman J.D. & Williams R.S. (1968): Infrared sensing of active geologic processes.—In: Env. Res. Inst. Michigan, Proceedings of the Fifth Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, p. 787–820.
71. Fürst M. (1980): Die photogeologische Linearanalyse und ihre Anwendung bei der indirekten Erkundung von Kluftwasser.—Mainzer Geowiss. Mitt., 9: 53–83.
72. Fürst M., Klupp K. & Müller R. (1978): Die photogeologische Linearanalyse und ihre Anwendung bei der Uranprospektion in der Oberpfalz.—Erlanger Geol. Abh., 106: 34 S.
73. Garson M.S. & Krs M. (1976): Geophysical and geological evidence of the relationship of Red Sea transverse tectonics to ancient fractures. Bull. Geol. Soc. Amer., 87: 169–181.
74. Gates D.M. (1970): Physical and physiological properties of plants.—In: Agric. Board, Nat. Res. Council, Remote sensing with special reference to agriculture and forestry.—Washington (National Academy of Science), 224–252.
75. Gates D.M. et al. (1965): Spectral properties of plants.—Appl. Optics, 4: 11–20.
76. Gausman H.W. (1974): Leaf reflectance of near infrared.—Photogr. Eng., 40: 183–191.
77. Gausman H.W. (1977): Reflectance of leaf components.—Rem. Sens. of Env., 6 (1): 1–10.
78. Gawarecki S.J., Lyon R.J.P. & Nordberg W. (1965): Infrared spectral returns and imagery of the earth from space and their applications to geologic problems.—Scientific Experiments for Manned Orbital Flight, 4, Science and Technology Series, American Astronautical Society, pp. 13–33.
79. Gerlach C. (1977): Satellitenbildauswertung zur Feststellung von Trinkwasserreserven im Rheinischen Schiefergebirge.—Geol. Rdsch., 66: 850–866.
80. Gierloff-Emden H.G. (1977): Orbital remote sensing of coastal and offshore environments.—A manual of interpretation.—Berlin (Gruyter).
81. Gierloff-Emden H.G. (1982): Remote sensing for coastal areas.—In: Int. Geosci. and Rem. Sens. Sympos. (IGARSS 82), München, WA, 8: 1.1–1.8.
82. Gillespie A.R. (1980): Digital techniques of image enhancement. In: Siegal B.S. & Gillespie A.R. (eds.), Remote sensing in geology.—New York (Wiley), 139–226.
83. Gillespie A.R. & Criss R.E. (1983): Correlation of infrared reflectance ratios at 2.3 µm/1.6 µm and 1.1 µm/1.6 µm with $\delta^{18}\text{O}$ values delineating fossil hydrothermal systems in the Idaho batholith.—Digest IGARSS 83, Intern. Geoscience and Remote Sensing Symposium, TA-4: 4.1–4.6.
84. Girdler R.W. (1968): Drifting and rifting of Africa.—Nature, 217: 1102–1105.
85. Goetz A.F.H., Abrams M.J., Billingsley F.C., Elston D.P., Gillespie A.R., Lucchitta I. & Squires R.L. (1975): Application of ERTS-images and image processing to regional geologic problems and geologic mapping in Northern Arizona.—NASA Technical Report, 32-1597.—Pasadena, Calif. (JET Propulsion Laboratory, Calif. Inst. of Techn.), 188 pp.
86. Goetz A.F.H., Rock B.N. & Rowan L.C. (1983): Remote sensing for exploration: an overview.—Econ. Geol., 78: 573–590.

87. Goetz A.F.H. & Rowan L.C. (1981): Geologic remote sensing.—Science, 211 (4484): 781–791.
88. Goetz A.F.H., Rowan L.C. & Kingston M.J. (1982): Mineral identification from orbit: Initial results from the Shuttle multispectral infrared radiometer.—Science, 218 (4576): 1020–1024.
89. Goetz A.F., Siegal B.S. & Rowan L.C. (1975): Quantitative spectral techniques and computer image processing as applied to lithologic mapping.—Proc. of the 1975 IEEE Conference on Decision and Control: 412–413.
90. GOODYEAR AEROSPASE: Developing national resources with synthetic aperture radar.—Litchfield Park, Arizona (Goodyear Aerospace Corp., Arizona Division), 63 pp.
91. Gordon H.R. (1978): Atmospheric correction.—Appl. Optics, 17: 1631–1636.
92. Gordon H.R. & McCluney (1975): Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing.—Appl. Optics, 14: 413–419.
93. Graham L.C. (1975): Flight planning for stereo radar mapping.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 41: 1131–1138.
94. Grootenboer J. (1973): The influence of seasonal factors on the recognition of surface lithologies from ERTS imagery of the western Transvaal.—Third ERTS Symposium.—NASA Spec. Publ., 351 (1): 643–655.
95. Günther R. (1972): Remote Sensing in der Geologie.—BMBW-Forsch.-Bericht, 7228: 212 S.
96. Günther R. (1977): Großfotolineationen des mitteleuropäischen Raumes und ihre geologisch-tektonische Bedeutung.—Geotekt. Forsch., 53: 42–67.
97. Günther R., Kappelmeyer O. & Kronberg P. (1977): Zur Prospektion auf geothermale Anomalien, Erfahrungen einer Modelluntersuchung in Polichnitos, Lesbos (Griechenland).—Geol. Rundsch., 66 (1): 10–33.
98. Günther R., Kronberg P. & Schönfeld M. (1975): Struktur-geologische Karte der Region des Roten Meeres und angrenzender Gebiete 1:2000000, erstellt aus Landsat-Kartierungen.—Geol. Inst. TU Clausthal (unveröff.).
99. Gwinner M.P. (1971): Geologie der Alpen.—Stuttgart (Schweizerbart), 480 S.
100. Hänel R. (1970): Report I and II on Geothermal Investigations in Greece.—Bundesanstalt f. Bodenforschung, Hannover.
101. Halbouty M.T. (1980): Geologic significance of Landsat data for 15 giant oil and gas fields.—AAPG, 64 (1): 8–36.
102. Hapke B. & Horn H. van (1963): Photometric studies of complex surfaces with application to the Moon.—J. Geophys. Res., 68: 4545–4570.
103. Haydn R. (1977): Digital processing of Landsat data for geological applications.—Proc. Int. Symp. on Image Processing, Interactions with Photogrammetry and Remote Sensing, Graz, pp. 89–92.
104. Haydn R. (1982): Some aspects of the presentation of remote sensing data.—EARSEL-ESA Symposium, Igls, Austria, ESA SP, 175: 77–80.
105. Haydn R. (1983): A concept for the processing and display of Thematic Mapper Data.—First TM-Conf. at NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., 10 pp.—(NASA).
106. Haydn R., Dalke G.W., Henkel J. & Bare J.R. (1982): Application of IHS colour transform for processing of multispectral data and image enhancement.—Proc. Int. Symp. on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands, Cairo (Egypt).—(Env. Res. Inst. Michigan, Ann Arbor, Michigan).
107. Hecht J. (1972): Geologische Karte 1:20000 des Gebietes von Polichnitos, mit Erläuterungen.—Athen 1972.
108. Heinrich R. (1977): Vergleichende tektonische Untersuchungen von Satellitenbild-Daten und Gelände-Daten im NW-Harz und im nordöstlichen Harzvorland.—Geotekt. Forsch., 53: 83–87.
109. Heinrich R. (1980): Tektonische Untersuchungen an Bruchstrukturen Nordost-Harzes in Landsat-Aufnahmen, in Luftbildern und im Gelände.—Dissertation, Geol. Inst. TU Clausthal, 154 S.
110. Helbig H. (1973): Vorbereitung und Auswertung farbiger Luftbilder mit Hilfe eines Farbabtastgerätes.—Bildmessung u. Luftbildwesen, 4: 123–128.
111. Herda K. & Marek K.H. (1979): Anwendung der Multispektraltechnik mit den Geräteausstattungen MFK-6 und MSP-4.—Jenaer Rundsch., 3: 108–112.
112. Higham A.D., Wilkinson P.B., Kahn D.A., Fitzgerald E., Earl Q.S. & Taylor G. (1975): Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys.—ESA/ASE Scientific & Techn. Review, 1: 85–118. (1. Basic physics and sensing technology).
113. Hildebrandt G. (1976): Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation.—In: Proc. Remote Sensing in Forestry, IUFRO, Oslo: 9–22.
114. Hodgson R.A. (1975): Regional linear analysis as a guide to mineral resource exploration using Landsat data.—US Geol. Surv., Prof. Paper, 1015: 155–172.
115. Hoffer R.M. & Johannsen C.J. (1969): Ecological potential in spectral signature analysis.—In: Remote Sensing in Ecology.—Athens, Georgia (Univ. of Georgia Press), 1–16.
116. Hunt G.R. (1977): Spectral signatures of particular minerals in the visible and near-infrared.—Geophys., 42: 501–513.
117. Hunt G.R. (1979): Near infrared (1.3–2.4 µm) spectra of alteration minerals: potential use in remote sensing.—Geophys., 44: 1974–1986.
118. Hunt G.R. & Ashley R.P. (1979): Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared.—Econ. Geol., 74: 1613–1629.
119. Hunt G.R. & Salisbury J.W. (1970): Visible and near-infrared spectra of rocks and minerals: I. Silicate minerals.—Modern Geol., 1: 283–300.
120. Hunt G.R. & Salisbury J.W. (1971): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates.—Modern Geol., 2: 23–30.
121. Hunt G.R. & Salisbury J.W. (1976): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks.—Modern Geol., 5 (4): 211–217.
122. Hunt G.R. & Salisbury J.W. (1976): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XII. Metamorphic rocks.—Modern Geol., 5 (4): 219–228.
123. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1971a): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides.—Modern Geol., 2 (3): 195–206.
124. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1971b): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates.—Modern Geol., 3: 1–14.
125. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1972): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates.—Modern Geol., 3: 121–132.
126. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1973): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates.—Modern Geol., 4: 85–106.
127. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1974a): Visible and infrared spectra of minerals and rocks: IX. Basic and ultrabasic rocks.—Modern Geol., 5: 15–22.
128. Hunt G.R., Salisbury J.W. & Lenhoff C.J. (1974b): Visible and infrared spectra of minerals and rocks: VIII. Intermediate rocks.—Modern Geol., 4: 237–244.
129. Hunt G.R. & Vincent R.K. (1968): The behavior of spectral features in the infrared emission from particulate surfaces of various grain sizes.—J. Geophys. Res., 73: 6039–6046.
130. Innes R.B. (1968): An interpreter's perspective on modern airborne radar imagery.—Proc. Fifth Symp. on Remote Sensing of Environment, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. 107–122.—(Env. Res. Inst. Michigan).
131. Jacob J., Lamp J. & Lehner M. (1982): Computer aided soil evaluation in cultured landscapes.—Int. Arch. of ISPRS, 24 (VII/1): 397–405.
132. Jacob J., Lamp J. & Schroeder D. (1981): Möglichkeiten und Grenzen der Bodenfernerkundung in norddeutschen Kulturlandschaften.—Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges., 32: 731–744.
133. Jacobi J., Kirchhof W. & Lamp J. (1982): Qualitative and quantitative evaluation of airborne scanner imagery for pedological and agricultural purposes in North Germany.—Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARS 82), 1 (WP 4.4): 1–6.
134. Janza F.J. (1975): Interaction mechanisms.—In: Reeves R.G. (ed.), Manual of Remote Sensing, Chapter 4.—Falls Church, Va. (American Society of Photogrammetry), 75–179.
135. Jerlov N.G. (1968): Optical Oceanography.—Amsterdam (Elsevier).
136. Jones A.D. (1976): Photographic data extraction from Landsat images.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 42 (11): 1423–1426.
137. Kadro A. (1981): Untersuchung der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetationsbestände.—Diss. Forstwirtschaftl. Fakultät der Albert-Ludwigs-Univ., Freiburg, 215 S.
138. Kadro A. & Hildebrandt G. (1980): Beobachtungen über das spektrale Reflexionsverhalten von Kiefern- und Fichtenbeständen.—Int. Arch. of Photogrammetrie, Sect. B 7, 20: 487–496.
139. Kahle A.B. & Rowan L.C. (1980): Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images for lithologic mapping in the East Tintic Mountains, Utah.—Geology, 8 (5): 234–239.
140. Kahle A.B., Gillespie A.R. & Goetz A.F.H. (1976): Thermal inertia imaging: A new geological mapping tool.—Geophys. Res. Lett., 3 (1): 26–28.
141. Kasten F. & Raschke R. (1972): Nomenklatur zur Beschreibung von Strahlungsmessungen und -rechnungen.—Veröff. Bereich Extraterrestr. Physik, Abt. Physik u. Astronomie, Ruhr-Univ. Bochum, 31 S.
142. Knipling E.B. (1969): Leaf reflectance and image formation on color infrared film.—In: Johnson P.O. (ed.), Remote Sensing in Ecology.—Athens, Georgia (Univ. of Georgia Press), 17–29.
143. Knipling E.B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation.—Remote Sensing of Environment, 1 (3): 155–159.
144. Köhler U. (1982): Messung der richtungsabhängigen spektralen Reflexion von natürlichen Gesteinsoberflächen.—Berl. Geowiss. Abh., Reihe A, 41: 167–252.
145. Kolouch D., Dennert-Möller E., Lohmann P., Ehlers M. & Bähr P. (1981): Digitale Verarbeitung von Fernerkundungsaufnahmen.—Zeitschr. f. Vermessenwes., 106: 143–158.
146. Konecny G. (1972): Geometrische Probleme der Fernerkundung.—Bildmessung u. Luftbildwesen, 40: 162–172.
147. Konecny G. (1981): Gutachten über die Anwendbarkeit von Landsat-Aufnahmen bei der Klassifizierung von Wattgebieten der deutschen Nordseeküste.—Geol. Ber. f.d. Planfestst.—Verf., Nordstrander Bucht, Ber. 2, Teilber. 2b.
148. Konecny G., Bähr H.P., Rell W. & Schreiber H.C. (1979): Use of spaceborne metric cameras for cartographic applications.—Wiss. Arb. Inst. Photogr. Ingenieurwes., 4: 165 pp.
149. Koopmans B.N. (1973): Drainage analysis on radar images.—ITC Journal, 3: 464–480.
150. Koopmans B.N. (1975): Variable flight parameters for SLAR.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 41: 299–305.
151. Kreitzer M.H. (1974): Direct additive printing.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 40: 281–285.
152. Kreitzer M.H. & Gilbertson B. (1974): Exposure for multispectral photos.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 40: 551–557.
153. Kritikos G. (1975): DIBIAS-Datenverarbeitungssystem.—DFVLR, Sommerschule Alpbach, Erläuterungen zu Bildverarbeitungsverfahren.
154. Kristof S.J. (1971): Preliminary multispectral studies of soils.—J. Soil and Water Conserv., 26 (1): 15–18.
155. Kristof S.J. & Zachary A.L. (1971): Mapping soil types from multispectral scanner data.—In: Env. Res. Inst. Michigan, Ann Arbor, Michigan.—Proc. 7th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 3: 2095–2108.
156. Kristof S.J. & Zachary A.L. (1974): Mapping soil features from multispectral scanner data.—Photogr. Eng., 40 (12): 1427–1434.
157. Kronberg P. (1974): Erfahrungen mit dem Erderkundungssatelliten ERTS-1.—Umschau Wiss. u. Techn., 73: 469–481.
158. Kronberg P. (1976): Bruchstrukturen des Rheinischen Schiefergebirges, des Münsterlandes und des Niederrheins—kartiert in Aufnahmen des Erderkundungssatelliten ERTS-1.—Geol. Jb., 33: 37–48.
159. Kronberg P. (1977): Die regionale und überregionale Bruchtektonik Mitteleuropas—Bestandsaufnahme und Interpretationen.—Geotekt. Forsch., 53: 7–41.
160. Kronberg P. (1978a): Surface traces of crustal fractures mapped as photolineations on Landsat-imagery (Greece and Western Turkey).—Map 1:1000000.—Geologisches Institut der TU Clausthal.
161. Kronberg P. (1978b): Azimuth-frequency distribution of photolineations mapped on Landsat-imagery of Greece and Western Turkey (3° and 10° intervals). (Software for map compilation and data analysis by B. Surborg & P. Tsombos).—Map 1:1000000. Geologisches Institut der TU Clausthal.
162. Kronberg P. (1982): Die Querzone von Lippstadt-Warstein-Ramsbeck im Satellitenbild: Tiefenstrukturen und oberflächennahe Bruchstrukturen.—Fortschr. Geol. Rheinl. u. Westf., 30: 404–411.

163. *Kronberg P.* (1983): Patterns and principles of crustal fracturing as deduced from a Landsat mosaic covering central and eastern Iran.—In: Geol. Survey of Iran, Geodynamic Project (Geotraverse) Iran—Final Report.—Geol. Survey of Iran Report, 51: 37–50.
164. *Kronberg P.* (1984): Faults and fracture patterns of central and eastern Iran as mapped on Landsat-imagery.—N. Jb. Geol. Pal., Abh., 168 (2/3): 208–214.
165. *Kronberg P. & Günther R.* (1977): Fracture patterns and principles of crustal fracturing in the Aegean Region.—In: Kallergis G. (ed.): Proc. VI. Colloqu. on the Geology of the Aegean Region, Athens, 2: 893–906.
166. *Kronberg P., Schönfeld M., Günther R. & Tsombos P.* (1975): ERTS-1 data on the geology and tectonics of the Afar/Ethiopia and adjacent regions.—In: Pilger A. & Rösler A. (eds.), Afar Depression of Ethiopia.—Inter-Union Comm. on Geodynamics, Scient. Rep., 14.—Stuttgart (Schweizerbart), 20–27.
167. *Kronberg P., Tsombos P. & Surborg B.* (1981): Karte der Häufigkeitsverteilung von Landsat-Lineationen im Bereich Griechenlands und der West-Türkei, 1:1 000 000.—Geologisches Institut TU Clausthal.
168. *Kruck W.* (1976): Hydrological investigations in the Argentine Pampa using satellite imagery.—Geol. Jb., 33: 145–159.
169. *Labovitz M.L., Masuoka E.J., Bell R., Siegrist A.W. & Nelson R.F.* (1983): The application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides—results from the 1980 field season at Mineral, Va.—Econ. Geol., 78 (4): 750–760.
170. *Lamb J., Jacob J.A., Wittje V.* (1980): Experiments on spectral signatures of soil samples.—Vortrag: AG Spectral Signatures in Hamburg, 3 pp.
171. *Laubschre H.* (1980): Die Entwicklung des Faltenjuras—Daten und Vorstellungen.—N. Jb. Geol. Pal., Abh., 160: 289–320.
172. *Lawton D.L. & Palmer D.F.* (1978): Enhancement of linear features by rotational exposure.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 44 (9): 1185–1189.
173. *Leberl F.* (1975): Radargrammetric point determination PRORADAM.—Bildmessung u. Luftbildwesen, 45 (1).
174. *Leberl F.* (1979): Accuracy analysis of stereo side-looking radar.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 45 (8): 1083–1096.
175. *Leberl F., Jensen H. & Kaplan J.* (1976): Side-looking radar mosaicking experiment.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 42: 1035–1043.
176. *Lee K. & Raines G.L.* (1974): An Evaluation of Multiband Photography for Rock Discrimination.—In: Proc. of the Third Conf. on Earth Resources Observation and Analysis Systems (Tulahoma, Tenn.), 3: 361–396.
177. *Lee K. & Hutchinson R.M.* (1974): Geologic and mineral and water resources investigations in Western Colorado, using Skylab EREP Data.—NASA CR, 138722.
178. *Lenz H. et al.* (1972): The age of early tectonic events in the zone of the Jordan geosuture, based on radiometric data.—24th Int. Geol. Congr., 3: 371–379, Montreal.
179. *Lepley L.K.* (1968): Coastal water clarity from space photographs.—Photogr. Eng., 34: 667–674.
180. *Lewis A.J. & McDonald H.C.* (1970): Interpretive and mosaicking problems of SLAR.—Remote Sensing of Environment, 1: 231–236.
181. *List F.K., Burger H., Klitzsch E., Meissner B., Pöhlmann G. & Schmitz H.J.* (1982): Application of visual interpretation and digital processing of Landsat-Data for the preparation of a geological interpretation map of Southwestern Egypt at a scale of 1:500 000.—Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 1st Thematic Conf.: Remote Sensing of Arid and Semi-arid Lands, Cairo, Egypt, pp. 849–858.
182. *List F.K., Helmcke D., Meissner B., Pöhlmann G. & Roland N.W.* (1978): Geologische Interpretation des Tibesti nach Aufnahmen von Landsat-1 (Republik Tschad).—Bildmessung u. Luftbildwesen, 4: 139–145.
183. *Lohmann P. & Piepen H. van der* (1981): Evaluation of ocean bottom features from ocean color scanner imagery.—Photogrammetria, 36: 81–89.
184. *Longshaw T.G. & Gilbertson B.* (1975): Multispectral aerial photography as exploration tool, II: An application in the Bushveld igneous complex, South Africa.—Remote Sensing of Environment, 4 (2): 147–164.
185. *Longshaw T.G. & Gilbertson B.* (1976): Multispectral aerial photography as exploration tool, III: Two applications in the Northwestern Cape Province, South Africa.—Remote Sensing of Environment, 15 (2): 79–92.
186. *Lowe D.S.* (1969): Optical Sensors.—In: Principles and applications to earth resources survey.—Paris (CNES and Univ. of Michigan), 73–136.
187. *Lundien J.R.* (1971): Terrain analysis by electromagnetic means.—Technical Report No. 3–693, Report 5.—Vicksburg Mississippi (US Army Waterways Experiment Station).
188. *Lyon R.J.P.* (1965): Analysis of rocks by spectral infrared emission (8–25 microns).—Econ. Geol., 60: 751–736.
189. *Lyon R.J.P.* (1970): The multiband approach to geologic mapping from orbiting satellites: is it redundant or vital?—Remote Sensing of Environment, 1: 237–244.
190. *Lyon R.J.P.* (1972): Infrared spectral emittance in geological mapping—Airborne spectrometer data from Pissgah Crater, California.—Science, 175: 983–986.
191. *Lyon R.J.P.* (1975): A comparison of observed and model-predicted atmospheric perturbations on target radiances measured by ERTS.—In: Proc. IEEE Symp. on Appl. Remote Sensing, Digital Imagery to Mineral and Petroleum Exploration, Houston.
192. *Lyon R.J.P. & Green A.A.* (1975): Reflectance and emittance of terrain in the mid-infrared (6–25 μ m) region.—In: Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals.—New York (Academic Press), 165–195.
193. *Lyon R.J.P. & Lee K.* (1970): Remote sensing in exploration for mineral deposits.—Econ. Geol., 65 (7): 785–800.
194. *Lyon R.J.P. & Patterson J.* (1966): Infrared spectral signatures—a field geological tool.—In: Proc. Fourth Symp. Remote Sensing of Environment.—Ann Arbor, Michigan (University of Michigan), 215–230.
195. *Lyon R.J.P. & Patterson J.* (1969): Airborne geological mapping using infrared emission spectra.—Proc. 6th Symp. on Remote Sensing of Environment.—Ann Arbor, Michigan (University of Michigan), 527–552.
196. *Macdonald H.C.* (1969a): Geologic evaluation of radar imagery from Darien Province, Panama.—Modern Geol., 1 (1): 1–63.
197. *Macdonald H.C.* (1969b): Effective radar look-directions for geologic interpretation.—NASA 2nd Ann. Earth Resources Aircraft Program, Status Review, Vol. 1: Geology and Geography, 9: 1–21.
198. *Macdonald H.C.* (1980): Techniques and applications of imaging radars.—In: Siegal B.S. & Gillespie A.R. (eds.),

- Remote Sensing in Geology.—New York (Wiley), 297–336.
199. *Mathews H.L., Cunningham R.L., Cipra J.E. & West T.R.* (1971): Application of multispectral remote sensing to soil survey research in southeastern Pennsylvania.—Argon. Abstr.: 103.
200. *Maul G.A. & Gordon H.R.* (1975): On the use of the earth resources technology satellite (Landsat-1) in optical oceanography.—Remote Sensing of Environment, 4 (2): 95–128.
201. *MBB/ZGF* (1983): MOMS—Modular Optoelectronic Multispectral Scanner.—Informationsblatt, München.
202. *McCluney W.R.* (1976): Remote measurement of water color.—Remote Sensing of Environment, 5 (1): 3–34.
203. *Meier D.* (1983): Zur Tektonik des schweizerischen Tafel- und Faltenjura (regionale und lokale Strukturen, Kluftgenese, Bruch- und Falten tektonik, Drucklösung).—Dissertation TU Clausthal, 184 S.
204. *Meier R.* (1981): Soil moisture detection with microwave and thermal-infrared-sensors in the catchment area Rietsholsbach (Switzerland).—Institut für Geographie, Univ. Zürich.
205. *Meissner B.* (1977): The fracture pattern of the Central Aegean Sea.—A comparative investigation of Landsat-images, airphotos, sea-maps and field observation.—In: Kallergis G. (ed.), Proc. VI. Coll. on the Geology of the Aegean Region, Athens, 2: 907–911.
206. *Meissner D., Bodechtel J., Haydn R. & Laucht H.* (1983): Modular Optoelectronic Scanner (MOMS) for earth observation—first results of the STS-7 mission.—Sonderdruck, MBM/ZGF, München, 14 S.
207. *Mohr K. & Pilger A.* (1964): Über die Fortsetzung rheinisch streichender Schollengrenzen aus dem Harzvorland in den Harz.—Z. Dt. Geol. Ges., 116 (2): 731–756.
208. *Mohr K., Kronberg P. & Günther R.* (1977): Die Bruchtektonik des Harzes im Satellitenbild.—Geotekt. Forsch., 53: 68–82.
209. *Montgomery O.L., Baumgardner M.F. & Weismiller R.A.* (1976): An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical and genetic characteristics of soils.—LARS Techn. Rep., 082776, Purdue Univ., Indiana.
210. *Mühlfeld R.* (1976): Relationship between vegetation, soil, bedrock and other geologic features in moderate humid climates (Central Europe) as seen in ERTS-imagery.—Geol. Jb., Reihe A, 33: 21–35.
211. *Myers V.I.* (1975): Crops and soils.—In: Reeves R. (ed.): Manual of Remote Sensing, Vol. 3.—Falls Church, Va. (Am. Soc. Photogr.), 1715–1814.
212. *NASA* (1971): Data users handbook: NASA Earth Resources Technology Satellite.—Greenbelt, Maryland (Goddard Space Flight Center) (various revisions in 1972, 1976, and 1977).
213. *NASA* (1973a): Symposium on significant results obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1. Vol. I. Technical Presentations, Sections A and B.—Washington, D.C., 1725 pp.
214. *NASA* (1973b): Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Vol. I, Technical Presentations, Sections A and B.—Washington, D.C., 1994 pp.
215. *NASA* (1974): Skylab Earth Resources Data Catalog. Rep. No. JSC, 09016.—Houston, Texas (NASA L.B. Johnson Space Center), 359 pp.
216. *NASA* (1978): Skylab EREP investigations summary.—NASA Spec. Publ., 399: 1–386.—(Section 4: Geology and hydrology, pp. 119–188, Section 6: Data Analysis techniques, pp. 257–342).
217. *National Iranian Oil Company* (1975): Geological Map of Iran 1:1 000 000.—Sheet 1–6, Tehran.
218. *Newton R.W.* (1976): Microwave sensing and its application to soil moisture detection.—Techn. Rep. RSC, 81.—College Station, Texas (Rem. Sens. Center, Texas, A & M University).
219. *Newton R.W. & Rouse J.W., Jr.* (1980): Microwave radiometer measurements of soil moisture contents.—IEEE Trans. Antennas Propag., AP, 28: 680–686.
220. *NOAA: Landsat-Data Users Notes.*—Sioux Falls, S.D. (Mundt Federal Building) (published quarterly).
221. *Northfleet A.A., Medeiros R.A. & Mühlmann H.* (1969): Revaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná.—Bol. Têc. Petrobrás, 12 (3): 291–346.
222. *Obuchov A.I. & Orlov D.S.* (1964): Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations.—Počvovedenie, 2.
223. *Offield T.W.* (1975): Thermal-infrared images as a basis for structure mapping, front range and adjacent plains in Colorado.—Bull. Geol. Soc. Amer., 86: 495–502.
224. *Offield T.W.* (1975a): Line-grating diffraction in image analysis: enhanced detection of linear structures in ERTS images, Colorado, Front Range.—Modern Geol., 5: 101–107.
225. *Orlov D.S.* (1966): Quantitative patterns of light reflection on soils: I. Influence of particle (aggregate) size on reflectivity.—Doklady Soil Sci., Suppl. 13.
226. *Palmason G.* (1968): Invited comments.—In: Proc. 5th Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan.
227. *Palmason G., Friedman J.D., Williams R.S., Jr., Jonsson J. & Saemundsson K.* (1970): Aerial infrared surveys of Reykjanes and Torfajökull thermal areas, Iceland, with a section on costs of exploration surveys.—Geothermics, Special Issue, pp. 339–412.
228. *Parry J.T., Wright R.K. & Thomson K.P.B.* (1980): Drainage on multiband radar imagery in the Laurentian Area, Quebec, Canada.
229. *Patoureaux Y.* (1979): Cartographie et l'inertie thermique des sols par télédétection multispectrale.—Diss. Univ. P. et M. Curie, Paris, 207 p.
230. *Piech K.R. & Walker J.E.* (1974): Interpretation of soils.—Photogr. Eng., 40: 87–94.
231. *Piech K.R., Schott J.R. & Stewart K.M.* (1975): S 190 Interpretation techniques development and applications to New York State water resources.—NASA, Contract. Rep., 144499.
232. *Pilger A. & Rösler A.* (eds.) (1975): Afar Depression of Ethiopia.—Inter. Union Comm. on Geodynamics Scientific Report, 14.—Stuttgart (Schweizerbart), 416 pp.
233. *Podwysocky M.H., Segal D.B. & Abrams M.J.* (1983): Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area.—Econ. Geol., 78 (4): 675–687.
234. *Pohn H.A., Offield T.W. & Watson K.* (1974): Thermal inertia mapping from satellite-discrimination of geological units in Oman.—J. Res. US Geol. Surv., 2 (2): 147–158.
235. *Polgyn F.C., Piech K.R., Shapiro A., York L.B. & Potter A.E.* (1978): Data analysis techniques.—In: Skylab—EREP investigations summary.—Houston, Texas (NASA, L.B. Johnson Space Center), 257–342.
236. *Polysos N.* (1981): Ergebnisse einer geologischen Auswer-

- tung von Landsat-Aufnahmen Mittelgriechenlands.-Z. Dt. Geol. Ges., 132: 503–512.
237. *Pröber C.* (1981): Die Möglichkeiten der Fernerkundung in der Küstengeologie.-Diss. Geol. Inst. Christian-Albrechts-Univ. Kiel, 177 S.
 238. Projeto Radambrasil (1975): Folha NA. 20 Boa Vista e parte das folhas NA. 21 Tumucumaque, NB. 20 Roraima e NB 21, 8.-DNPM, Rio de Janeiro (Min. Minas e Energia).
 239. Projeto Radambrasil (1976): Folha SA 21 Santarem, 10.-DNPM, Rio de Janeiro (Min. Minas e Energia).
 240. Projeto Radambrasil (1978): 16.-DNPM, Rio de Janeiro (Min. Minas e Energia).
 241. *Prost G.* (1983): Mineral exploration with Skylab photography in Central Idaho.-Econ. Geol., 78 (4): 633–640.
 242. *Quade J. G., Chapman P. E., Brennan P. A. & Blinn J. C.* (1970): Multispectral remote sensing of an exposed volcanic province.-NASA Techn. Memorandum, 33–453.-Pasadena, Calif. (Jet Propulsion Laboratory, Calif. Inst. of Techn.), 33 pp.
 243. *Quenzel H. & Kaestner M.* (1980): Optical properties of the atmosphere - Calculated variability and application to satellite remote sensing of phytoplankton.-Appl. Optics, 19: 1338–1344.
 244. *Quiel F.* (1973): Zur Anwendung von Temperaturmessungen im Thermalinfrarot in der Hydrologie.-Diss. Geowiss. Fakultät Ludwig-Maximilians-Univ., München, 108 S.
 245. *Quiel F.* (1975): Thermal IR in geology.-Photogr. Eng. and Remote Sensing, 41: 341–346.
 246. *Raines G.* (1980): Remote sensing applied to regional sedimentary uranium exploration in the Powder River Basin, USA.-In: 26e Congr. Geol. Intern., Paris, Abstr., II, Sect. 11: 830.
 247. *Raines G. L. & Canney F. C.* (1980): Vegetation and geology.-In: Siegal B. S. & Gillespie A. R. (eds.): Remote Sensing in Geology.-New York (Wiley), 365–380.
 248. *Raines G. L., Frisken J. G., Kleinkopf M. D. & Fuente-D., M. de la* (1980): The discovery of the Alcaparros mineral deposit, Sonora, Mexico.-In: Official Program of 6th Ann. Pecora Symp. Integration of Remote Sensing into the Exploration Process.-Sioux Falls, S.D., 67–69.
 249. *Ray R. G. & Fischer W. A.* (1960): Quantitative photography-A geologic research tool.-Photogr. Eng., 26 (1): 143–150.
 250. *Reeves R. G.* (1968): Structural geologic interpretation from radar imagery. NASA Technical Letter, 102: 15 pp.
 251. *Reeves R. G.* (ed.) (1975): Manual of Remote Sensing. Vol. I. Theory, Instruments and Techniques; Vol. II, Interpretation and Applications.-Falls Church, Va. (American Society of Photogrammetry), 2144 pp.
 252. *Reifsnnyder W. E. & Hull H. W.* (1965): Radiant energy in relation to forests.-US Dept. Agric. Techn. Bull., 1344: 111 pp.
 253. *Rivereau J. C.* (1983): SPOT.-Proc. Remote Sensing, Alpbach, Summerschool.-ESA SP, 205: 11–17.
 254. *Rivereau J. C.* (1983): Typical SPOT data and products-potential applications.-Proc. Remote Sensing, Alpbach, Summerschool.-ESA SP, 205: 19–23.
 255. *Rivereau J. C.* (1977): Contribution of Landsat imagery to geological prospecting over the western mediterranean areas.-Third Pecora Conf., Sioux Falls, S.D., 18 pp.
 256. *Ross H. P., Alder J. E. M. & Hunt G. R.* (1969): A statistical analysis of the reflectance of igneous rocks from 0,2 to 2,65 microns.-Icarus, 11 (1): 46–54.
 257. *Rowan L. C. & Kahle A. B.* (1982): Evaluation of 0.46 to 2.36 μ m multispectral scanner images of the East Tintic Mining District, Utah, for mapping hydrothermally altered rocks.-Econ. Geol., 77: 441–452.
 258. *Rowan L. C., Offield T. W., Watson K., Cannon P. J. & Watson R. D.* (1970): Thermal infrared investigations, Arbuckle Mountains, Oklahoma.-Geol. Soc. Amer. Bull., 81: 3549–3562.
 259. *Rowan L. C., Offield T. W., Watson K. & Watson R. D.* (1969): Thermal infrared investigations Mill Creek Area, Oklahoma.-NASA 2nd Ann. Earth Resources Aircraft Program, Status Review, 1: Geology and Geography.-Houston.
 260. *Rowan L. C., Wetlaufer P. H., Goetz A. F. H., Billingsley F. C., Stewart J. H.* (1974): Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in South-Central Nevada.
 261. *Sabins F. F.* (1969): Thermal infrared imagery and its application to structural mapping in Southern California.-Geol. Soc. Amer. Bull., 80: 397–404.
 262. *Saviegar R. A. G., Huntley D. A., McCulloch J. S. G., Norman J. W., Painter R. B., Roberts E. H., Bannert D., Beckett P. H. T., Bickmore D. P., Cripps E., Curtis L. F., Downing R., Edwardson T. E., Haefner H., Hardy J. R., & Longhurst A. R.* (1975): Multispectral scanning systems and their potential application to earth-resources surveys.-2nd Earth-science applications.-ESA/ASE Scientific and Techn. Review, 1: 119–169.
 263. *Schaber G. G., Berlin G. L. & Brown W. E.* (1975): Selection of remote sensing techniques-surface roughness information from 3-cm wavelength SLAR images.-In: Proc. Ann. Meeting Amer. Soc. of Photogrammetry: 103–117.
 264. *Schaber G. G., Berlin G. L. & Brown W. E.* (1976): Variations in surface roughness within Death Valley, California: Geologic evaluation of 25-cm wavelength radar images.-Geol. Soc. Amer. Bull., 87: 29–41.
 265. *Scherz J. P.* (ed.): Assessment of aquatic environment by remote sensing.-Madison (Inst. Env. Studies, Univ. Wisconsin), 235 pp.
 266. *Scherz J. P. & Stevens A. R.* (1970): An introduction to remote sensing for environmental monitoring.-Madison (The University of Wisconsin), 80 pp.
 267. *Scherz J. P., Sydor M. & Van Domelen J. F.* (1973): Aircraft and Satellite Monitoring of Water Quality in Lake Superior Near Duluth. Third ERTS-1 Symp., NASA Washington, pp. 1619–1639.
 268. *Schmugge T. J.* (1978a): Effect of texture on microwave emission from soils.-I. E. E. E. Transact. on Geoscience and Remote Sensing, GE, 18 (4): 353–361.
 269. *Schmugge T.* (1978b): Remote sensing of surface soil moisture.-J. of Appl. Meteor., 17: 1549–1557.
 270. *Schmugge T. J.* (1980): Microwave approaches in hydrology.-Photogr. Eng. and Remote Sensing, 46 (4): 495–507.
 271. *Schmugge T. J., Blanchard B., Anderson A. & Wang J.* (1978): Soil moisture sensing with aircraft observations of the diurnal range of surface temperature.-Water Res. Bull., Am. Water Res. Ass., 14: 169–178.
 272. *Schmugge T. J., Jackson T. J. & McKim H. L.* (1980): Survey of methods for soil moisture determination.-Water Resources Res., 16: 961–979.
 273. *Schoele R.* (1984): Das "Geowissenschaftliche Multibild Auswerte- und Prozessor-System" GEOMAPS.-Berl. Geowiss. Abh. (A), 47: 39–47.
 274. *Schönfeld M.* (1977): Scherzonen im Kristallin der Red Sea

Hills im nordöstlichen Sudan und ihre Bedeutung für die Entwicklung des Roten Meeres-erste Ergebnisse einer Auswertung von Landsat-Aufnahmen.-Geotekt. Forsch., 53: 107–121.

275. *Schönfeld M., Günther R. & Kronberg P.* (1977): Regionale Bruchtektonik und Riftentwicklung im Bereich des Roten Meeres-neue Daten und Interpretationen.-Geotekt. Forsch., 53: 122–133.
276. *Sesören A.* (1976): Linerament analysis from ERTS (Landsat) images of the Netherlands.-Geologie en Mijnbouw, 55 (1): 61–67.
277. *Settle M.* (1983): Current trends and research challenges in land remote sensing. Proc. Remote Sensing, ESA-DFVLR, Alpbach, Summerschool.-ESA SP, 205: 3–9.
278. *Sieber A.* (1982): Beispiele für den Einsatz von Radar in der Satelliten-Fernerkundungs-Auswertung und Interpretation von Radarbilddaten-Signaturen unbewachsener Oberflächen.-Manuskript, Vortragsveranstaltung Carl-Granz-Gesellschaft.
279. *Siegal B. S. & Goetz A. F.* (1977): Effect of vegetation on rock and soil type discrimination.-Photogr. Eng. and Remote Sensing, 43 (2): 191–196.
280. *Siegrist A. W. & Schnetzler C. C.* (1980): Optimum spectral bands for rock discrimination.-Photogr. Eng. and Remote Sensing, 46 (9): 1207–1215.
281. *Shockley W. G., Knight S. J. & Lipscomb E. B.* (1962): Identifying soil parameters with an infrared spectrometer.-In: Proc. of the Second Symp. on Remote Sensing of Environment.-Ann Arbor (University of Michigan Press).
282. *Short N. M., Smith A. & Baker R.* (1976): Excerpts from selected Landsat-1 final reports in geology.-NASA GSFC, X-923-76-74, 72 pp.
283. *Smith J. T.* (ed.) (1968): Manual of color aerial photography.-Falls Church, Va. (American Society of Photogrammetry), 550 pp.
284. *Steiner D. & Gutermann T.* (1966): Russian data on spectral reflectance of vegetation, soil, and rock types.-European Research Office, US Army, Contract DA-91-591-EUC-3863/01-652-0106.
285. *Stoiber R. E. & Rose W. I.* (1975): An investigation of thermal anomalies in the central American volcanic chain and evaluation of the utility of thermal anomaly monitoring in the prediction of volcanic eruptions.-NASA CR, 144496.
286. *Stoner E. R. & Baumgardner M. F.* (1980b): Physicochemical site and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils.-LABS Techn. Report, 111679.
287. *Stoner R. E. & Horvath E. H.* (1971): The effect of cultural practices on multispectral response from surface soils.-In: Proc. 7th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 2: 2109–2113.
288. *Stoner E. R. & Baumgardner M. F., Biehl L. L. & Robinson B. F.* (1980a): Atlas of soil reflectance properties.-Res. Bull., 962, Agric. Exp. Sta., Purdue University.
289. *Sydor M.* (1976): Turbidity in Lake Superior.-In: ERTS-1-a new window in our planet.-US Geol. Survey, Prof. Paper, 929: 153–156.
290. *Taranik J. V.* (1978): Principles of computer processing of Landsat data for geological applications.-US Geol. Surv., Open-File Rep., 78–117: 98 pp.
291. *Theilen-Willige B.* (1982): The Araguinha astrobleme/Central Brasil.-Geol. Rdsch., 71 (1): 318–327.
292. *Thomas J. R., Wiegand C. L. & Myers V. I.* (1967): Factors affecting light reflectance of cotton.-In: Proc. 4th Symp. on

Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan: 305–312.

293. *Tollmann A.* (1977): Die Bruchtektonik Österreichs im Satellitenbild.-N. Jb. Mineral. Geol. Paläontol., Abh., Abt. A, 153: 1–27.
294. *Tomiyasu K.* (1982): Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit.-Int. Geosc. and Rem. Sens. Symp. (IGARSS 82), 1 (WP 9): 5.1–5.3.
295. *Turner R. E. & Spencer M. M.* (1972): Atmospheric model for correction of spacecraft data.-Proc. 8th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, 1, Ann Arbor, Michigan.
296. *Tsombos P.* (1980): Vergleichende Untersuchungen zur Bruchtektonik Westgriechenlands im Satellitenbild, Luftbild und Gelände.-Clausthaler Geowiss. Diss., 4: 101 S.-Geol. Inst. TU Clausthal.
297. *Tsombos P. & Surborg B.* (1981): Rechnergestützte Bearbeitung linearer Elemente in fotogeologischen Kartierungen.-Geol. Inst. TU Clausthal: 27 S.
298. *Ulaby F. T., Batlivala P. P. & Dobson M. C.* (1978): Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture.-Part I: Bare Soil.-IEEE Trans. Geo. Electron., GE, 16: 286–295.
299. *Ulaby F. T., Bradley G. A. & Dobson M. C.* (1979): Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture.-Part II: Vegetation-Covered Soil.-IEEE Trans. Geo. Electron., GE, 17: 33–40.
300. *Vail J. R. & Hughes D.* (1977): Tholeiite derivative dyke swarms near Erkowit, Red Sea Hills, Sudan.-Geol. Rdsch., 66: 228–237.
301. *Valle G. R., Friedman J. D., Gawarecki S. J. & Banwell G. J.* (1970): Photogeologic and thermal infrared reconnaissance surveys of the Ios Negritos-Ixtlan de los Hervores geothermal area.-Geothermics, Special Issue, 2: 381–398.
302. *Valley S. L.* (1965): Handbook of geophysics and space environments.- (Airforce Cambridge Research Laboratories, Office of Aerospace Research, USAF).
303. *Van Roessel J. W. & Godoy R. C.* (1974): Slar mosaics for project RADAM.-Photogr. Eng., 40(5): 581–595.
304. *Vargas F. C.* (1975): Interpretation Geologico-Fisiografica de una Fotografia Skylab Correspondiente al Area: Santa Cruz-Montero-Buena Vista.-Yacimientos Petroliferos Fiscales Bolivianos, Special Report.
305. *Vincent R. K. & Thomson F. J.* (1972a): Recognition of exposed quartz sand and sandstone by two-channel infrared imagery.-J. Geophys. Res., 77 (14): 2473–2477.
306. *Vincent R. K. & Thomson F. J.* (1972b): Rock-type discrimination from ratioed infra-red scanner images of Pisgah Crater, California.-Science, 175: 986–988.
307. *Vincent R. K. & Thomas F.* (1972c): Spectral compositional imaging of silicate rocks.-J. Geophys. Res., 77 (14): 2465–2471.
308. *Виноградов Б. В.* Дистанционное зондирование содержания гумуса в почвах. Советское почвоведение, № 2. 1982. 103–113 с.
309. *Völger K. & Gans W.* (1973): Multispektrale Abtastverfahren in der Fernerkundung und ihre Anwendung auf Probleme des Umweltschutzes, der Hydrologie, Geologie, Mikroklimatologie und Regionalplanung.-Informationsschrift SWISSAIR/Metallgesellschaft, Frankfurt, 22 S.
310. *Vogel M.* (1972): Mikrowellenradiometrie und Side Looking Radar.-DGLR Mitt., 72, 10. Mai.
311. *Wallace R. E. & Moxham R. M.* (1967): Use of infrared imagery in study of the San Andreas Fault System,

- California.—US Geol. Surv., Prof. Paper, 575-D: 147–156.
312. *Wang J. R. & Schmugge T. J.* (1980): An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content.—IEEE Transact., Geosc. and Rem. Sens., 6 E-18: 288–295.
 313. *Wang J. R., Shiue I. C. & McMurtrey J. E.* (1980): Microwave remote sensing of soil moisture content over bare and vegetated fields.—Geophys. Res. Letter, 7: 801–804.
 314. *Wang J. R. & Williams D.* (1978): Dielectric constants of soils at microwave frequencies.—NASA Techn. Paper, 1238.
 315. *Watson R. D.* (1972): Spectral reflectance and photometric properties of selected rocks.—Remote Sensing of Environment, 2: 95–100.
 316. *Watson K.* (1975): Geologic application of thermal infrared images.—Proc. IEEE, 63: 128–137.
 317. *Watson K., O'Leary D. & Pohn H. A.* (1975): A photogeologic comparison of Skylab and Landsat-images of southwestern Nevada and southeastern California.—NASA CR, 144642.
 318. *Weller R. N.* (1970): Photo enhancement by film sandwiches.—Photogr. Eng.: 468–479.
 319. *West T. R.* (1972): Engineering soils mapping from multispectral imagery using automatic classification techniques.—In: Proc. 51st Ann. Mtg. of Ind. Highway Res. Board.
 320. *Westin F. C.* (1973): ERTS 1 MSS imagery: a tool for identifying soil associations.—COSPAR, A 5.3: 1–15.
 321. *Westermann* (1981): Sat-Map Bundesrepublik Deutschland 1:500 000.—Braunschweig (Kartograph. Anst. G. Westermann).
 322. *Whitlock C. H., Witte W. C. & Usry E. A.* (1978): Penetration depth at green wavelengths in turbid waters.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 44 (11): 1405–1410.
 323. *Whitney G., Abrans M. J. & Goetz A. F. H.* (1983): Mineral discrimination using a portable ratio-determining radiometer.—Econ. Geol., 78 (4): 688–698.
 324. *Wickland D. E.* (1982): Patterns of vegetation response to heavy metal stress.—Intern. Symp. Remote Sensing of Environment, Fort Worth, Abstr.: 126–127.
 325. *Wieczorek U.* (1972): Der Einsatz von Äquidensiten in der Luftbildinterpretation und bei der quantitativen Analyse von Texturen.—Münch. Geograph. Abh., 7: 195 S.
 326. *Wijk W. R. van* (ed.) (1966): Physics of plant environment. 2nd ed.—Amsterdam (North Holland Publ. Company), 382 pp.
 327. *Wijk W. R. van & Derksen W. J.* (1963): Sinusoidal temperature variation in a layered soil. In: *Wijk W. R. van* (ed.): Physics of plant environment. 2nd ed.—Amsterdam (North Holland Publ. Company), 171–209.
 328. *Wittje V.* (1980): Zur spektralen Remission von Böden.—Dipl.-Arbeit, Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, Univ. Kiel.
 329. *Wong K. W.* (1975): Geometric and cartographic accuracy of ERTS-1 imagery.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 41: 621–635.
 330. *Wong K. W., Thornburn T. H. & Khoury M. A.* (1977): Automatic soil identification from remote sensing data.—Photogr. Eng. and Remote Sensing, 43 (1): 73–80.
 331. *Woodside W. & Messmer J. J.* (1961): Thermal conductivity of porous media I.—Unconsolidated sands.—J. Appl. Phys. (32): 1688–1699.
 332. *Woodside W. & Messmer J. J.* (1961): Thermal conductivity of porous media.—Consolidated rocks.—J. Appl. Phys. (33): 1699–1706.
 333. *Yarger H. L., McCauley J. R., James G. W. & Magnusson L. M.* (1973): Quantitative water quality with ERTS-1. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symp., Section B, 1: 1637–1651.
 334. *Zickler A.* (1980): Die Multispektralkamera MKF-6 M aus Jena.—Vermessungsinformation, 2: 8–9.
 335. *Colwell J. E.* (1974): Vegetation canopy reflectance.—Remote Sensing of Environment, 3: 175–183.
 336. *Colwell R. N., Brewer W., Landis G., Langley P., Morgan J., Rinker J., Robinson J. M. & Sorem A. I.* (1963): Basic matter and energy relationships involved in remote reconnaissance.—Report Subcomm. I, Photo Interpretation Comm., Am. Soc. of Photogrammetry, Falls Church, Va. In: Photogr. Eng., pp. 761–799.
 337. *Craib K. B.* (1972): Synthetic aperture LSAR systems and their application for regional resources analysis. In: Sharokhi (ed.): Remote Sensing of Earth Resources.—Univ. of Tennessee Space Institute, Tullahoma, Tenn., pp. 152–178.
 338. *Frebold G.* (1938): Das Brockenmassiv. Ein Deutungsversuch seiner inneren Struktur und seiner Raumgewinnung.—Jb. Hallesche Verb. Erforsch. mitteldeutscher Bodenschätze und Verwertung, 16 (N.F.): 25–76.
 339. *Günther R. & Kronberg P.* (1977): Thematisch-statistische Auswertung von Bruchstrukturen in Landsataufnahmen Mitteleuropas.—Abschlußbericht DFG-Project Kr 273/22, Geolog. Institut TU Clausthal, 23 S.
 340. *Kronberg P. & Theilen-Willige B.* (1985): Untersuchungen zur Nutzung von Satelliten-SAR-Aufnahmen für die Erkundung (Vergleich von SIR-A-Bilddaten mit multispektralen Landsat-MSS- und TM-sowie Metric Camera-Aufnahmen).—Forschungsbericht BMFT (im Druck).
 341. *Palmason G., Friedman J. D., Williams R. S., Jonsson J. & Saemundson K.* (1970): Aerial infrared surveys of Ryekjanes and Torfajökull thermal areas, with a section on cos of exploration surveys.—Geothermics, Special Issue, U.N. Symp. on the Devel. and Utiliz. of Geothermal Resources, Pisa 1970, vol. 2, Part 1, pp. 399–412.
 342. *Teleki P. & Weber C.* (eds.) (1984): Remote sensing for geological mapping.—Proc. IUGS/UNESCO/BRGM-Seminar Febr. 1984, Orleans, France.—BRGM Document no. 82—IUGS Publication no. 18, Editions du BRGM, Orléans.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Амурский Г. И., Бондарева М. С., Кац Я. Г. и др.* Изучение тектоники нефтегазоносных областей с использованием космических снимков. М.: Недра, 1985. 143 с.
- Анализ космических снимков при тектономагматических и металлогенических исследованиях. М.: Наука, 1979. 164 с.
- Аэрокосмические исследования Земли. М.: Наука, 1979. 304 с.
- Аэрокосмические методы геологического изучения шельфа. Л.: Недра, 1985. 276 с.
- Аэрометоды геологических исследований. Л.: Недра, 1971. 704 с.
- Береговой Г. Т., Бузников А. А., Васильев О. Б. и др.* Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 270 с.
- Борисов О. М., Глух А. К.* Кольцевые структуры и линейменты Средней Азии. Ташкент: ФАН, 1982. 124 с.
- Буш В. А.* Проблема кольцевых структур Земли. Итоги науки и техники, сер. «Общая геология», т. 22. М.: ВИНТИ, 1986. 116 с.
- Виноградов Б. В.* Растительные индикаторы. М.: Высшая школа, 1964. 324 с.
- Виноградов Б. В.* Аэрометоды изучения растительности аридных зон. М.—Л.: Наука, 1966. 360 с.
- Виноградов Б. В.* Космические методы изучения природной среды. М.: Мысль, 1976. 285 с.
- Виноградов Б. В.* Преобразованная Земля. Аэрокосмические исследования. М.: Мысль, 1981. 295 с.
- Виноградов Б. В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
- Геологическое дешифрирование космических снимков восточной части Средиземноморского пояса. М.: Недра, 1981. 208 с.
- Геологическое изучение Земли из космоса. М.: Наука, 1978. 228 с.
- Гонин Г. Б.* Космическая фотосъемка при изучении природных ресурсов. Л.: Недра, 1980. 319 с.
- Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков: Методика и результаты. М.—Берлин: Наука—Академи-ферлаг, 1982. 83 с.
- Дистанционное зондирование. Доклады, 27-й МГК, т. 18. М.: Наука, 1984. 119 с.
- Использование космической информации в нефтяной геологии. Тр. ВНИГРИ, вып. 232. М.: ВНИГРИ, 1981. 150 с.

- Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях (методические рекомендации). Ред. Брюханов В. Н., Буш В. А. М.: Недра, 1986. 160 с.
- Исследование природной среды космическими средствами. Геология и геоморфология. М.: ВИНТИ, 1973, 174 с.; 1974, т. 2, 176 с.; 1976, т. 5, 292 с.
- Кац Я. Г., Рябухин А. Г., Трофимов Д. М.* Космические методы в геологии. М.: Изд-во МГУ, 1976. 248 с.
- Космогеологическая карта СССР. Масштаб 1:2 500 000. Ред. Е. А. Козловский, В. Н. Брюханов, Н. В. Межеловский. М., 1984. 16 л.
- Космогеология СССР. Ред. Е. А. Козловский, Н. В. Межеловский, В. Н. Брюханов. М.: Недра, 1987. 320 с.
- Космическая информация в геологии. Ред. В. Г. Трифонов, В. И. Макаров, Ю. Г. Сафонов, П. В. Флоренский. М.: Наука, 1983. 534 с.
- Космическая информация при поисках, разведке и эксплуатации газовых месторождений: Результаты и перспективы использования. М.: ВНИИГАЗ, 1987. 204 с.
- Космическая съемка и тематическое картографирование. Ред. К. А. Салищев, Ю. Ф. Книжников. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Космическая фотосъемка и геологические исследования. Л.: Недра, 1975. 415 с.
- Космические исследования природных комплексов Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1983. 177 с.
- Космические исследования природных ресурсов. Ред. Ю. К. Ходарев, Я. Л. Зиман. М.: Наука, 1976. 384 с.
- Кринов Е. Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
- Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф.* Аэрофотосъемка. Аэрофото-съемочное оборудование. М.: Недра, 1981. 296 с.
- Макаров В. И., Трифонов В. Г.* Космос и геология. Новое в жизни, науке и технике, сер. Науки о Земле. М.: Знание, 1987. 48 с.
- Математические и технические проблемы обработки изображений. Ред. А. С. Алексеев. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1980.
- Металлогения скрытых линейментов и концентрических структур. М.: Недра, 1984. 272 с.
- Методы и технические средства автоматизации обработки материалов аэро- и космических съемок. Л.: ВСЕГЕИ, 1979.

Методы обработки и интерпретации многозональной информации о природных ресурсах Земли. Ред. А.П. Тищенко, А.И. Бурцев. Л.: Гидрометеониздат, 1980.

Многозональные аэрокосмические съемки Земли. Ред. Р.З. Сагдеев, Я.Л. Зиман. М.: Наука, 1981. 303 с.

Моралев В. М., Чешихина К. Г. Дистанционные методы изучения геологии и полезных ископаемых. Итоги науки и техники, сер. «Геол. и геохим. методы поисков пол. ископ. Методы разв. и оценки месторожд. Развед. и промысл. геофизика», т. 9. М.: ВИНТИ, 1987. 136 с.

Петрусович М. Н. Аэрометоды при геологических исследованиях. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 407 с.

Применение радиолокационной аэросъемки при геолого-географических исследованиях. Ред. В.М. Глушков, В.Б. Комаров. Л.: Недра, 1981.

Прокопенко А. И., Пяткин В. П., Неишумаев В. А. Дистанционные методы при анализе структурных элементов земной коры. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. 222 с.

Радиолокационные методы исследования Земли. Ред. Ю.А. Мельник. М.: Сов. радио, 1980. 264 с.

Сладкопевцев С. А. Изучение и картографирование рельефа с помощью аэрокосмической информации. М.: Недра, 1982. 216 с.

Садов А. В., Ревзон А. Л. Аэрокосмические методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 223 с.

«Союз-22» исследует Землю. М.: Наука, 1980. 231 с.

Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. 252 с.

Шилин Б. В. Тепловая аэросъемка при изучении природных ресурсов. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 248 с.

Ширяев Е. Е. Картографическое отображение, преобразование и анализ геоинформации. М.: Недра, 1984. 248 с.

Шульц С. С., мл. Земля из космоса. Л.: Недра, 1984. 115 с.

Янишин А. Л. Развитие космического земледования в Академии наук СССР. Л.: Наука, 1987. 33 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аббе, озеро 259	Ватты 279–280
Адриатического моря побережье 281–282, рис. 207, 208	Венесуэла 311–312, рис. 229
Акаба, залив 266	Вентерсдорп, система 220
Алжир 234, рис. 116	Верхне-Рейнский грабен 209–210
Альбеде 28, 40, 42	Ветровая тень 25
Альподинарская линия 251	Виенгебирге, горы 205
Альпы–Динариды, граница 251–253, рис. 179, 180	Вогезы, горы 209
Антиатлас, хребет 248–249, рис. 176	Вода в инфракрасном излучении 74–75
Апертура антенны 146	Водное тело 63
Аппалачские горы 191, 250, рис. 177	Водный баланс растений 63
Арагуаина, кольцевая структура 232	Воды грунтовые, глубина залегания 51–52, 194
Аридные районы юго-востока Омана 319–320, рис. 238	– замутненные 68
Астроблема Госсис-Блафф 248, рис. 175	– наземные и прибрежные 276–282
АТЛАС-программа 87	– определение примесей 74–75
Аттенуация 67, 71	– пресные в прибрежных областях 304–306, рис. 223
Афар, впадина 255–259, рис. 181–187	– спектральные характеристики 63–75
	– толща 63
	– цвет 72–74
	В-поляризованный сигнал 137
Бали, остров 311, рис. 228	Гавайи, остров 283
Бахос 194	Гайана 312
Бендикс-сканер 101, табл. 4, 105, 106	Гаусса–Крюгера система координат 185
Береговые хребты, США 311	Геологической интерпретации радиолокационных
Бернские Альпы 209	снимков критерии 154–156
Биогеографических измерений методика 61	ГЕОМАПС 165–166, 175
Бирма 211, 212, рис. 158	Гидрогеологическая информация снимков «Скайлэб»
Блу-Ридж, антиклинорий 250, рис. 177	194–195
Большое Невольничье озеро 203	«Гипер-бокс» 176
Большой Кевир, разлом 202, 239	Глубина сигнала 69–70
Бразилия 312	«Голубое смещение» 62
Бресский грабен 210	Г-поляризованный сигнал 137
Брилонская антиклиналь 207	Граница вода–воздух 73
Брукс, хребет 223	Гэрлок, разлом 272
Бушвелдский комплекс 218–220	

346	Предметный указатель	Предметный указатель	347
Данакиль, грабен 259–261, рис. 188	Данакиль, грабен 259–261, рис. 188	Данакиль, грабен 259–261, рис. 188	Данакиль, грабен 259–261, рис. 188
Диэлектрическая постоянная пород и их увлажнение 142	Диэлектрическая постоянная пород и их увлажнение 142	Диэлектрическая постоянная пород и их увлажнение 142	Диэлектрическая постоянная пород и их увлажнение 142
«Длинноволновый пигмент» 61	«Длинноволновый пигмент» 61	«Длинноволновый пигмент» 61	«Длинноволновый пигмент» 61
Докембрийский фундамент 202–203	Докембрийский фундамент 202–203	Докембрийский фундамент 202–203	Докембрийский фундамент 202–203
«Дорожка» 151, 153	«Дорожка» 151, 153	«Дорожка» 151, 153	«Дорожка» 151, 153
Дренажная сеть ландшафта 328, 329, рис. 244–246	Дренажная сеть ландшафта 328, 329, рис. 244–246	Дренажная сеть ландшафта 328, 329, рис. 244–246	Дренажная сеть ландшафта 328, 329, рис. 244–246
ESA, общеевропейская организация 118	ESA, общеевропейская организация 118	ESA, общеевропейская организация 118	ESA, общеевропейская организация 118
Желтое вещество 67–68, 70	Желтое вещество 67–68, 70	Желтое вещество 67–68, 70	Желтое вещество 67–68, 70
Живое сечение коэффициентов рассеяния, общее 139–140	Живое сечение коэффициентов рассеяния, общее 139–140	Живое сечение коэффициентов рассеяния, общее 139–140	Живое сечение коэффициентов рассеяния, общее 139–140
Загрос, складчатая зона 244, рис. 174	Загрос, складчатая зона 244, рис. 174	Загрос, складчатая зона 244, рис. 174	Загрос, складчатая зона 244, рис. 174
Запроса данных система WRS 118	Запроса данных система WRS 118	Запроса данных система WRS 118	Запроса данных система WRS 118
Зула, залив 190	Зула, залив 190	Зула, залив 190	Зула, залив 190
Излучательные характеристики растений 62	Излучательные характеристики растений 62	Излучательные характеристики растений 62	Излучательные характеристики растений 62
Индекс-карты 123, 128	Индекс-карты 123, 128	Индекс-карты 123, 128	Индекс-карты 123, 128
Инженерно-геологические задачи 301–302, рис. 220–222	Инженерно-геологические задачи 301–302, рис. 220–222	Инженерно-геологические задачи 301–302, рис. 220–222	Инженерно-геологические задачи 301–302, рис. 220–222
Ионическая зона, чешуйчатая и складчатая структура 203	Ионическая зона, чешуйчатая и складчатая структура 203	Ионическая зона, чешуйчатая и складчатая структура 203	Ионическая зона, чешуйчатая и складчатая структура 203
Иорданский рифт 266–267	Иорданский рифт 266–267	Иорданский рифт 266–267	Иорданский рифт 266–267
Искажения радиолокационных снимков 149–152	Искажения радиолокационных снимков 149–152	Искажения радиолокационных снимков 149–152	Искажения радиолокационных снимков 149–152
Исландия 285–286, рис. 212	Исландия 285–286, рис. 212	Исландия 285–286, рис. 212	Исландия 285–286, рис. 212
Йеллоустонский национальный парк, Скалистые горы 283–284, рис. 211, 213, 214	Йеллоустонский национальный парк, Скалистые горы 283–284, рис. 211, 213, 214	Йеллоустонский национальный парк, Скалистые горы 283–284, рис. 211, 213, 214	Йеллоустонский национальный парк, Скалистые горы 283–284, рис. 211, 213, 214
Калиброванные данные изображений 330	Калиброванные данные изображений 330	Калиброванные данные изображений 330	Калиброванные данные изображений 330
Калибровка сканерных данных, радиометрическая 105	Калибровка сканерных данных, радиометрическая 105	Калибровка сканерных данных, радиометрическая 105	Калибровка сканерных данных, радиометрическая 105
Калифорния 270–272, рис. 200, 201	Калифорния 270–272, рис. 200, 201	Калифорния 270–272, рис. 200, 201	Калифорния 270–272, рис. 200, 201
Камеры, см. Приборы для дистанционных съемок	Камеры, см. Приборы для дистанционных съемок	Камеры, см. Приборы для дистанционных съемок	Камеры, см. Приборы для дистанционных съемок
Каталог космических изображений ESA 87–88	Каталог космических изображений ESA 87–88	Каталог космических изображений ESA 87–88	Каталог космических изображений ESA 87–88
Классификация данных съемки, тематическая 172–177	Классификация данных съемки, тематическая 172–177	Классификация данных съемки, тематическая 172–177	Классификация данных съемки, тематическая 172–177
«Континентальный» аэрозоль 66	«Континентальный» аэрозоль 66	«Континентальный» аэрозоль 66	«Континентальный» аэрозоль 66
Контрастирование 168	Контрастирование 168	Контрастирование 168	Контрастирование 168
– по закону Гаусса 169	– по закону Гаусса 169	– по закону Гаусса 169	– по закону Гаусса 169
Концентрация муты 199	Концентрация муты 199	Концентрация муты 199	Концентрация муты 199
Коррекция снимков, радиометрическая 168	Коррекция снимков, радиометрическая 168	Коррекция снимков, радиометрическая 168	Коррекция снимков, радиометрическая 168
Корреляция, методы 67	Корреляция, методы 67	Корреляция, методы 67	Корреляция, методы 67
Космические аппараты для дистанционных съемок:	Космические аппараты для дистанционных съемок:	Космические аппараты для дистанционных съемок:	Космические аппараты для дистанционных съемок:
«Аполлон 9» 80	«Аполлон 9» 80	«Аполлон 9» 80	«Аполлон 9» 80
«ERTS» 106	«ERTS» 106	«ERTS» 106	«ERTS» 106
«Колумбия» 86	«Колумбия» 86	«Колумбия» 86	«Колумбия» 86
«Лэндсат» 33, 35, 58, 60, 67, 89–92, 98, 99, 106–127, 157, 161, 199–282, 324	«Лэндсат» 33, 35, 58, 60, 67, 89–92, 98, 99, 106–127, 157, 161, 199–282, 324	«Лэндсат» 33, 35, 58, 60, 67, 89–92, 98, 99, 106–127, 157, 161, 199–282, 324	«Лэндсат» 33, 35, 58, 60, 67, 89–92, 98, 99, 106–127, 157, 161, 199–282, 324
«Нимбус» 89	«Нимбус» 89	«Нимбус» 89	«Нимбус» 89
«NOAA» 89	«NOAA» 89	«NOAA» 89	«NOAA» 89
«Скайлэб» 76, 80, 86	«Скайлэб» 76, 80, 86	«Скайлэб» 76, 80, 86	«Скайлэб» 76, 80, 86
«Союз» 78	«Союз» 78	«Союз» 78	«Союз» 78
«Спейслэб» 76	«Спейслэб» 76	«Спейслэб» 76	«Спейслэб» 76
«Спейс шаттл» 34, 35, 87, 198	«Спейс шаттл» 34, 35, 87, 198	«Спейс шаттл» 34, 35, 87, 198	«Спейс шаттл» 34, 35, 87, 198
Крен 152	Крен 152	Крен 152	Крен 152
Кристаллический фундамент, Канада 202, рис. 151	Кристаллический фундамент, Канада 202, рис. 151	Кристаллический фундамент, Канада 202, рис. 151	Кристаллический фундамент, Канада 202, рис. 151
Лабрадорский прогиб 224–225	Лабрадорский прогиб 224–225	Лабрадорский прогиб 224–225	Лабрадорский прогиб 224–225
Литологическое разделение доломитов и известняков 295–298, рис. 217	Литологическое разделение доломитов и известняков 295–298, рис. 217	Литологическое разделение доломитов и известняков 295–298, рис. 217	Литологическое разделение доломитов и известняков 295–298, рис. 217
Литофациальное картирование 35, 299–300, 312, рис. 218, 219, 230	Литофациальное картирование 35, 299–300, 312, рис. 218, 219, 230	Литофациальное картирование 35, 299–300, 312, рис. 218, 219, 230	Литофациальное картирование 35, 299–300, 312, рис. 218, 219, 230
Литофациальные комплексы 199, 205, 299–300, 326, рис. 240	Литофациальные комплексы 199, 205, 299–300, 326, рис. 240	Литофациальные комплексы 199, 205, 299–300, 326, рис. 240	Литофациальные комплексы 199, 205, 299–300, 326, рис. 240
Ложноцветные изображения 201, 221, 270	Ложноцветные изображения 201, 221, 270	Ложноцветные изображения 201, 221, 270	Ложноцветные изображения 201, 221, 270
Лут, тектонический блок, Иран 199, 236–243, рис. 147, 148, 168–173	Лут, тектонический блок, Иран 199, 236–243, рис. 147, 148, 168–173	Лут, тектонический блок, Иран 199, 236–243, рис. 147, 148, 168–173	Лут, тектонический блок, Иран 199, 236–243, рис. 147, 148, 168–173
Макдоннелл, горы, Австралия 248, рис. 175	Макдоннелл, горы, Австралия 248, рис. 175	Макдоннелл, горы, Австралия 248, рис. 175	Макдоннелл, горы, Австралия 248, рис. 175
Мали 326, рис. 240	Мали 326, рис. 240	Мали 326, рис. 240	Мали 326, рис. 240
Мату-Гросу-Гояс, провинция 232–233, рис. 166	Мату-Гросу-Гояс, провинция 232–233, рис. 166	Мату-Гросу-Гояс, провинция 232–233, рис. 166	Мату-Гросу-Гояс, провинция 232–233, рис. 166
«Медианный фильтр» 176	«Медианный фильтр» 176	«Медианный фильтр» 176	«Медианный фильтр» 176
Медно-порфировые месторождения 35, 192	Медно-порфировые месторождения 35, 192	Медно-порфировые месторождения 35, 192	Медно-порфировые месторождения 35, 192
Мезозеллинский прогиб 203	Мезозеллинский прогиб 203	Мезозеллинский прогиб 203	Мезозеллинский прогиб 203
Меррей, зона разрывов 272	Меррей, зона разрывов 272	Меррей, зона разрывов 272	Меррей, зона разрывов 272
Метод отношений 171	Метод отношений 171	Метод отношений 171	Метод отношений 171
Минеральных ассоциаций карты 35	Минеральных ассоциаций карты 35	Минеральных ассоциаций карты 35	Минеральных ассоциаций карты 35
Многозональные снимки пород разного типа 76–77	Многозональные снимки пород разного типа 76–77	Многозональные снимки пород разного типа 76–77	Многозональные снимки пород разного типа 76–77
Мобил, залив 199	Мобил, залив 199	Мобил, залив 199	Мобил, залив 199
Мозеля долина 222	Мозеля долина 222	Мозеля долина 222	Мозеля долина 222
Моментальное поле зрения элемента детектора сканера 99	Моментальное поле зрения элемента детектора сканера 99	Моментальное поле зрения элемента детектора сканера 99	Моментальное поле зрения элемента детектора сканера 99
«Морской» аэрозоль 66	«Морской» аэрозоль 66	«Морской» аэрозоль 66	«Морской» аэрозоль 66
Мохаве, пустыня 272	Мохаве, пустыня 272	Мохаве, пустыня 272	Мохаве, пустыня 272
Мультиспектральные съемки 107	Мультиспектральные съемки 107	Мультиспектральные съемки 107	Мультиспектральные съемки 107
Мюнстерский «залив» 205–207	Мюнстерский «залив» 205–207	Мюнстерский «залив» 205–207	Мюнстерский «залив» 205–207
Нутларская главная мульда 205	Нутларская главная мульда 205	Нутларская главная мульда 205	Нутларская главная мульда 205
Объемное рассеяние 143	Объемное рассеяние 143	Объемное рассеяние 143	Объемное рассеяние 143
Оптические процессы в толще воды 67	Оптические процессы в толще воды 67	Оптические процессы в толще воды 67	Оптические процессы в толще воды 67
– на границе вода–воздух 67	– на границе вода–воздух 67	– на границе вода–воздух 67	– на границе вода–воздух 67
– – – поверхности воды 65–66	– – – поверхности воды 65–66	– – – поверхности воды 65–66	– – – поверхности воды 65–66
Отражательная способность выветрелых и свежих поверхностей пород 29–30	Отражательная способность выветрелых и свежих поверхностей пород 29–30	Отражательная способность выветрелых и свежих поверхностей пород 29–30	Отражательная способность выветрелых и свежих поверхностей пород 29–30
– – горных пород 26–35	– – горных пород 26–35	– – горных пород 26–35	– – горных пород 26–35
Ошибка точности координат, допустимая 114	Ошибка точности координат, допустимая 114	Ошибка точности координат, допустимая 114	Ошибка точности координат, допустимая 114
Пакистан, горные районы 317, рис. 235	Пакистан, горные районы 317, рис. 235	Пакистан, горные районы 317, рис. 235	Пакистан, горные районы 317, рис. 235
«Пат-роу-номер» 120, 123	«Пат-роу-номер» 120, 123	«Пат-роу-номер» 120, 123	«Пат-роу-номер» 120, 123
Пелагонийская зона 203	Пелагонийская зона 203	Пелагонийская зона 203	Пелагонийская зона 203
Пиксель-элемент 89, 106, 114, 115, 140, 167, 172	Пиксель-элемент 89, 106, 114, 115, 140, 167, 172	Пиксель-элемент 89, 106, 114, 115, 140, 167, 172	Пиксель-элемент 89, 106, 114, 115, 140, 167, 172
Пилансберг, комплекс щелчных пород 218–219	Пилансберг, комплекс щелчных пород 218–219	Пилансберг, комплекс щелчных пород 218–219	Пилансберг, комплекс щелчных пород 218–219
Пилбара, тектонический блок 201, рис. 150	Пилбара, тектонический блок 201, рис. 150	Пилбара, тектонический блок 201, рис. 150	Пилбара, тектонический блок 201, рис. 150
Пинд, горы 203	Пинд, горы 203	Пинд, горы 203	Пинд, горы 203
Поглотительная способность горных пород 26	Поглотительная способность горных пород 26	Поглотительная способность горных пород 26	Поглотительная способность горных пород 26
Полезный сигнал 68	Полезный сигнал 68	Полезный сигнал 68	Полезный сигнал 68
Полихнитос, область, Греция 289–294, рис. 214–215	Полихнитос, область, Греция 289–294, рис. 214–215	Полихнитос, область, Греция 289–294, рис. 214–215	Полихнитос, область, Греция 289–294, рис. 214–215
Полосы поглощения α -хлорофилла 62	Полосы поглощения α -хлорофилла 62	Полосы поглощения α -хлорофилла 62	Полосы поглощения α -хлорофилла 62
Поперечные хребты 271	Поперечные хребты 271	Поперечные хребты 271	Поперечные хребты 271
Почвы:	Почвы:	Почвы:	Почвы:
– альbedo 42	– альbedo 42	– альbedo 42	– альbedo 42
– влажность 43–45	– влажность 43–45	– влажность 43–45	– влажность 43–45
– коэффициент рассеяния радиоизлучения влажной почвой 141	– коэффициент рассеяния радиоизлучения влажной почвой 141	– коэффициент рассеяния радиоизлучения влажной почвой 141	– коэффициент рассеяния радиоизлучения влажной почвой 141
– органического вещества содержание 42–43	– органического вещества содержание 42–43	– органического вещества содержание 42–43	– органического вещества содержание 42–43
– отражательная способность 41–47	– отражательная способность 41–47	– отражательная способность 41–47	– отражательная способность 41–47
– отражение целинных почв 42	– отражение целинных почв 42	– отражение целинных почв 42	– отражение целинных почв 42
– поглотительная способность 41–47	– поглотительная способность 41–47	– поглотительная способность 41–47	– поглотительная способность 41–47
– радиационная температура 47	– радиационная температура 47	– радиационная температура 47	– радиационная температура 47
– собственная теплоемкость 48	– собственная теплоемкость 48	– собственная теплоемкость 48	– собственная теплоемкость 48
– собственное тепловое излучение 47–52	– собственное тепловое излучение 47–52	– собственное тепловое излучение 47–52	– собственное тепловое излучение 47–52
– спектральные характеристики 42	– спектральные характеристики 42	– спектральные характеристики 42	– спектральные характеристики 42
– – – США 45–47	– – – США 45–47	– – – США 45–47	– – – США 45–47
– температура поверхности 50	– температура поверхности 50	– температура поверхности 50	– температура поверхности 50
– температурный профиль 47	– температурный профиль 47	– температурный профиль 47	– температурный профиль 47
– температуропроводность 50–51	– температуропроводность 50–51	– температуропроводность 50–51	– температуропроводность 50–51
– теплоперенос 49	– теплоперенос 49	– теплоперенос 49	– теплоперенос 49
– теплопроводность 48	– теплопроводность 48	– теплопроводность 48	– теплопроводность 48
Приборы для дистанционных съемок:	Приборы для дистанционных съемок:	Приборы для дистанционных съемок:	Приборы для дистанционных съемок:
камера «Видекон» 89	камера «Видекон» 89	камера «Видекон» 89	камера «Видекон» 89
– крупноформатная КФК 330	– крупноформатная КФК 330	– крупноформатная КФК 330	– крупноформатная КФК 330
– метрическая 76, 86–87, 89, 198	– метрическая 76, 86–87, 89, 198	– метрическая 76, 86–87, 89, 198	– метрическая 76, 86–87, 89, 198
– ТМ («Тематик-Маппер») 58, 120–124, 127–128, 274–276	– ТМ («Тематик-Маппер») 58, 120–124, 127–128, 274–276	– ТМ («Тематик-Маппер») 58, 120–124, 127–128, 274–276	– ТМ («Тематик-Маппер») 58, 120–124, 127–128, 274–276
– МКФ-6 78–79	– МКФ-6 78–79	– МКФ-6 78–79	– МКФ-6 78–79
– ETC 80–86, 190, 191, 199	– ETC 80–86, 190, 191, 199	– ETC 80–86, 190, 191, 199	– ETC 80–86, 190, 191, 199
– Hasselblad 500EL 80	– Hasselblad 500EL 80	– Hasselblad 500EL 80	– Hasselblad 500EL 80
приемник зарядовой связи (ПЗС) 128, 129, 133	приемник зарядовой связи (ПЗС) 128, 129, 133	приемник зарядовой связи (ПЗС) 128, 129, 133	приемник зарядовой связи (ПЗС) 128, 129, 133
проектор мультиспектральный MSP-4 79	проектор мультиспектральный MSP-4 79	проектор мультиспектральный MSP-4 79	проектор мультиспектральный MSP-4 79
система дистанционного зондирования РБВ 157	система дистанционного зондирования РБВ 157	система дистанционного зондирования РБВ 157	система дистанционного зондирования РБВ 157
– РЛСА 120, 135, 147–149	– РЛСА 120, 135, 147–149	– РЛСА 120, 135, 147–149	– РЛСА 120, 135, 147–149
– РЛСБО 135, 146–147	– РЛСБО 135, 146–147	– РЛСБО 135, 146–147	– РЛСБО 135, 146–147
– IP 316–319, 324, 328	– IP 316–319, 324, 328	– IP 316–319, 324, 328	– IP 316–319, 324, 328
сканер, бендикс-сканер 105, 106	сканер, бендикс-сканер 105, 106	сканер, бендикс-сканер 105, 106	сканер, бендикс-сканер 105, 106
– геометрия изображения сканерных снимков 98–100	– геометрия изображения сканерных снимков 98–100	– геометрия изображения сканерных снимков 98–100	– геометрия изображения сканерных снимков 98–100
– 24-канальный 102	– 24-канальный 102	– 24-канальный 102	– 24-канальный 102
– многозональный, схема устройства 94, рис. 71	– многозональный, схема устройства 94, рис. 71	– многозональный, схема устройства 94, рис. 71	– многозональный, схема устройства 94, рис. 71
– МСС, масштаб изображения 114–116	– МСС, масштаб изображения 114–116	– МСС, масштаб изображения 114–116	– МСС, масштаб изображения 114–116
– – пространственное разрешение 114–116	– – пространственное разрешение 114–116	– – пространственное разрешение 114–116	– – пространственное разрешение 114–116
– – радиометрическое разрешение 114–116	– – радиометрическое разрешение 114–116	– – радиометрическое разрешение 114–116	– – радиометрическое разрешение 114–116
– – спектральное разрешение 114–116	– – спектральное разрешение 114–116	– – спектральное разрешение 114–116	– – спектральное разрешение 114–116
– – точная привязка 114–116	– – точная привязка 114–116	– – точная привязка 114–116	– – точная привязка 114–116
– тепловой 93–97, 101	– тепловой 93–97, 101	– тепловой 93–97, 101	– тепловой 93–97, 101
– эффективность 100–105	– эффективность 100–105	– эффективность 100–105	– эффективность 100–105
съемочное устройство ХРВ 133–134	съемочное устройство ХРВ 133–134	съемочное устройство ХРВ 133–134	съемочное устройство ХРВ 133–134
«Псевдорельефное» воспроизведение 170	«Псевдорельефное» воспроизведение 170	«Псевдорельефное» воспроизведение 170	«Псевдорельефное» воспроизведение 170
Радиоволны и естественные поверхности 139–143	Радиоволны и естественные поверхности 139–143	Радиоволны и естественные поверхности 139–143	Радиоволны и естественные поверхности 139–143
Радиолокационная съемка, параметры 136–144	Радиолокационная съемка, параметры 136–144	Радиолокационная съемка, параметры 136–144	Радиолокационная съемка, параметры 136–144
Радиолокационные мозаики 153	Радиолокационные мозаики 153	Радиолокационные мозаики 153	Радиолокационные мозаики 153
Радиометрическая коррекция освещенности 30	Радиометрическая коррекция освещенности 30	Радиометрическая коррекция освещенности 30	Радиометрическая коррекция освещенности 30
Радиотени 138, 144, 152	Радиотени 138, 144, 152	Радиотени 138, 144, 152	Радиотени 138, 144, 152

«Речная муть» 63–64
Рифтовая зона Красного моря 261–270, рис. 189–200
Рудных месторождений поиск 192–194
Рыскание на курсе 152
Рыхлые осадки (гранулометрия, вещественный состав) 320
РИВЕРЛИН 180
РИДАРЛИН 184

Сан-Андреас, разлом 271
Сан-Рафаэль, поднятие 191
Сан-Хоакин, долина 271
Саудовская Аравия 227
Северный Рейн-Вестфалия 209
Северо-Ливанская зона 267
Сезонные снимки 222–226, рис. 161–163
Семплинг аналогового сигнала 115
«Синоптическое перекрытие» 107
Скальные породы под рыхлыми осадками 324–325, рис. 239, 241, 242
Сканеры *см.* Приборы для дистанционных съемок
Скаттерограммы 176
Складчатые области 314, рис. 231, 232
Складчатый пояс Ленгуру 318
Снимки «Лэндсат» 199–282
– «Скайлэб» 189–199
Современные геологические процессы 199, 277–279
Сомалийское плато 259
Спектральная глубина сигнала 72
Спектральные характеристики объектов 25, 26–35
– – растений 53–55
– – – влияние внешних факторов 55–59
– – – здоровых зеленых 54–55
– – – крон деревьев 59–61
– – – кустарниковых 59–61
– – – произрастающих на почвах с повышенным содержанием тяжелых элементов 56–57
– яркости поверхностей 29
– – – коэффициент 28
Спектральный эффект тени 60
«Спектрозональное воспроизведение» 170
Спектрометрирование в среднем ИК-диапазоне 35
Структурное картирование 236–272
Суточный ход температур 25
Суэцкий залив 264
Сьерра-Невада, горы 271
«Съем тепла» в почве 52

Табас, тектонический блок, Иран 199, 236–243, рис. 147, 148, 168–173
Тангаж 152

Твердый сток 63–64, 68
Тевтобурский Лес 205–207
Температура объекта, радиационная 24
Температурный профиль 24, 25, 40
Тепловая инерция 40
Тепловое излучение пород, вторичное 36–46
Тепловые съемки для тематических карт 75
– тени 298
Тиндуф, бассейн 250
Топографическая инверсия 153
Трансвааль, провинция ЮАР 216, рис. 159, 160
Трансформация принципиальных компонент 172

Угол визирования 139
Уошиито, горы 250–251, рис. 178
Устье Евфрата и Тигра 280
– Миссисипи 280–281, рис. 206

Фильтрация 170
Фильтры аддитивные 170
– субтрактивные 170
Фитопланктон 68
Формы рельефа 311–312, рис. 229
Фотобумага с синтетической основой 114

Хунсрюк, горы 222

Цветовое разделение 169
Центральная Европа 205, 209, рис. 153–157
Цикл процесса сканирования 100, 107–108, 112, 221

Черчилл, провинция 224

Шварцвальд, горы 209
ШНИПУЛИН 183
Шотори, хребет 228–230

Эвапотранспирация 25
Эйфель, горы 222

ЭРОС-центр 86, 90, 91, 115, 116, 118, 119–120, 128, 235
ЭРЭП, 80
Эстуарий Эльбы 71–72
Эфиопское нагорье 190, 258

Южная Африка 299–300
Юра, горы 209–210

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к русскому переводу	5	4.4. Спутники типа «Лэндсат» для изучения Земли	106
Предисловие	8	4.5. Приемники зарядовой связи (МОМС, СПОТ)	128
1. Введение и обзор	10	4.6. Программа картирования теплового потока (НСММ)	134
2. Физические основы дистанционного зондирования	13	4.7. Радиолокационная съемка	135
2.1. Электромагнитное излучение, электромагнитный спектр, источники излучения	13	5. Общая и специальная обработка снимков	157
2.2. Взаимодействие электромагнитных волн с атмосферой	15	5.1. Введение	157
2.3. Взаимодействие электромагнитного излучения с различными веществами и средами на поверхности Земли	18	5.2. Фотографические способы	158
3. О спектральных характеристиках природных сред и материалов	26	5.3. Электронная обработка снимков	165
3.1. Введение	26	5.4. Статистическое выявление и воспроизведение линеаментов	177
3.2. Горные породы	26	6. Материалы дистанционного зондирования: информационное содержание, интерпретация, возможности использования	189
3.3. Почвы	41	6.1. Введение	189
3.4. Спектральные характеристики растительности	52	6.2. Снимки «Скайлэб»	189
3.5. О спектральных характеристиках вод озер, рек и морских побережий	63	6.3. Снимки «Лэндсат» (МСС)	199
4. Методы съемки и съемочные платформы в дистанционном зондировании	76	6.4. Тепловые снимки	282
4.1. Фотографические методы	76	6.5. Радиолокационные снимки	306
4.2. Телевизионные методы	89	7. Литература	332
4.3. Сканерные методы	92	7.1. Учебники, справочники, тематические сборники, атласы	332
		7.2. Журналы	333
		7.3. Цитируемая литература	333
		Предметный указатель	345

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., д. 2, издательство «Мир».

Научное издание

Петер Кронберг

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ

Основы и методы
дистанционных исследований
в геологии

Заведующий редакцией В. В. Герасимовский
Старший научный редактор В. С. Краснова
Младший научный редактор Т. С. Егорова
Художник В. Л. Захаров
Художественный редактор А. Я. Мусин
Технический редактор И. И. Володина
Корректор М. А. Смирнов

ИБ № 6345

Слано в набор 1.10.87. Подписано к печати 26.07.88.
Формат 84 × 108¹/₁₆. Бумага мелованная № 1. Печать офсетная. Гарнитура таймс. Объем 11. бум. л.
Усл. печ. л. 36,96 Усл. кр.-отт. 73,92 Уч.-изд.л. 44,70
Изд. № 5/5745. Тираж 1870 экз. Зак. 1107.
Цена 7 р. 70 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
В/о «Совэкспорткнига»
Государственного комитета
СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
129820, ГСП, Москва,
И-110, 1-й Рижский пер., 2

Можайский полиграфкомбинат
В/О «Совэкспорткнига»
Государственного комитета СССР
по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
143200 г. Можайск, ул. Мира, 93.