

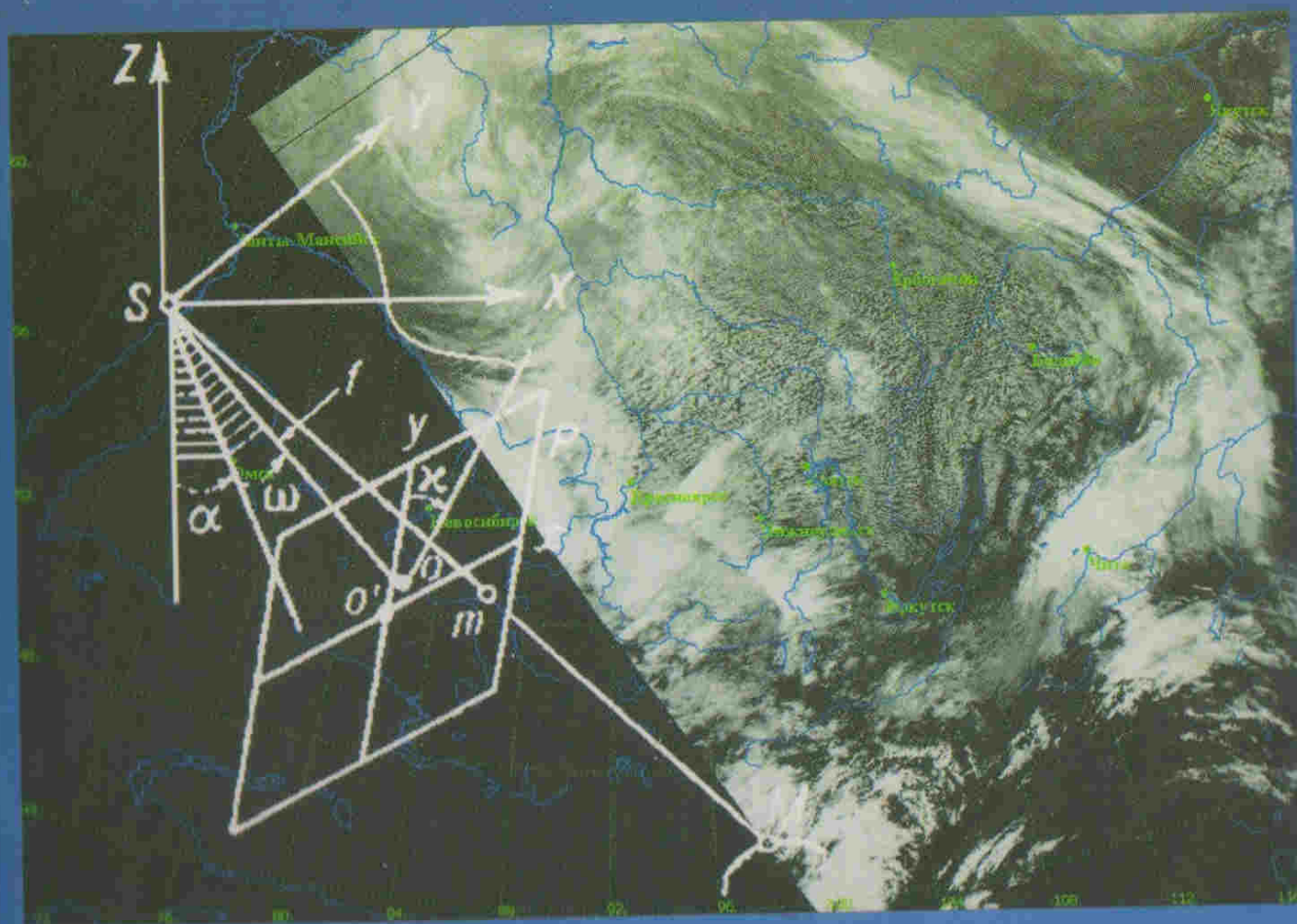
526.9
0-15



УЧЕБНИК

А.И.Обиралов, А.Н.Лимонов, Л.А.Гаврилова

ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ



«КолосС»



МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ «АГРООБРАЗОВАНИЕ»



А. И. ОБИРАЛОВ, А. Н. ЛИМОНОВ,
Л. А. ГАВРИЛОВА

ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Под редакцией А. И. Обиралова

Допущено Министерством сельского хозяйства Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: 120301 «Землеустройство», 120302 «Земельный кадастр», 120303 «Городской кадастр»

Зк. 1541



МОСКВА «КолосС» 2006

УДК 528.7(075.8)
ББК 26.12я73
О-15

Редактор *Н. М. Щербакова*

Рецензент канд. техн. наук, профессор *У. Д. Ниязгулов* (Московский государственный университет путей сообщения)

Введение, ч. II, ч. III (глава 11), ч. IV (кроме разд. 16.6), ч. V (кроме разд. 19.5 и главы 20) написаны *А. И. Обираловым*, ч. I, ч. IV (разд. 16.6), ч. V (разд. 19.5 и глава 20) — *А. Н. Лимоновым*, ч. III (кроме главы 11, разд. 12.9 и 12.16) — *Л. А. Гавриловой*, разд. 12.9 и 12.16 — совместно *Л. А. Гавриловой и А. Н. Лимоновым*

Обиралов А. И., Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А.
О-15 Фотограмметрия и дистанционное зондирование. — М.: КолосС, 2006. — 334 с.: ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).
ISBN 5—9532—0359—4

Рассмотрены современные съемочные системы и технологии получения аэро- и космических снимков. Основное внимание уделено геометрии снимков и использованию их для получения метрической информации. Дано общее представление о современных технологиях преобразования снимков в планы. Детально рассмотрена технология дешифрирования снимков и использования их при решении прикладных задач: обследования и организации территорий, кадастре, мониторинге.

Для студентов вузов по специальностям «Землеустройство», «Земельный кадастр» и «Городской кадастр».

УДК 528.7(075.8)
ББК 26.12я73

ISBN 5—9532—0359—4

© Издательство «КолосС», 2006

ВВЕДЕНИЕ

●

Фотограмметрия — техническая наука о методах определения метрических характеристик объектов и их положения в двух- или трехмерном пространстве по снимкам, полученным с помощью специальных съемочных систем. Такими системами могут быть традиционные фотографические камеры, а также системы, использующие иные законы построения изображения и иные (кроме фотографических слоев) регистраторы электромагнитных излучений. Основная задача фотограмметрии — топографическое картографирование, а также создание специальных инженерных планов и карт, например кадастровых.

Фотограмметрические методы позволяют также экономично и достаточно точно решать непосредственно по снимкам некоторые прикладные задачи, например измерять площади участков местности, определять их уклоны, получать количественные характеристики эрозионных процессов, выполнять вертикальную планировку с определением объема земляных работ и др.

Это направление метрической обработки снимков принято называть *прикладной фотограмметрией*.

В учебнике термином «метрическая обработка» с целью краткости изложения назван процесс получения со снимков только геометрической информации, сущность которой указана выше. Именно этот смысл вложен в используемый далее термин «метрические свойства» снимков и другой продукции съемки.

Метрической обработке снимков обычно предшествует (иногда совмещается) процесс отбора подлежащих нанесению на изготавливаемые планы и карты объектов, которые опознают на анализируемых изображениях, определяют их качественные и количественные характеристики, положение границ и выражают полученные данные условными знаками. Этот процесс называют *дешифрированием снимков*. В процессе дешифрирования выполняют также досъемку не отобразившихся на снимках элементов ситуации.

В двадцатые годы прошлого столетия были сделаны попытки

использования аэрофотоснимков для специализированного изучения лесов и в начале тридцатых годов — почв. Создание космических летательных аппаратов и съемочных систем, работающих в более широком диапазоне электромагнитных излучений с оперативной доставкой по радиоканалам результатов съемки на пункты приема, активизировало развитие этого направления. Оно получило название «дистанционное зондирование».

Под *дистанционным зондированием* понимают неконтактное изучение Земли (планет, спутников), ее поверхности, близповерхностного пространства и недр, отдельных объектов, динамических процессов и явлений путем регистрации и анализа их собственного или отраженного электромагнитного излучения. Регистрацию можно выполнять с помощью технических средств, установленных на аэро- и космических летательных аппаратах, а также, в частных случаях, на земной поверхности, например при исследовании динамики эрозионных и оползневых процессов, в гляциологии и др.

Принципиально к дистанционному зондированию можно отнести известные методы исследования недр Земли — сейсморазведку и гравиразведку, сканирующую эхолотию дна водоемов и др. В изучении земельных ресурсов, кадастре, земельном и экологическом мониторинге используются методы зондирования только с помощью электромагнитных излучений.

Дистанционное зондирование, интенсивно развиваясь, выделилось в самостоятельное направление использования снимков. Международное фотограмметрическое общество (МФО), в которое входил СССР и входит ныне Россия, в 1980 г. преобразовано в Международное общество фотограмметрии и дистанционного зондирования (МОФ и ДЗ).

Взаимосвязь основных направлений использования снимков и наименования направлений может быть представлена схемой (рис. 1).



Рис. 1. Схема взаимосвязи основных процессов получения и обработки снимков

Дешифрирование (интерпретация) технологически входит одновременно в обе части названия дисциплины. В дистанционном зондировании роль дешифрирования преобладающая.

В настоящее время нет удобной для использования специальной терминологии в картографировании при решении задач формирования баз земельно-кадастровых данных. Например, планы поселений в масштабе 1:2000 и крупнее официально называют «базовыми планами состояния и использования земель». А планы межселенных земель в масштабе 1:10 000 — «базовыми картами состояния и использования земель». В практике принято планы и карты называть однословно, например топографические, почвенные, геоботанические и т. п.

Авторы полагают, что в учебнике, где длинные названия планов и карт используются многократно, необходимо их сокращение. Планы и карты данного назначения можно было бы назвать *кадастровыми*. Этот термин уже используется в публикациях. Без краткого названия осталось и дешифрирование. Его в данном случае можно наименовать также *кадастровым*.

Изучение дисциплины «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» опирается на знание дисциплин: математика, информатика, физика, экология, почвоведение, инженерное обустройство территории, геодезия, географические информационные системы (ГИС).

Знания, приобретенные при изучении данной дисциплины, позволяют специалистам, работающим в области землеустройства, формирования кадастра недвижимости, мониторинга землепользования и охраны окружающей среды, получать или квалифицированно заказывать и использовать цифровые кадастровые планы и карты, а также получать сопутствующие специальные карты.

Краткий исторический обзор развития фотограмметрии и дистанционного зондирования. Технической основой формирования фотограмметрии явилось изобретение в 1839 г. французом Даггером фотографии. В 1851—1859 гг. француз Э. Ласседа разрабатывает графический вариант составления планов сооружений по их наземным фотографиям.

Создание средств воздухоплавания предоставило возможность перейти от наземной инженерной фотосъемки к аэрофотосъемке. В 1858 г. французом Ф. Надаром получены первые фотоснимки с воздушного шара. Это был важный шаг в развитии фотограмметрии — аэрофотоснимок по своей геометрии приблизился к плану местности.

Первые аэрофотоснимки с воздушного шара в России были получены 18 мая 1886 г. А. М. Кованько. Город Петербург снимали аэрофотоаппаратом В. Н. Срезневского с высот 800, 1200 и 1350 м.

В 1910 г. летчик Гельгар получил первые в России фотоснимки с самолета.

Первое время аэрофотосъемку применяли в основном в целях военной разведки. Эти действия относятся к направлению, которое в 1960 г. назовут дистанционным зондированием.

В 1922 г. в нашей стране была предпринята попытка решения гражданских задач с помощью аэрофотосъемки — исследовали возможность выполнения лесотаксационных работ по снимкам. Опыт оказался удачным.

В 1924 г. Н. М. Алексапольский, П. П. Соколов, В. С. Цвет-Колыдинский и другие ученые под руководством М. Д. Бонч-Бруевича создали и организовали работу государственного технического бюро «Аэросъемка». Через год бюро выполнило аэрофотосъемку в Можайском районе Московской области. В результате было доказано, что создание контурных планов и карт в масштабах 1:2000—1:50 000 имеет преимущество перед наземной съемкой в производительности, детальности и универсальности получаемых материалов.

С 1926 г. начали производственные аэросъемки для картографирования территорий в различных регионах страны под руководством Н. Н. Веселовского, В. Ф. Дейнеко, Н. Н. Степанова и др.

Ознакомимся кратко с технологией обработки снимков в период до 1930 г. В общем случае оптическая ось объектива аэрофотоаппарата не бывает отвесной. Наклон снимков ограничивается углом 3° — плановая съемка. Масштаб снимка вследствие влияния его наклона непостоянен — перспективное изменение масштаба подчиняется определенному закону. К единому масштабу снимки равнинной местности приводили путем проективного преобразования его — трансформирования. Выполняли этот процесс с помощью фототрансформатора. Это оптикомеханический прибор, в кассету которого закладывали аэронегатив, а на экран — планшет. Кассету и экран устанавливали в такое взаимное положение, при котором на экране получалось свободное от перспективных искажений изображение (обычно в стандартном масштабе). Для получения такого положения использовали 4...5 точек на снимок с определенными в поле геодезическими координатами (опорные точки). Эти точки в нужном масштабе наносили на планшет, а соответственные точки накладывали на негатив. Изменяя взаимное положение кассеты и экрана, совмещали соответственные проецируемые точки с точками на планшете. Затем планшет заменяли фотобумагой, выполняли экспонирование и проявление. Трансформированные снимки укладывали по опорным точкам на планшет; избыточные части снимков на перекрытиях обрезали. Оставшиеся центральные части снимков наклеивали.

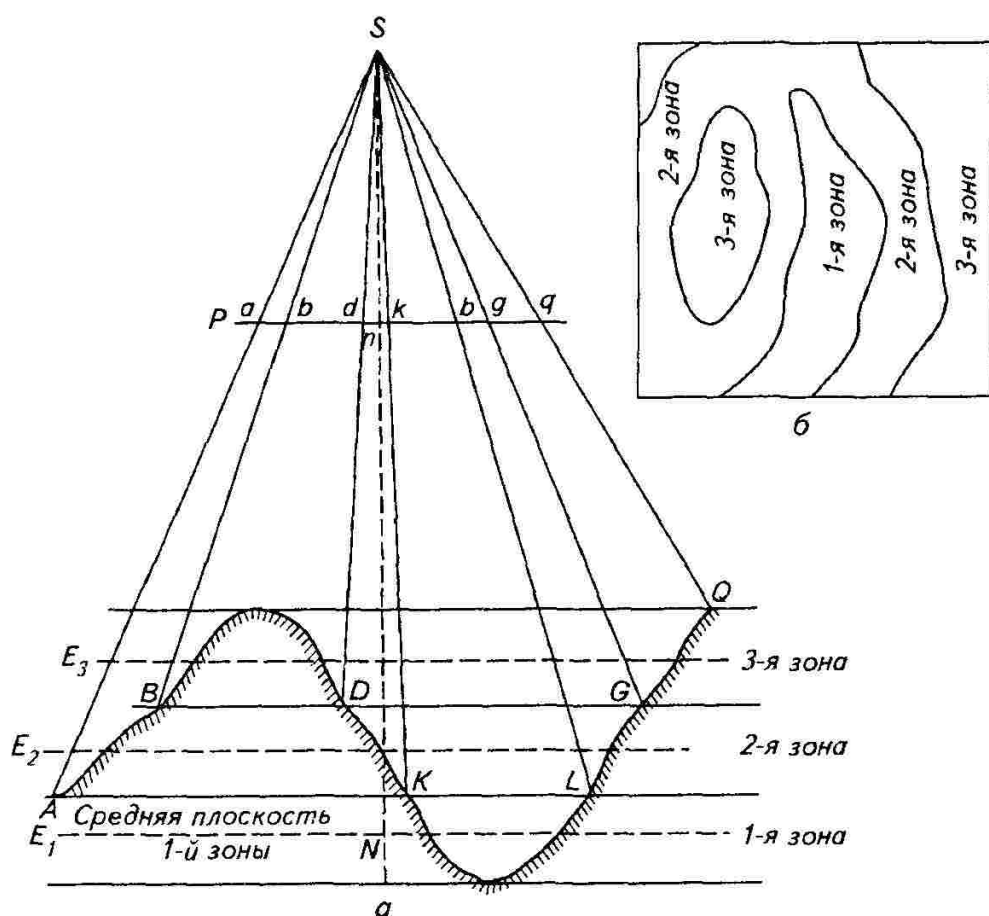


Рис. 2. Геометрическая интерпретация принципа трансформирования снимков и изготовления фотопланов рельефной местности

Рельеф местности существенно усложнял процесс трансформирования снимков — масштаб в этом случае изменяется не только с изменением высоты некоторого участка, но и с изменением его наклона, направлением наклона и положения наклоненного участка относительно центра снимка. Разномасштабность снимков рельефной местности уменьшалась до допустимых норм при использовании технологии трансформирования по зонам. Местность условно рассекали горизонтальными плоскостями на зоны, высоту которых рассчитывали так, чтобы смещение точек за влияние рельефа на изображении каждой зоны относительно ее средней секущей плоскости не превышало определенного допуска. Сечение плоскости позитивного снимка P , земной поверхности и горизонтальных плоскостей отвесной плоскостью, проходящей через центр проекции S , показано на рисунке 2, а. Приведение средних зональных масштабов к единому масштабу плана выполняли путем ступенчатого изменения высоты проецирования при переходе к экспонированию изображения очередной зоны. Гра-

ницами зон на трансформированных снимках служили перенесенные с топографической карты горизонтали, соответствующие высотным уровням границ зон. По этим границам совместно разрезали снимки смежных зон (рис. 2, б). Положение снимков на планшете определяли также по опорным точкам.

Все необходимые для трансформирования опорные точки первоначально определяли геодезически в поле — сплошная привязка. Позже число определяемых в поле точек было сокращено — разреженная привязка. Недостающие точки определяли камерально с помощью графической фототриангуляции. Этот процесс основывался на практической неискажаемости направлений, исходящих из центральной точки снимка. С помощью скопированных на восковки лучевых графиков засекали недостающие точки.

Горизонтالي на фотопланы наносили в поле с помощью мензулы или тахеометра. На участках с достаточным числом опознающихся на фотоплане точек для съемки рельефа использовали нивелир. Этот способ создания топографических планов, разработанный под руководством Н. М. Алексапольского, был назван комбинированным. Позже число определяемых в поле пикетов сократили — при проведении горизонталей стали использовать стереоскопы.

В 1931 г. было организовано технико-производственное предприятие «Сельхозаэрофотосъемка» для картографирования сельскохозяйственных территорий РСФСР. Позже аналогичные предприятия были созданы и в других республиках. В 1932 г. все они объединились в единый центр Всесоюзную контору «Сельхозаэрофотосъемка». С 1970 г. она преобразуется во Всесоюзный институт сельскохозяйственных аэрогеодезических изысканий (ВИСХАГИ). В 1994 г. эта организация преобразована в Российский проектно-изыскательский институт земельно-кадастровых съемок — «Росземкадастрсъемка»; с 1996 г. — «Госземкадастрсъемка».

В середине тридцатых годов на смену комбинированному приходит дифференцированный способ картографирования по материалам аэрофотосъемки. Контурной основой остается тот же фотоплан, но горизонтали проводят камерально с помощью стереометров (СТД-1 и СТД-2), созданных Ф. В. Дробышевым. Эти приборы были компактными, дешевыми и высокопроизводительными. Трансформирование результатов измерения превышений точек местности в этих приборах выполняли с помощью коррекционных устройств.

В сороковые—пятидесятые годы были созданы (и их широко использовали в нашей стране) так называемые универсальные стереофотограмметрические приборы — стереографы Ф. В. Дробы-

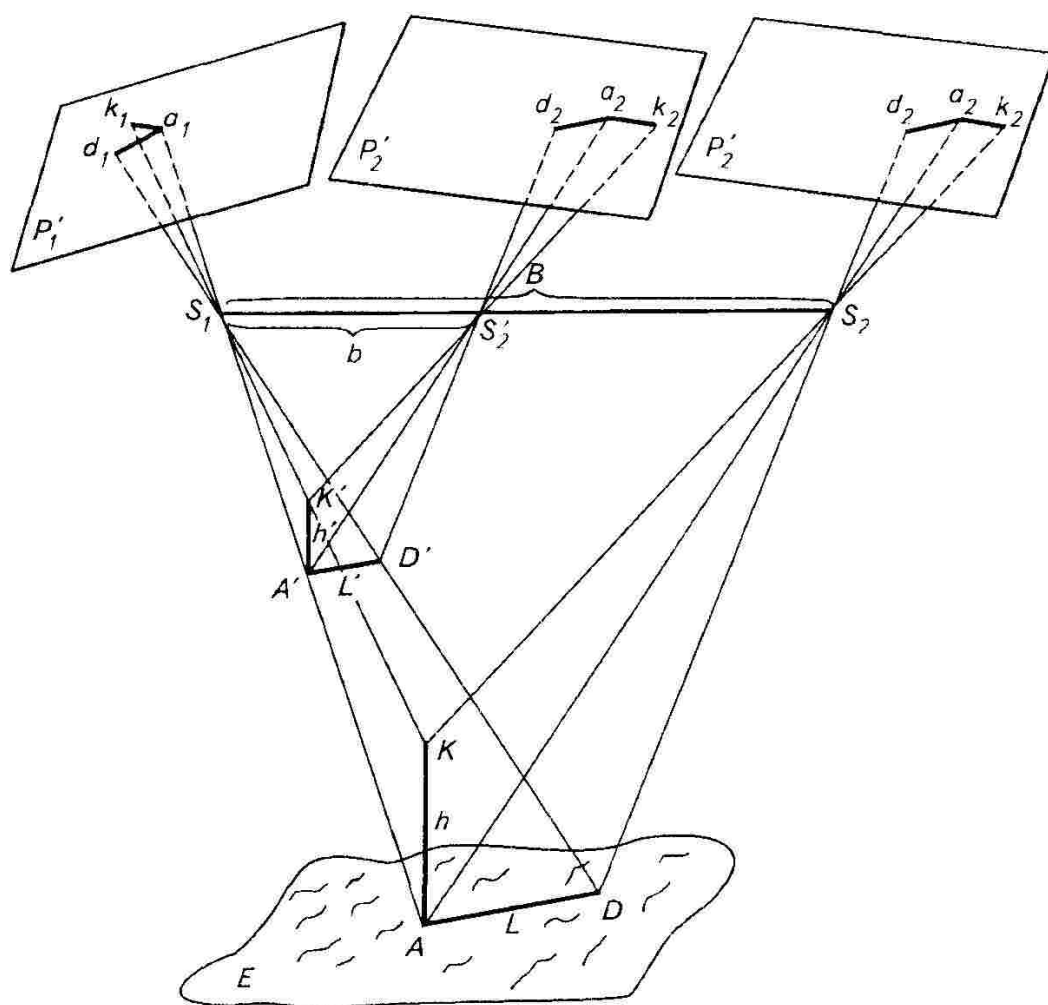


Рис. 3. Схема построения геометрической модели местности

шева (СД) и стереопроекторы Г. В. Романовского (СПР). Принцип работы их заключается в построении и измерении геометрической модели местности по снимкам.

Идея построения модели — на рисунке 3. Показана пара P_1 и P_2 реальных снимков, полученных с базиса фотографирования $B = S_1S_2$. Сблизив снимки, не нарушая их взаимного ориентирования, до положения, например, $S_1S_2' = b$, получим в результате пересечения соответственных лучей трехмерную модель местности $D'A'K'$, подобную реальному объекту DAK . Масштаб модели в плане и по высоте определяется соотношением

$$\frac{1}{M'} = \frac{L'}{L} = \frac{h}{h'} = \frac{b}{B},$$

где L и L' — длины соответственных горизонтальных линий на местности и модели (на рис. 3 AD и $A'D'$); h и h' — превышения точек на местности и модели (на рис. 3 KA и $K'A'$).

Эту модель можно измерять с помощью стереоскопической марки, получая любые метрические данные, или, ортогонально проецируя нужные элементы и ее трассируемые маркой горизонтали на основу, получать топографический план местности.

Описанная идея в мировой практике была реализована в приборах с двумя и большим числом проектирующих камер. Фокусное расстояние камер в зарубежных приборах устанавливали равным фокусному расстоянию камеры аэрофотоаппарата. Связка проектирующих лучей при этом будет подобна связке, использованной при съемке с выполнением соотношения, приведенного на с. 9. Если равенство фокусных расстояний не соблюдается, связка будет преобразованной — горизонтальный и вертикальный масштабы модели будут неодинаковыми. Именно по этому пути пошло отечественное стереофотограмметрическое приборостроение. Кроме того, в вышеназванных приборах снимки в кассетах остаются постоянно горизонтальными. Трансформирование результатов измерения выполняли коррекционными механизмами.

Приборы рассмотренного класса в международной практике относят к классу аналоговых стереоприборов. Эти приборы использовали и для сгущения сети опорных точек при разреженной привязке снимков (аналоговая фототриангуляция).

Возникновение и развитие электронно-вычислительной техники существенно повлияло на технологию фотограмметрической обработки снимков. Разрабатывают и широко применяют способы пространственной аналитической фототриангуляции (А. Н. Лобанов, Ф. Ф. Лысенко, Б. К. Малявский, И. Ф. Антипов и др.). Наступает период создания и использования аналитических стереофотограмметрических приборов. Трансформационные функции в них выполняют компьютеры. В нашей стране создан прибор этого класса — стереоанаграф (Г. А. Зотов и др.). Этот период (шестидесятые—восемьдесятые годы) — переходный к этапу цифровой фотограмметрии.

Цифровые технологии обработки снимков являются основными при выполнении картографических и инженерных работ. Эти технологии имеют существенные преимущества перед ранее использовавшимися, например: они не требуют использования сложного дорогого специализированного оборудования; позволяют решать по снимкам автоматизированно разнообразные инженерные задачи, в том числе и при землеустройстве, а также автоматизировать некоторые процессы при картографировании территорий.

Большое значение в становлении фотограмметрии сыграли научные разработки российских ученых. В 1907 г. был издан первый

учебник В. Ф. Найденова «Измерительная фотография и применение ее в воздухоплавании». В 1908—1909 гг. Р. Ю. Тиле опубликовал трехтомный капитальный труд «Фотограмметрия в современном развитии».

Из наиболее поздних работ можно отметить следующие: «Пространственная обратная засечка в фотограмметрии» (Н. Г. Кель, 1926 г.); «Фотография и фотограмметрия» (Н. Г. Кель, 1937 г.); «Элементы фотограмметрии» (Н. А. Урмаев, 1941 г.); «Теория трансформирования снимков и создание карты по трансформированным снимкам» (А. Н. Лобанов, 1954 г.); «Обоснование аналитических методов стереофотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки» (Н. Д. Ильинский, 1959 г.); «Аналитическая фототриангуляция» (А. Н. Лобанов, 1972 г.); «Динамическая фотограмметрия» (Б. Н. Родионов, 1982 г.); «Аналитическая обработка фотограмметрической информации в инженерных изысканиях» (Б. К. Малявский, А. А. Жарновский, 1984 г.).

Освоение космического пространства послужило мощным катализатором в развитии съемочной техники и технологий обработки получаемых данных в интересах картографирования и, главным образом, дистанционного зондирования.

7 ноября 1959 г. отечественная автоматическая станция «Луна-3» сфотографировала и передала по телевизионному каналу на Землю снимки обратной стороны Луны.

6 августа 1961 г. космонавт Г. Титов с борта космического корабля «Восток-2» впервые в мире произвел фотокиносъемку земной поверхности.

Далее космические съемки в интересах различных ведомств стали выполнять регулярно с обитаемых и необитаемых космических летательных аппаратов. Одновременно расширялся спектр специальных аэрофотосъемок для решения дистанционным методом различных задач, в том числе и сельскохозяйственного назначения.

Началом подготовки специалистов по получению и обработке аэроснимков в нашей стране послужило образование в 1919 г. Высшей аэрофотограмметрической школы Красного военно-воздушного флота. В 1920 г. было открыто аэрофотогеодезическое отделение (позже стало факультетом) в Московском межевом институте. В 1930 г. в учебнике по геодезии (под редакцией Ф. Н. Красовского) был опубликован раздел «Фототопография», написанный Н. М. Алексапольским.

В 1931 г. в Московском институте землеустройства начал работать кабинет аэрофотосъемки, преобразованный в 1937 г. в кафедру аэрофотогеодезии (основатель и первый заведующий В. Ф. Дейнеко). В 1955 г. вышел в свет, в 1968 г. был переиздан

учебник В. Ф. Дейнеко «Аэрофотогеодезия», предназначенный для подготовки инженеров-землеустроителей. Эта дисциплина рассматривает основы теории перспективы, технологию получения и полной обработки аэрофотоснимков. В 1971 г. дисциплина была переименована в соответствии с международным стандартом и стала называться «Фотограмметрия и дешифрирование снимков», а с 2001 г. «Фотограмметрия и дистанционное зондирование».

Фотограмметрию и дистанционное зондирование под разными названиями изучают в высших и средних учебных заведениях, готовящих специалистов по различным направлениям природопользования, архитектуре, проектированию линейных сооружений и др.

Часть I

АЭРО- И КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ

●

Материалы, получаемые в результате выполнения аэро- и космических съемок, используют при решении разнообразных задач изучения земной поверхности. По снимкам, полученным с воздушных или космических носителей, изготавливают карты и планы, используемые в земельном кадастре и землеустройстве, определяют геодезические координаты изобразившихся точек местности, границы изучаемых объектов, их принадлежность к соответствующему классу, а также их качественные характеристики. Точность решения этих задач в значительной степени зависит от величины геометрических деформаций используемых снимков и искажений яркостей изображенных объектов при выполнении съемки.

Особенности съемочной аппаратуры и условия получения снимка — главные факторы, приводящие к деформациям и яркостным искажениям изображений.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ЗЕМЛИ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Аэро- и космические съемки (АКС) — первые технические этапы при решении фотограмметрических задач и дистанционного зондирования. При этом выполняют измерение (регистрацию) отраженного или собственного электромагнитного излучения. Измеряют и регистрируют излучение с некоторого расстояния от изучаемого объекта с помощью различных датчиков или съемочных систем.

Под съемочной системой понимают технические средства, с помощью которых регистрируют электромагнитное излучение.

В зависимости от места установки съемочной системы измеряют и регистрируют излучение в наземных условиях, с воздушного

(аэро-) или космического летательного аппарата (носителя). При получении информации о земной поверхности большой протяженности аэро- и космические методы наиболее эффективны и оперативны. Для изучения локальных явлений или относительно небольших по размерам объектов, например, при определении объемов земляных работ, деформации зданий и построек, мониторинге ледников, оползней и др., выполняют наземные съемки с помощью фотогеоделитов, цифровых съемочных устройств или лазерных сканеров.

В зависимости от типа съемочной аппаратуры информация может быть представлена в различном виде. Например, в виде двумерной аналоговой записи на фотографическом носителе (фотоснимки) или поэлементной цифровой записи на магнитном носителе. Некоторые съемочные системы позволяют получать трехмерное изображение, элемент которого имеет все три пространственные координаты, например лазерные системы. С летательных аппаратов можно измерять электромагнитное излучение над объектом в дискретных точках, при этом определяют его различные характеристики, например при спектрометрировании — оптические свойства объектов, а при исследованиях загрязнений территорий — количество и распределение определенных химических соединений, радионуклидов, тяжелых металлов и др.

Результаты регистрации электромагнитного излучения, представленные в виде изображения изучаемого объекта (участка земной поверхности) в аналоговой или цифровой форме записи, называют *видеоинформацией*. Процедуру преобразования результатов аналоговой или цифровой записи сигналов в видимое изображение называют *визуализацией*.

Аэро- и космические съемки Земли разделяют на *пассивные* и *активные*. При пассивной съемке информацию получают двумя способами: первый — путем регистрации отраженного от объекта солнечного светового потока; второй — измерением радиационного потока, излучаемого самим объектом (собственное излучение). При активной съемке поверхность исследуемого объекта облучается с борта аэро- или космического летательного аппарата с помощью искусственного облучателя (лазера — оптического генератора, радиогенератора), а отраженное излучение регистрируют соответствующие бортовые приемные устройства.

Аэро- и космические съемки представляют собой сложный комплекс инженерных, технических и организационных мероприятий, в состав которых входят работы по наземному обеспечению получения и последующей предварительной обработке изображений (снимков).

При дистанционном зондировании Земли наиболее широко применяют пассивные съемочные системы (фотографические и оптико-электронные), а из активных — радиолокационные системы бокового обзора (РЛС БО) и лазерные системы.

Материалы аэро- и космических съемок имеют ряд преимуществ по сравнению с топографической съемкой, благодаря которым решают многочисленные задачи изучения поверхности Земли. К таким преимуществам можно отнести:

оперативность получения метрической и смысловой информации об изучаемой территории;

объективность и документальность этой информации, так как при АКС регистрируют фактическое состояние объектов на земной поверхности;

экономическую эффективность получения информации по материалам аэро- и космических съемок;

возможность регулярных наблюдений (особенно по материалам космических съемок) за изменениями, происходящими на изучаемой территории.

1.2. СХЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ПРИ АЭРО- И КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

Рассмотрим общую схему получения первичной видеоинформации при проведении аэро- и космических съемок земной поверхности (рис. 1.1).

При съемке в отраженных лучах радиационный поток проходит путь от источника излучения до объекта через атмосферу, где происходят его энергетические изменения.

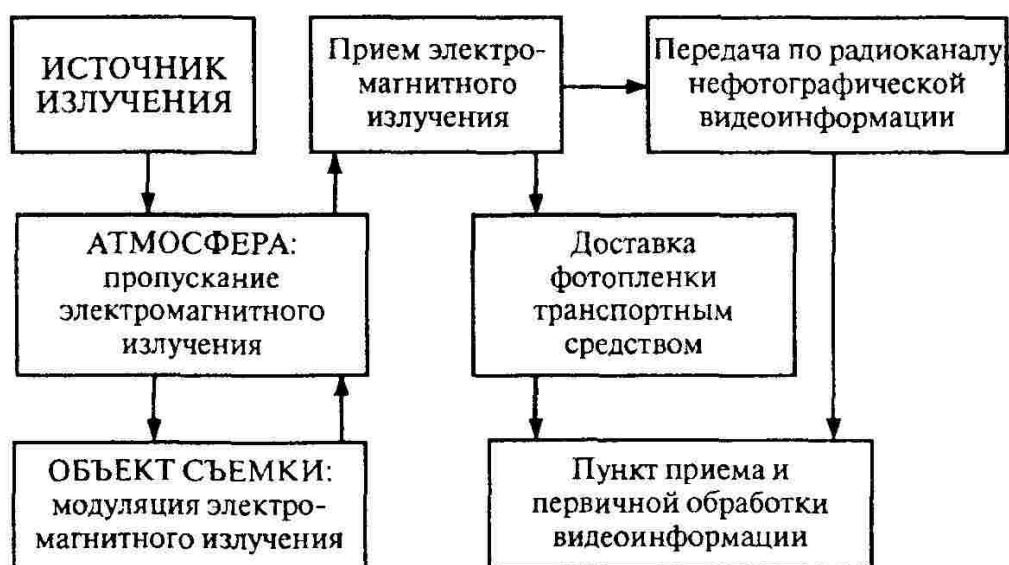


Рис. 1.1. Схема получения первичной видеоинформации

В результате взаимодействия с объектом часть радиационного потока отражается в пространство и имеет иной спектральный состав, поляризацию и энергию. Характер изменений зависит от химических и физических свойств снимаемых объектов. Поэтому отраженный поток электромагнитного излучения несет сведения о свойствах изучаемых объектов.

На пути от объекта до приемника съемочного устройства отраженное излучение объекта подвергается искажению под воздействием различных компонентов, входящих в состав атмосферы. При регистрации собственного излучения оно также подвергается воздействию атмосферы. Излучение радиодиапазона искажается помехами, вызванными в основном радиомagnetным полем Земли, ионосферным и тропосферным влиянием атмосферы на флуктуации прохождения радиосигнала.

В качестве приемников излучения в съемочных системах служат фотографические пленки, фотоэлектрические и термоэлектрические элементы. Если съемку выполняют с помощью радиосъемочной аппаратуры, то для приема радиоизлучения, отраженного от объекта, используют антенны.

Материалы съемок поступают на пункты приема. При выполнении фотографических съемок здесь выполняют фотохимическую обработку фотопленки, изготавливают контактные снимки. При съемке нефотографическими съемочными системами, передающими результаты измерений излучения по радиоканалу, на пунктах приема записывают передаваемую информацию, проводят ее визуализацию и размножают цифровые изображения. На пунктах приема также оценивают изобразительное и фотограмметрическое качество материалов съемок, выполняют фотометрическую и геометрическую коррекцию нефотографической видеоинформации. После этого результаты дистанционного зондирования передают потребителю на фотографических или магнитных носителях. На территории страны существует сеть региональных государственных и негосударственных пунктов приема космической информации. Потребитель информации практически одновременно с проведением съемки может получать интересующие сведения об объектах (так называемая съемка в реальном или близреальном времени).

Как видно, процедура получения видеоинформации достаточно сложная. На каждом этапе происходит искажение электромагнитного излучения, формирующего изображение. Знание особенностей этих искажений позволяет учитывать их при планировании, выполнении съемок или при дальнейшей обработке материалов аэро- и космических съемок.

1.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРИ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При проведении аэро- и космических съемок для создания картографических материалов, экологического изучения территорий, мониторинга земель используют наиболее информативные для этого диапазоны электромагнитного излучения (рис. 1.2):

оптический диапазон ($\lambda = 0,1 \dots 1000$ мкм) и радиодиапазон (длины волн электромагнитного излучения более 1 мм).

Оптический диапазон делят на области и зоны спектра.

Основной естественный источник облучения земной поверхности — Солнце. Поэтому при съемке земной поверхности чаще всего регистрируется отраженное от объектов солнечное излучение.

Спектр электромагнитного излучения Солнца почти совпадает со спектром излучения абсолютно черного тела с температурой 5570 К. Распределение энергии по спектру зависит от длины волны и характеризуется спектральной плотностью энергетической

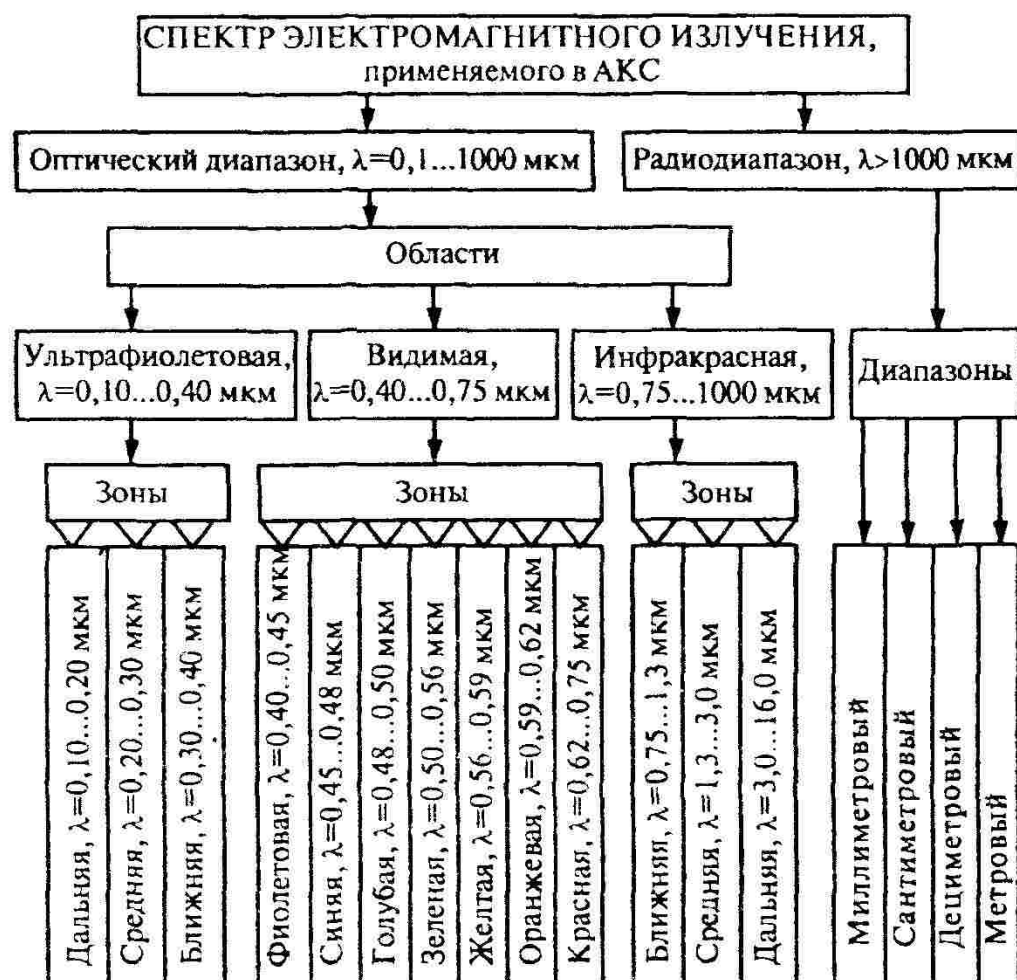


Рис. 1.2. Схема деления спектра электромагнитного излучения

яркости. Суммарная энергия облучения, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, в некотором спектральном интервале $\lambda_1 - \lambda_2$, создаваемая Солнцем на верхней границе атмосферы на элементарной площадке, расположенной перпендикулярно к направлению падения лучей, определяется интегралом:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (1.1)$$

где $\varphi(\lambda)$ — спектральная интенсивность излучения.

Электромагнитное излучение, поступающее на снимаемую поверхность, состоит из двух составляющих: прямое солнечное излучение и диффузное — рассеянное атмосферой и отраженное объектами земной поверхности. От соотношения доли прямой и диффузной радиации зависит освещенность объектов. В общем случае при безоблачном небосводе вклад рассеянной радиации в суммарную освещенность невелик.

Суммарная освещенность объекта зависит от высоты солнца, которая определяется широтой места наблюдения, датой и местным временем наблюдения.

Максимальное количество (до 99,9 %) солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, приходится на спектральный интервал $\lambda = 0,3 \dots 4,0$ мкм с преобладанием в видимой зоне спектра $\lambda = 0,4 \dots 0,7$ мкм. При длине волны более 5 мкм отражение излучения не происходит.

Объекты земной поверхности излучают в пространство собственную радиацию. Собственное излучение также относят к естественному. Собственное излучение в видимой зоне спектра практически отсутствует. В спектральной зоне от 2 до 5 мкм интенсивности собственного и отраженного излучения примерно одинаковы. При выполнении аэро- и космических съемок объектов Земли излучения в данной зоне спектра регистрируют суммарно. Собственное излучение испускается земными объектами на длинах волн более 5 мкм. Его называют тепловым излучением. Максимум собственного излучения приходится на длину волны $\lambda = 10$ мкм (рис. 1.3).

Интенсивность самоизлучения зависит от температуры объекта и длины волны.

Аналогично отраженному собственное излучение может быть диффузным и направленным.

В качестве искусственных источников излучения, используемых для освещения (облучения) объектов земной поверхности, применяют оптические генераторы (лазеры) и радары (радиолокаторы). Искусственные источники различаются по интенсивности, спектральному составу и поляризации генерируемого излучения, потребляемой мощности питания и т. п. Технические характери-

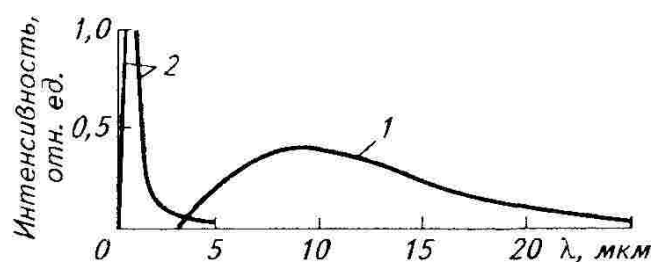


Рис. 1.3. Спектр излучения Земли:

1 — собственного (теплового); 2 — отраженного (солнечного)

стики искусственных источников излучения следующие: максимальная пиковая сила излучения, амплитудно-временной показатель силы излучения, относительная спектральная интенсивность излучения, диаграмма направленности излучения. Интегральная облученность, создаваемая на поверхности объекта, помимо перечисленных характеристик, зависит от времени облучения и высоты полета. Искусственные облучатели применяют при съемках поверхности Земли как с воздушных, так и с космических летательных аппаратов.

1.4. РОЛЬ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Все виды излучения (солнечное или от искусственного источника, отраженное или собственное) частично рассеиваются, поглощаются и отражаются атмосферой. При этом изменяются поляризация, спектр несущих и модулированных частот, происходит рефракция лучей и т. п. При аэро- и космических съемках поляризация излучения значения не имеет и не учитывается.

Атмосфера состоит из газов, водяного пара и различных примесей, так называемых аэрозолей (мельчайших взвешенных твердых и жидких частиц). Основная масса атмосферы (99,9 %) сосредоточена в слое ниже 50 км, поэтому здесь и происходят основные искажения проходящего через нее излучения.

Атмосфера представляет собой фильтр с достаточно нестабильными пропускными характеристиками. Нестабильность вызывается сложным вещественным составом и движением воздушных потоков атмосферы, обусловленным различием температуры и давления в ее слоях. Для описания оптических свойств используют критерий, называемый пропускной способностью атмосферы. Этот критерий зависит от оптической плотности, наличия механических частиц, водяных паров, длины волны излучения, толщины слоя атмосферы, через который проходит излучение, и т. д. Искажению подвергается отраженное и собственное излучение объектов. Чем больше оптическая толщина атмосферы между

объектом и съемочной аппаратурой, тем больше искажение. При малых высотах съемки (до 200...400 м) атмосфера практически не изменяет спектральный состав излучения.

Газы и аэрозоли, входящие в состав атмосферы, изменяют спектр проходящего электромагнитного излучения: полностью или частично поглощают лучи некоторых спектральных зон. Основные поглотители солнечного излучения — водяной пар, двуокись углерода и озон. Существуют спектральные интервалы, в которых атмосфера прозрачна для прохождения лучей. Их называют «окна прозрачности» (рис. 1.4), и в них излучение практически не поглощается.

Съемки поверхности Земли необходимо выполнять в спектральных интервалах, прозрачных для прохождения лучей. Такими в оптическом диапазоне являются видимая область спектра и некоторые спектральные зоны в инфракрасной (ИК) области: $\Delta\lambda = 0,95...1,05$; $1,2...1,3$; $1,5...1,8$; $2,1...2,4$; $3,3...4,2$; $4,5...5,1$; $8,7...9,0$; $10,0...14,0$ мкм. Спектральные интервалы $\Delta\lambda = 3...5$ мкм и $\Delta\lambda = 8...14$ мкм называют соответственно «ближним» и «дальним» тепловым окном прозрачности атмосферы.

Механические частицы и водяной пар в атмосфере образуют так называемую атмосферную дымку, которая снижает контраст изображения. Возникновение атмосферной дымки обусловлено рассеянием излучения частицами и аэрозолями, размер которых значительно меньше длины волны λ . Интенсивность рассеяния в соответствии с законом Релея обратно пропорциональна λ^4 . Наибольшему рассеянию подвергается излучение в ультрафиолетовой, фиолетовой и синей зоне спектра. Синие лучи рассеиваются примерно в двадцать раз больше, чем инфракрасные. Следовательно, при съемке в синей зоне спектра можно ожидать ухудшения качества изображения.

Рассеяние излучения пропорционально толщине слоя атмосферы, через который оно проходит, что учитывают при расчетах интенсивности рассеяния.

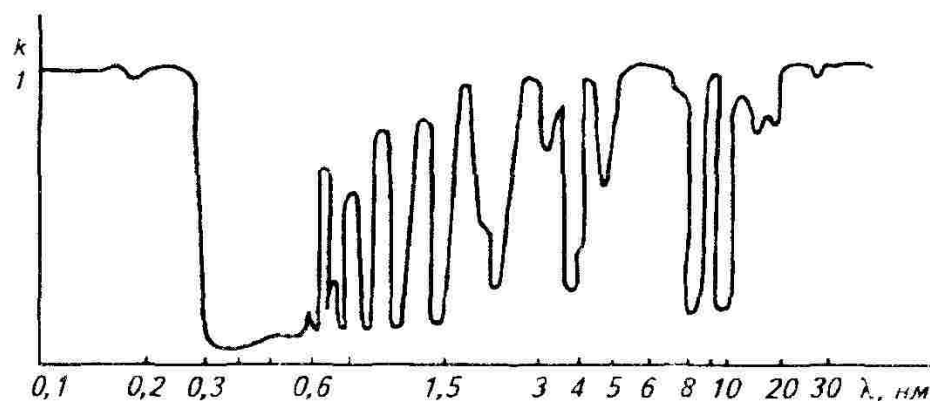


Рис. 1.4. График пропускной способности атмосферы

Интенсивность рассеяния зависит от угла между направлением падающего и отраженного потока. Поэтому положение естественного или искусственного источника облучения относительно объекта съемки, а также направление излучения учитывают при съемках.

Следующий критерий, влияющий на построение снимка, — рефракция светового луча в атмосфере (атмосферная рефракция). Атмосферная рефракция — это искривление светового луча, направленного к объективу съемочной системы. Объясняется это тем, что в атмосфере происходит уменьшение плотности воздуха с увеличением высоты относительно земной поверхности. При прохождении светового луча из области с большей плотностью в область с меньшей плотностью происходит его отклонение. Если атмосферу описать моделью, состоящей из нескольких горизонтальных слоев с изменяющейся плотностью воздуха, то рефракцию можно представить в виде графика, показанного на рисунке 1.5.

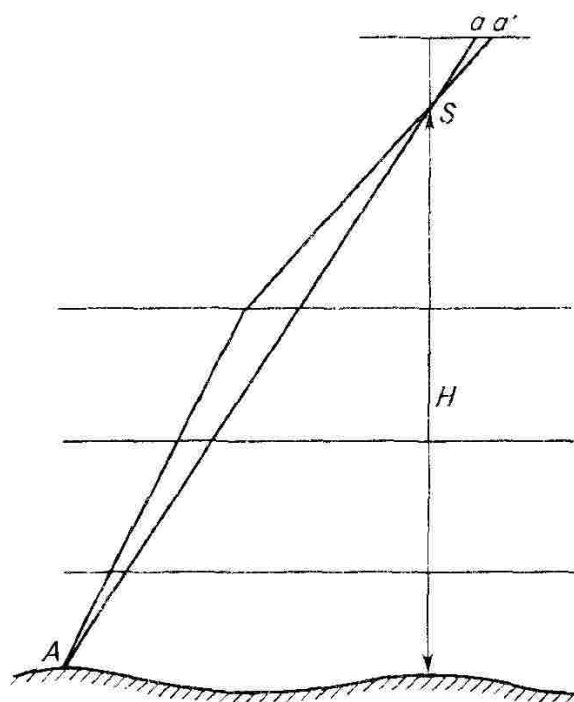


Рис. 1.5. График вертикальной (фотограмметрической) рефракции атмосферы

Aa — луч, не искаженный влиянием рефракции атмосферы, Asa' — реальный луч, строящий изображение точки a' на снимке. Расстояние aa' на снимке есть искажение положения точки, вызванное влиянием рефракции атмосферы. При выполнении аэро- или космических съемок горизонтальная рефракция атмосферы значительно меньше вертикальной и ее практически не рассматривают.

Вертикальная рефракция атмосферы, ее называют фотограмметрической, рассчитывается для стандартного состояния атмосферы, зенитного расстояния луча Z , угла, под которым луч проходит атмосферу, длины волны излучения, давления и т. п. Рефракцию атмосферы R измеряют в минутах.

Значения фотограмметрической рефракции R в стандартной атмосфере при $Z = 45^\circ$ и $\lambda = 656$ мкм для различных высот H над поверхностью Земли следующие:

H , км	1	2	4	8	18	40	80	200	300
R , мин	2	5	9	15	22	12	6	2,5	1,5

Рассмотренные оптические свойства атмосферы оказывают влияние при производстве аэро- и космических съемок. При их организации и проведении необходимо учитывать оптику атмосферы с целью повышения изобразительного и метрического качества получаемых снимков.

1.5. ОБЪЕКТЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАК ОТРАЖАТЕЛИ И ИЗЛУЧАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

При съемке земной поверхности объект местности представляется энергетическим полем, несущим информацию. Энергетическое излучение съемочная система регистрирует в определенном угловом интервале и с определенной точки пространства. При этом поверхность объекта представляется суммой элементарных площадок. В зависимости от расположения центра наблюдения (положения съемочной системы) и элементарной площадки объекта регистрируемое излучение изменяется по интенсивности и спектральному составу. Результаты измерений отображаются на снимке в виде полей яркости (в черно-белом или цветном варианте). При этом образовавшееся изображение уникально, так как спектральный состав, суммарная интенсивность и направленность излучения изменяются во времени. Поэтому существует малая вероятность повторения сочетания условий, определяющих свойства энергетического поля, а значит, мала вероятность получения иного снимка с аналогичным распределением полей яркости (цвета).

Изменяется излучение вследствие множества причин (суточные и сезонные изменения состояния объекта, природно-естественного и антропогенного характера), которые можно разделить на две группы: первая — факторы, определяющие свойства самого объекта (физические, химические и др.), вторая — внешние условия формирования энергетического поля, например условия освещения объекта.

Полнота и достоверность информации, получаемой при съемке земной поверхности, в значительной степени зависят от правильности учета свойств энергетического поля, создаваемого объектом съемки.

При пассивных аэро- и космических съемках интерес представляют лучи, отраженные и излучаемые объектами земной поверхности.

Критериями отражательной способности служат коэффициенты интегральной яркости, спектральной яркости, интегральные и спектральные индикатрисы рассеяния.

Коэффициентом интегральной яркости r (КЯ) называют отношение интегральной яркости объекта B в данном направлении к интегральной яркости идеально отражающей поверхности B_0 .

определяемых при одинаковых условиях освещения и наблюдения. Идеально отражающей считают поверхность, которая полностью и равномерно по всем направлениям отражает падающую на нее радиацию. Коэффициент интегральной яркости определяется в широкой спектральной зоне, и вычисляют его по формуле

$$r = B/B_0. \quad (1.2)$$

Если яркости измеряли в узких спектральных зонах, то их называют монохроматическими яркостями. Отношение монохроматических яркостей объекта B_λ и идеально отражающей поверхности $B_{0\lambda}$, измеряемых при одинаковых условиях освещения и наблюдения, называют *коэффициентом спектральной яркости* r_λ (КСЯ):

$$r_\lambda = B_\lambda/B_{0\lambda}. \quad (1.3)$$

Коэффициенты интегральной и спектральной яркости могут определяться для различных направлений отражения излучения.

Коэффициенты интегральной и спектральной яркости зависят (общий случай) от многих факторов:

$$r_\lambda = f(\lambda, h_0, A_0, \frac{D}{Q}, A, \varphi, \dots), \quad (1.4)$$

где λ — длина волны, на которой определяют КСЯ; h_0 — высота солнца; A_0 — азимут солнца относительно структуры поверхности объекта; D — поток рассеянной радиации; Q — поток суммарной радиации; A — азимут направления наблюдения относительно плоскости главного вертикала; φ — угол отклонения направления наблюдения от отвесного направления.

Число факторов, определяющих КСЯ и КЯ, может быть значительным. Например, для сельскохозяйственного угодья это тип почвы, количество в почве гумуса, минеральных солей, влажность, вид растительности, фаза вегетации, угнетенность, фитопатология и запыленность растений и т. п. Большинство факторов оказывает свое воздействие одновременно, что проявляется в значительных вариациях критериев отражательной способности однотипных объектов.

Коэффициенты спектральной яркости объекта определяют одновременно в нескольких зонах спектра. Используя полученные данные, строят кривые КСЯ (рис. 1.6), показывающие зависимость коэффициентов от длины волны излучения.

Различные классы объектов имеют свои специфичные формы кривых КСЯ. По форме кривых КСЯ принято разделять объекты на четыре класса: растительность; почвы и горные породы; водные поверхности; снега и облака. При выполнении съемок для целей картографирования наибольший интерес для изучения объектов поверхности Земли представляют первые три класса.

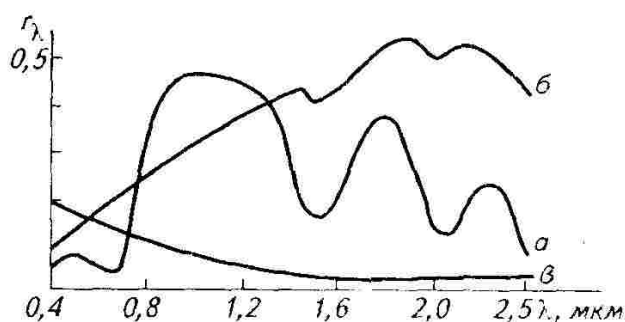


Рис. 1.6. Графики КСЯ основных классов природных образований

Кривые КСЯ объектов с растительными покровами (рис. 1.6, а) имеют повышение в зеленой зоне спектра на длине волны около 0,55 нм, понижение на длине волны 0,66 нм, вызванное поглощением солнечной радиации хлорофиллом растений, резкое повышение в инфракрасной области. В зависимости от фазы вегета-

ции, фитопатологии и иных факторов форма кривых КСЯ объектов данного класса изменяется в значительных пределах. Например, кривые КСЯ посевов злаковых культур по мере их созревания принимают плавный ход.

Кривые КСЯ почв и горных пород имеют незначительный подъем при увеличении длины волны (рис. 1.6, б). Влажность, химический состав, содержание гумуса, минеральных солей и т. п. определяют уровень и крутизну подъема кривых.

Кривые КСЯ водных объектов при увеличении длин волн (рис. 1.6, в) понижаются плавно и монотонно. Степень засоленности, тип иловых отложений, биологический и растительный состав воды обуславливают значения КСЯ водных поверхностей.

Сведения о коэффициентах интегральной и спектральной яркости приводятся в литературе и справочниках в виде таблиц, а для КСЯ прилагаются графики кривых. Справочные сведения должны иметь описание физических, химических свойств почв, типа растительности, фазы вегетации, состояния растений, условий освещения и т. п.

При выполнении аэро- и космических съемок и последующем анализе изображений необходимы сведения о пространственном распределении отраженной световой энергии. Это распределение характеризуется индикатрисой рассеяния, представляющей собой поверхность, проходящую через концы векторов КЯ и КСЯ, определенных для различных углов отражения, которую соответственно называют интегральной или спектральной.

Для описания индикатрисы рассеяния используют два ее сечения: в плоскости главного вертикала солнца ($A = 0...180^\circ$) и перпендикулярной ему ($A = 90...270^\circ$). Неравномерность пространственного отражения объекта зависит от размеров, формы, пространственной ориентации элементов его поверхности, высоты солнца и его азимутального положения относительно объекта и т. п. По направленности пространственного отражения объекты разделяют (рис. 1.7):

на отражающие равномерно по всем направлениям падающее на поверхность излучение (рис. 1.7, а). Такие поверхности называ-

ют ортотропными. К ним относят поверхности с мелкой структурой, например различные ровные песчаные поверхности;

зеркально отражающие излучение по направлению от источника света (рис. 1.7, б). К ним относят водные поверхности без ряби и волн, снежный наст, влажные солончаки, такыры и пр.;

отражающие световой поток преимущественно в сторону источника излучения (рис. 1.7, в), такими могут быть поверхности с крупной структурой — вспаханная пашня, сухая широколиственная растительность и др.;

смешанная форма отражения, как в сторону источника освещения, так и в противоположном направлении (рис. 1.7, г). — увлажненные газоны, сенокосы, пастбища и другие среднеструктурные поверхности.

Неравномерность пространственного отражения в различных спектральных зонах неодинакова. Асферичность интегральных и спектральных индикатрис уменьшается с увеличением высоты солнца.

Как отмечалось, критерии отражательной способности объектов земной поверхности зависят от многих факторов. Поэтому их значения могут изменяться в широких пределах. Для применения их в практических целях необходим достаточный набор статистических данных, по которым вычисляют вероятностные значения

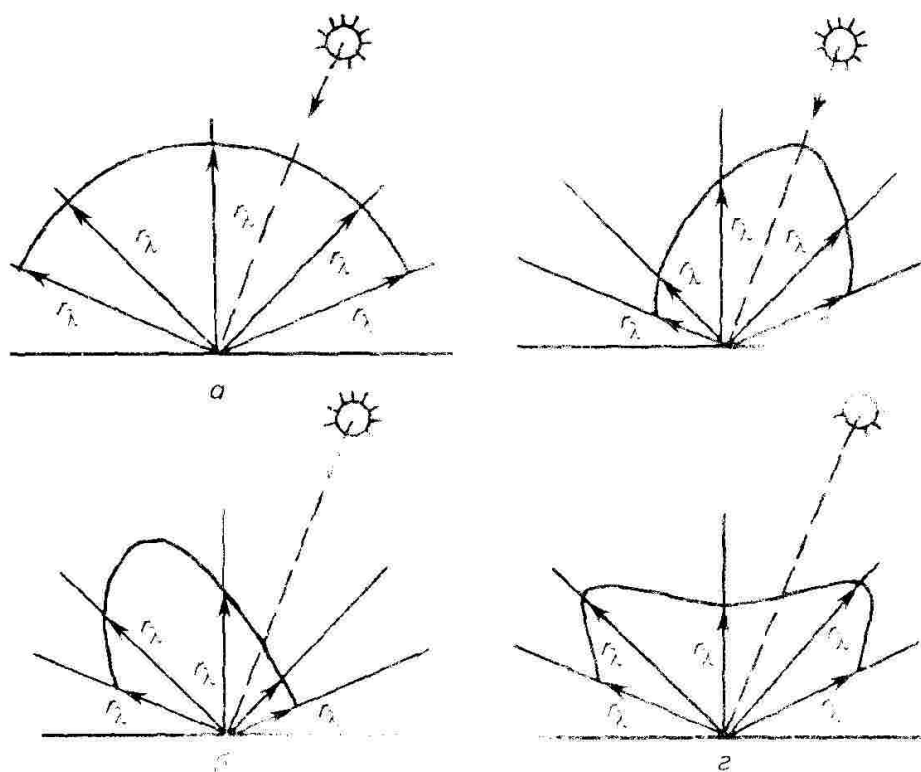


Рис. 1.7. Сечения индикатрис рассеяния основных типов поверхностей (направление сечений $A = 0 \dots 180^\circ$)

критериев отражательной способности и их дисперсии. При этом критерии должны быть определены при однотипных условиях наблюдений.

Определение критериев отражательной способности, исследование их динамики выполняют в результате проведения комплекса работ, называемого спектрометрированием. С помощью приборов (спектрометров) по определенной методике измеряют яркости объектов и эталонной поверхности. В качестве эталонной поверхности используют любую, отражательные свойства которой известны и постоянны. При вычислении критериев отражательной способности учитывают отличия отражения эталонных поверхностей, применяемых при спектрометрировании, от идеальной поверхности. Одновременно с измерениями описывают условия освещения и состояние объекта на момент измерений. По результатам измерений вычисляют критерии отражательной способности.

Спектрометрирование выполняют в лабораториях и полевых условиях: находясь на поверхности объекта или с воздушных и космических летательных аппаратов.

Спектрометрирование в лаборатории позволяет с высокой точностью и в необходимом количестве измерять образцы почв, растительности и иных материалов. Недостаток, снижающий возможность использования получаемых результатов в дистанционном зондировании, — отличие в освещении образца и объекта в естественных условиях. Пробы исследуемых образцов растений (тем более сорванных растений) также находятся в условиях, отличающихся от их естественного состояния.

Полевое наземное спектрометрирование проводят при непосредственном нахождении на объекте исследования. Спектрометры устанавливают на высокие штативы, мачты или механические подъемники (автовышки). Наземный способ имеет свои особенности и преимущества:

- небольшое расстояние между объектом и измерительным прибором исключает влияние атмосферы на отраженное от объекта излучение;

- возможность полного и достоверного описания объекта, его физических и химических свойств, условий освещения;

- возможность исследования влияния какого-либо фактора при исключении других, моделирование некоторых факторов;

- простота организации и относительно небольшие затраты.

Небольшая высота, с которой выполняют наземные измерения, обуславливает ряд недостатков:

- крупноструктурные объекты имеют значительные вариации отраженного излучения. В поле зрения спектрометра (его значение небольшое, порядка 5°) попадают различные сочетания элемен-

тов, слагающих поверхность, что не позволяет получить интегрированный отраженный поток. Для получения значения КЯ или КСЯ крупноструктурного объекта необходимо измерить некоторое множество отдельных площадок с последующим вычислением их среднего значения;

сложность или невозможность наблюдений высоких объектов, например леса;

трудоемкость производства работ.

Спектрометрирование с летательных аппаратов существенно отличается от наземного способа организацией измерений, сложностью приборов и обработкой результатов измерений. Его достоинства:

возможность регистрации интегрального сигнала при наблюдении крупноструктурных объектов;

возможность наблюдения высоких или труднодоступных объектов (например, болотная растительность);

наблюдение большого числа объектов или получение большой выборки на определенном типе объекта за короткий период, в течение которого освещение практически не изменяется.

Основные недостатки:

сложность привязки результатов определений критериев отражательной способности к объектам наблюдений и, как следствие, затруднение привязки наземного описания характеристик изучаемого объекта;

сложность процесса эталонирования;

высокая стоимость и сложность организации работ.

Собственное излучение объектов, регистрируемое при проведении аэро- или космических съемок, имеет характеристики, которые могут быть получены на основе законов электромагнитного излучения абсолютно черным, серым и нечерным телом. Как известно, абсолютно черным телом называют тело, которое полностью поглощает все падающее на него излучение. Спектр излучения абсолютно черного тела определяется его температурой. Распределение излучения по спектру подчиняется закону Планка (рис. 1.8, 1). Для изучения и повышения эффективности производства аэро- и космических съемок кривые излучения абсолютно черного тела, полу-

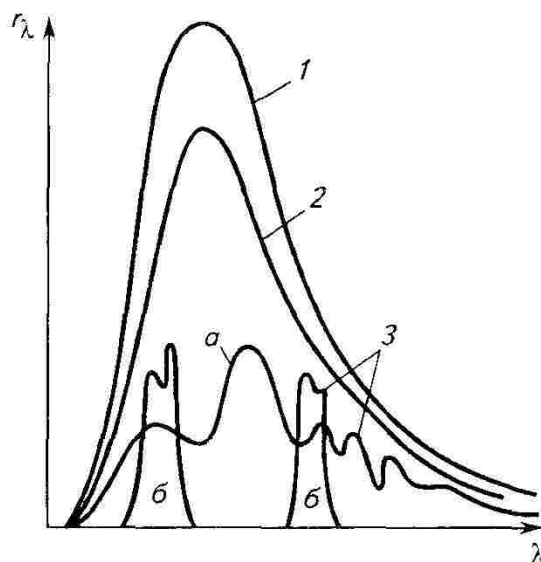


Рис. 1.8. Спектральное распределение энергии излучения тела:

1 — черного; 2 — серого; 3 — нечерного (а — селективного непрерывного, б — полосового излучения)

ченные при разных температурах, можно использовать для моделирования солнечной радиации и излучательной способности объектов земной поверхности. Спектральная кривая распределения излучения серого тела подобна спектральной кривой черного тела, но характеризует меньшую интенсивность (рис. 1.8, 2). Не-черным телом называют объекты, самоизлучение которых избирательно (селективно) (рис. 1.8, 3).

Абсолютно черное тело излучает электромагнитную энергию, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$, определяемую по закону Стефана—Больцмана:

$$M_{\text{ст}} = \varepsilon_{\text{т}} \sigma T^4, \quad (1.6)$$

где $\varepsilon_{\text{т}}$ — интегральный коэффициент излучения, $\varepsilon_{\text{т}} = M_{\text{ст}}/M_{\text{стТ}}$; $M_{\text{стТ}}$ — энергетическая светимость абсолютно черного тела при температуре T ; σ — постоянная Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$, $\text{Вт} \cdot \text{см} \cdot \text{К}^{-4}$.

Самоизлучение объектов может быть диффузным и направленным.

Большинство природных образований в тепловой области спектра имеет сферическую индикатрису излучения, которое практически подчиняется закону Ламберта — интенсивность излучения пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности объекта и направлением наблюдения. Объекты антропогенного происхождения обычно имеют направленное излучение.

Критерии отражательной и излучательной способности учитывают при организации и производстве аэро- и космических съемок. С их помощью:

выбирают одну или несколько зон спектра, в которых проводят съемку объектов земной поверхности. На снимках, получаемых в выбранных зонах, обеспечивается наилучшее разделение изображений изучаемых объектов;

определяют время суток и сезон съемки, которые обеспечат решение предыдущей задачи;

разрабатывают технические требования к спектральной чувствительности приемников излучения съемочных систем.

Оптимизацию зон спектра и времени съемки выполняют аналитическим или графическим способом с последующим аналитическим контролем правильности выбора.

Интегральные и спектральные индикатрисы рассеяния используются для расчета угла изображения (захвата) съемочной системы, в пределах которого неравномерность пространственного отражения снимаемых объектов не окажет влияния на изменение оптической плотности (цвета) их изображений на снимке. Такие съемочные системы можно считать фотометрическими. В зависимости от типа объектов угол должен быть в интервале $3...30^\circ$. Применяемые съемочные системы имеют угол захвата значительно больше. В этом случае для исключения влияния неравномерности

пространственного отражения на снимках ограничивают рабочую площадь. Ее размер и расположение на снимке рассчитывают в соответствии с углом, определяемым с помощью индикатрис рассеяния.

При использовании в дистанционном зондировании инфракрасной и тепловой областей спектра съемочную систему и условия съемки оптимизируют с учетом коэффициентов и индикатрис излучения.

Контрольные вопросы и задания

1. Составьте блок-схемы пассивной и активной съемки. 2. Можно ли считать влияние атмосферы при выполнении аэро- и космических съемок постоянным фактором? Изменится ли цвет объекта на поверхности Земли при наблюдении его с различных высот? 3. Какое влияние оказывает атмосфера на геометрию прохождения отраженных от поверхности объектов лучей? 4. Перечислите достоинства и недостатки наземного и аэро- спектрометрирования. 5. Можно ли считать оптические характеристики природных объектов постоянными? Назовите факторы, влияющие на значения КСЯ и форму индикатрис рассеяния. 6. Перечислите направления применения критериев отражательной способности природных объектов. 7. Можно ли считать рекомендации по использованию КСЯ и индикатрис рассеяния неизменными при различных условиях проведения съемок?

Глава 2

АЭРО- И КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

Классифицировать съемочные системы можно по различным критериям. Съемочные системы разделяют:

на воздушные и космические;

пассивные и активные;

работающие в оптическом или радиодиапазоне;

однозональные и многозональные. При выполнении многозональных съемок получают одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения;

фотографические и нефотографические съемочные системы. Фотографирование можно выполнять на черно-белых или цветных фотоматериалах. Цвет изображения может быть натуральным или псевдоцветным (спектрзональное фотографирование);

оперативные и неоперативные в зависимости от способа и сроков доставки видеоинформации. Фотографические съемочные системы являются неоперативными, так для доставки экспонированной пленки требуется посадка летательного аппарата или спуск на Землю специального контейнера. Нефотографические системы относят к оперативным. С их помощью видеоинформация передается по радиоканалу в реальном времени съемки или

записывается на магнитном носителе с последующей передачей в эфир;

использующие для построения изображения законы центральной проекции (кадровые — фотографические и телевизионные системы), строчно-кадровую развертку (сканеры) и иные законы.

При создании топографических крупномасштабных планов и карт фотограмметрическим методом используют в основном снимки, получаемые кадровыми аэрофотоаппаратами.

Классификация может быть продолжена, исходя из многообразия конструкций и технических характеристик съемочных систем.

2.2. ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

Основные критерии, применяемые для оценки информационных возможностей съемочных систем: линейная разрешающая способность, спектральная разрешающая способность, фотограмметрическая точность, фотометрическая точность.

Линейной разрешающей способностью съемочной системы называют ее возможность раздельно воспроизводить на снимке мелкие детали снимаемого объекта. Разрешающая способность R определяется числом раздельно воспроизводимых черных линий в 1 мм изображения при таком же белом интервале между ними. Для числа воспроизводимых линий R и ширины линии ρ_c справедлива следующая зависимость

$$\rho_c = 1/2R. \quad (2.1)$$

Например, если съемочная система имеет разрешающую способность $R = 50 \text{ мм}^{-1}$, то это означает, что в 1 мм изображения может быть зафиксировано 100 черных и белых линий и минимальный размер различимого элемента изображения будет равен 0,01 мм. Величину ρ_c называют разрешением на снимке. Размер соответствующего элемента на поверхности снимаемого объекта называют разрешением съемочной системы.

Разрешающая способность съемочной системы определяется путем съемки миры — специального тест-объекта, представляющего собой основу, на которую нанесен рисунок в виде черных и белых полос. Вместо полос могут быть использованы черные и белые сектора круга.

В первом случае миру называют штриховой, во втором — радиальной (рис. 2.1). Среди штриховых наиболее часто применяют пятишпальную миру. Она представляет собой тридцать решеток, каждая из которых содержит пять светлых полос на черном фоне. Длина полос в десять раз больше их ширины. В каждой последующей решетке ширина полос уменьшается на 1/10.

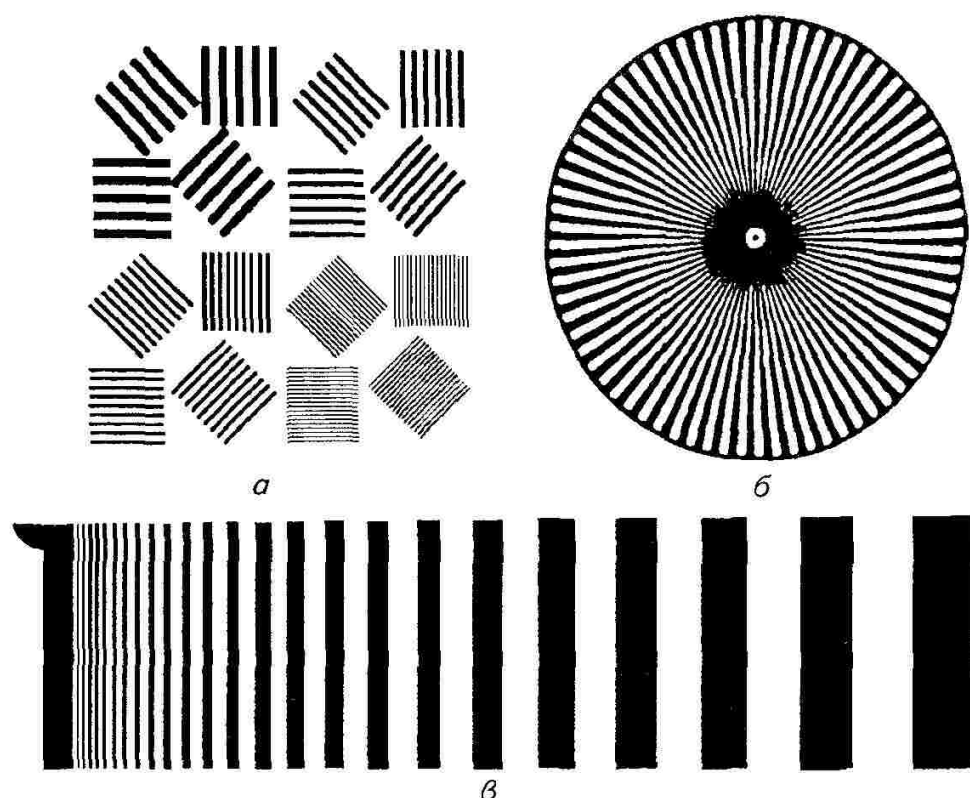


Рис. 2.1. Тест-объекты (миры):

a — штриховая; *б* — радиальная; *в* — П-образная мира с постоянным изменением частоты штрихов

Съемку выполняют в лабораторных условиях или с летательного аппарата. Размер мира должен обеспечивать воспроизведение ее деталей на реальном снимке. Линейная разрешающая способность — наиболее употребимый критерий при оценке качества съемочных систем.

Разрешающая способность съемочных систем (сканеры и цифровые кадровые системы), в которых приемниками излучения служат ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы, выражается числом элементов или линий в одном дюйме изображения — dpi (dots per inch — точек на дюйм) или lpi (line per inch — линий на дюйм). Например, 600 или 1200 dpi означает, что минимальный размер элемента изображения соответственно равен 0,04 и 0,02 мм.

Под термином *спектральная разрешающая способность* съемочной системы понимают минимальную ширину спектральной зоны, в которой проводят съемку. Ширина спектральной зоны определяется возможностью используемого сенсора воспринимать интегральный сигнал (уровень излучения), создаваемый в данной зоне. Для фотографических систем она приблизительно равна 40...50 нм, для нефотграфических систем — 10...20 нм и менее.

Фотограмметрическая точность съемочных систем — критерий геометрического искажения получаемого снимка. Степень геометрического искажения определяется позиционной точностью построения оптического изображения и последующей деформацией данного оптического изображения приемником излучения. Существуют топографические и нетопографические съемочные системы. Под топографическими понимают такие системы, геометрические искажения в которых минимальны и практически не влияют на точность фотограмметрических преобразований. К этому же классу можно отнести съемочные системы, имеющие значительные искажения геометрии построения изображения, но с известным законом (моделью) деформации. Используя модель деформации, можно учесть геометрические искажения снимка при цифровой фотограмметрической обработке снимков. Для нетопографических съемочных систем главным является получение изображения с высокими изобразительными свойствами.

Съемочные системы, обеспечивающие достаточную точность передачи пропорций яркостей снимаемых объектов по полю изображения, относятся к фотометрическим. Причинами, снижающими фотометрическую точность, могут быть: оптический тракт съемочной системы, нестабильность работы ее электронной цепи, непропорциональность регистрации сигналов сенсором и др. В качестве одного из критериев фотометрической точности может быть использовано отношение *сигнал/шум* — критерий, определяющий отношение основного сигнала, несущего информацию, к величине сигнала-шума (помехи). Чем больше отношение *сигнал/шум*, тем выше фотометрическая точность системы.

При конструировании таких систем учитывают возможные изменения пропорций регистрируемых сигналов по полю изображения. Для повышения фотометричности съемочных систем оптимизируют угол захвата съемочных систем, уменьшают шумы оптического и электронного тракта, формирующего изображение, и т. п.

Рассмотренные критерии можно считать основными и общими при оценке и сравнении различных съемочных систем. Для отдельных типов съемочных систем могут быть определены специфические критерии.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие критерии положены в основу классификации съемочных систем?
2. Что означает термин «фотограмметрическая точность» съемочной системы? Можно ли считать точной фотограмметрической системой съемочную систему со значительными, но известными по величине и направлению деформациями?
3. Что можно считать «фотометрическим шумом» в съемочных системах?
4. Каков физический смысл понятий «линейная разрешающая способность» съемочной системы, «разрешение» съемочной системы?

Глава 3

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотографический способ регистрации электромагнитного излучения — один из основных способов при производстве съемок земной поверхности с воздушных летательных аппаратов. Знание свойств фотографических материалов, а также принципа и точности построения изображения в различных типах фотокамер позволяет оптимизировать съемочный процесс и процесс использования получаемых снимков.

Достоинства фотографического способа получения и хранения информации заключаются в том, что:

- изображение представляет собой аналоговую модель снимаемого объекта в виде двумерного распределения функций его яркости (оптической плотности или цвета);

- достаточно строгая пропорциональность оптической плотности (цвета) на снимке яркостям объектов;

- фотографический процесс и возможность управления им изучены достаточно;

- фотографические сенсоры (фотоматериалы) имеют достаточно стабильные характеристики и свойства, что обеспечивает получение снимков необходимого качества;

- стоимость фотоснимков значительно ниже стоимости снимков, полученных нефотографическим способом;

- разрешающая способность получаемых изображений высока.

Недостатки фотографического способа:

- ограничение спектральной зоны съемки (0,3...1,1 мкм);

- необходимость проведения фотохимической обработки;

- неоперативность доставки получаемой информации;

- зависимость от погодных условий;

- необходимость проведения специальной процедуры ввода изображения при дальнейшей компьютерной обработке снимков.

3.2. КАДРОВЫЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ АЭРОФОТОАППАРАТЫ

Существует большое число конструкций аппаратов. Аэро- и космические фотоаппараты можно классифицировать: по способу построения изображения, числу используемых спектральных зон (каналов), а также по длине фокусного расстояния объектива, разрешающей способности, назначению и т. д.

Наибольшее применение имеют *кадровые топографические аэрофотоаппараты (АФА)*.

В них имеется плоская поверхность, на которой строится изображение, неподвижный относительно нее объектив, главная оп-

тическая ось занимает неизменное положение, перпендикулярно плоскости снимка, изображение строится в центральной проекции. Экспонирование площади снимка происходит одновременно.

Блок-схема основных устройств показана на рисунке 3.1.

Основными блоками его являются съемочная камера и кассета. Съемочная камера состоит из оптического блока 6 и корпуса 5. В нижней части оптического блока расположен объектив 4 с закрепленным на нем светофильтром 3. В верхней части этого блока, в фокальной плоскости аэрофотообъектива, расположена прикладная рамка 13. Пленка 11 в АФА располагается в кассете 8 на катушках 10. В плоскости прикладной рамки в момент фотографирования происходит выравнивание аэрофотопленки. Существуют несколько способов выравнивания аэрофотопленки. Например, с помощью прижимного стола 9 аэрофотопленка прижимается к выравнивающему стеклу 7. В некоторых типах АФА выравнивание пленки происходит за счет создания воздушного разрежения между пленкой и выравнивающим столом. Невыравнивание аэропленки приводит к геометрическим деформациям изображений и снижает разрешающую способность снимка. Управляют работой АФА с помощью пульта 12. Аэрофотокамера закрепляется в аэрофотоустановке 2 над стеклом 1, герметизирующим люк летательного аппарата.

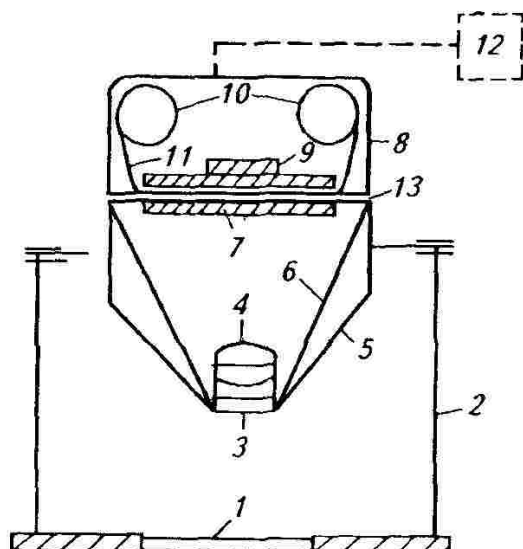


Рис. 3.1. Схема устройства аэрофотоаппарата:

1 — стекло люка; 2 — аэрофотоустановка; 3 — светофильтр; 4 — объектив; 5 — корпус камеры; 6 — оптический блок; 7 — выравнивающее стекло; 8 — приемная и передающая кассеты; 9 — прижимной стол; 10 — приемная и передающая катушки с аэропленкой; 11 — аэропленка; 12 — пульт управления; 13 — прикладная рамка

На серединах сторон прикладной рамки (в некоторых конструкциях также в ее углах) имеются координатные метки, которые отображаются при съемке на каждом аэроснимке. Форма меток может быть различной, например в виде острого угла, направленного к центральной части снимка, или в виде крестов. Прикладная рамка ограничивает размеры снимка. Наиболее широко применяемые форматы 18×18 , 23×23 и 30×30 см. Формат кадра может быть не квадратным.

В некоторых типах АФА (АФА-ТЭС) в плоскости прикладной рамки находится выравнивающее стекло, на поверхность которого наносят контрольные метки в виде сетки крестов с шагом 10 или 20 мм.

Толщина штрихов крестов — 2—3 мкм, а точность их нанесения — 2 мкм. Используя сетку крестов, учитывают искажения изображения на снимке.

Расстояния между координатными и контрольными метками (крестами) определяют при фотограмметрической калибровке АФА, результаты заносят в формуляр аэрофотоаппарата. Используют их для выявления и учета деформации аэрофото пленки, а также для построения системы координат снимка при фотограмметрической обработке снимков. По резкости изображения контрольных меток (крестов) оценивают качество выравнивания аэро пленки.

Кассета (съемная часть аэрокамеры) предназначена для размещения аэро пленки, ее перемотки и отмеривания по размеру кадра, а также, как уже сказано ранее, выравнивания пленки в плоскость. Кассета в зависимости от толщины подложки вмещает аэро пленку длиной 60 или 120 м, что соответствует для отечественных АФА 300 или 600 снимкам размером 18×18 см.

Аэрофотообъектив — оптико-механическое устройство, состоящее из оптической и механической части. Оптическая часть (собственно объектив) — это закрепленные в корпусе линзы различной кривизны и формы. Линзы подбирают с целью получения оптического изображения с заданными свойствами. Узлы механической части, затвор и диафрагма, размещаются в межлинзовом пространстве аэрообъектива.

Затвор — это устройство, регулирующее время (выдержку), в течение которого происходит экспонирование аэро пленки. Выдержки в аэрофото затворах изменяются от $1/40$ до $1/1000$ с и менее. Изменяются выдержки в аэрофотоаппаратах ступенчато (например, $1/125$, $1/250$, $1/500$), что позволяет регулировать экспозицию кратно двум.

В момент открытия затвора летательный аппарат и вместе с ним аэрофотоаппарат совершают линейные и угловые перемещения относительно снимаемой местности. Это вызывает перемещение оптического изображения относительно аэрофото пленки. В результате происходит смаз фотографического изображения, уменьшающий резкость и разрешающую способность снимка на 30...50 %. Смаз фотографического изображения можно уменьшить, уменьшив выдержку t при съемке. Для минимизации влияния поступательного движения летательного аппарата выдержку рассчитывают по формуле

$$t = m\delta_{\text{доп}}/W, \quad (3.1)$$

где m — масштаб снимка; $\delta_{\text{доп}}$ — величина допустимого смаза; W — скорость летательного аппарата.

Однако есть предел уменьшения выдержки. Поэтому в некоторых типах аэрофотоаппаратов применяют устройства, называемые

компенсаторами сдвига изображения. Смысл их работы заключается в том, что с помощью специальных устройств в момент экспонирования устраняют перемещение оптического изображения относительно светочувствительного слоя. Помимо сдвигов оптического изображения, вызванных линейными и угловыми движениями летательного аппарата, на качество изображения оказывают влияние вибрационные сдвиги. Основная причина их появления — вибрации от работы моторов летательных аппаратов.

Диафрагма служит для изменения диаметра входного отверстия объектива. В аэрофотоаппаратах диаметр входного отверстия объектива регулирует величину светового потока, проходящего через объектив. Чем больше диаметр диафрагмы, тем больше освещенность экспонируемой аэрофотоплёнки. В практических целях для выражения размера отверстия объектива используют характеристику, называемую «относительным отверстием». Относительное отверстие объектива $1/k$ есть отношение диаметра входного (действующего) отверстия i к фокусному расстоянию объектива f .

$$1/k = i/f. \quad (3.2)$$

В объективах используют стандартные дискретные значения относительных отверстий, знаменатели которых равны 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32. Эти значения отмечают на кольце диафрагм, с помощью которого можно установить заданную величину относительного отверстия. Их рассчитывают таким образом, что переход к соседнему индексу диафрагмы изменяет освещенность светочувствительного фотоматериала в два раза.

Поэтому освещенность и выдержку можно изменять с шагом, кратным двум, что увеличивает шкалу дискретности экспонирования. Создание точной экспозиции при фотосъемке позволяет получить изображения с заданными изобразительными свойствами.

Основные *характеристики аэрофотообъектива*, определяющие метрические и изобразительные свойства снимков, — фокусное расстояние, дисторсия, разрешающая способность, угол поля изображения, светораспределение по полю изображения.

Фокусным расстоянием f объектива (главным расстоянием аэрофотоаппарата) называют расстояние от задней узловой точки объектива до главного фокуса. Через главный фокус перпендикулярно оптической оси проходит фокальная плоскость, в которой строится изображение и где располагается аэрофотоплёнка. Фокусное расстояние определяют при фотограмметрической калибровке АФА с точностью до 0,01 мм (или до 0,001 мм) и записывают в аттестат аэрофотообъектива. В АФА применяют объективы с фокусными расстояниями от 20...30 мм до нескольких метров. Фо-

кусное расстояние АФА f и высота фотографирования (расстояние до поверхности объекта) H определяют масштаб аэрофотографирования:

$$1/m = f/H, \quad (3.3)$$

где m — знаменатель масштаба фотографирования.

При неизменной высоте фотографирования чем больше фокусное расстояние, тем крупнее масштаб съемки.

Важная характеристика топографических АФА — дисторсия объектива. Дисторсия — частный случай аберрации, приводит к искажению связки проектирующих лучей, строящих оптическое изображение, т. е. к искажению центральной проекции. Искажение происходит в результате неодинакового преломления различных направленных к объективу проектирующих лучей (рис. 3.2).

Луч из точки A , падающий на объектив S под углом ω к главной оптической оси SO , выходит из него под углом ω' . Вследствие этого точка A изобразится на снимке в точке a' вместо точки a .

Смещение Δr точек по полю снимка неравномерно и приводит к нарушению подобия изображения снимаемого объекта. Геометрически дисторсию в какой-либо точке снимка можно представить вектором, определяющим направление и величину смещения изображения данной точки от ее неискаженного положения. Различают радиальную дисторсию, имеющую направление к центру или от центра снимка, и тангенциальную дисторсию, направление которой перпендикулярно радиальному. Дисторсию определяют при фотограмметрическом исследовании АФА в дискретных точках по всей площади кадра. Для различных типов объективов ее значение варьируется от 0,002...0,005 мм до десятых долей миллиметра. Объективы, в которых дисторсия практически не искажает изображение, называются ортоскопическими. При компьютерных технологиях фотограмметрической обработки снимков возможен учет искажений, вызванных дисторсией. В положение точек изображения вводят поправки, по модулю равные значению дисторсии.

Под разрешающей способностью объектива понимают свойство раздельно воспроизводить оптическое изображение двух близко расположенных точек или линий.

При ее определении используют штриховые и радиальные миры, аналогично определению разрешающей способности съемочных систем. В центре изображения, построенного объективом, разрешающая способность выше, чем на краю. Поэтому при изучении мелких деталей снимаемых объектов пред-

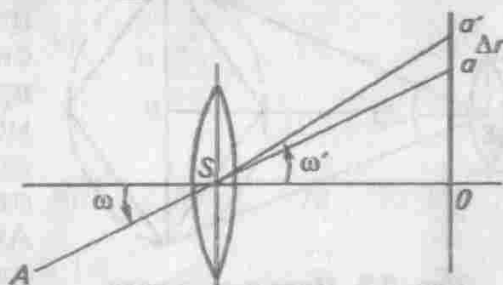


Рис. 3.2. Схема действия дисторсии

почтительнее использовать центральные части снимков. В длиннофокусных объективах падение разрешающей способности от центра к краю незначительно. Существуют аэрофотообъективы, у которых разрешающая способность практически не изменяется по полю изображения.

Светораспределение в плоскости снимка определяет фотометрические свойства аэрофотообъектива. Освещенность, создаваемая в фокальной плоскости, уменьшается от центра к краю. Функция светораспределения описывается согласно закону Ламберта формулой

$$E_{\beta} = E_0 \cos^n \beta, \quad (3.4)$$

где E_{β} — освещенность в точках поля изображения; E_0 — освещенность в центре поля изображения; β — угол, образуемый главной оптической осью и направлением на точку; n — коэффициент, равный 1, 2, 3, 4 в зависимости от типа объектива.

Неравномерность светораспределения приводит к тому, что объекты одинаковой яркости при отображении их в центре или на краю снимка имеют различную оптическую плотность (цвет).

Угол, образованный лучами, исходящими из задней узловой точки объектива и опирающимися на диагональ прикладной рамки АФА, называют *углом поля изображения* (рис. 3.3). По величине угла поля изображения (2β) аэрофотоаппараты подразделяют на узкоугольные (менее 15°), нормальноугольные ($15...60^\circ$), широкоугольные (более 60°).

При увеличении угла поля изображения увеличивается неравномерность светораспределения от центра к краю и уменьшается разрешающая способность снимка. В узкоугольных АФА эти изменения выражены в меньшей степени. Для устранения неравномерности светораспределения, которая в широкоугольных аппаратах может быть значительной, применяют напыление объективов металлическим порошком, с плотностью слоя уменьшающегося от центра к краю.

Аэрофотоаппарат помещают в *аэрофотоустановку* (АФУ), предназначенную для его крепления на летательном аппарате, ориентирования в заданном положении и уменьшения влияния вибрации. Продольную сторону прикладной рамки (снимка) АФА

ориентируют по направлению полета летательного аппарата, а также устанавливают заданный угол наклона снимка. Данные действия проводят вручную или автоматически. В зависимости от возможных задаваемых углов отклонения оптической оси АФА от отвесного направления различают АФУ: плановые — при этом углы отклонения не превышают 3° ; перспективные — с углами отклонения до

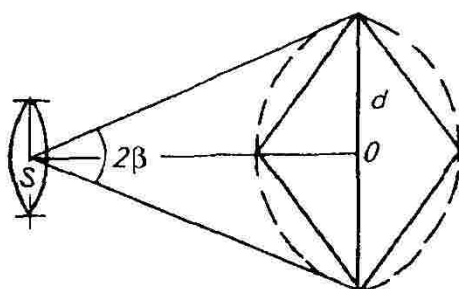


Рис. 3.3. Поле и угол поля изображения

40...45°. Для уменьшения влияния продольных и поперечных наклонов летательных аппаратов в момент экспонирования применяют гиросtabilизирующие аэрофотоустановки, обеспечивающие горизонтальность плоскости снимка с точностью до 7...10 мин.

Командный прибор (интервалометр) предназначен для автоматического включения аэрофотоаппарата через определенный промежуток времени. По принципу работы их разделяют на электрические и оптико-электронные. После подачи электрического сигнала с командного прибора выполняется цикл последовательных операций для получения аэрофотоснимков: перемотка пленки, взвод затвора, выравнивание пленки в плоскость, экспонирование (срабатывание затвора). Длительность цикла различна у большинства АФА и находится в интервале 1,2...2,5 с.

Управляют всем комплексом узлов аэрофотоаппарата с пульта управления. Здесь же осуществляется синхронизация работы АФА и сопровождающей съемку специальной аппаратуры. Например, космической навигационной аппаратуры GPS, позволяющей определять пространственное положение снимка в системе координат на момент съемки.

Топографические аэрофотоаппараты предназначены для получения снимков, которые используют при создании топографического планово-картографических материалов, сельскохозяйственных и земельно-кадастровых планов, мониторинге территорий и т. п. Применяют отечественные аэрофотоаппараты типа АФА-ТЭ (топографический электрический с выравниванием пленки вакуумным способом) и АФА-ТЭС (топографический электрический с выравнивающим стеклом в плоскости прикладной рамки), а также зарубежные АФА (табл. 3.1).

3.1. Характеристика некоторых типов топографических аэрофотоаппаратов

Показатель	АФА-ТЭ	АФА-41	АФА-ТЭС-5М	АФА-ТЭС-7	АФА-ТЭС-10	LMK-30	LMK-15	RC-30
Фокусное расстояние, мм	70, 100, 140, 200, 500	100, 200	50	70	100	305	152	Сменные объективы 88, 153, 303
Дисторсия, мкм	0,03...0,01	0,025...0,04	0,01	0,01	0,01	0,002	0,003	0,002
Разрезающая способность, лин/мм	25...40	45...60	55	70	90	65	70	110
в центре на краю	12...25	12...20	16	25	30	65	70	110
Относительное отверстие	1:9...1:7	1:8...1:6	1:9	1:6, 1:8	1:6, 1:8	—	—	—

Показатель	АФА-ТЭ	АФА-41	АФА-ТЭС-5М	АФА-ТЭС-7	АФА-ТЭС-10	ЛМК-30	ЛМК-15	RC-30
Способ выравнивания пленки	Вакуум		Прижим к стеклу					
Формат снимка, см	18×18	18×18	18×18	18×18	18×18	23×23	23×23	23×23

Новейшие научно-технические достижения в электронике, оптике, фотографии, вычислительной технике позволили разработать и перейти к использованию нового поколения аэрофотосъемочного оборудования. Отличительные особенности современного оборудования следующие:

наличие сменных объективов с различными фокусными расстояниями, их быстрая и удобная смена во время съемки;

высокая (более 100 лин/мм) разрешающая способность изображения, практически одинаковая по всему полю кадра;

остаточная дисторсия 2...3 мкм;

наличие большого диапазона выдержек 1/100...1/1000 с и компенсаторов сдвига изображения, что позволяет производить аэрофотосъемку с малых высот и на больших скоростях летательных аппаратов;

оптико-электронные командные приборы, управляющие работой камеры в полуавтоматическом режиме;

наличие стабилизирующих платформ, обеспечивающих получение снимков с углами наклона не более 10 мин, автоматическое регулирование экспозиций.

Управляют работой аэрофотоаппарата и съемочным процессом в целом с помощью специального бортового компьютера. Компьютер помещен в крепкий корпус, не содержит движущихся частей, имеется электронная защита, что значительно снижает вероятность его выхода из строя в полете. Программно обеспечивают следующие функциональные возможности:

графическое отображение на дисплее маршрута полета и разворотов над фотографируемым участком местности;

точное открытие затвора в точке пространства с заданными координатами и регистрацией их на краю снимка в системе WGS-84;

отображение любой исходной информации, необходимой при дальнейшей фотограмметрической обработке: время суток, дата, точность определения координат центров фотографирования и т. п.

Одним из современных типов аэросъемочного оборудования является разработанный фирмой Leica (Швейцария) топографический аэрофотоаппарат RC-30 (см. рис. 3.2) с навигационной системой ASCOT.

3.3. ДЕФОРМАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В КАДРОВЫХ АЭРОФОТОАППАРАТАХ

Получение снимка, как было рассмотрено ранее, происходит под влиянием множества факторов: особенностей съемочной системы, условий освещения объекта съемки, условий проведения съемки, фотохимической обработки. Под их воздействием формируется *реальный снимок*. *Идеальный снимок* — это снимок, полученный по заданному закону геометрического построения изображения. Получение идеального снимка возможно при отсутствии искажающего влияния физических факторов. В кадровых аэрофотоаппаратах в основе получения изображения лежит центральное проецирование. В идеальной центральной проекции точка изображения, центр проекции и точка местности находятся на одной прямой. Это положение называют условием коллинеарности. При выполнении аэро- и космических съемок под воздействием ряда перечисленных физических факторов положение точек снимка изменяется — нарушается условие коллинеарности. При фотограмметрической обработке снимков координаты точек местности вычисляют после измерений их координат на снимке. Если не учитывать искажение положения точек на снимке, то геодезические (географические) координаты могут быть определены с погрешностями, превышающими допустимые. Поэтому при фотограмметрической обработке необходимо знать значение и направление искажения положения точек на реальном снимке. В данном разделе сделано обобщение влияния уже рассмотренных ранее факторов, вызывающих нарушение условия коллинеарности.

Воздействие физических факторов на геометрические искажения снимка имеет систематический или случайный характер. Систематические искажения могут быть определены с заданной точностью и учтены при фотограмметрической обработке снимков, например деформация изображения, обусловленная влиянием дисторсии объектива. Случайные искажения учитывать сложнее, поэтому в процессе получения изображения создаются условия проведения съемок, при которых минимизируется их влияние.

Перечислим основные факторы в последовательности прохождения излучения от объекта съемки до фотографической пленки (сенсора). В этот же ряд факторов включим и процесс фотохимической обработки.

Рефракция света в атмосфере. Влияние данного фактора рассмотрено в разделе 1.4.

Рефракция в защитном стекле фотолюка. В результате разности температур и давления воздуха на внешней и внутренней поверхности стекла люка защитное стекло прогибается, возникают кривизна и клиновидность. Происходит отклонение луча, что вызывает дефокусировку аэрофотокамеры и искажает ортоскопию

изображения. При расчетах их допустимых значений учитывают разности температур между внешней средой и внутри летательного аппарата, коэффициент преломления стекла и т. п. Рефракция составляет 3...5 мкм, а дефокусировка — несколько десятых долей миллиметра.

Рефракция в светофильтре. Вызвана непараллельностью его сторон, в зависимости от качества изготовления может достигать нескольких микрометров.

Дисторсия объектива аэрофотоаппарата. В топографических АФА дисторсия равна 2...3 мкм, в нетопографических аппаратах может достигать десятых долей миллиметра.

Фотографический смаз изображения. Вызван линейными и угловыми перемещениями оптического изображения относительно фотопленки при фотографировании, в зависимости от метода фототриграмметрической обработки снимков допускается в пределах 0,02...0,05 мм.

Отклонение поверхности аэрофотопленки от фокальной плоскости АФА. Определяется размером зазора между светочувствительным слоем и плоскостью прикладной рамки и составляет 5...30 мкм.

Остаточная погрешность выравнивания пленки в плоскость. Для уменьшения геометрических искажений и повышения резкости изображения в АФА пленка перед экспонированием выравнивается в плоскость. Погрешность выравнивания зависит: от способа выравнивания пленки (механический или вакуумный), клиновидности, толщины и размера прогиба выравнивающего стекла. В центральной части кадра невыравнивание пленки вызывает смещение изображения на 2...2,5 мкм, а на краю снимка может достигать 150 мкм.

Неравномерность толщины фотоэмульсионного слоя аэропленки. При ее изготовлении фотоэмульсию наносят на основу (подложку). Толщина фотоэмульсионного слоя в пределах снимка неодинакова. Для аэрофотопленок на триацетатной основе изменение толщины фотоэмульсионного слоя не превышает 2 мкм на 10 мм, частные изменения достигают 6...7 мкм. Смещение точки изображения, вызываемое различием толщины фотослоя, в центральной части снимка примерно равно 2 мкм, на краю снимка может достигать 20 мкм, а для широкоугольных АФА и более.

Деформация фотопленки, вызванная сушкой после фотохимической обработки и хранением снимков, рассмотрена в разд. 4.2.

Перечисленные основные факторы, вызывающие нарушение условия коллинеарности проектирующих лучей, проявляют свое действие, как правило, совместно. Исключить или уменьшить их влияние можно путем выбора соответственных съемочных средств и условий проведения съемок или учитывая их при фотограмметрической обработке снимков.

3.4. НЕТОПОГРАФИЧЕСКИЕ АЭРОФОТОАППАРАТЫ

Щелевые аэрофотоаппараты. Как уже отмечалось, существенный недостаток снимков, получаемых кадровыми аэрофотоаппаратами, — фотографический смаз изображения, вызванный главным образом поступательным движением летательного аппарата. Скорость перемещения оптического изображения относительно аэрофотопленьки

$$v_{из} = Wf/H = W/m, \quad (3.5)$$

где W — скорость летательного аппарата; f — фокусное расстояние АФА; H — высота фотографирования; m — знаменатель масштаба аэрофотосъемки.

Как видно из формулы, при равных съемочных масштабах скорость перемещения оптического изображения относительно аэрофотопленьки и, следовательно, фотографический смаз зависят от скорости летательного аппарата. Чем больше его скорость, тем больше смаз фотографического изображения. Для устранения влияния поступательного движения летательного аппарата на смаз и увеличения разрешающей способности изображения используют щелевые аэрофотоаппараты (рис. 3.4).

В щелевых АФА (ЩАФА) изображение местности 1 получают в результате непрерывного экспонирования пленки 3 . Пленка движется по направлению движения оптического изображения со скоростью $v_{пл} = v_{из}$. Таким образом, скорость движения оптического изображения относительно пленки равна нулю. Синхронное движение аэропленьки и оптического изображения исключает фотографический смаз изображения, вызванный поступательным перемещением летательного аппарата. Изображение строится объективом 2 и щелью 4 , расположенной перед светочувствительным слоем пленки перпендикулярно направлению полета. Экспонирование происходит через постоянно открытую щель, ширина которой прямо пропорционально зависит от интенсивности освещения. В результате съемки получают не отдельные кадры, а сплошную ленту фотографического изображения. При этом изображение строится по двум законам: в поперечном направлении снимок представляет собой центральную проекцию, в продольном (по оси полета) — ортогональную проекцию. Изображение, построенное одновременно по двум законам, требует особой фотограмметрической обработки, отличающейся от обработки снимков, полученных топографическими кадровыми системами. Внедрение ком-

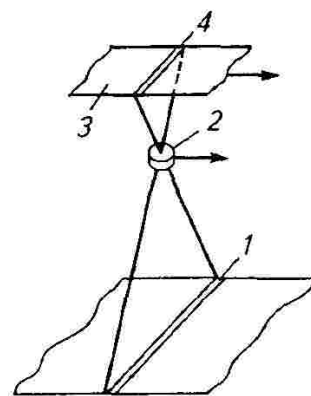


Рис. 3.4. Схема построения изображения в щелевом аэрофотоаппарате:

1 — местность; 2 — объектив; 3 — пленка; 4 — щель

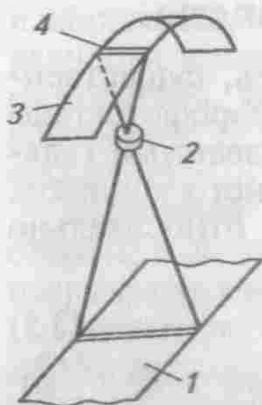


Рис. 3.5. Схема построения изображения в панорамном аэрофотоаппарате:

1 — полоса местности; 2 — объектив; 3 — пленка; 4 — полоса

пьютерных технологий позволяет достаточно точно выполнять фотограмметрическую обработку изображений, полученных ЩАФА.

Панорамные аэрофотоаппараты (ПАФА). Эти аппараты разработаны, исходя из следующих соображений. Для увеличения зоны захвата съемочной системой необходимо использовать широкоугольный объектив. Однако, как уже отмечалось, увеличение угла поля изображения приводит к падению освещенности и уменьшению разрешающей способности от центра к краю снимка. В конструкции панорамного АФА (рис. 3.5) используется свободный от этих недостатков узкоугольный объектив.

Объектив 2 вращается вокруг оси, проходящей через его заднюю узловую точку параллельно оси маршрута, и просматривает (панорамирует) полосу местности 1 в пределах угла $140...180^\circ$. Этот способ панорамирования называют прямым. Косвенное панорамирование осуществляют вращением призм или зеркал, установленных перед объективом. Изображение строится полосой 4 на пленке 3, расположенной на цилиндрической поверхности. Получаемый в ПАФА кадр представляет собой вытянутый прямоугольник.

Особенности панорамных снимков:
 высокие изобразительные свойства по всей площади снимка;
 ширина полосы захвата на местности в десять раз и более превышает высоту фотографирования;
 разномасштабность по полю снимка от центра к краю увеличивается в несколько раз.

Панорамные снимки из-за механических перемещений частей ПАФА в момент экспонирования имеют значительные геометрические искажения. Поэтому чаще их используют для получения семантической информации. Применение цифровых технологий фотограмметрической обработки позволяет применять панорамные снимки в картографических целях.

Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите о достоинствах и недостатках фотографического способа регистрации информации.
2. Перечислите основные характеристики аэрофотообъективов.
3. Составьте принципиальную схему конструкции АФА.
4. Каковы принципы построения изображения в кадровых, щелевых и панорамных аэрофотоаппаратах?
5. Что означают понятия «оптический сдвиг изображения» и «фотографический смаз изображения»?
6. Как влияет дисторсия объектива на геометрические свойства изображения?
7. Перечислите основные факторы, приводящие к деформации изображений, полученных кадровыми АФА.

Глава 4

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМКАХ

4.1. ПОНЯТИЕ О ФОТОГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Получение фотографического изображения основано на фотографическом эффекте. Под воздействием энергии излучения некоторые природные или созданные человеком вещества изменяют свое состояние. При этом вещества, являющиеся результатом фотохимической реакции, образуют фотоизображение. В фотографическом процессе наиболее часто используют галогениды серебра (галоидное серебро): бромистое (AgBr), хлористое (AgCl), йодистое (AgI) и их сочетания.

Фотографический эффект в общем виде описывается формулой



где $h\nu$ — энергия фотона (h — постоянная Планка; ν — частота электромагнитных колебаний); Ag — серебро; Br — бром.

Энергия, поступающая на галогенид серебра, вызывает начальную фазу реакции разложения, происходящую медленно. Для ее ускорения применяют химические реактивы (проявители). Образованное при этом металлическое серебро (Ag) есть та частица, из которой строится изображение. Чем интенсивнее световой поток, тем активнее происходит фотохимическая реакция и тем больше образуется металлического серебра (на снимке это участки черного цвета).

Весь процесс получения фотографического изображения состоит из нескольких этапов. На первом этапе — съемочном — с помощью оптической системы строится изображение на светочувствительном слое фотографического материала, находящегося в ее фокальной плоскости. Освещенность отдельных участков оптического изображения будет пропорциональна яркостям соответствующих участков снимаемого объекта. В результате взаимодействия световых лучей и галогенидов серебра происходит фотохимическая реакция и образуется так называемое скрытое изображение. На следующем этапе, негативном, с помощью химических реактивов скрытое изображение превращается в видимое. Продукт этого этапа — негатив (зафиксированное на фотоматериале обратное по яркости изображение объекта). Негатив, будучи промежуточным продуктом, используется в следующем этапе для получения позитива, который представляет собой аналоговую копию объекта съемки. Все три этапа связаны между собой, и погрешности, возникающие при их выполнении, влияют на качество снимков.

4.2. СТРОЕНИЕ ЧЕРНО-БЕЛЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Фотоматериалы различают по их назначению, техническим характеристикам, строению, качественному составу и т. п. Их изготавливают в виде фотопленки, фотопластинок, фотобумаги.

Схема расположения основных слоев черно-белой аэрофотопленки показана на рисунке 4.1. На основу (подложку) 5 наносится один или два фотоэмульсионных (светочувствительных) слоя 2, 3. Имеются вспомогательные слои: защитный слой 1 (задубленная желатина) покрывает эмульсионный слой и защищает его от механических повреждений, слой 4 обеспечивают надежное соединение отдельных слоев и подложки, противоореольный слой 6 поглощает лучи, отразившиеся от подложки.

Светочувствительный (фотоэмульсионный) слой изготавливают из фотоэмульсии, которая представляет собой желатину с распределенными в ней частицами светочувствительного вещества (галогенидами серебра). В фотоэмульсию также добавляют вещества, улучшающие ее свойства:

стабилизирующие вещества, способствующие сохранению фотографических свойств эмульсионного слоя в течение длительного времени;

дубящие вещества, повышающие механическую прочность и теплостойкость фотоэмульсии;

оптические сенсibilизаторы (органические красители), способствующие увеличению чувствительности фотослоя к лучам зеленой, красной или инфракрасной зоны спектра.

Толщина светочувствительного слоя на аэрофотопленке в сухом состоянии колеблется от 5 до 25 мкм. В этом слое кристаллы (зерна) галоидного серебра, размеры которых около 1 мкм, распо-

лагаются беспорядочно в 20...40 ярусах. Расположение кристаллов, их пространственное распределение по толщине слоя, по размерам определяет структуру непроявленного фотоэмульсионного слоя. Эта характеристика важна тем, что изначально устанавливает качественные параметры будущего изображения.

В качестве основы (подложки) используют прозрачные и непрозрачные материалы. К материалам, применяемым для создания аэрофотопленок, предъявляют высокие требования: механическая прочность и эластичность, малая деформация при сушке после фотохимической

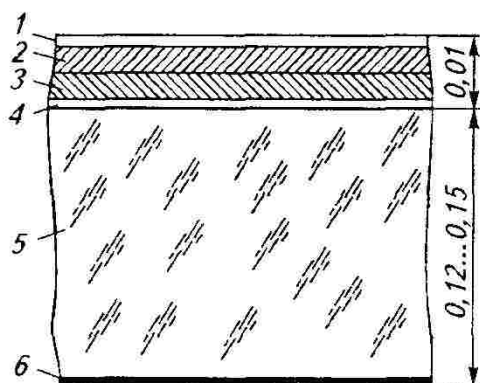


Рис. 4.1. Строение черно-белой негативной аэрофотопленки:

1, 2 и 3 — защитный, второй и первый эмульсионные слои; 4 — подслой; 5 — целлулоидная основа; 6 — противоореольный слой

обработки, прозрачность и оптическая однородность, устойчивость к температурным изменениям и химическому воздействию реактивов. Основы аэрофотопленок изготавливают из триацетата, лавсана или материала типа «кронар» и «эстар».

Критерием подложки, определяющим позиционную точность изображения на снимке, является ее деформация, которая может быть плоскостной, определяемой по двум взаимно перпендикулярным направлениям в плоскости снимка, и вертикальной вследствие непостоянства толщины аэрофотопленки (изменение толщины на 4...8 мкм). Плоскостную деформацию разделяют на равномерную и неравномерную. Исследования деформаций различных типов аэрофотопленок позволяют сделать следующие выводы:

наибольшую (0,06...0,25 %) равномерную деформацию наблюдают у пленок на триацетатной основе, что при формате снимка 180 × 180 мм приводит к изменению длины линии на 0,1...0,5 мм; равномерная деформация может изменяться для различных кадров в одном аэрофильме двукратно; при нагревании (при вводе снимка в компьютер при помощи сканера) величина деформации может изменяться полуторакратно; у лавсановых основ равномерная деформация в два раза меньше, чем у триацетатных;

неравномерная деформация (неодинаковая в различных направлениях) для обоих типов основ составляет в среднем 0,01...0,02 %, что соответствует на краю снимка 7...14 мкм. Данный вид деформации имеет небольшие изменения от воздействия различных факторов;

локальная или местная деформация для аэрофотопленок на триацетатной основе достигает 6 мкм, для лавсановой подложки — 4 мкм; при цифровом методе фотограмметрической обработки снимков локальную деформацию учитывают с помощью контрольных меток (крестов), впечатываемых в каждый снимок при съемке.

4.3. СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОФОТОПЛЕНОК

Сенситометрические характеристики определяют свойства фотоэмульсионного слоя реагировать на поступающий на него при съемке световой поток. Эти характеристики для каждой фотоэмульсии получают в результате сенситометрических исследований. Учение о методах исследований сенситометрических характеристик светочувствительных материалов называют фотографической сенситометрией. Рассмотрим некоторые понятия, применяемые в сенситометрии, фотографии, фотометрии и дешифрировании:

световой поток F — мощность лучистой энергии, оцениваемая по производимому ею зрительному ощущению; 1 люмен — зрительное ощущение, создаваемое 0,0016 Вт лучистой энергии при длине волны 556 нм;

сила света J — отношение светового потока к телесному углу, в котором он распространяется: $J = 1 \text{ лм/1 стер} = 1 \text{ свеча}$, 1стерадиан — телесный угол $\Pi = 57,3^\circ$;

яркость B — характеристика светящихся тел, равная отношению силы света в данном направлении к площади поверхности источника, видимой по этому направлению, измеряется в системе СИ в нитах (нт);

освещенность E — отношение светового потока к величине поверхности (распределение светового потока по площади), измеряют в люксах (лк);

выдержка (время освещения) t — время, в течение которого фотографический слой подвергается непрерывному воздействию света;

экспозиция — количество световой энергии, поступающей на светочувствительный слой; определяется как произведение освещенности E на время освещения t .

$$H = Et; \quad (4.2)$$

оптическая плотность D — мера фотографического почернения светочувствительного слоя. Выражают в виде десятичного логарифма коэффициента непрозрачности (коэффициент непрозрачности есть отношение прошедшего через оптическую среду светового потока к падающему):

$$D = \lg (1/T) = \lg Q, \quad (4.3)$$

где T — коэффициент пропускания (прозрачности); Q — коэффициент непрозрачности.

При $T = 1$ оптическая плотность $D = 0$, при $T = 0,1$ $D = 1$.

Причины, по которым для оценки фотографического почернения используют оптическую плотность, а не коэффициент пропускания, следующие: 1) оптическая плотность пропорциональна количеству металлического серебра в фотоизображении, образующего это почернение; 2) логарифмический способ выражения оптической плотности соответствует логарифмическому закону зрительного восприятия.

Сенситометрический метод позволяет определять основные фотографические характеристики светочувствительных материалов. Для этого выявляют функциональную зависимость оптической плотности D от экспозиции H :

$$D = f(H). \quad (4.4)$$

Используя выявленную зависимость, графически или аналитически находят фотографические характеристики.

Сенситометрические исследования фотоматериалов проводят в таком порядке:

с помощью специального прибора сенситометра участки испытываемого материала получают различные точно дозированные количества освещения H . В сенситометре предусмотрено изменение спектрального состава светового потока с помощью различных светофильтров. Это позволяет исследовать фотоматериалы на чувствительность к лучам различных зон спектра;

экспонированный (освещенный) фотоматериал подвергают химической обработке, после чего получают сенситограммы — полосы с участками различной степени почернения (различной оптической плотности). Условия химической обработки строго регламентированы (тип проявителя и закрепителя, время и температура проявления). Данные условия должны соответствовать условиям при практическом использовании исследуемых фотоматериалов;

на приборе денситометре измеряют оптическую плотность D каждого поля сенситограммы;

устанавливают зависимость оптической плотности от логарифма экспозиций $D = f(\lg H)$. Зависимость может быть описана дробно-линейной функцией или представлена в виде графика на специальном сенситометрическом бланке. График, выражающий зависимость оптической плотности от логарифма экспозиции $D = f(\lg H)$, называют *характеристической кривой*. Несколько характеристических кривых, полученных для различного времени проявления экспонированных в сенситометре фотопленок, показано на рисунке 4.2.

Определяют искомые фотографические характеристики: оптическую плотность вуали, коэффициент контрастности, интегральную и спектральную светочувствительности, фотографическую широту.

С помощью характеристических кривых можно управлять съёмочным и негативным процессом для получения изображений требуемого фотографического качества. В этих целях исследуют режимы экспонирования и химической обработки фотопленки. Для каждого режима строят характеристическую кривую, по которой определяют сенситометрические характеристики данной фотопленки. Далее выбирают такие режимы фотохимической обработки, при которых данная пленка при заданных условиях экспонирования позволит получить рекомендованные значения сенситометрических характеристик.

Оптическая плотность вуали D_0 — почернение неэкспонированного фотоматериала или его участков после химической обработки. Определяют ее как проекцию крайней левой точки характеристической кривой на ось D (см. рис. 4.2). Оптическая плот-

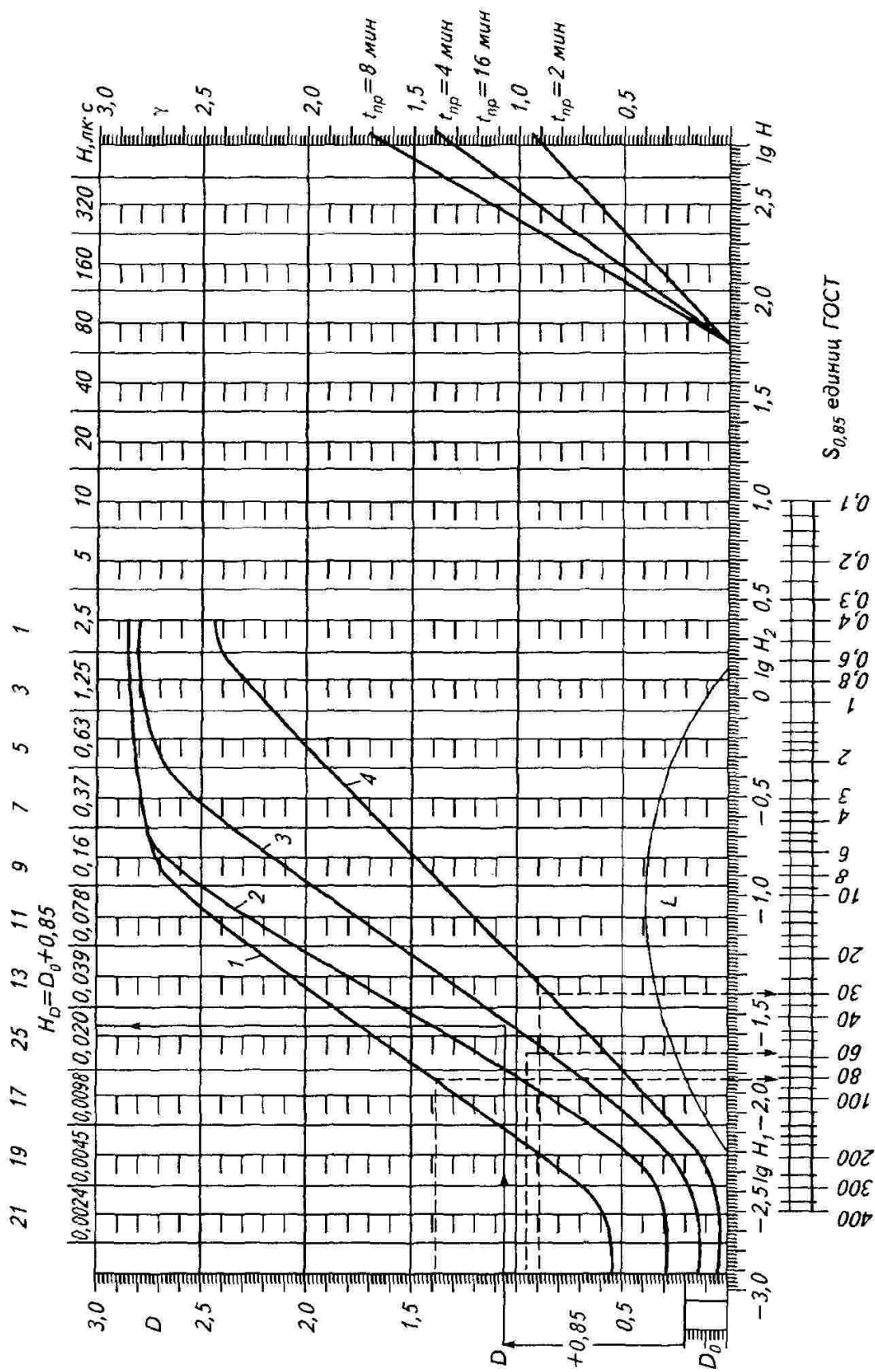


Рис. 4.2. Характеристические кривые аэрофотопленок для различного времени проявления, построенные на сенситометрическом бланке

ность вуали возрастает с увеличением срока хранения фотоматериала (происходит самопроизвольный переход галогенида серебра в металлическое серебро) или при нарушении режима химической обработки. Вуаль снижает контраст изображения, что может привести к исчезновению мелких деталей объекта. Для аэрофотоплёнок величина вуали допускается не более 0,2.

Коэффициент контрастности γ численно равен тангенсу угла наклона прямолинейного участка характеристической кривой к оси логарифмов экспозиций H . Может быть определен как отношение разности оптических плотностей к разности логарифмов экспозиций для точек начала и конца прямолинейного участка характеристической кривой:

$$\gamma = (D_2 - D_1) / (\lg H_2 - \lg H_1) = D / \lg H. \quad (4.5)$$

Коэффициент γ может быть определен также графическим способом на сенситометрическом бланке с помощью характеристической кривой (см. рис. 4.2). Для этого через индекс, находящийся справа на шкале $\lg H$, проводят линию, параллельную прямолинейному отрезку характеристической кривой. В пересечении со шкалой γ определяют его значение.

Коэффициент контрастности характеризует свойство фотоэмульсионного слоя реагировать на некоторый интервал экспозиций (ΔH) большей или меньшей разностью оптической плотности (ΔD) соседних объектов ($\Delta D = \gamma \Delta \lg H$). Его величина изменяется с изменением режима фотохимической обработки: с увеличением времени проявления фотоматериала (в определенных пределах) увеличивается его γ ; применяя различные типы проявителей, также можно управлять значением коэффициента контрастности.

Светочувствительностью S называют способность фотографического слоя создавать большую или меньшую оптическую плотность при одинаковой экспозиции. Светочувствительность определяется как величина, обратно пропорциональная экспозиции H_{D_3} , создающей на фотографическом материале после химической обработки заданную оптическую плотность D_3 :

$$S = K_S / H_{D_3}. \quad (4.6)$$

Значения коэффициента K_S и заданной оптической плотности H_{D_3} определяются применяемой сенситометрической системой. Этих систем несколько: отечественная система ГОСТ, система DIN, система ASA, международная система ISO. В системе ГОСТ, действующей в нашей стране с 1963 г., для аэроплёнок общего назначения коэффициент $K_S = 10$, для позитивных плёнок $K_S = 1$.

Экспозицию H_{D_3} определяют с помощью характеристической кривой в соответствии с заданной оптической плотностью D_3 , используемой в конкретной сенситометрической системе. Например, в системе ГОСТ для аэрофотоплёнок $D_3 = D_0 + 0,85$ — заданная оптическая плотность измеряется величиной, превышающей плотность вуали D_0 на 0,85. Это означает, что средняя оптическая плотность на фотографическом изображении будет находиться в пределах 0,9...1,1. При этом обеспечиваются наилучшие изобразительные свойства фотоснимков. Последовательность определения светочувствительности следующая (см. рис. 4.2):

на шкале оптической плотности находят значение D_3 , для чего к D_0 прибавляют 0,85 (аэрофотоплёнки) или 0,2 (позитивные плёнки);

из полученной точки на шкале D проводят линию, параллельную оси $\lg H$, до пересечения с характеристической кривой;

из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось экспозиции H и находят экспозицию H_3 , при которой получена заданная оптическая плотность D_3 ;

вычисляют светочувствительность по формулам:

для аэрофотоплёнок и плёнок общего назначения

$$S_{0,85} = 10 / H_{D=D_0+0,85}, \quad (4.7)$$

для позитивных фотоплёнок

$$S_{\text{поз}} = 1 / H_{D=D_0+0,2}. \quad (4.8)$$

Светочувствительность фотоматериала — величина непостоянная и зависит от интенсивности падающего на нее светового потока, а главное — от режима фотохимической обработки (тип проявителя, время и температура проявления).

Светочувствительность в других системах вычисляют по формулам:

в системах ISO и ASA

$$S_{\text{iso}} = S_{\text{asa}} = 0,8 / H_{D=D_0+0,1}; \quad (4.9)$$

в системе DIN

$$S = 10 \lg 1 / H_{D=D_0+0,1}. \quad (4.10)$$

Плёнки одинаковой светочувствительности имеют разные численные значения в различных сенситометрических системах.

Фотографическая широта L — свойство фотографического материала сохранять некоторый диапазон пропорций яркостей объектов в виде оптических плотностей на фотоснимке. Величина L определяется проекцией прямолинейного участка характеристической кривой на ось $\lg H$ (см. рис. 4.2), и вычисляют ее как раз-

Рис. 4.3. Спектральная чувствительность различных типов фотоэмульсий (пленок)

ность логарифмов экспозиций, соответствующих его концу и началу:

$$L = \lg H_2 - \lg H_1. \quad (4.11)$$

Чем больше фотографическая ширина, тем больший интервал градаций яркостей объектов будет передаваться без искажений. Изменяя режим фотохимической обработки фотопленок, можно изменять величину фотографической ширины. При этом она должна быть больше или равна разности логарифмов яркостей объектов.

Спектральная чувствительность S_λ эмульсионного слоя фотоматериала характеризует его способность реагировать на лучи различного спектрального диапазона. Спектральная чувствительность фотоматериалов, как уже отмечалось, зависит от типа сенсibilизаторов, находящихся в фотоэмульсии. Различают следующие типы фотоэмульсий (рис. 4.3):

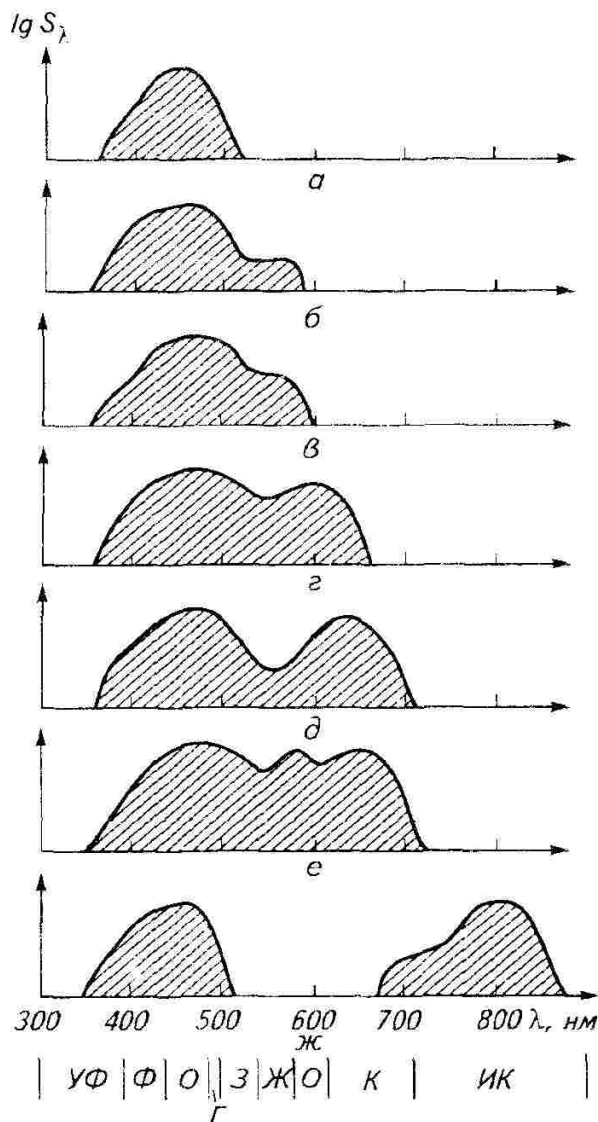
несенсибилизированные (а) — чувствительны к синим лучам спектра;

ортохроматические и изоортохроматические (б, в) — чувствительны к синим, зеленым и желтым лучам;

панхроматические и изопанхроматические (г, д, е) — взаимодействуют с лучами всей видимой зоны спектра;

инфракрасные фотослои (ж) обладают максимальной чувствительностью к лучам инфракрасной зоны спектра. Различные типы фотослоев имеют максимумы чувствительности, соответствующие различным длинам волн. Это отражается в их маркировке, например И-840, И-960.

Для повышения изобразительных и информационных свойств снимков аэро- или космические съемки выполняют с применением светофильтров — стеклянных окрашенных плоскопараллель-



ных пластин. В зависимости от типа красителя, используемого для их изготовления, светофильтры пропускают или не пропускают (отрезают) излучение определенной длины волны. Светофильтры с заданными пропускными характеристиками устанавливают на объективе аэрофотоаппарата и тем самым регулируют спектр излучения, поступающего на фотопленку. Фотографический эффект, создаваемый в фотоэмульсионном слое, при их применении будет иным по сравнению со съемкой без светофильтров и оценивается *эффективной светочувствительностью*. Отношение общей светочувствительности к эффективной называют *кратностью светофильтра* q , которую вычисляют по формуле

$$q = S/S_{\lambda}, \quad (4.12)$$

где S — общая светочувствительность фотоматериала при освещении его интегральным световым потоком без светофильтра; S_{λ} — светочувствительность, полученная при освещении фотоматериала через светофильтр.

Кратность светофильтра учитывают при фотосъемке. При расчете оптимальной экспозиции ее значение увеличивается в q крат.

Выбирая и устанавливая соответствующие светофильтры, можно производить фотосъемку в заданной спектральной зоне. Светофильтры применяют, например, для устранения влияния воздушной дымки, снижающей контраст изображения объектов местности. Ее влияние увеличивается с высотой фотографирования. На объектив аэрофотоаппарата устанавливают желтый светофильтр (ЖС), отсекающий коротковолновый спектр излучения, создаваемый атмосферной дымкой. При этом повышается контраст изображения объектов, а также увеличивается количество отображенных на снимке мелких малоконтрастных деталей.

4.4. СТРУКТУРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПЛЕНОК

Зернистая структура фотоэмульсионного слоя — важный фактор в получении снимков с определенными изобразительными свойствами. Зерно — это частица светочувствительного вещества (например, Ag Br). Зерна фотоэмульсии при экспонировании рассеивают световые лучи, что ограничивает воспроизведение мелких деталей, снижает резкость изображения и уменьшает пределы увеличения снимков. Рассмотрим некоторые понятия, являющиеся функциями структурных свойств фотоматериалов.

Коэффициент (фактор) зернистости используют для визуальной оценки размеров зернистости фотоэмульсии. Он служит показателем предельного увеличения изображений, который вычисляют по формуле

$$Q = 100/n, \quad (4.13)$$

где n — коэффициент увеличения, при котором визуально определяется появление зерна на изображении.

Чем больше коэффициент зернистости, тем больше размер зерна фотоэмульсии и соответственно меньше коэффициент увеличения фотоснимка, обеспечивающего высокое изобразительное качество увеличенного фотоизображения. Коэффициент Q определяют на приборах гранулометрах. В справочниках о фотоматериалах приводятся сведения об этом коэффициенте в разделе «Гранулометрические характеристики».

Разрешающая способность фотоматериала относится к резольвометрическим характеристикам и определяет способность фотоэмульсионного слоя отдельно воспроизводить мелкие близко расположенные детали фотографируемого объекта.

Разрешающая способность зависит от размера зерна фотоэмульсионного слоя: чем больше зерно, тем меньше разрешающая способность.

Для получения снимков с высокими изобразительными свойствами желательно применять мелкозернистые фотоматериалы. Но мелкозернистые фотоэмульсионные слои обладают малой светочувствительностью. Специфика выполнения аэро- и космических фотосъемок (необходимость коротких выдержек) предполагает применение высокочувствительных фотопленок. Поэтому аэро- и космические фотоснимки имеют достаточно крупную структуру изображения. Как следствие, существует ограничение в коэффициентах увеличения снимков при фотографической печати позитивов и при работе с изображением, визуализированным на мониторе компьютера.

При выполнении аэро- или космических фотографических съемок важной задачей является *определение оптимальной экспозиции*. Правильное экспонирование предполагает поступление такого количества световой энергии, при котором на снимке будет обеспечена пропорциональная передача яркостей объектов и получена разрешающая способность фотоизображения, соответствующая этому параметру аэрофотопленки. При аэрофотосъемке экспозиция регулируется в основном временем экспонирования (выдержкой). Выдержку t рассчитывают по экспонометрической формуле

$$t = 4K_s nq / ET_z K_a S_{HD}(r + L_i), \quad (4.14)$$

где K_s — коэффициент сенситометрической системы; n — знаменатель относительного отверстия объектива (диафрагма); q — кратность светофильтра; E — освещенность объекта; T_z — прозрачность атмосферы; K_a — коэффициент рассеяния в фотокамере; S_{HD} — светочувствительность фотопленки; r — средний коэффициент яркости объекта; L_i — коэффициент яркости воздушной дымки.

В современных фотографических съемочных устройствах экспонометрическую формулу решают с помощью автоматического регулятора экспозиций, обеспечивая требуемое фотографическое качество изображения.

Большое разнообразие аэрофотопленок позволяет выбрать нужный тип, исходя из условий освещения объекта, отражательной способности природных объектов, цели съемки и т. д.

4.5. НЕГАТИВНЫЙ ПРОЦЕСС

После проведения аэро- или космической фотосъемки получают экспонированный фильм, на котором в виде скрытого изображения записана информация о фотографируемом объекте. Скрытое изображение представляет собой участки экспонированного материала, где под действием энергии световых лучей произошла фотохимическая реакция (фотографический эффект). Для преобразования скрытого изображения в видимое производится негативный процесс.

Негативный процесс выполнения фотохимической обработки экспонированной фотопленки включает: проявление, первую промывку, фиксирование, вторую промывку и сушку. Его результат — негатив. На негативе изображение обратное яркостям объектов съемки: объектам большей яркости соответствуют их изображения большей оптической плотности и наоборот.

Фотографическое проявление представляет собой химическую реакцию преобразования галоидного серебра, подвергнувшегося воздействию света. Под действием водных проявляющих растворов экспонированное галоидное серебро переходит в металлическое. В тех местах, где энергия светового потока была больше (что соответствует большей яркости объекта), происходит более активная фотохимическая реакция. В результате избирательного восстановления галоидного серебра на снимке получают распределение пятен темного металлического серебра, которое и создает изображение. Проявление фотопленки осуществляют в строгом соответствии с режимом, применяемым при сенситометрических испытаниях (рекомендованный тип проявителя, время и температура проявления). Проявляющие растворы (проявители) представляют собой химические вещества, растворенные в воде. В состав проявителя входят проявляющие, сохраняющие, ускоряющие, противобульирующие вещества и т. п.

После проявления выполняют первую промывку — удаляют из фотоэмульсионного слоя остатки проявляющего раствора.

Следующий этап — фиксирование (закрепление). Если после промывки вынести проявленный фотоматериал на свет, то под действием света неэкспонированные частицы галоидного серебра (их в фотоэмульсии остается порядка 70...80 %) начнут превращаться в металлическое серебро. Через некоторое время фотоматериал станет одинаково черным и изображение исчезнет. При фиксировании остатки неэкспонированного галоидного серебра вступают в реакцию с гипосульфитом натрия. В результате обра-

зуется растворимое в воде соединение, которое вымывается из фотоэмульсионного слоя. В фотоэмульсии остается металлическое серебро, составляющее изображение на негативе. Вторая промывка должна быть продолжительной, в проточной воде. Если в фотослое останется фиксаж, то со временем изображение пожелтеет и может исчезнуть.

Для автоматизации фотохимической обработки аэрофильмов применяют проявочные машины (например, 80П-1). Скорость обработки составляет 90...95 м/ч.

Сушку химически обработанного аэрофильма (аэронегативов) выполняют таким образом, чтобы исключить или уменьшить возможные деформации подложки и фотоэмульсионного слоя. Применяемые способы сушки относят к конвекционным — пленка равномерно с двух сторон обдувается нагретым воздухом с относительной влажностью 50...60 %. Для сушки аэрофильмов используют специальные барабаны, шкафы и приборы.

Полученные негативные материалы подлежат метрологической оценке. Определяют фотографическое качество и резкость изображения.

4.6. ПОЗИТИВНЫЙ ПРОЦЕСС

Если аэронегативы по качеству отвечают нормативным требованиям, то с них получают позитивные копии — фотоотпечатки. Этот процесс называют позитивным. На позитивах изображение по яркости обратно негативу, но прямое по отношению к объекту. Позитивный процесс может быть выполнен в режиме классической фотографической обработки или с помощью компьютерных технологий. При фотографическом варианте последовательность отдельных этапов позитивного процесса аналогична съемочному и негативному процессам: после экспонирования (печати) выполняют проявление, промывку, фиксирование, промывку и сушку.

Фотоотпечатки (позитивы) обычно изготавливают на фотобумаге. Иногда используют позитивную фотопленку (ее светочувствительность невысокая, 1...3 единицы ГОСТ). Существует два способа печати с негативов позитивных копий: контактный и проекционный.

При контактном способе позитивный фотоматериал (фотобумага или позитивная пленка) и негатив плотно прижимаются эмульсионными слоями. Экспонирование производят через негатив. Масштаб изображения позитива равен масштабу негатива. Контактную печать выполняют на контактных копировальных приборах, схема которых приведена на рисунке 4.4, или на автоматических печатающих приборах.

Резкость изображения на отпечатанных контактных снимках зависит от плотности прижима позитивного материала к негативу. Отсутствие объектива при данном способе печати исключает

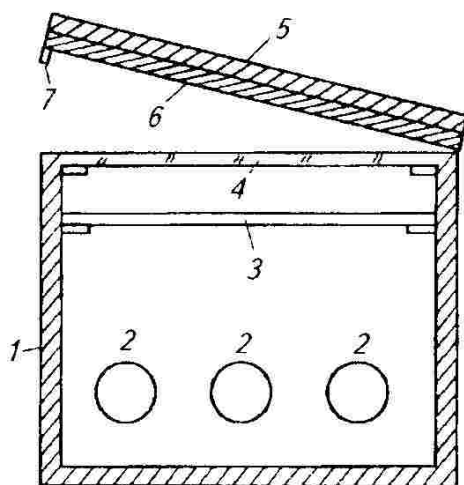


Рис. 4.4. Схема контактного копировального прибора:

1 — корпус; 2 — лампы освещения; 3 — матовое рассеивающее стекло; 4 — стекло, на котором укладывается негатив; 5 — прижимное устройство; 6 — уплотнитель; 7 — контактный выключатель

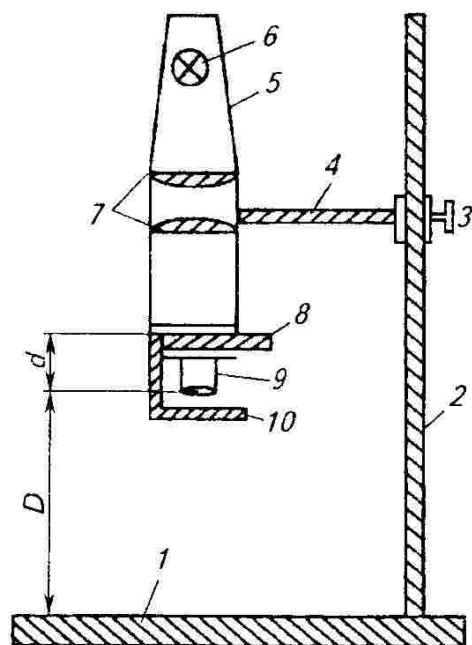


Рис. 4.5. Схема фотоувеличителя:

1 — экран; 2 — штанга; 3 — муфта крепления; 4 — кронштейн; 5 — корпус осветителя; 6 — лампа освещения; 7 — конденсор; 8 — рамка с негативом; 9 — объектив; 10 — светофильтр

погрешности на позитиве, вызываемые неидеальностью оптической системы.

Проекционная печать позволяет получать позитив в ином масштабе, чем негатив. На практике обычно изготавливают увеличенные позитивы (снимки). Для этого используют приборы фотоувеличители (рис. 4.5). Масштаб проецированного изображения (увеличенного снимка) зависит от расстояния между объективом и экраном D , которое изменяют, перемещая проектор по вертикальной штанге. При большем расстоянии D коэффициент увеличения больше.

Для получения резкого изображения на экране, а следовательно, и на снимке выполняют оптическое сопряжение трех плоскостей: негатива, объектива и экрана (позитива). Это условие выражают следующей зависимостью:

$$1/D + 1/d = 1/F_{об}, \quad (4.15)$$

где D — расстояние от задней узловой точки объектива до плоскости экрана; d — расстояние от задней узловой точки до плоскости негатива; $F_{об}$ — фокусное расстояние объектива фотоувеличителя.

Таким образом, изменяя расстояние D для достижения необходимого масштаба позитива, требуется изменение d согласно формуле (4.15). В обычных фотоувеличителях это делают вручную, а резкость оценивают визуально. В аэрофотогеодезическом производстве используют фотоувеличители с коэффициентом увеличения до 40...100 крат, при этом оптическое сопряжение (получение резкого изображения на экране) происходит автоматически.

Применение объектива при данном способе печати может вызывать

геометрические искажения на позитиве, вызываемые неидеальностью оптической системы.

Фотобумага, применяемая для получения контактных или увеличенных снимков, так же как и негативные материалы, обладает сенситометрическими и структурными характеристиками. Они в значительной мере определяют фотографическое и изобразительное качество фотоотпечатка. Строение фотобумаги похоже на строение фотопленок.

Сенситометрические испытания фотобумаг проводят по методике, сходной с той, которую применяют при исследовании пленок. В результате получают характеристическую кривую, по которой определяют сенситометрические параметры фотобумаги. Применение фотобумаги в позитивном процессе учитывает ее особенность. Фотобумага имеет максимальную оптическую плотность $D_{\max} = 1,7 \dots 1,8$. Максимальная оптическая плотность негатива обычно имеет большее значение, порядка $2,5 \dots 3,0$. Возникает задача при фотографической печати уместить больший интервал оптических плотностей негатива в меньшем интервале оптических плотностей, воспроизводимых фотобумагой. Для этого при печати используют не фотографическую широту, определяемую по прямолинейному участку характеристической кривой, а так называемый полезный интервал экспозиций $\Delta \lg H_6$, который ограничивается точками на характеристической кривой с минимальным градиентом. В этих точках касательные, проведенные к кривой, имеют минимальный угол с осью $\lg H$ (рис. 4.6).

Отношение $\Delta D / \Delta \lg H_6 = q_{\text{ср}}$ дает средний градиент фотобумаги. Величина $q_{\text{ср}}$ — это некоторый аналог коэффициента контрастности фотопленки. Так, полезный интервал экспозиций больше, чем фотографическая широта, средний градиент фотобумаги несколько меньше, чем коэффициент контрастности. Часть изобразившихся на негативе объектов с максимальной или минимальной плотностью могут быть не отображены на фотоотпечатке (позитиве) или попадают в область недодержек или передержек. В последнем случае пропорции градаций яркости объектов на позитивном изображении нарушаются.

Светочувствительность фотографических бумаг

$$S = K_s / H_3, \quad (4.16)$$

где $K_s = 100$; H_3 — логарифм экспозиции, соответствующей среднему значению полезного интервала экспозиций.

Светочувствительность фотобумаги не имеет такого значения, как свето-

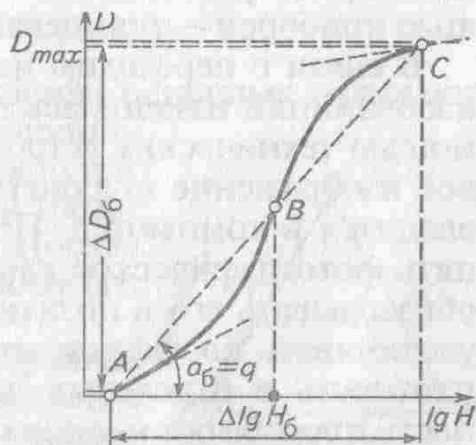


Рис. 4.6. Характеристическая кривая черно-белой фотобумаги

чувствительность фотопленок, так как при печати в лабораторных условиях экспозицию можно изменять в широких пределах. Обычно светочувствительность фотобумаг невелика и составляет несколько единиц.

Наиболее значимые характеристики — полезный интервал экспозиций и средний градиент фотобумаги, которые можно достаточно просто определить с помощью специальных тест-объектов.

Существуют различные виды фотобумаг, отличающиеся по типу эмульсионного слоя, подложки (тонкая бумага, картон), контрастности, с матовым или глянцевым покрытием. В фотобумагах типа «фотокарт» бумажная основа помещена между двумя тончайшими слоями полимерной пленки, поэтому после фотохимической обработки не размокает и, как следствие, практически не деформируется. Такой тип фотобумаги используют для производства увеличенных до большого размера аэрофотоснимков (отпечатков) или их фрагментов.

При печати фотобумагу подбирают в зависимости от коэффициента контрастности негатива: чем больше коэффициент контрастности негатива $\gamma_{\text{нег}}$, тем меньшую контрастность (средний градиент) γ_6 должна иметь фотобумага, и наоборот. Условие правильного воспроизведения яркостей объекта на отпечатке выражают формулой

$$\gamma_{\text{нег}}\gamma_6 = 1.$$

Фотохимическая обработка фотобумаги аналогична обработке фотопленки в негативном процессе. Фотоэмульсионный слой фотобумаги нечувствителен к синим лучам спектра, и поэтому работу с ней, включая проявление, фиксирование и промывку, можно проводить при желтом или красном освещении. Сушат фотоотпечатки на специальных стеллажах или с помощью приборов — гляцевателей.

В связи с переходом на компьютерные технологии обработки изображений изменилась процедура позитивного процесса. С помощью технических устройств — сканеров — негативное аналоговое изображение (аэронегатив) преобразуется в цифровой вид и вводится в компьютер. Программными средствами можно изменять фотографическое качество негативного изображения и преобразовывать его в позитивное. При этом можно уменьшать или увеличивать коэффициент контрастности, изменять оптическую плотность в отдельных частях изображения, повышать детальность проработки мелких объектов в тенях и т. п. Тиражируют позитивное изображение с помощью современных технических средств — фотопринтеров и плоттеров.

4.7. ПОНЯТИЕ О ЦВЕТНОЙ ФОТОГРАФИИ

Число цветов и оттенков цветного изображения воспринимается глазами человека во много раз больше, чем число тонов черно-белого изображения. Это предполагает получение большего объема информации при использовании цветной фотографии, что особенно важно при съемках земной поверхности.

Рассмотрим основные характеристики цвета: цветовой тон или оттенок, насыщенность цвета, светлота или относительная яркость.

Цветовой тон (иначе цвет) — это основной критерий, отличающий его от серого и белого.

Насыщенность цвета есть степень разбавленности его белым.

Светлота характеризует относительный цветовой контраст. Например, если одна часть цветной поверхности освещена, а другая находится в тени, то при одинаковой насыщенности они различаются по светлоте.

В основу цветной фотографии заложена выдвинутая М. В. Ломоносовым теория о трехкомпонентном цветовом делении зрения. В соответствии с этой теорией глаз человека имеет три группы колбочек, воспринимающих три основных цвета: синий (С), зеленый (З) и красный (К). С их помощью можно воспроизвести любой цвет путем смешивания. Схему смешения цветов можно анализировать на примере треугольника цветов (рис. 4.7).

Буквами Г, Ж, П обозначены дополнительные цвета, соответственно голубой, желтый и пурпурный. С помощью цветного треугольника легко определить набор цветов для получения нужного цвета. Белый (Б) цвет получают сложением основных цветов $Б = С + З + К$, черный (Ч) — дополнительных $Ч = Г + Ж + П$. Заменяя основные цвета на дополнительные и дополнительные на основные, возможны различные комбинации цветообразования:

$$Г = С + Ж, Ж = З + К, П = С + К;$$

$$Б = С + Ж, Б = З + П, Б = Г + К;$$

$$С = Г + П, З = Г + Ж, К = Ж + П.$$

Получение цветов в результате смешения основных называют аддитивным смешением. Смешение дополнительных цветов для получения основных путем вычитания из белого некоторых цветов называют субтрактивным синтезом цветов. Последний способ проще реализуется, и поэтому его применяют в цветной фотографии.

В цветных фотографических материалах (фотопленках и фотобумагах) применяется принцип разделения и синтеза цветов.

Цветные фотопленки и фотобумаги имеют по три элементарных фотослоя (рис. 4.8), а в

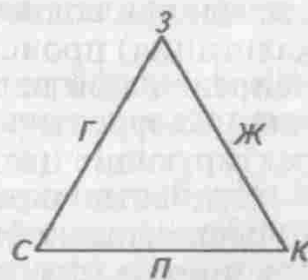


Рис. 4.7. Треугольник цветов



Рис. 4.8. Схема цветного фотоизображения:

I—цветной объект; II—цветная фото-
 пленка; III—цветной негатив; IV—цвет-
 ной позитивный материал; I...6 элемен-
 тарные слои

некоторых случаях четыре. Каждый из слоев чувствителен к лучам определенного спектра: первый — к синим, голубым и пурпурным; второй — к голубым, зеленым и желтым; третий — к желтым, красным и пурпурным. В каждом слое находятся красители, которые после химической обработки окрашивают его в дополнительный цвет. Первый слой окрашивается в желтый цвет, второй — в пурпурный, третий — в голубой. После химической обработки изображение объектов на цветном негативе будет иметь цвета, не соответствующие оригиналу. Их цвета получаются сложением цветов изображений объектов на элементарных слоях.

Цветной позитивный процесс аналогичен цветному негативному процессу. В результате цветовоспроизведение цветного позитива должно соответствовать цветовой гамме объекта. Это называют балансом цветов. При длительном хранении пленки, неправильной химической обработке, использовании при съемке не соответствующего по спектру освещения (например, пленка для съемки при солнечном освещении экспонируется в лучах ламп накаливания) происходит разбалансирование цветов, что приводит к неправильной передаче цветов объекта на позитивном изображении. Скорректировать цвета при печати можно, применив корректирующие цветные светофильтры.

Основные характеристики черно-белых фотоматериалов (светочувствительность, коэффициент контрастности, фотографическая широта, фактор зернистости и разрешающая способность) не меняют своих понятий в цветной фотографии. Методики их определения и формулы для их расчетов имеют некоторые отличия.

Существенный недостаток цветных изображений — пониженная по сравнению с черно-белыми материалами разрешающая способность, что может ограничивать области их применения. Объясняется это наличием трех элементарных светочувствительных слоев на фотоматериале. Если каждый слой имеет свою разрешающую способность R_1 , R_2 , R_3 , то суммарная разрешающая способность всех слоев может быть определена по известной эмпирической формуле

$$1/R_0 = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3. \quad (4.17)$$

Например, если условно примем разрешающую способность каждого элементарного слоя равной 100 мм^{-1} , то результирующая разрешающая способность (без учета влияния других факторов) будет в три раза меньше, т. е. $R = 33 \text{ мм}^{-1}$.

Разновидность цветной аэрофотографии — спектрозональная фотография. Регистрируется изображение на двух или трех цветных слоях фотопленки. В отличие от цветного фотографирования в натуральных цветах при спектрозональной съемке получают изображения в ложных цветах, не соответствующих цветам объектов. Псевдоцвета изображений объектов позволяют добиться наибольших цветовых контрастов. Например, пашня может изображаться красным или синим цветом. За счет повышения цветовых контрастов надежнее и легче выполняется визуальное выявление изображений малоконтрастных объектов на снимках.

Спектрозональную съемку выполняют для изучения состояния посевов, лесов, при почвенном картографировании, при геологических исследованиях и т. д.

Для спектрозонального фотографирования применяют цветные фотопленки с маркировкой СН — спектрозональные негативные. Различные типы спектрозональных пленок имеют элементарные слои, чувствительные к различным зонам спектра. В зависимости от спектральной отражательной способности изучаемых объектов выбирают тот или иной тип спектрозональной фотопленки.

Печать спектрозональных снимков выполняют контактным или проекционным способом. Химическая обработка для получения негативов и позитивов аналогична обработке цветных фотоматериалов.

Достоинство цветной и спектрозональной фотографии — высокая энергетическая разрешающая способность, что позволяет получить больший объем информации на снимке.

При компьютерной обработке цветных снимков потребуется в три раза больше объема памяти для хранения цифрового цветного изображения. Это объясняется тем, что при вводе в компьютер цветного снимка применяемый для этих целей цветной сканер сканирует и представляет в цифровом виде изображение каждого

элементарного слоя. Стоимость цветных снимков больше стоимости снимков, полученных на черно-белых фотоматериалах.

Развитие теории фотографии, совершенствование фотографических материалов и технических средств их фотохимической обработки позволило повысить качество цветных изображений. Упростился и ускорился процесс получения цветных позитивов.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие химические преобразования вещества являются основой фотографического процесса? 2. Что представляет собой фотографическая эмульсия? 3. Назовите основные свойства подложки аэрофотопленки. 4. Расскажите об основных этапах сенситометрических исследований пленок. 5. Какое назначение имеет характеристическая кривая при сенситометрических исследованиях? Назовите сенситометрические параметры пленок, учитываемые при выполнении съемочных работ. 6. Что означает понятие «сенсibilизированные аэрофотопленки»? 7. Как влияют гранулометрические параметры пленок на их изобразительные и метрические свойства? 8. Чем вызвана необходимость оптимизации экспозиции при выполнении аэрофотосъемки? 9. Какие химические процессы происходят при получении негатива? 10. Опишите схему получения цветного изображения. Каковы преимущества и недостатки цветного изображения по сравнению с черно-белым?

Глава 5

НЕФОТОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

К нефототрафическим системам относят несколько классов съемочных устройств, которые разработаны с целью расширения технических возможностей аэро- и космических методов изучения Земли. Принципиальное их отличие от фотографических систем — применение иных сенсоров, регистрирующих широкий спектр излучения от земной поверхности, иных способов построения и передачи изображения. Съемочные системы, установленные на космических летательных аппаратах, позволяют получать информацию о процессах, проходящих на Земле, в реальном или близреальном времени. Специфика космических полетов потребовала конструирования съемочных систем специального вида: компактных, малой массы и энергопотребления, с возможностью передачи без искажения информации на пункт приема непосредственно в процессе съемки и т. д. Съемочные системы, применяемые при космических съемках, успешно используют в аэросъемочном процессе.

5.1. КАДРОВЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Кадровые телевизионные (ТВ) системы имеют сходство с кадровыми фотографическими системами — изображение строится по закону центральной проекции. Также существуют оптическая система, затвор, компенсатор сдвига изображения. Изображение формируется на фотоэлектрической поверхности (фотомишени),

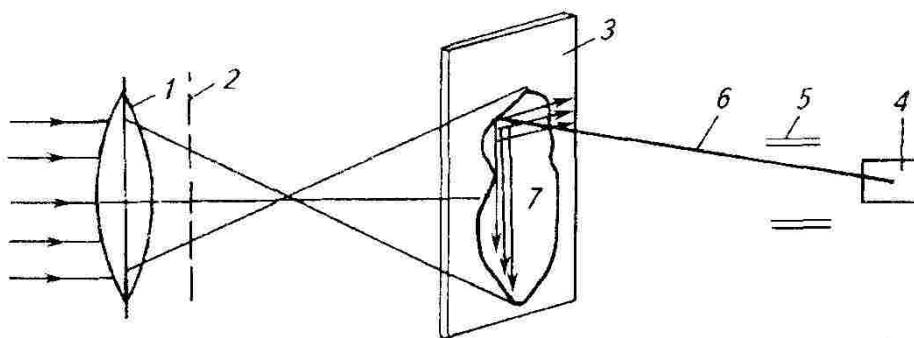


Рис. 5.1. Схема видикона:

1 — объектив; 2 — затвор; 3 — фотомишень; 4 — электронный прожектор; 5 — управляющие конденсаторы; 6 — электронный луч; 7 — изображение

являющейся частью приемопередающего устройства — видикона (рис. 5.1).

Фотомишень можно считать аналогом фотопленки, но в отличие от нее используемый многократно. Схема процесса получения ТВ-снимка следующая. Оптическое изображение с помощью объектива фокусируется на фотомишень. На ее поверхности образуется поле электрических зарядов. Величина заряда на элементарной площадке фотомишени пропорциональна интенсивности падающего светового потока (экспозиции). Изображение представлено распределением электрических зарядов различной величины. При передаче на пункт приема оно сканируется электронным лучом, исходящим из электронного прожектора и управляемым отклоняющей системой (конденсаторами). В момент взаимодействия электронного луча с элементарной ячейкой происходит сложение зарядов. Суммарный заряд поступает на усилитель, после чего передается антенной по радиоканалу на наземный пункт приема, где поступившие сигналы визуализируются — преобразуются в изображение, аналогичное фотографическому. В результате сканирования фотоэлектрическая поверхность очищается и готова к приему нового оптического изображения. В случае, когда прямая радиосвязь невозможна, результаты съемки записываются на магнитный носитель. Передачу информации начинают после входа в зону радиовидимости. Изображение в кадровых ТВ-системах может быть получено одновременно в нескольких спектральных зонах. Для этого используют несколько видиконов, имеющих различную спектральную чувствительность фотоэлектрических поверхностей.

Недостатки кадровых ТВ-систем — большие геометрические и фотометрические искажения, низкая разрешающая способность, а также зависимость от погодных условий. ТВ-снимки используют при исследовании больших территорий земной поверхности и поверхности океанов, изучении облачности и т. п. Из отечественных ТВ-систем можно отметить систему «Метеор» с разрешением на местности от $1,25 \times 1,25$ км в центре до $2,0 \times 2,0$ км на краю сним-

ка. Система RVR, установленная на LANDSAT (США), имеет три спектральных канала с разрешением на местности при съемке с высоты 930 км 0,04...0,08 км.

5.2. СКАНИРУЮЩИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Сканирующие съемочные системы (сканеры) отличаются от других прежде всего принципом построения изображения, которое строится построчным сканированием (просматриванием) местности (рис. 5.2, а).

Сканирующее устройство воспринимает отраженный (излученный) электромагнитный поток от элементарных площадок снимаемого объекта 1, расположенных вдоль строки. Размер площадки зависит от высоты съемки, мгновенного угла 2α изображения оптической системы 2 сканера и положения относительно оси сканирования (рис 5.2, б). Угол захвата 2β определяет ширину полосы на местности. Переход от одной строки к другой (построчная развертка) происходит в результате поступательного движения летательного аппарата. Для исключения разрывов между строками скорость сканирования согласуется с высотой и скоростью полета. В качестве сканирующих устройств 4 используют вращающиеся оптические элементы: плоские зеркала, зеркальные призмы, пирамиды и т. п.

В сканирующих системах применяют различные типы приемников электромагнитного излучения: тепловые (теплоэлектрические) и фотонные (фотоэлектрические). Тепловые системы рабо-

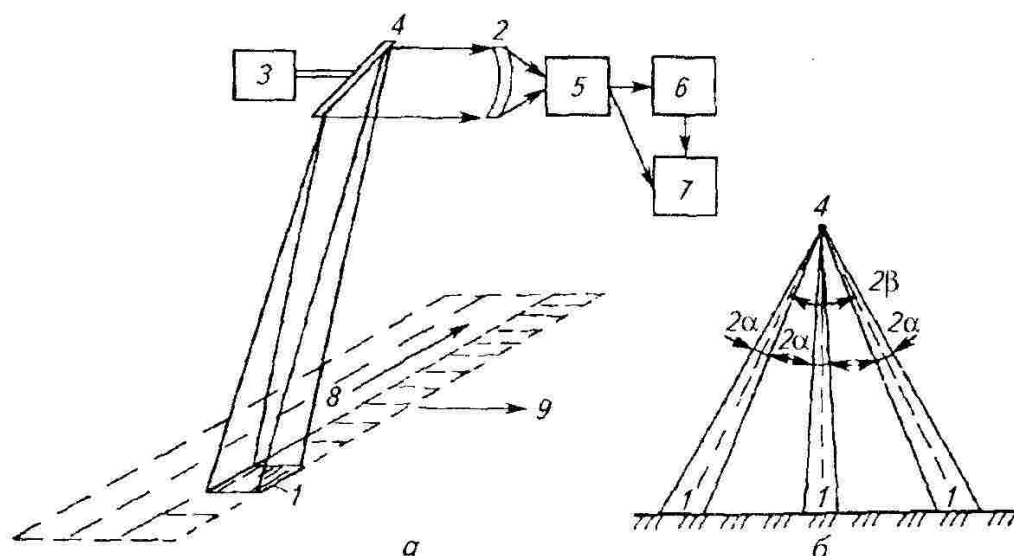


Рис. 5.2. Схема сканирования местности:

1 — площадка мгновенного обзора, элемент местности; 2 — объектив; 3 — механизм вращения зеркала; 4 — сканирующее зеркало; 5 — приемник излучения; 6 — устройство магнитной записи; 7 — передающее устройство; 8 — направление сканирования; 9 — направление полета

тают на основе преобразования тепловой энергии в электрический сигнал, в фотонных системах уровень сигнала определяется количеством поглощенных фотонов. Наибольшее применение получили сканеры, приемниками в которых служат линейки ПЗС. Различные типы сенсоров имеют различную спектральную чувствительность и охватывают спектральный интервал от видимой зоны до дальней инфракрасной зоны (0,4...16 мкм). Выбор приемника излучения и его спектральной чувствительности зависит от спектрального интервала съемки.

Сканирование можно проводить различными методами по разнообразным траекториям. Чаще применяют оптико-механическое сканирование по одному или двум взаимно перпендикулярным направлениям. В первом случае от одной строки изображения к другой переходят за счет перемещения летательного аппарата. Регистрация лучистой энергии происходит интегрально, т. е. воспринимается суммарный поток излучения во всем используемом спектральном интервале.

В сканерах устанавливают несколько сенсоров, позволяющих получать изображение одновременно в различных спектральных каналах. Непосредственно поступившее в приемник электромагнитное излучение измеряют, сравнивая возникший аналоговый видеосигнал от объекта с эталонным видеосигналом, создаваемым эталонным (искусственным или естественным) источником излучения. Результирующему сигналу присваивают цифровой код, пропорциональный данному сигналу. Кодированные видеосигналы составляют цифровое изображение.

Результаты съемки передаются на пункт приема по радиоканалу. Поступившие кодированные сигналы записываются на магнитный носитель. Далее может быть выполнено преобразование кодированных сигналов и получение аналогового изображения, подобного фотографическому. Результаты съемок удобнее передавать пользователю на магнитных носителях, например на СД-дисках, с последующей визуализацией на местах обработки снимков.

5.3. ТЕПЛОВЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Широкое развитие и применение получили *тепловые* сканирующие системы, относящиеся к пассивным. Данные системы работают в инфракрасной и тепловой зонах электромагнитного излучения. При дистанционном зондировании используют излучение ближней ИК-зоны ($\lambda = 0,76...3,0$ мкм), средней ИК-зоны ($\lambda = 3,5...5,6$ мкм) и дальней ИК-зоны ($\lambda = 8,0...14,0$ мкм). Для этого используют многозональные радиометры, радиометрические комплексы, тепловизионные системы и т. п. В зависимости от вида получаемой информации и возможностей используемой ап-

паратуры съемку можно проводить в одном или нескольких спектральных интервалах одновременно.

Тепловая съемка представляет собой измерение двумерного поля излучения путем поэлементного сканирования объекта земной поверхности. Принцип получения изображения основан на измерении температур объектов местности. В зависимости от физических и химических свойств снимаемые объекты могут быть «теплее» или «холоднее». Преобразованные (визуализированные) результаты измерений температур имеют вид, аналогичный фотографическому изображению местности. Точность регистрации температуры различными системами составляет $0,1...0,01^\circ$. Съемку можно выполнять как в дневное, так и в ночное время. Разрешение на местности достигает при малых высотах съемки $H = 200...300$ м $0,01...0,12$ м.

Совершенствование ИК-приемников, оптических систем, методов термометрии позволяет получать ИК-изображения, сопоставимые по своим параметрам с фотографическими. Для стереоскопического рассматривания снимки получают с перекрытиями (часть местности, изображенной на предыдущем снимке, фиксируется на последующем). Регистрация трех координат точек изображения позволяет визуализировать на мониторе компьютера трехмерное изображение (табл. 5.1).

5.1. Характеристики отечественной многозональной радиометрической аппаратуры высокого пространственного и температурного разрешения

Параметр	«Климат-СМ2»	«Тавр-СМ2»	«Мавр-СМ»	«Савр СМ1»
Спектральная зона, мкм:				
видимая	0,45...0,52 0,52...0,62 0,62...0,74	0,45...0,52 0,52...0,62 0,62...0,74	То же	То же
ближняя ИК	1,55...1,75 1,75...2,1 2,1...2,35	1,55...1,75 1,75...2,1 2,1...2,35		
дальняя ИК	7,5...9,2 10,2...11,5 11,5...13,5	7,5...9,2 10,2...11,5 11,5...13,5		
Поле зрения, угл. град	96	5	5	4,67
Линейное разрешение при $H = 0,2; 2; 10$ км, м	0,3(1,5)...1,2(6)	0,08(0,4)...0,2(1)	2; 4...10; 20 ($H = 200, 400$ км)	0,01...0,5
Точность определения температур, град	0,03	0,1	0,1	0,1

Изображения, получаемые с помощью тепловых съемочных систем, используют в целях картографирования подземных коммуникаций, выявления техногенных нарушений сооружений (неф-

те- и газопроводов, теплосетей, зданий и т. п.) и изучения негативных экологических процессов в природной среде (выявление загрязнения почв и водных объектов нефтепродуктами, засоления почв, зон подтопления и т. п.).

5.4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Использование в качестве приемников излучения ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы расширяет класс съемочных систем, имеющих на выходе цифровое изображение. При использовании компьютерных технологий фотограмметрической обработки снимков подобные съемочные системы становятся перспективными, так как не требуют дополнительного преобразования снимка в цифровое изображение.

Принцип работы прибора с зарядной связью (ПЗС) заключается в следующем. Светочувствительный слой представляет собой сетку кремниевых диодов, расположенную за оптической системой. Каждый кремниевый диод соединен с ячейкой хранения заряда. Когда световой поток в виде оптического изображения поступает на диод, некоторое количество электрического заряда генерируется пропорционально падающему потоку. Заряд переносится в ячейку хранения заряда (ячейку памяти). Из ячеек памяти информация последовательно считывается и преобразуется в цифровой код (цифровое изображение). Линейное разрешение цифровых съемочных систем зависит от размера элементов, составляющих ПЗС-матрицу. Их число в современных цифровых съемочных системах достигает 80 млн элементов и более, что обеспечивает разрешающую способность, близкую к фотографической. Использование ПЗС-матриц в качестве сенсора при создании формата снимка 18×18 см, 23×23 см ограничено технологической возможностью изготовления матриц большого размера. Обычно сенсор цифровых кадровых аэрофотокамер состоит из 4, 9 или более ПЗС-матриц. Каждая матрица служит для фиксации изображения части общего снимка. Изображение каждой ПЗС-матрицы перекрывается с соседними. С помощью программных средств, используя перекрывающиеся части изображения, формируется цифровой снимок. Например, черно-белый сенсор аэрокамеры ULTRA CAM D фирмы Vexcel состоит из 9 матриц, имеет размер изображения в пикселях (точках) $11\,500 \times 7500$, при этом размер пикселя равен 9 мкм; разрешение на местности при высоте съемки 500 м (300 м) соответственно 5 см и 3 см; фокусное расстояние сменных объективов 75, 100, 125 мм; производительность 1 снимок в секунду; объем записанной информации более 1,5 терабайтов при числе снимков 2775; съемку можно проводить в 4 спектральных каналах — R, G, B

(красный, зеленый, голубой) и ближнем инфракрасном. Аэрокамера DMC фирмы ZI имеет сенсор, состоящий из 4 матриц с общим количеством пикселей $13\,500 \times 8000$; фокусное расстояние 40...120 мм.

Из зарубежных систем наиболее известна французская система SPOT с разрешением в черно-белом варианте (панхроматический спектральный интервал) 10 м. Американской фирмой POSITIV SYSTEMS разработан цифровой 4-канальный сканер ADAR SYSTEM 5500 для легкого самолета. Спектральные интервалы изменяются с помощью набора сменных светофильтров. Разрешение на местности 0,5 м (3,0 м) при высоте полета $H = 1100$ м (6600 м) и захвате на местности площади 750×500 м (4500×3000 м).

Фирмой LH Systems создана самолетная цифровая система ADS-40, в основу которой положена схема сканера с тремя парами линеек ПЗС, расположенными в фокальной плоскости объектива. Пары линеек смещены относительно друг друга на половину элемента. Число элементов в каждой одинарной линейке равно 12 000 — в сдвоенной линейке получается разрешающая способность, как при использовании линейки, состоящей из 24 000 элементов. Поэтому использование сдвоенной линейки со смещением обеспечивает увеличение разрешающей способности в два раза. Парные ПЗС-линейки расположены параллельно таким образом, что съемка в видимой зоне спектра проводится первой парой линеек в направлении «вперед», второй — отвесно, а третьей — в направлении «назад». Кроме сдвоенных линеек, работающих интегрально в видимой зоне, в фокальной плоскости располагаются четыре одинарных линейки для проведения многозональной съемки в узких зонах спектра: $\lambda = 430...490$ нм, $\lambda = 535...585$, $\lambda = 610...660$ и $\lambda = 835...885$ нм.

Разрешение на местности в направлении полета составляет около 25 см. Время считывания информации с линеек равно 1,2 м/с. Поэтому для исключения разрывов и наложений строк на изображении необходимо согласование скорости полета носителя и высоты съемки. Разрешающая способность ADS-40 сопоставима с топографическими аэрофотоаппаратами. Изображения, полученные АДС-40, можно использовать для целей крупномасштабного картографирования.

Геометрические свойства сканерных изображений отличаются от снимков, полученных топографическими аэрофотоаппаратами. Каждая из строк представляет собой центральную проекцию узкой полосы земной поверхности и формируется из отдельных элементов изображения (пикселей), соответствующих определенным площадкам на местности, при различных пространственных положениях (линейных и угловых) летательного аппарата. Геометрические особенности изображений, полученных цифровыми съемочными системами, накладывают определенные требования к

математическому аппарату и специальному программному обеспечению, позволяющему учесть их при дальнейшей фотограмметрической обработке.

5.5. ЛАЗЕРНЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Лазерные съемочные системы относятся к активным съемочным системам, работающим в оптическом диапазоне. В основе лазерной съемки заложен принцип работы светодальномера без отражателя — лазерная локация. Отражателем является поверхность снимаемого объекта. В качестве облучателя используют полупроводниковый лазер, генерирующий излучение в ближней ИК-зоне в импульсном режиме. С помощью лазера осуществляют направленное облучение поверхности. Сигнал, отраженный от элементарной площадки земной поверхности (объекта), принимает оптическая система. При каждом элементарном измерении в процессе сканирования регистрируются наклонная дальность до площадки отражения и направление относительно осей системы координат лазерного локатора (рис. 5.3).

Положение локатора в геодезической системе координат (X , Y , Z) определяется бортовым GPS-приемником. Углы наклона и разворота зондирующего луча относительно осей геодезической системы координат определяют с помощью инерциальной аппарату-

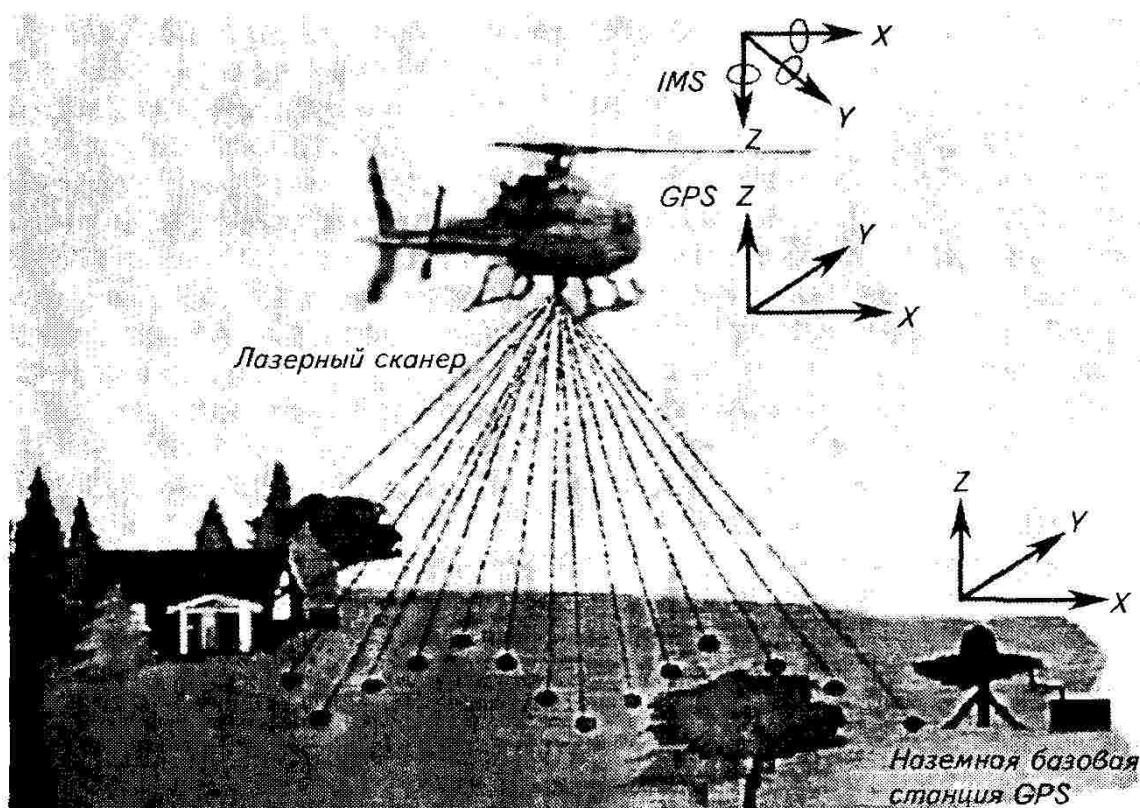


Рис. 5.3. Схема лазерной съемки

ры. Это позволяет получить после обработки результатов измерений геодезические координаты элемента поверхности, вызвавшего отражение зондирующего луча. Точность пространственных координат обратно пропорциональна высоте съемки. Результатом съемки является *трехмерное цифровое* изображение. Далее приведены технические характеристики авиационного лазерного сканера ALMT-1020 фирмы Optech Inc (Канада):

Высота съемки H , м	80...2000
Точность определения:	
высоты точки местности, см	15 ($H = 1200$ м)... 25 ($H = 2000$ м)
плановых координат X, Y точки местности	$1/2000$ высоты полета H
Ширина полосы сканирования	$0,72 H$
Частота, Гц:	
сканирования	До 100
импульсов лазера	50
Минимально различимый элемент местности (разрешение) с высоты 300 м, см	25

В зависимости от типа лазерного локатора при съемке можно фиксировать до пяти отражений для каждого направления визирования. Это означает, что при одном элементарном измерении могут быть получены отклики от нескольких пространственных компонентов площадки объекта. Например, от проводов линии электропередачи, лиственного покрова леса, поверхности земли.

Изображения лазерным сканером получают в два этапа. На первом регистрируют результаты измерений множества элементарных площадок (точек) — получают так называемое «облако точек», каждая из которых имеет координаты X, Y, Z . Модель лазерного сканера ALMT-3100 имеет рабочую частоту зондирующих импульсов 100 кГц и обеспечивает плотность сканирования земной поверхности до 10 точек на 1 м^2 . На втором этапе осуществляют компьютерную обработку результатов измерений и визуализацию изображения. Программными средствами можно исключить из обработки любой из откликов, задавая тем самым тематическую направленность преобразованных снимков. Например, оставить отклики от поверхности объекта и тем самым получить информацию о рельефе. Результаты измерений обрабатывают на борту летательного аппарата.

Лазерные съемочные системы применяют для построения профилей рельефа на территориях, закрытых лесами, и создания цифровой модели рельефа местности. Их применение эффективно при обследовании линий электропередач. При съемке городов и поселений получаемое трехмерное изображение позволяет успешнее проводить работы по организации территорий. Или, например, оптимизировать размещение приемопередатчиков мо-

бильной телефонной связи для достижения уверенного приема сигналов.

Помимо лазерных сканеров, используемых с воздушных и космических носителей, существуют наземные лазерные сканеры. Принцип работы этих съемочных систем аналогичен рассмотренным сканерам. Изображения, получаемые ими, применяют для изучения деформаций зданий и промышленных сооружений, составления фронтальных планов сложных архитектурных сооружений и т.п.

5.6. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Создание радиофизических съемочных систем основано на использовании радиоволн в качестве носителя информации об объектах земной поверхности. Их разделяют на два класса: использующие метод активной радиолокации и регистрирующие собственное излучение объектов в радиодиапазоне.

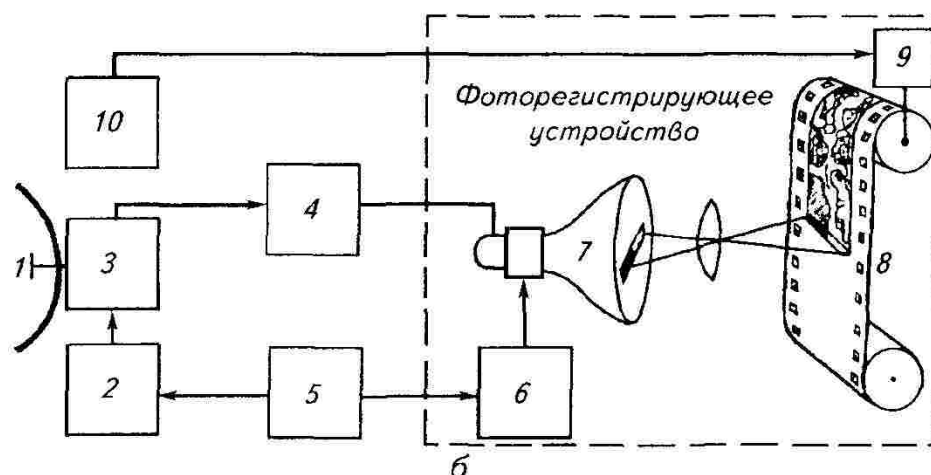
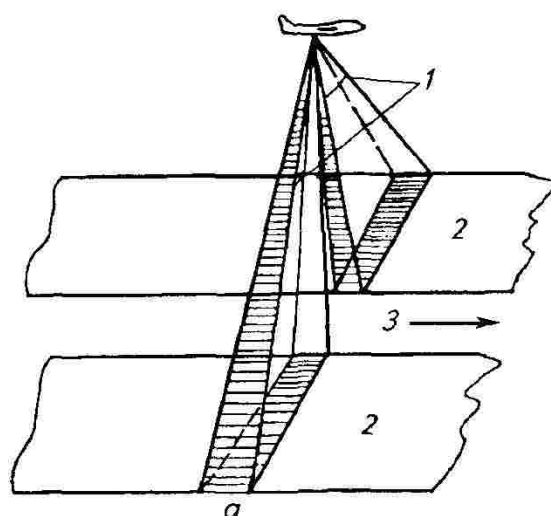
Из систем, относящихся к первому классу, наибольшее применение получили *радиолокационные станции бокового обзора* (РЛС БО). В основу их работы заложены принципы радиолокации. Генератор, установленный на борту летательного аппарата, вырабатывает радиоволны определенной длины, амплитуды, поляризации. С помощью антенны радиоизлучение в виде плоского луча направляется на земную поверхность (рис. 5.4, а).

Длины радиоволн, используемые при съемке, находятся в диапазоне от 1 см до 1 м и более. Режим излучения может быть непрерывным или импульсным. После взаимодействия с объектами поверхности происходит модулирование несущего сигнала, изменяются его исходные характеристики. Степень модулирования определяется физическими и химическими свойствами объекта. Отраженный модулированный сигнал воспринимается приемной антенной. Принятые сигналы после усиления поступают на экран, где происходит построчная визуализация результатов радиолокации. Полученное на экране ЭЛТ-изображение фиксируется с помощью регистрирующего устройства на движущуюся фотопленку (рис. 5.4, б). Яркость изображения объекта зависит от энергии возвратившегося сигнала.

Прямолинейность распространения радиоволн, их чувствительность к изменению рельефа при отражении создают определенную специфику радиолокационного изображения. Она выражается в значительной изменчивости яркости изображений и сложной геометрии снимка. Первичную обработку результатов съемки выполняют на борту летательного аппарата или на земле. После геометрической коррекции снимка геометрические искажения уменьшаются. Результат съемки — непрерывная полоса радиолокационного изображения. Аэросъемку выполняют со стандартных высот, например, $H = 3,5; 5; 6,5; 10,5$ км, при этом шири-

Рис. 5.4. Схема радиолокационной съемки:

а — принцип съемки с помощью РЛСБО: 1 — направленность облучения; 2 — полоса обзора; 3 — направление полета; *б* — структурная схема РЛСБО: 1 — антенна; 2 — генератор излучения; 3 — антенный переключатель; 4 — приемник; 5 — синхронизатор; 6 — блок развертки; 7 — ЭЛТ; 8 — фотопленка; 9 — устройство протяжки пленки; 10 — датчик скорости



на полосы обзора достигает 15 и 37,5 км. Масштаб изображения в продольном и поперечном направлении неодинаков. Разрешение РЛС БО уступает фотографическому. Характеристика некоторых типов РЛС приведена в таблице 5.2.

5.2. Характеристика различных радиолокационных средств для первого (1) и второго (2) режимов работы

Показатель	РЛСБО-Д		РСА-9		РСА-23	
	1	2	1	2	1	2
Диапазон, см	3	3	9...10	9...10	23	23
Полоса обзора, км	2 × 450	200	180	2 × 180	200	100
Разрешение, м	1000...2600	100...200	100...200	20	200	50
Угол наблюдения, град	21...46	20...50	15...50	15...50	20...50	20...50

Продольное разрешение зависит от размеров антенны и частоты используемых радиоволн. Усовершенствованные радиолокационные станции позволяют получить разрешение по полю снимка при съемке из космоса до 5 м и менее.

Преимущество радиолокационных съемок — их независимость от погодных условий. Съемку можно проводить при сплошной облачности, в туман и даже дождь, поэтому РЛС-съемку называют «всепогодной». Она незаменима в районах, где погодные условия не позволяют использовать иные съемочные системы. Современные технологии обработки снимков делают возможным использования РЛС-снимков для картографических целей. Радиолокационную съемку применяют для изучения водных поверхностей, определения границ береговых линий, овражной сети, зон подтопления, состояния посевов и т. п.

Сверхвысокочастотная радиометрия относится к пассивным методам исследования поверхности Земли. Ее выполняют с помощью СВЧ-радиометров, измеряющих собственное излучение объектов в спектральном интервале 0,15...30 см в нескольких спектральных каналах. Способы построения изображения и передачи информации на наземные пункты приема аналогичны применяемым при РЛС-съемке. Линейное разрешение СВЧ-радиометров в зависимости от типа прибора может быть от нескольких метров до десятков километров и более. Точность определения температур уступает тепловым съемочным системам. Достоинство СВЧ-съемки — формирование воспринимаемого радиометрами сигнала в глубине изучаемого объекта, т. е. получение информации о глубинных процессах. Характеристики некоторых типов СВЧ-модулей, устанавливаемых на космических аппаратах, приведены в таблице 5.3.

5.3. Характеристика различных СВЧ-модулей

Показатель	МИВЗА	МЗОАС1	МТЗА	МВЗА
Частота, Гц	22,2; 35; 94	6; 11; 19; 22,2; 35; 94	50...58	100...200
Число каналов	6	12	10...12	10...14
Полоса обзора, км	1500	1500	1500	1500
Разрешение на местности, м	100; 60	100...10	50	20...10

В практике проведения аэро- и космических съемок часто применяют комплексные съемочные системы разных типов. Это позволяет получать разноплановую информацию об исследуемых объектах. Например, комплект съемочных средств может состоять:

из цифрового аэрофотоаппарата для получения цифровых цветных или спектрально-зональных изображений;

цифровой лазерной системы, применяемой для создания модели рельефа;

тепловизионного сканера, позволяющего получать изображение подземных коммуникаций.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества кадровых телевизионных систем по сравнению с фотографическими? 2. Как строится изображение в сканирующих системах? Каковы преимущества и недостатки сканеров по сравнению с кадровыми съемочными системами? 3. В чем заключается принцип получения изображения в тепловых съемочных системах? 4. Какие достоинства имеют цифровые съемочные системы? 5. Каковы особенности получения изображений лазерными съемочными системами? 6. В чем заключается метод активной радиолокации? Какие достоинства и недостатки имеют изображения, полученные с помощью радиолокационных станций?

Глава 6

ПРОИЗВОДСТВО АЭРОФОТОСЪЕМКИ

6.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

При создании топографической основы фотограмметрическим методом используют снимки, полученные отечественными аэрофотоаппаратами типа АФА-ТЭ, АФА-ТЭС, а из зарубежных — LMK, RC-30 (Leica). В качестве основных носителей съемочной аппаратуры применяют самолеты: Ан-2, Ан-30, Ту-134СХ, Ил-20М (табл. 6.1).

6.1. Характеристика основных воздушных носителей

Показатель	Тип самолета			Вертолет Ка-26
	Ан-2	Ан-30	Ту-134	
Диапазон скоростей, км/ч	140...250	240...490	300...900	0...160
Практический потолок, м	4500	8900	11800	3100
Взлетная дистанция, м	690	1240	2180	—
Продолжительность полета, ч	7	6	5	3,5
Эксплуатационная скорость, км/ч	180...210	450...475	600...880	140
Дальность полета, км	1200	2300	2900	400

В некоторых случаях съемку проводят с вертолетов, мотодельтапланов, управляемых по радио авиамodelей и воздушных шаров. Съемку выполняют в ясную солнечную погоду, при отсутствии облаков. Комплекс аэрофотосъемочных работ состоит из нескольких этапов:

разработки технического задания (проекта), включающего технические параметры съемки: границы участка съемки, высоту и масштаб фотографирования, фокусное расстояние АФА, продольное и поперечное перекрытие снимков, тип аэрофотопленки, сроки съемки и т. д. При использовании современных технических средств производства аэрофотосъемки, таких, как навигационная система GPS и компьютерная система управления полетом и работой аэрофотоаппарата типа ASCOD, разработка задания имеет

свои особенности. Получают координаты проектируемых центров фотографирования, т. е. точек, в которых происходит открытие затвора АФА (экспонирование). Для этого на топографическую карту масштаба 1:100 000 наносят заданную границу участка (объекта) аэрофотосъемки. Затем с помощью дигитайзера определяют координаты поворотных точек границы участка съемки, которые вводят в бортовой компьютер. В компьютер также вводят масштаб аэрофотосъемки, величину продольного и поперечного перекрытия, фокусное расстояние и формат снимков. По этим данным вычисляют координаты проектируемых центров фотографирования в системе координат WGS-84;

подготовки аэрофотосъемочного оборудования, полетного задания и т. п.;

аэрофотографирования;

фотолабораторной обработки аэрофильмов (проявление, фиксирование, сушка, нумерация негативов, контактная печать аэроснимков);

составления накидного монтажа и изготовления его репродукции, оценки фотографического и фотограмметрического качества материалов аэрофотосъемки;

сдачи материалов аэрофотосъемки заказчику.

При аэрофотографировании масштаб получаемых снимков, по экономическим соображениям, мельче масштаба создаваемого плана. По масштабу фотографирования съемку разделяют на: крупномасштабную ($1:M > 1:15\,000$), среднемасштабную ($1:16\,000 < 1:M < 1:50\,000$), мелкомасштабную ($1:M < 1:51\,000$) и сверхмелкомасштабную ($1:M < 1:200\,000$).

Фотосъемку в зависимости от угла отклонения оптической оси объектива АФА от вертикали, как было рассмотрено ранее, делят на плановую и перспективную.

Плановой называют аэрофотосъемку, выполняемую при вертикальном положении оптической оси, при этом угол отклонения допускается до 3° .

Использование гиросtabilизирующих аэрофотоустановок при фотографировании местности позволяет получить снимки с углом наклона 7...10 мин (предельное значение угла 40 мин). При создании планов и карт крупного масштаба применяют снимки, полученные в результате проведения плановой аэрофотосъемки.

При *перспективной* съемке угол отклонения оптической оси от вертикали может достигать 45° . Ее выполняют для увеличения зоны захвата снимаемой местности при обзорных или рекогносцировочных работах.

При планово-перспективной съемке используют несколько аэрофотоаппаратов одновременно — одним АФА проводят плановую съемку, другими перспективную. Это позволяет фотографировать полосу местности до горизонта.

По количеству и расположению снимков различают однокад-

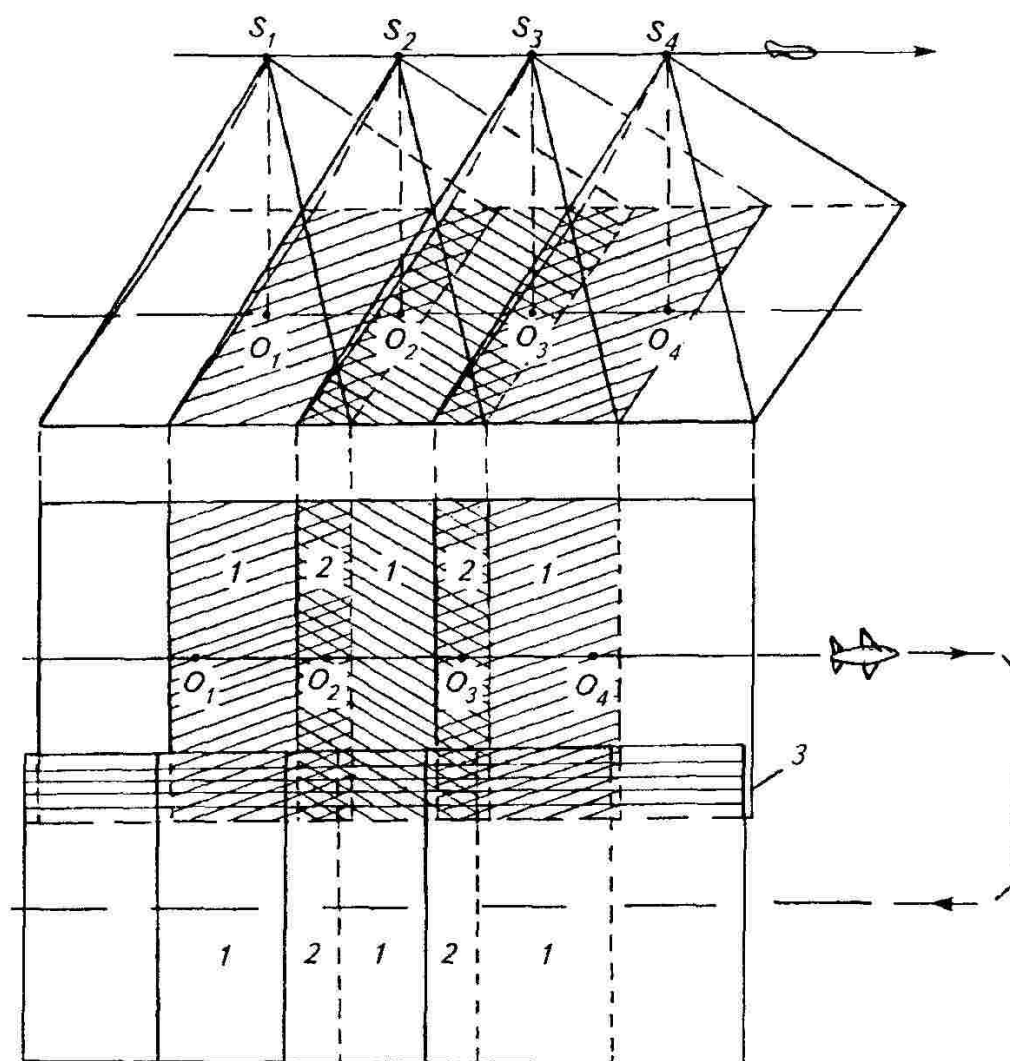


Рис. 6.1. Схема аэрофотосъемки:

1 — двойное продольное перекрытие снимков; 2 — тройное продольное перекрытие снимков;
3 — поперечное перекрытие снимков; $S_1, \dots, S_4$ — положение центров фотографирования;
 $O_1, \dots, O_4$ — их проекции на местности

ровую (одинарную), маршрутную и многомаршрутную (площадную) аэрофотосъемку.

При *однокадровой* фотосъемке получают одиночные снимки участков земной поверхности.

При *маршрутной* фотосъемке изображение полосы местности представляется в виде некоторого количества снимков, полученных по направлению (маршруту) полета летательного аппарата. Маршрут полета может быть прямолинейным, криволинейным или ломаным. Это зависит от вида фотографируемого объекта и целей съемки. Например, при обследовании или проектировании линейных объектов (дорог, трубопроводов, линий электропередачи, каналов и т. п.) съемку проводят по криволинейным или ломаным маршрутам.

Многомаршрутная (площадная) фотосъемка представляет собой получение снимков местности с нескольких параллельных маршрутов (рис. 6.1). Маршруты прокладываются чаще всего по направлениям восток—запад—восток или север—юг—север. Площадную аэрофотосъемку применяют при картографировании или обследовании больших территорий.

Одномаршрутную и многомаршрутную аэрофотосъемку, проводимую с помощью кадровых АФА, выполняют с перекрытиями соседних снимков. Перекрытиями называют части аэроснимков, на которых изображена одна и та же местность. Значения перекрытий выражают в процентах от длины стороны снимков.

Взаимное перекрытие снимков одного маршрута — это *продольное перекрытие*, рассчитываемое по формуле

$$p_x = (l_x \cdot 100 \%) / l, \quad (6.1)$$

где l_x — размер перекрывающихся частей снимка; l — длина стороны снимка по направлению маршрута.

Продольное перекрытие снимков рассчитывают или задают, исходя из технологии фотограмметрической обработки снимков (или иных соображений). Величина его может быть 60, 70, 80, 90 %. Перекрытие двух смежных снимков называют двойным (на рис. 6.1 обозначено цифрой 1). Зона перекрытия трех снимков — тройное перекрытие (на рис. 6.1 обозначено цифрой 2) и т. д. Для каждого стандартного значения продольного перекрытия определяют минимальные и максимальные пределы.

Продольное перекрытие обеспечивается частотой (временным интервалом) включения АФА, которое зависит от высоты фотографирования и путевой скорости летательного аппарата. Расстояние между соседними точками фотографирования в маршруте называют базисом фотографирования и обозначают B_x .

Поперечное перекрытие p_y — это перекрытие снимков соседних маршрутов. Поперечное перекрытие рассчитывают по формуле

$$p_y = (l_y \cdot 100 \%) / l, \quad (6.2)$$

где l_y — размер перекрывающейся части снимков двух смежных маршрутов.

Минимальное поперечное перекрытие допускается 20 %. Расстояние между маршрутами (см. рис. 6.1) рассчитывают по формуле

$$B_y = l_y m (100 \% - p_y) / 100 \%, \quad (6.3)$$

где l_y — длина поперечной стороны снимка; m — знаменатель масштаба аэрофотосъемки; p_y — заданное поперечное перекрытие.

Продольные и поперечные перекрытия позволяют определить центральную часть снимка, где его геометрические и фотометри-

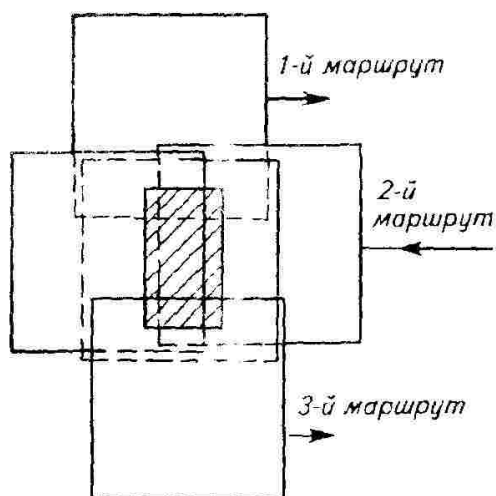


Рис. 6.2. Рабочая площадь снимка

ческие искажения минимальны. Эту часть снимка называют *рабочей площадью* снимка. Рабочую площадь снимка, ограниченную линиями, проходящими через середины двойных продольных и поперечных перекрытий, называют *теоретической* (рис. 6.2).

Размеры ее сторон b_x и b_y по соответственным осям x и y рассчитывают по формулам:

$$b_x = l(100\% - p_x)/100\%, \quad (6.4)$$

$$b_y = l(100\% - p_y)/100\%. \quad (6.5)$$

Теоретическую рабочую площадь используют при расчетах, а практическую — при выполнении фотограмметрических работ. Варианты ограничения ее рассматривают в части IV.

6.2. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Организация заключения договора на аэрофотосъемку. Аэрофотосъемочные работы выполняют как государственные предприятия (аэрофотосъемочные отряды), так и различные фирмы, имеющие лицензии на производство аэрофотосъемки. Заказчиком может быть любая организация, у которой есть разрешительные документы на работу с материалами аэрофотосъемки.

Порядок заказа аэрофотосъемки состоит из следующих основных этапов:

организация-заказчик направляет письменное предложение фирме-исполнителю, в котором указывает местоположение участка снимаемой местности (на мелкомасштабной карте наносят границы объекта съемки, его площадь, сроки съемки, тип АФА и т. п.);

заказчик составляет и согласует с исполнителем техническое задание на выполнение аэрофотосъемки, если фирма-исполнитель имеет возможности выполнить этот вид работ. В задании отмечают технические параметры съемки: назначение съемки, высота фотографирования, фокусное расстояние АФА, съемочный масштаб, тип аэрофотоаппарата, тип аэрофотопленки и светофильтра, использование специальной аппаратуры, сопровождающей аэрофотосъемку (радиовысотометров, приборов GPS или иных), тип летательного аппарата. Указывают условия проведения аэрофотосъемки: примерные сроки, высоту солнца. Подтверждают площади и местоположение участка:

в соответствии с техническим заданием исполнитель определяет стоимость комплекса аэрофотосъемочных работ, которую согласуют с заказчиком.

между заказчиком и исполнителем заключается договор на выполнение аэрофотосъемки.

После выполнения аэрофотосъемочных работ оценивают качество материалов аэрофотосъемки.

Оценку качества материалов съемки выполняют с целью выявления соответствия реально получаемых результатов требованиям технического задания и существующим нормативам, значения которых определены инструкциями и наставлениями по производству аэрофотосъемок. Оценивают фотографическое качество аэрофотоснимков и фотограмметрическое качество материалов аэрофотосъемки.

Фотографическое качество зависит от состояния атмосферы, освещения объекта съемки, технических условий проведения аэрофотографирования, фотохимической обработки. При визуальной оценке на аэрофотонегативах не должно быть обнаружено механических повреждений, изображений облаков, теней от них, бликов, ореолов. Изображение на снимках должно быть резким, с хорошей проработкой деталей в светлых и темных участках. Оптическая плотность (тон) и контрастность должны соответствовать нормативам. При визуальном способе для сравнения можно использовать снимки-эталон, т. е. снимки, фотографическое качество которых оценено высококвалифицированными специалистами-экспертами. Применение приборов позволяет более точно и объективно оценить фотографическое качество аэрофотоизображений.

Фотограмметрическое качество материалов аэрофотосъемки оценивают по следующим критериям.

1. Определение продольных и поперечных перекрытий. Величину перекрытий определяют с помощью специальной линейки, позволяющей измерять перекрытия в процентах. Если аэрофотосъемка выполнена с продольным перекрытием 60 или 80 %, то минимальное значение перекрытия допускается соответственно 56 и 78 %. Минимальное поперечное перекрытие допускается 20 %. Обычно определение перекрытий выполняют по накидному монтажу.

Накидным монтажом называют временное соединение контактных снимков, осуществляемое совмещением (наложением) их перекрывающихся частей. В результате получают непрерывное фотографическое изображение снятой территории.

Снимки укладывают и закрепляют на специальных деревянных щитах, иногда покрытых пробковым слоем. При 80 % перекрытия снимки укладывают через один, при 90 % — через два. Независимо

от величины продольного перекрытия обязательно используют крайние снимки маршрутов. Укладывают снимки так, чтобы номера снимков были видны на накидном монтаже. Снимки размещают на щите так, чтобы их номера располагались горизонтально. Номер может быть в правом верхнем углу или на южной (нижней) стороне снимка.

Первый закрепленный снимок укладывают на второй из данного маршрута так, чтобы максимально точно совместить изображения их перекрывающихся частей. Совмещают изображения способом «мельканий». Суть этого способа заключается в том, что на предыдущий снимок укладывают последующий так, чтобы изображения их перекрывающихся частей примерно совпали. Затем верхний снимок многократно в быстром темпе отгибают и прижимают к нижнему. При неточном совмещении снимков наблюдаемые изображения объекта будут перемещаться. Возникает эффект мультипликации. Для устранения перемещения положение верхнего снимка уточняют, сдвигая в нужном направлении. После закрепления второго снимка аналогично укладывают остальные снимки маршрута. Снимки второго и последующих маршрутов укладывают также способом «мельканий», добиваясь совмещения изображений как в зонах продольных, так и поперечных перекрытий. При 30%-м поперечном перекрытии монтируют все маршруты, при 60%-м — через маршрут. При значительной территории съемочного участка составляют несколько накидных монтажей, каждый из которых, как правило, покрывает четыре смежных трапеции.

2. Непрямолинейность аэрофотосъемочного маршрута начинают с определения главных точек крайних снимков маршрута. За главные точки принимают пересечение линий, соединяющих противоположные координатные метки. Затем соединяют прямой линией и измеряют расстояние L между ними (рис. 6.3).

После этого измеряют уклонение l от этой прямой главной точки наиболее удаленного снимка. Это уклонение называют стрелкой прогиба маршрута. Отношение стрелки прогиба к длине маршрута, выраженное в процентах, есть прямолинейность

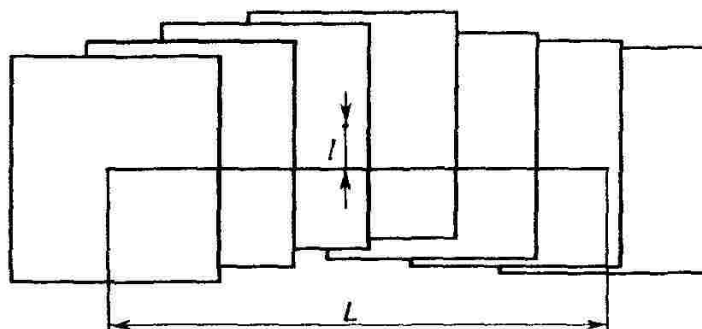


Рис. 6.3. Схема определения прямолинейности маршрута съемки

маршрута:

$$n = l \cdot 100 \% / L. \quad (6.6)$$

Непрямолинейность маршрута не должна превышать 2 % при высоте фотографирования H более 750 м и в масштабе съемки 1:М мельче 1:5000 и не более 3 %, если $H < 750$ м и 1:М крупнее 1:5000.

3. Разворот снимка относительно направления маршрута «елочка» ϵ можно определять двумя способами: первый — путем измерения угла ϵ между линией xx , соединяющей координатные метки снимка, и базисом фотографирования (рис. 6.4); второй — измерение угла между осью маршрута и поперечной стороной снимка. Допустимые углы «елочки» при фокусных расстояниях 100, 140, 200, 350 и 500 мм соответственно равны 5, 7, 10, 12 и 14°.

4. Углы наклона снимков можно определять по изображению круглого уровня в одном из углов снимка. Если на снимках нет изображений уровней, то углы наклона определяют фотограмметрическим способом. Как уже отмечалось, при плановой съемке углы наклона не должны превышать 3°.

После завершения работ по оценке качества материалов аэрофотосъемки выдают заключение о ее соответствии требованиям инструкции и техническому заданию. В случае несоответствия требованиям выполняют повторную (сплошную или выборочную) аэрофотосъемку.

5. Фактическую высоту фотографирования H над средней плоскостью съемочного участка определяют по измеренным базисам на накидном монтаже и топографической карте по формуле

$$H = fd_k M / d_{\text{нм}}, \quad (6.7)$$

где d_k — базис на карте; M — знаменатель масштаба карты; $d_{\text{нм}}$ — базис на накидном монтаже.

При аэрофотосъемке равнинной местности базисы выбирают по диагоналям накидного монтажа. Концами базисов служат дос-

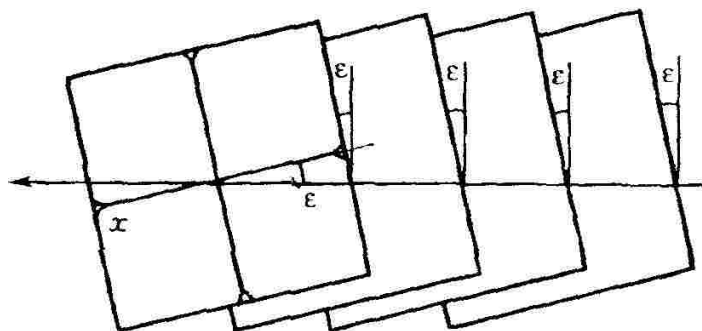


Рис. 6.4. Схема определения разворота снимка относительно направления маршрута съемки («елочки»)

товерно опознаваемые точки на накидном монтаже и соответственные им на карте. При съемке местности со значительным рельефом базисы выбирают в пределах одного маршрута.

Отклонение фактической высоты от заданной вычисляют в процентах. Допустимое отклонение не должно превышать 3...5 %.

6. Обеспеченность границ участка (объекта) съемки и проверка наличия аэрофотоснимков, покрывающих всю территорию в пределах границ участка съемки. Контроль выполняют по накидным монтажам всего участка или отдельных маршрутов. Для этого на аэрофотоснимках опознают поворотные точки границ участка съемки и сравнивают с обозначенными проектными границами на топографической карте. С накидных монтажей участков, где аэрофотосъемка не завершена (имеются пропуски), делают репродукции, на которых сверху подписывают — «участок не завершен».

После оценки качества материалов аэрофотосъемки изготавливают репродукции накидного монтажа. Репродукция накидного монтажа — это его уменьшенная в два—четыре раза копия. Репродукцию изготавливают чаще традиционным фотографическим способом. Для этого с помощью специальных репродукционных фотокамер получают негативы репродукций, а затем осуществляют фотопечать их позитивного изображения. Перед фотографированием на накидном монтаже прикрепляют надписи с указанием года выполнения и масштаба аэрофотосъемки, номенклатуры трапеции, шифра объекта и масштаба будущей репродукции. В компьютерных технологиях обработки снимков составляют накидной монтаж программными средствами аналогично рассмотренной технологии. Оператор на мониторе анализирует качество выполненной аэрофотосъемки. С помощью принтера или плоттера на печать выводится репродукция (копия) накидного монтажа. С помощью репродукции легче пользоваться большим числом аэрофотоснимков: выбрать необходимый в данный момент снимок, составить проект геодезической привязки снимков и т. п.

После производства аэрофотосъемки заказчику сдают:

- аэрофильмы (аэрофотонегативы) в неразрезанном виде, на катушках, упакованные в плотно закрытые металлические банки;
- контактные отпечатки с аэронегативов;
- негативы репродукций накидных монтажей;
- репродукции накидных монтажей;
- топографические карты с проектными и фактическими осями маршрутов аэрофотосъемки;
- журналы регистрации аэронегативов и негативов репродукций накидных монтажей;
- данные показаний радиовысотомера или приборов GPS;
- контрольные негативы прикладной рамки аэрофотоаппарата;

характеристики АФА: фокусное расстояние, значение дисторсии по осям и зонам, координаты главной точки, расстояние между координатными метками;

паспорт аэрофотосъемки и другие материалы и сведения, предусмотренные договором.

6.3. ОСОБЫЕ УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Аэрофотосъемку городов и крупных поселений городского типа выполняют с учетом некоторых особенностей организации полетов и технических требований к получаемым изображениям фотографируемых территорий.

Важный этап подготовки проведения летно-съемочных работ — согласование режима полетов над территорией города. При этом утверждают сроки, время суток и минимально допустимую высоту аэрофотографирования, воздушные коридоры подлета к участку съемки, типы аэросъемочных летательных аппаратов.

Технические параметры и условия проведения аэрофотосъемки определяются спецификой городского ландшафта. Это прежде всего значительная плотность высотных объектов (зданий и сооружений), которые при съемке кадровыми АФА закрывают определенные участки местности, так называемые «мертвые зоны». Помимо «мертвых зон» высотные объекты создают тени, длина которых пропорциональна их высотам и обратно пропорциональна высоте солнца. Участки местности, находящиеся в «мертвых зонах» и закрытые тенью, в большинстве случаев становятся недоступными для изучения по аэрофотоснимкам. Кроме того, на снимках недостаточно полно отображаются линии электропередачи, связи, колодцы теплосетей, водопроводов и других коммуникаций.

Особенности городского ландшафта предъявляют специальные требования к проведению аэрофотосъемки:

для уменьшения «мертвых зон» аэрофотосъемку проводят с продольным перекрытием снимков $p_x = 80\%$ и поперечным перекрытием $p_y = 40...60\%$ и более;

если аэрофотоснимки в дальнейшем будут использовать для получения только плановых координат (X, Y) точек местности (например, при инвентаризации земель), то применяют аэрофотоаппараты с длиннофокусным объективом высокой разрешающей способности;

для улучшения изобразительных свойств аэроснимков применяют аэрофото пленки с высокой разрешающей способностью и большой фотографической широтой;

фотохимическую обработку экспонированной аэрофотопленки проводят в мелкозернистом проявителе. Для проработки изображений деталей объекта в тенях коэффициент контрастности проявленного изображения должен быть равен $1,0 \pm 0,2$;

для уменьшения влияния теней от высотных объектов съемку проводят при максимально возможных высотах солнца. Если позволяют погодные условия, выполняют так называемую съемку «под зонтиком» — летательный аппарат находится ниже сплошной высокой облачности. При этом объект съемки освещается только рассеянной радиацией и поэтому теней практически не образуется.

Контрольные вопросы и задания

1. Как подразделяют аэрофотосъемку? 2. Какие критерии определяют фотограмметрическое качество материалов аэрофотосъемки? 3. По каким параметрам оценивают фотографическое качество аэрофотоснимков? 4. Каковы особенности проведения аэрофотосъемки застроенных территорий? В чем преимущества съемки «под зонтиком»? 5. Как организуют заказ на аэрофотосъемку? 6. Какие материалы получает заказчик от исполнителя аэрофотосъемочных работ?

Глава 7

ПОНЯТИЕ О КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ ЗЕМЛИ

7.1. УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Условия получения космических снимков существенно влияют на их геометрические и изобразительные свойства. Это, в свою очередь, определяет методологию и технологию фотограмметрической обработки снимков и интерпретацию изображений.

Основные отличительные особенности получения космических снимков:

большая скорость и сложность траектории движения космического летательного аппарата (КЛА) относительно земной поверхности;

значительная высота съемки (высота полета КЛА), исчисляемая сотнями и тысячами километров над земной поверхностью;

влияние всего слоя атмосферы на геометрическое и энергетическое искажение отраженного или собственного излучения объектами земной поверхности, поступающего на вход съемочных систем.

Рассмотрим условия получения космических снимков.

Космическую съемку поверхности Земли проводят с пилотируемых космических аппаратов, орбитальных станций и беспилотных искусственных спутников Земли. Съемку могут выполнять космонавты в так называемом ручном режиме или автоматически по заданной программе.

Двигается КЛА по сложной траектории, называемой орбитой. При съемке поверхности Земли используют эллиптические, параболические и гиперболические орбиты.

При движении КЛА по *эллиптической орбите* Земля находится в одном из фокусов эллипса. Точка орбиты, расположенная ближе к центру Земли, называется перицентром (перигеем), а наиболее удаленная — апоцентром (апогеем).

Параболические или *гиперболические* орбиты соответствуют траектории движения КЛА по параболе или гиперболе.

При съемке Земли или иных планет возможны варианты получения изображения: при подлете, отлете или при прохождении мимо планеты КЛА.

Существенный недостаток съемок с КЛА, находящихся на перечисленных орбитах, — изменение удаленности съемочной системы от снимаемой поверхности. Пропорционально изменению высоты съемки изменяется масштаб получаемых снимков.

Съемку можно выполнять со спутников Земли, находящихся на *геостационарных орбитах*. При этом варианте съемки положение спутника относительно поверхности не изменяется, так как его угловая скорость движения равна угловой скорости движения земной поверхности. При съемке с геостационарных спутников получают информацию об одной территории практически в любое время. Результаты съемки можно использовать для мониторинга этой территории с различным временным интервалом.

Наиболее приемлемыми с точки зрения фотограмметрических преобразований являются *круговые орбиты* КЛА. Круговые орбиты представляют собой окружности с центром, совпадающим с центром Земли (рис. 7.1). Радиус таких орбит r определяют как сумму радиуса Земли r_0 и высоты полета H летательного аппарата. Средний масштаб снимков при съемке с круговых орбит практически одинаков. Полосы снимаемой поверхности (полосы обзора), захватываемые с каждого витка летательного аппарата, также примерно одинаковы.

Плоскость орбиты КЛА пересекает плоскость экватора под некоторым углом i , который называют *наклоном орбиты* (см. рис. 7.1). Если наклонение орбиты равно 90° , то ее плоскость проходит через полюсы Земли. Такая орбита носит название *полярной*. При наклонении, равном 0° , плоскость

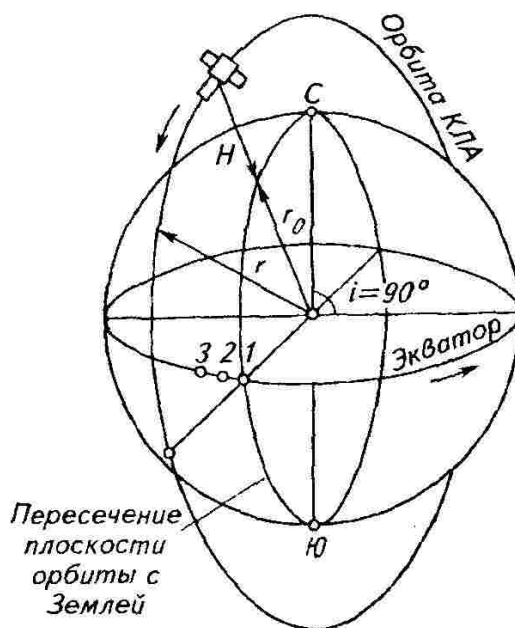


Рис. 7.1. Некоторые элементы круговой орбиты

орбиты КЛА совпадает с экватором, поэтому ее называют экваториальной. Использование полярной и близполярной орбиты обеспечивает выполнение съемки всей поверхности за счет вращения Земли вокруг своей оси. При уменьшении наклона орбиты сокращается территория, захватываемая съемочной аппаратурой. Периодичность (частота) съемки одной и той же территории в зависимости от параметров полета КЛА может быть от 4 раз в сутки до 5...6 раз в месяц и реже. Регулярная повторяемость съемки позволяет применять получаемые материалы для обновления мелко-масштабных топографических и специальных карт, а также осуществлять мониторинг больших территорий.

От параметров полета зависит время возвращения летательного аппарата в заданную точку. Это связано с тем, что при наклоне орбиты, не равном нулю ($i > 0$), а также из-за вращения Земли точка пересечения орбиты КЛА с экватором смещается. Если на данном витке КЛА прошел над точкой 1 экватора (см. рис. 7.1), то после оборота вокруг Земли он пройдет уже над точкой 2 экватора, затем над точкой 3 и так далее. Время возврата КЛА в исходную (или заданную) точку над поверхностью Земли в зависимости от параметров полета составляет 1...30 сут и более. Положение КЛА, а следовательно, положение съемочной аппаратуры в пространстве определяют в географических координатах.

Высота полета КЛА при круговых орбитах находится в пределах от 200 до 1000 км.

В зависимости от фокусного расстояния используемой съемочной системы и высоты полета КЛА снимки получают в масштабе от 100 000 до 10 000 000.

Один из главных факторов, влияющих на качество изображений, как уже отмечалось, — огромная скорость движения КЛА, приводящая к фотографическому смазу.

7.2. ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ФОТОСЪЕМКИ

Технические средства получения космических снимков аналогичны фотографическим системам, применяемым при аэрофотосъемке. Существуют топографические фотокамеры и дешифровочные.

Формат космических снимков различен — от размера 70×90 мм до 30×30 см и более. Например, снимок, полученный панорамной камерой высокого разрешения КВР-1000, имеет формат 190×700 мм. При одинаковых параметрах съемки (f , H , p_x , p_y) использование снимков с большим форматом имеет преимущества: во-первых, позволяет увеличить площадь захвата на поверхности Земли, во-вторых, при фотограмметрической обработке повышается точность определения высот точек местности.

Как уже рассматривалось в разделе 7.1, при съемке с КЛА, движущихся по эллиптическим орбитам, изменяется высота фотографирования. Вследствие этого средние масштабы смежных снимков имеют значительные различия.

В связи с изменением высот фотографирования при постоянной скорости движения КЛА возникает необходимость изменять интервал времени между моментами съемки. Это необходимо для обеспечения постоянного заданного значения продольного перекрытия снимков. Интервал фотографирования меняют с помощью специального автоматического устройства, входящего в комплект космического фотоаппарата.

При космическом фотографировании поперечное перекрытие снимков обеспечивается тремя приемами. В первом случае за счет вращения Земли: при этом снимки, получаемые с последующего витка, перекрываются со снимками предыдущего витка (виток аналогичен маршруту при аэрофотосъемке). Если съемка выполняется при движении КЛА по полярной или близполярной орбите, поперечное перекрытие снимков будет непостоянным. Вблизи экватора перекрытие будет минимальным, в районе полюсов — максимальным. Чтобы поперечное перекрытие находилось в заданных пределах, необходимо согласование скорости обращения КЛА со скоростью вращения Земли.

Во втором случае перекрытие снимаемой полосы осуществляется поперечным наклоном (креном) летательного аппарата. Угол крена должен обеспечить заданное поперечное перекрытие снимков.

В третьем случае продольное перекрытие снимков обеспечивается разворотом КЛА, при котором выполняется наклон главной оптической оси съемочной системы «вперед» по направлению полета — предыдущий снимок и «назад» — последующий снимок (рис. 7.2).

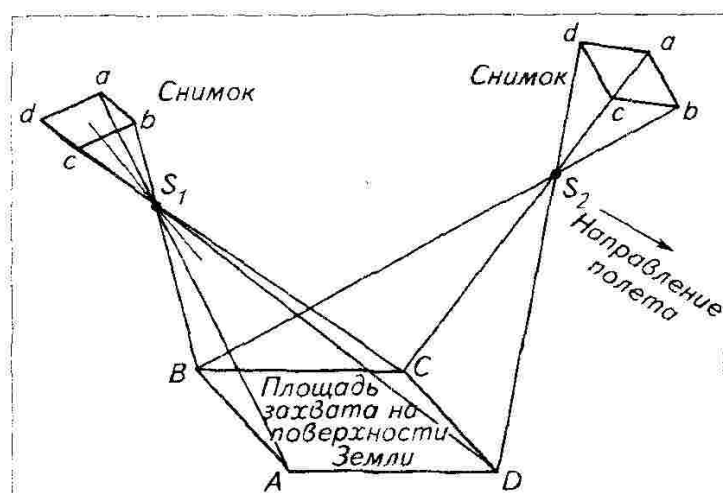


Рис. 7.2. Схема съемки с разворотом КЛА

Существенное отличие космической съемки, как уже отмечалось, — изображение на одном снимке территории площадью в несколько тысяч квадратных километров. При этом на геометрии построения плоского изображения сказывается кривизна Земли. Точки земной сферической поверхности проецируются по законам центральной проекции на плоскость, в которой находится фотопленка. За счет этого на краях снимка масштаб изображения мельче по сравнению с его центральной частью.

При съемке с круговых орбит фотосъемку выполняют таким образом, чтобы оптическая ось фотокамеры была направлена по направлению нормали к поверхности Земли. Это частный случай конвергентной съемки. При этом взаимный угол, образованный оптическими осями двух смежных снимков стереопары, не превышает нескольких градусов.

7.3. КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

На рубеже XX века в нашей стране, наряду с государственными программами запуска космических летательных аппаратов и выполнения космических съемок, появились коммерческие космические программы. Первый коммерческий спутник был запущен российской ракетой-носителем с космодрома на Дальнем Востоке в январе 1997 г. Крупнейшие авиационные и космические компании участвуют в осуществлении собственных программ. Образовался рынок фотографических и цифровых изображений. Потребитель в соответствии с решаемой задачей, из публикаций или по Интернету выбирает из предлагаемых каталогов наиболее приемлемые для него материалы съемок. На околоземных орбитах находятся несколько десятков космических летательных аппаратов с различными съемочными системами на борту. Получаемая при этом разноплановая информация — изображения или результаты измерений определенных характеристик объектов на поверхности Земли или атмосферы — передается на пункты приема тех стран или коммерческих структур, по заказу которых осуществляют данную съемку. Космические летательные аппараты отличаются параметрами полета, а съемочные системы имеют различные характеристики (см. главу 1). Наземные комплексы приема и первичной обработки космической информации находятся в различных городах страны.

Наиболее известные и используемые в мире данные получают с зарубежных космических аппаратов NOAA, LANDSAT, SPOT, IRS, RADARSAT, ERS (табл. 7.1).

Высокие изобразительные и метрические качества имеют фотографические снимки, полученные с отечественного спутника «Комета» камерами специального назначения КВР-1000 и топографической ТК-350. Среди российских пользователей для изучения природных ресурсов используют снимки со спутников типа

«Метеор», «Ресурс-Ф», «Ресурс-О», «Океан», съемочные системы «Фрагмент», МСУ-Э, МСУ-СК (табл. 7.2). Съемка с периодически запускаемых на орбиты спутников позволила создать архивы изображений на различные районы земной поверхности, что дает возможность осуществлять мониторинг территорий и отдельных объектов и явлений.

Серия спутников LANDSAT (США) функционирует с начала семидесятых годов XX века. Съемку проводят с высоты орбиты 900 км. На спутниках используются многозональные съемочные системы типа MSS с линейным разрешением на местности 55×80 м. THEMATIC MAPPER имеет линейное разрешение в видимой области спектра (канал PAN — панхроматический) 15 м и при многозональной съемке (MSI) — 30 м.

В целях мониторинга кадастровой информации и создания картографической продукции масштабов $1:M = 1:5000...1:10\,000$ могут быть использованы космические съемочные системы высокого разрешения. Например, космические изображения земной поверхности, получаемые со спутников IKONOS и QUICK BIRD (США). Они имеют соответственно разрешение на местности 0,61 м и 1 м. Точность фотограмметрического определения координат точек по снимкам спутника QUICK BIRD, снятых в панхроматической зоне (0,45...0,95 мкм) и с использованием опорных точек, составляет 2 м, без опорных точек — 23 м.

Французская съемочная система SPOT IMAGE, установленная на спутниках типа SPOT, имеет четыре спектральных канала (4-й канал соответствует 1,55...1,75 мкм). Линейное разрешение при панхроматической съемке равно 5...10 м, а при многозональной — 20 м. Важное преимущество данной системы — возможность получения снимков с перекрытием (получение стереопар), что позволяет проводить стереофотограмметрическую обработку снимков. Снимок захватывает участок на земной поверхности размером примерно 60×60 км.

Индийские спутники последнего поколения (IRS-1C, IRS-1D) оснащены съемочными системами, работающими в четырех спектральных каналах. Панхроматические снимки получают с разрешением 5...6 м, а зональные — 23 м и более.

Разработка компактных радиолокационных съемочных систем с малым потреблением энергии позволила использовать их при космических съемках. Радарные изображения, получаемые, например, с канадского спутника RADARSAT или европейского ERS, имеют разрешение 25 м. Современные методы радиолокации позволяют получать изображения с разрешением на местности до 5 м и менее. Изменяя ориентацию спутника в полете на соседних орбитах, можно производить стереорадиолокационную съемку. Существующие компьютерные программы позволяют выполнять фотограмметрическую обработку радарных снимков. При этом учитывается специфическая геометрия радиолокаци-

онных изображений, производится построение цифровых моделей рельефа как по стереопаре, так и с использованием методов радарной интерферометрии (определение геометрических параметров объектов на основе интерференции отраженных от них радиоволн).

Фотографические снимки, полученные со спутника «Комета» кадровыми камерами КВР-1000 (фокусное расстояние $f=1000$ мм), имеют разрешение 2 м. Топографическая камера ТК-350, установленная на спутнике «Комета», позволяет производить съемку с перекрытиями. Разрешение изображения данных снимков — 10 м. Результаты стереофотограмметрической обработки снимков используют для создания и обновления мелкомасштабных планов и карт. Спутники «Комета» запускают на срок до 1 мес.

Широко используют фотографические изображения, получаемые со спутников серии «Ресурс-Ф», оснащенные фотографическими камерами КФА-1000, КФА-3000, КАТЭ-200 и четырехканальным фотоаппаратом МК-4.

На территории страны имеется большое число региональных пунктов приема космических изображений, получаемых со спутника «Ресурс-О». На спутнике установлены многозональные сканеры МСУ-Э с разрешением 45 м и МСУ-СК с разрешением 150 м. Благодаря свободному доступу снимки широко используют в отечественных организациях, занимающихся исследованиями природных ресурсов.

Таблица 7.1. Основные технические характеристики зарубежных космических съемочных систем

Объект	Вид съемки	Полоса захвата, км	Разрешение, м	Масштаб применения
Landsat-7	Панхром Многозональная (6 каналов)	183...183	15; 30...60	1:100000
ASTER	Панхром Многозональная (14 каналов)	60...60	15; 30...90	1:100000
Ikonos-2	Панхром Многозональная (3 канала)	11...120	1; 4	1:5000
Quick Bird-2	Панхром Многозональная (4 канала)	16,5...16,5; 31,5...31,5	0,61; 2,88	1:5000
SPOT-4	Панхром Многозональная (3 канала)	60...60	10; 20	1:25000
SPOT-5	Панхром Многозональная (3 канала)	60...60	2,5; 5	1:10000
IRS-1C	Панхром Многозональная (3 канала)	70...70	5,8; 23	1:25000
RadarSat-1	Радиолокационное изображение	50...500	9...100	1:25000

7.2. Основные характеристики материалов фотографических съемок, получаемых с российских космических летательных аппаратов

Характеристика	«Ресурс-Ф1»		«Ресурс-Ф1М»		«Ресурс-Ф2»	«Ресурс-Ф3»	«Комета»	
Высота съемки, км	80...400		180...400		200...450	180...400	200...280	
Наклонение орбиты, град	82,3 (82,6)		82,3 (82,6)		82,3 (82,6)	82,3 (82,6)	65 (71)	
Аппарат	КФА-1000 (2 камеры)	КАТЭ-200 (3 камеры)	КФА-1000 (3 камеры)	КФА-200 (1 камера)	МК-4	КФА-3000 (2 камеры)	ТК-350	КВР-1000
Полоса захвата камерой, км:								
одной	0,3 × Н	0,9 × Н	0,3 × Н	180 × 180	300 × 300	0,1 × Н	0,86 × Н	0,75 × Н
всеми	0,58 × Н	0,9 × Н	0,88 × Н			0,2 × Н	—	—
Фокусное расстояние, мм	1000	200	1000	500...600 600...700 700...900	570...760 560...810	3000	350	1000
Размер кадра, мм	300 × 300	—	—	180 × 180	180 × 180	300 × 300	300 × 450	180 × 720
Спектральные зоны, нм:								
для ч/б каналов	570...760	—	—	570...760	460...505 515...565 635...690 810...900	580...720	580...720	580...720
для СПЗ съемки	560...810	—	—	—	580...800	—	—	—
Разрешение на местности, м:								
ч/б каналы	3,5...6	20...30	3...6	15...20	6...12	2...3	8...12	2...3
СПЗ каналы	4,5...8	—	4...7	—	12...15	—	—	3...4

Существуют многолетние космические проекты исследования земной поверхности, разрабатывают и реализуют новые. Информацию о них и процедуре заказа снимков можно узнать через Интернет.

Для широкого пользования разработаны и применяют станции приема и обработки изображений (низкого и среднего разрешения) земной поверхности. Аппаратно-программные комплексы включают: персональные компьютеры, антенную систему, устройство сопряжения антенной системы с компьютером и программное обеспечение. С помощью параболической антенны, установленной на поворотном устройстве, принимают передаваемые со спутника изображения. Программные средства обеспечивают слежение за спутником, автоматический прием данных, их визуализацию.

зацию, просмотр и оценку. Визуализация изображения производится в черно-белом или цветном варианте, осуществляется синтезирование зональных снимков. Проводится географическая привязка всего снимка или его фрагмента, а также программными средствами рассчитываются географические координаты для каждого пикселя изображения. Выполняется фотограмметрическое преобразование изображений, составляются накладки. Программные средства позволяют выполнить тематическую обработку изображений и представить результаты обработки в картографическом виде.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие факторы проведения космических съемок определяют особые геометрические и изобразительные свойства получаемых снимков? 2. По каким орбитам движется КЛА при проведении съемок? В чем преимущества каждой из них? 3. В чем заключаются отличия производства космических съемок от аэро-съемок?

Часть II

ПЕРВИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ЗЕМЕЛЬНОМ И ГОРОДСКОМ КАДАСТРЕ



Под первичными информационными моделями в фотограмметрии и дистанционном зондировании понимают начальные результаты аэро- и космических съемок (снимки) в любой записи.

Для решения инженерных задач организации территорий, формирования банка земельно-кадастровой информации используются крупномасштабные планы, созданные по законам ортогонального проецирования. Эти планы в настоящее время составляются в результате фотограмметрической обработки снимков, полученных с помощью кадровых АФА. Изображение на снимках строится по законам центрального проецирования. Результаты этих видов проецирования будут одинаковыми при аэрофотосъемке равнинной местности и отвесном положении оптической оси объектива АФА.

В данной части дается анализ влияния угла наклона АФА, рельефа местности и других факторов на метрические свойства снимков. Даются рекомендации по выбору основных параметров аэрофотосъемки для получения снимков с заданными метрическими свойствами, позволяющими решать некоторые локальные задачи непосредственно по снимку.

К первичным информационным моделям относятся также фотосхемы. Масштаб исходных снимков при использовании прецензионных АФА значительно мельче масштаба изготавливаемых планов (до 10 и более крат). Но непрерывное изображение обширных пространств, составленное из рабочих площадей исходных снимков, — фотосхема предоставляет возможность пользователю анализировать одновременно общие закономерности и особенности ландшафта и решать многие задачи семантического характера, относящиеся к сфере дистанционного зондирования.

Глава 8

ОДИНОЧНЫЙ СНИМОК

8.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ

При картографировании земной поверхности используют различные законы построения изображения этой поверхности в масштабе — картографические проекции. Задачи организации территорий, земельного и городского кадастра, инженерных изысканий удобнее решать по планам, созданным по законам ортогонального проецирования, — точки элементов ситуации при этом проецируют на горизонтальную плоскость отвесными линиями с одновременным масштабированием результатов.

На снимках, полученных с помощью кадровых съемочных систем, изображение, как отмечалось ранее, строится по законам центрального проецирования. Проектирующие лучи здесь представляют собой пучок линий, проходящих через единую точку — центр проекции.

Основные элементы центральной проекции (рис. 8.1) следующие:

S — центр проекции, в фотограмметрии — задняя узловая точка объектива съемочной камеры;

P' — картинная плоскость (негативная) — фокальная плоскость объектива съемочной камеры;

P — картинная плоскость позитивная;

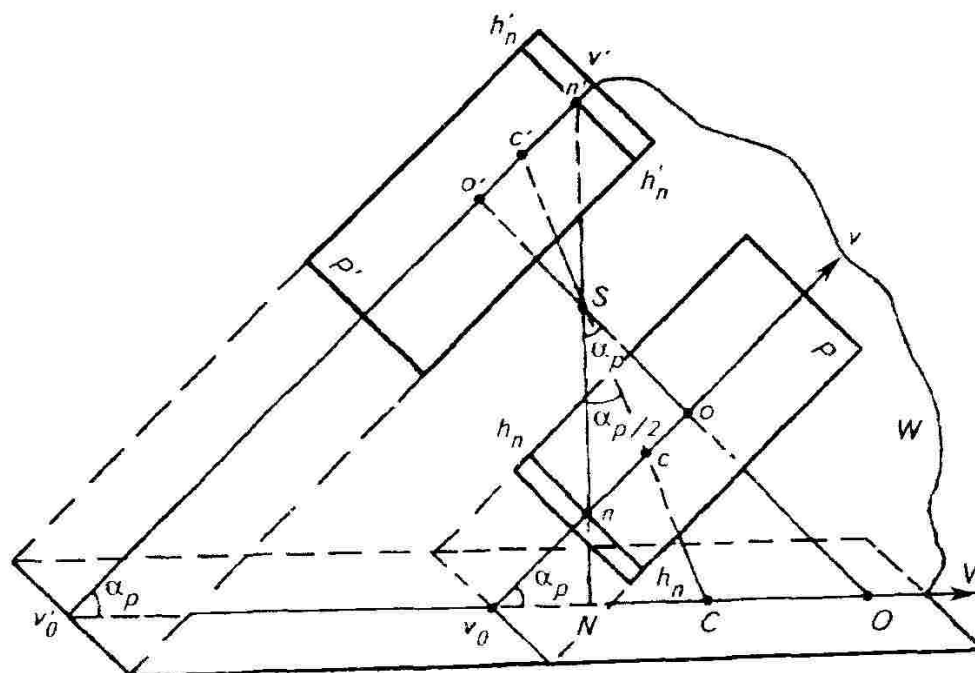


Рис. 8.1. Основные элементы центральной проекции

E — предметная плоскость — горизонтальная секущая плоскость снимаемого участка местности;

$o(o')$ — главная точка картины — главная точка снимка, получаемая при пересечении главного луча (оптической оси) объектива съемочной камеры S_0 с плоскостью картины;

W — плоскость главного вертикала, проходящая через точку S перпендикулярно плоскостям $P(P')$ и E ;

$v_0v(v'_0v')$ — главная вертикаль — след пересечения плоскостей $P(P')$ и W ;

v_0V — проекция главной вертикали;

$n(n')$ — точка надира — точка пересечения плоскости $P(P')$ с отвесным лучом;

N — проекция точки надира — точка пересечения плоскости E отвесным лучом, проходящим через точку S ;

α_P — угол наклона картины (снимка) — угол между плоскостями $P(P')$ и E или лучами SO и SN ;

$c(c')$ — точка нулевых искажений — точка пересечения плоскости $P(P')$ биссектрисой угла α_P ;

C — проекция точки нулевых искажений;

$h_nh_n(h'_nh'_n)$ — горизонталь, проходящая через точку $n(n')$, — линия в плоскости $P(P')$, перпендикулярная $v_0v(v'_0v')$.

Горизонтали могут проходить через любую точку картины, например через точку o — h_oh_o или точку c — h_ch_c . В одной из систем координат снимка главную вертикаль v_0v принимают за ось абсцисс, а любую из горизонталей — за ось ординат.

Точки o , n , c располагаются на главной вертикали, а точки O , C , N — на ее проекции. Отстояния точек n и c от точки o определяют по формулам:

$$on = f \operatorname{tg} \alpha_P \text{ и } oc = f \operatorname{tg} \alpha_P / 2. \quad (8.1)$$

Эти точки, в общем случае, близки друг к другу. Например, на плановых снимках при $\alpha_P = 2^\circ$ и $f = 100$ мм $on = 3,5$ мм и $oc = 1,8$ мм, а на снимках, полученных с использованием гиросtabilизированной АФУ, при $\alpha_P = 20'$ $on = 0,6$ мм и $oc = 0,3$ мм. Это положение неоднократно будем использовать в дальнейшем при анализе метрических свойств снимков и описании технологии их применения.

Расстояние oS — главное расстояние, и обозначают его буквой f . В фотограмметрии этот отрезок называется фокусным расстоянием съемочной камеры. Расстояние $SH = H$ называют высотой съемки.

8.2. СМЕЩЕНИЕ ТОЧЕК СНИМКА ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ ЕГО НАКЛОНА

На снимке равнинной местности (рис. 8.2, плоскость E), полученном при отвесном положении оптической оси съемочной камеры, элементы ситуации изобразятся без искажений. Сетка квад-

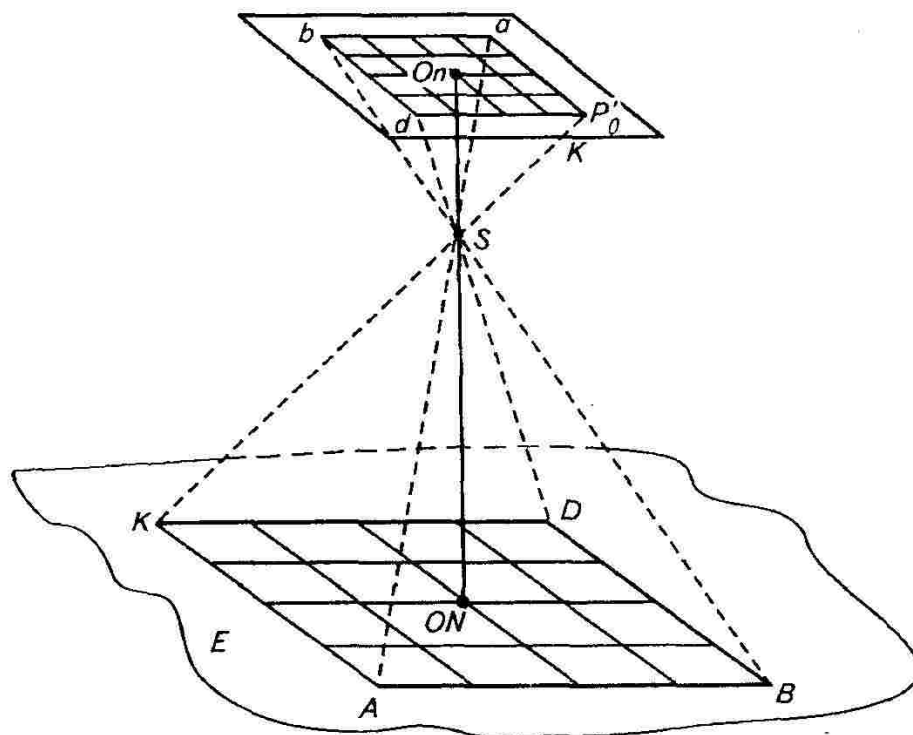


Рис. 8.2. Горизонтальный снимок равнинной местности

ратов на местности, например, изобразится на снимке P_0 подобной сеткой в масштабе

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}.$$

Наклон камеры на некоторый угол α_P нарушит подобие — изображение сетки квадратов перспективно преобразуется (рис. 8.3). Рассмотрим суть такого преобразования. На рисунке 8.4 показаны: в позитивном варианте горизонтальный снимок P_0 и наклонный снимок P , а также равнинная местность E в сечении их плоскостью главного вертикала. Снимки P_0 и P пересекутся по горизонтали $h_c h_c$, так как $oS = o_0 S = f$. В прямоугольных треугольниках So_0c и So_c общая гипотенуза и равные катеты; следовательно, эти треугольники равны; поэтому Sc — биссектриса угла α_P , а точка c лежит на $h_c h_c$.

Произвольно выбранные на снимке точки a и b изобразятся на снимке P_0 точками a_0 и b_0 . Приняв за начало отсчетов общую для обоих снимков точку c , отложим на снимке P_0 отрезки $ca' = ca$ и $cb' = cb$. В результате получим размеры смещения изображения точек A и B соответственно $a_0 a' = +\delta_\alpha$ и $b_0 b' = -\delta_\alpha$.

Значение δ_α для точек, расположенных не на главной вертикали, будет зависеть также от угла ϕ , отсчитываемого от положительного направления главной вертикали до направления, исходящего

Рис. 8.3. Наклонный снимок
равнинной местности

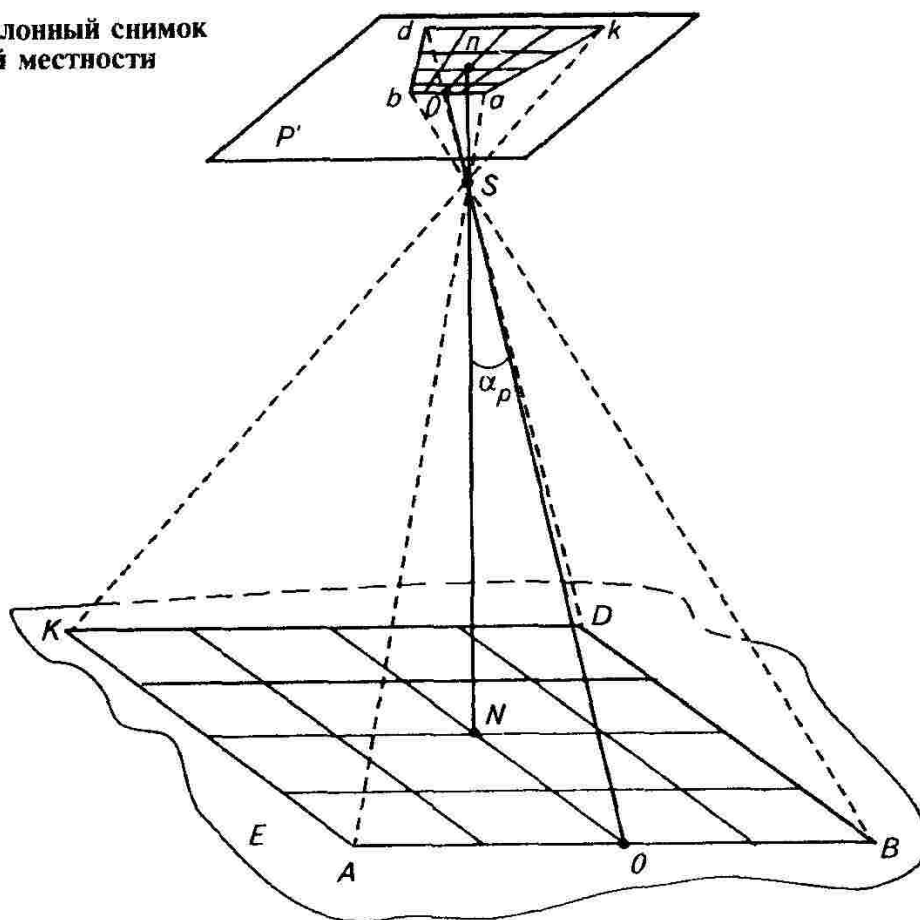
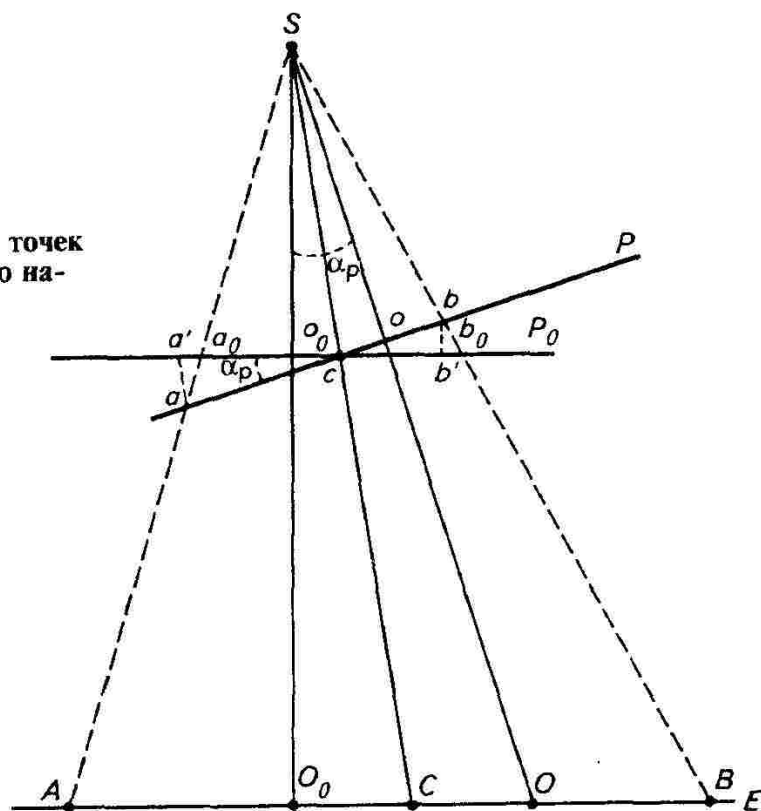


Рис. 8.4. Смещение точек
снимка вследствие его на-
клона



из точки c на анализируемую точку, например на точку a (рис. 8.5), против хода часовой стрелки.

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c^2 \cos \varphi \sin \alpha_P}{f - r_c \cos \varphi \sin \alpha_P}, \quad (8.2)$$

где r_c — расстояние определяемой точки снимка от точки нулевых искажений.

Анализ формулы (8.2) показывает:

смещения δ_α возрастают при увеличении угла α_P и уменьшении фокусного расстояния съемочной камеры;

точки, расположенные на горизонтали $h_c h_c$, не смещаются;

максимальные смещения точек при определенном значении r_c будут в точках, располагающихся на главной вертикали ($\cos \varphi = \pm 1$);

точки, расположенные от горизонтали $h_c h_c$ в сторону положительных абсцисс, смещаются к точке c , а в сторону отрицательных абсцисс — от точки c (на рис. 8.6 a_0, b_0, d_0, e_0 — положение точек на горизонтальном снимке).

При использовании снимков плановой съемки ($\alpha < 3^\circ$) можно применять упрощенные формулы:

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c^2 \cos \varphi \sin \alpha_P}{f} \quad \text{или} \quad \delta_\alpha = -\frac{r_c x_c \sin \alpha_P}{f}, \quad (8.3)$$

так как выражение $r_c \cos \varphi \sin \alpha_P$ имеет существенно меньшее значение в сравнении с величиной f . В формуле (8.3) $r_c \cos \varphi$ выражены через x_c — абсциссу точки в системе координат $v_0 v$ — ось x , $h_c h_c$ — ось y (см. рис. 8.5).

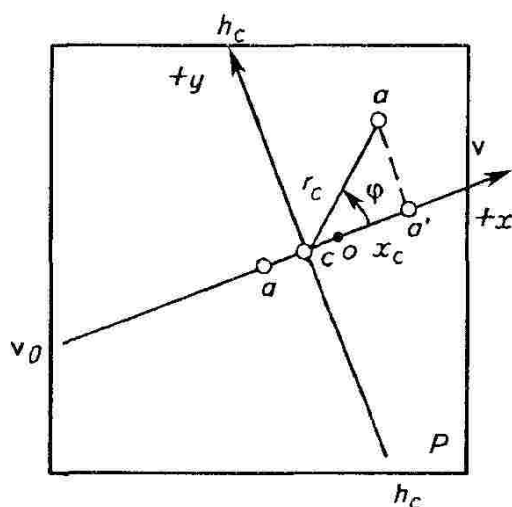


Рис. 8.5. Правило измерения углов φ при определении смещения точек снимка вследствие его наклона

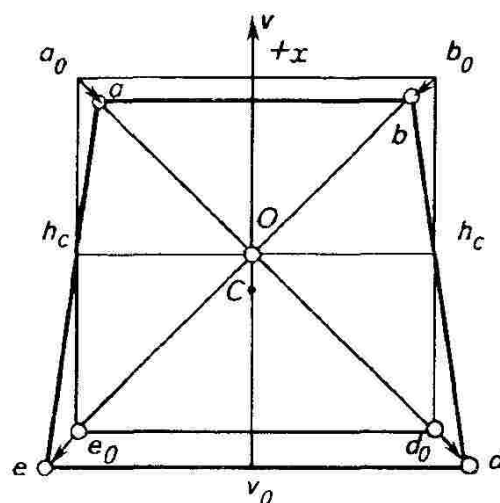


Рис. 8.6. Перспективное искажение изображения квадратного контура на наклонном снимке

8.3. ИЗМЕНЕНИЕ МАСШТАБА СНИМКА ВСЛЕДСТВИЕ ЕГО НАКЛОНА

Различие по величине смещения точек за влияние угла наклона снимка обуславливает непостоянство масштаба по полю кадра. Ранее отмечалось, что точки, расположенные на линии h_ch_c , за влияние наклона не смещаются. Очевидно, масштаб по этой линии будет постоянным и равным масштабу горизонтального снимка:

$$\frac{1}{m_{h_ch_c}} = \frac{f}{H}. \quad (8.4)$$

Горизонталь h_ch_c называют линией неискаженных масштабов. На прочих горизонталях масштаб также будет постоянным, но на каждой горизонтали свой. Его выражают формулой

$$\frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{x_c}{f} \sin \alpha_p \right), \quad (8.5)$$

в которой x_c — абсцисса горизонтали при начале координат в точке c . Масштаб вдоль главной вертикали определяют по формуле

$$\frac{1}{m_{vv}} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{x_c}{f} \sin \alpha_p \right)^2. \quad (8.6)$$

Масштаб по произвольному радиальному направлению может быть вычислен по формуле

$$\frac{1}{m_\phi} = \frac{f}{H} \left(1 - \frac{r_c}{f} \cos \phi \sin \alpha_p \right)^2. \quad (8.7)$$

В результате анализа формул (8.5)...(8.7) можно установить:

- масштаб по главной вертикали изменяется быстрее, чем последовательно по горизонталям;

- в точке c масштаб бесконечно малого отрезка по вертикали и любому другому направлению равен масштабу в той же точке по горизонтали. Этот масштаб называют главным;

масштаб в части снимка с положительными абсциссами мельче, а в части с отрицательными абсциссами крупнее главного.

Используя формулы (8.5)...(8.7), можно решить ряд практических задач, например определить возможности выполнения метрических действий непосредственно по снимку равнины с помощью его среднего масштаба. Такая задача может возникнуть, например,

при нанесении промерами на снимок не изобразившихся по тем или иным причинам объектов (досъемка при дешифрировании). При создании кадастровых планов и карт досъемочные работы выполняют с использованием линейных промеров длиной 15...25 мм на снимке. Средняя абсолютная погрешность измерения линий на снимке в полевых условиях — 0,15...0,20 мм. Средняя относительная погрешность при этом будет примерно 1/100. Погрешность за разномасштабность, обусловленная наклоном снимка, должна быть примерно той же и точнее.

Ранее установлено, что наиболее интенсивно масштаб снимка изменяется вдоль главной вертикали. Поэтому допустимость выполнения метрических действий непосредственно по снимку равнины должна определяться именно по этому направлению. Критерием допустимости может быть среднее относительное отклонение знаменателя масштаба изображения вдоль главной вертикали (m_{vv}) от знаменателя главного масштаба снимка (m):

$$\frac{1}{t} = \left| \frac{m_{vv} - m}{m} \right|. \quad (8.8)$$

Предельные значения критерия $1/t$ для разных f и α_p при использовании всего снимка формата 180×180 ($x = 90$ мм) и его рабочей площади ($X = 70$ мм) приведены в таблице 8.1.

8.1. Предельные значения критерия $1/t$ для разных f и α_p

α_P	f, MM					
	100		200		300	
	x, MM					
	90	70	90	70	90	70
3°	1/11	1/14	1/22	1/28	1/33	1/42
40'	1/48	1/62	1/96	1/123	1/144	1/185
10'	1/191	1/246	1/382	1/491	1/573	1/737

П р и м е ч а н и е. Жирной линией в таблице отделены допустимые точности для решения приведенной выше задачи при различных параметрах съемки.

Аэрофотосъемку в целях создания кадастровых планов и карт выполняют преимущественно с использованием гиростабилизированных АФУ. Поэтому в большинстве случаев метрические действия непосредственно на снимках равнины можно выполнять с использованием единого главного масштаба, определяемого по известным значениям f и H , с помощью измерений в натуре базисов или по координатам опознанных на снимках точек геодезической опоры.

Для поиска путей решения той же задачи при недостаточной точности использования среднего масштаба рассмотрим рисунок 8.7, на котором тонкими линиями показана сетка квадратов (прообраз) с поворотными пунктами общей границы a_0 , b_0 , d_0 и l_0 , а также преобразованное за наклон снимка изображение прообраза. Поворотными пунктами последнего будут a , b , d и l .

Для повышения наглядности характера преобразования в данном случае использован простейший вариант — главная вертикаль снимка v_0v проходит через центр сетки и совпадает с одним из направлений ее сторон. Квадраты при этом преобразуются в трапеции. В общем же случае — в четырехугольники более сложной конфигурации. Для иллюстрации этого утверждения воспользуемся репродукцией картины Н. Н. Ге (рис. 8.8), на которой квадратные элементы пола наблюдаются под значительным углом (в нашей терминологии — под углом съемки α_p) случайного направления.

Вернемся к рисунку 8.7. При существенном изменении масштаба изображения квадратов в пределах всей сетки, например в зонах при точках a и d (обозначены окружностями), в пределах каждой из этих зон разномасштабность существенно меньшая.

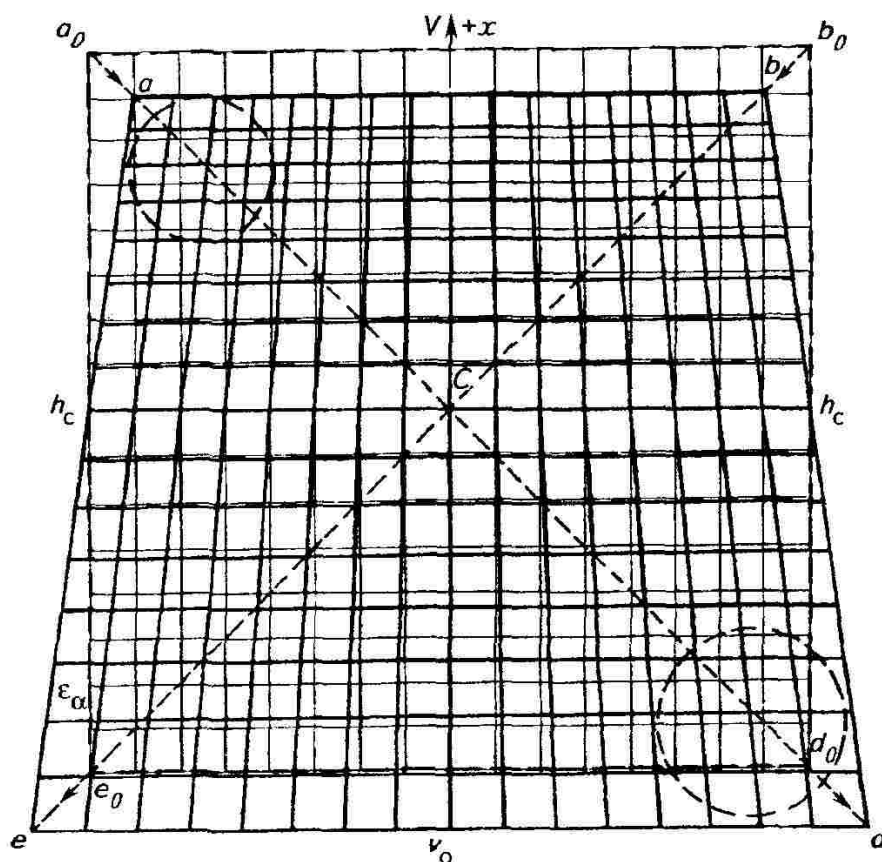


Рис. 8.7. Искажение сетки квадратов на плановом снимке при совпадении направления главной вертикали с направлением продольных сторон исходной сетки (прообраза)

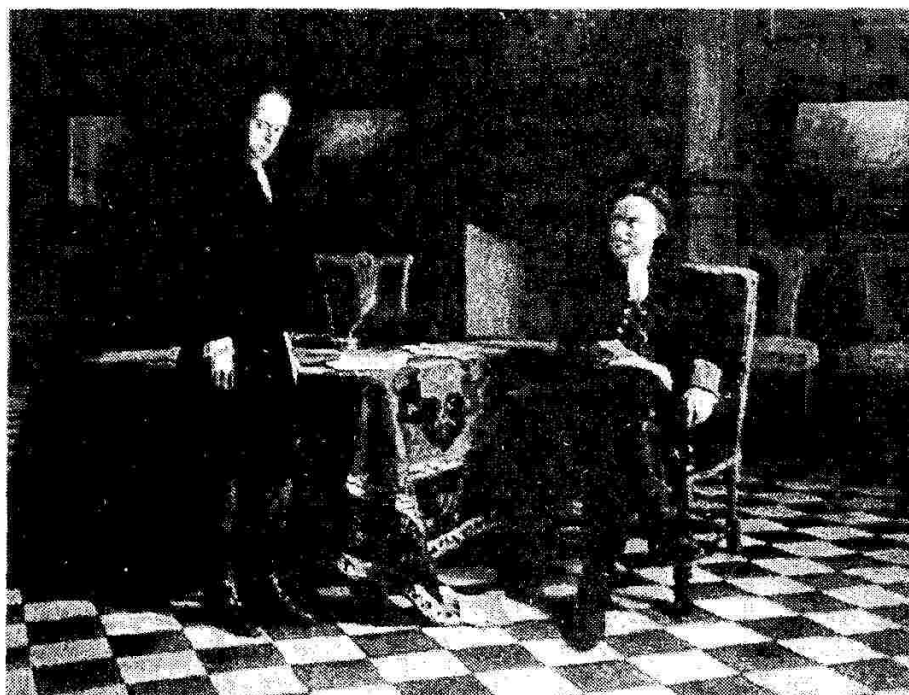


Рис. 8.8. Иллюстрация перспективного искажения произвольно ориентированной сетки квадратов относительно направления главной вертикали

Следовательно, необходимая точность выполнения метрических действий непосредственно по снимку может быть достигнута путем использования отдельных масштабов для его разных зон — частных масштабов. Технология определения таких масштабов и область их использования будут рассмотрены в главе 14.

8.4. ИСКАЖЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ НА НАКЛОННОМ СНИМКЕ

Непостоянство масштаба снимка равнины при $\alpha_p \neq 0$ приведет к искажению площадей. Относительная ошибка определения площади выражается формулой, предложенной Н. Н. Веселовским:

$$\frac{\Delta P_a}{P} = \frac{3x_c}{f} \sin \alpha_p = \frac{3mx_c}{H} \sin \alpha_p, \quad (8.9)$$

где x_c — абсцисса центра измеряемого участка в принятой ранее системе координат.

Проанализируем приведенную формулу:

искажение площади уменьшается с увеличением f и соответственным увеличением высоты съемки;

искажение уменьшается также с приближением участка к горизонтали $h_c h_c$. Площади участков, центр которых расположен на горизонтали $h_c h_c$, не искажаются.

Поскольку положение горизонтали обычно не известно, то это заключение имеет чисто теоретическое значение. Но в частном случае площади участков, центр которых совмещается с главной точкой (строго — с точкой c), за наклон снимка не искажаются. О возможностях использования этого положения предоставляется судить обучающимся (см. Контрольные вопросы и задания).

Очевидно, искажения площадей участков за наклон снимка в определенных его частях будут близкими между собой и могут оказаться в пределах установленных норм (см. рис. 8.7). Это значит, что, используя частные масштабы зон, площади участков можно определять непосредственно по снимкам.

8.5. ИСКАЖЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ НА НАКЛОННОМ СНИМКЕ

Наличие искажения направлений на наклонном снимке можно видеть на рисунке 8.7. Например, направление стороны сетки ae изменилось на ϵ_α . Здесь можно выявить также строгую закономерность в распределении значений искажений по полю снимка. В данном частном случае (v_0v направлена вдоль стороны сетки) направления, перпендикулярные v_0v , не искажаются. Иллюстрацией искажения направлений в общем случае может служить также репродукция картины Н. Н. Ге (см. рис. 8.8).

Определить искажения направления за наклон снимка можно с помощью рисунка 8.9. Исследуемое направление проходит через точки a и b (на рисунке показана правая верхняя часть снимка). Это направление пересечется с горизонталью $h_c h_c$ в точке k под углом λ . Опустив на линию ab перпендикуляр, получим точку d . Угол, образованный направлением перпендикуляра и главной вертикали, будет также равен λ . Введя в положение точки d поправку, определенную по формуле (8.2), найдем не смещенное за угол наклона снимка положение этой точки — d_0 . Наклонный и горизонтальный снимок пересекаются по линии $h_c h_c$ (см. разд. 8.2). Это значит, что точка k принадлежит и неискаженному направлению, проходящему через точку d_0 . Угол ϵ_α , образованный при этом, будет выражать значения искажения направления за наклон снимка.

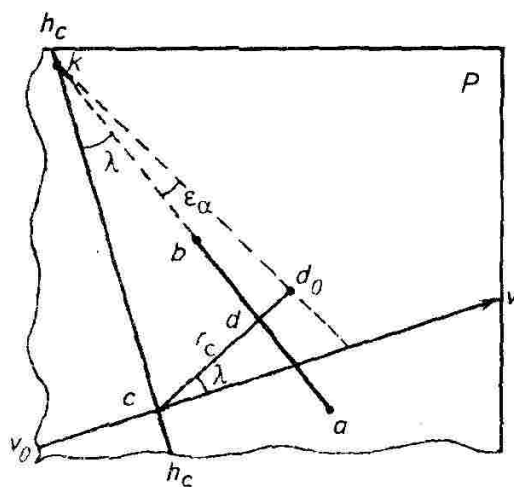


Рис. 8.9. Геометрическая интерпретация искажения направления на наклонном снимке

Вычислить ε_α можно по формуле Я. И. Гебгарта:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_\alpha = \frac{r_c \sin \alpha_p \sin \lambda}{f - r_c \sin \alpha_p \cos \lambda}, \quad (8.10)$$

где r_c — кратчайшее расстояние от точки c до исследуемого направления.

Положения точки c и главной вертикали обычно неизвестны. Поэтому полученную формулу применяют при определении возможности использования конкретных снимков для решения графических задач непосредственно по снимкам, вычисляя при этом предельные искажения. Для этого можно использовать упрощенную формулу при различных аргументах и фокусных расстояниях:

α_p	$f = 100 \text{ мм}$	$f = 200 \text{ мм}$	$f = 300 \text{ мм}$
3°	$2^\circ 42'$	$1^\circ 21'$	$54'$
$40'$	$36'$	$18'$	$7'$
$10'$	$9'$	$4'$	$3'$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{r_0 \alpha'_p \sin \lambda}{f}. \quad (8.11)$$

8.6. СМЕЩЕНИЕ ТОЧЕК СНИМКА ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Сечение горизонтального снимка P_0 и земной поверхности (с точками A , B и D) отвесной плоскостью, проходящей через центр проекции S , показано на рисунке 8.10. Эта плоскость пересечет снимок по линии, проходящей через точку надира n . Здесь же, в данном случае, располагаются точки o и c . Пересечем местность произвольной горизонтальной плоскостью E . Точки A_0 и B_0 — ортогональные проекции точек A и B на плоскость E . Превышения точек A и B над плоскостью E соответственно $-h_A$ и $+h_B$. На снимке точки местности и их ортогональные проекции на плоскость E изобразятся соответственно точками a и b , a_0 и b_0 . Заметим, что точка a , с отрицательным превышением, сместилась относительно точки a_0 к точке надира, а точка b , с положительным превышением, — от точки надира. Величины a_0a и b_0b — смещения точек a и b за влияние рельефа местности. Изображение точки местности D , лежащей на отвесном проектирующем луче, не сместится, независимо от ее превышения над плоскостью E . Вывод: точки снимка за влияние рельефа местности смещаются по направлению к точке надира или от нее в зависимости от знака превышения.

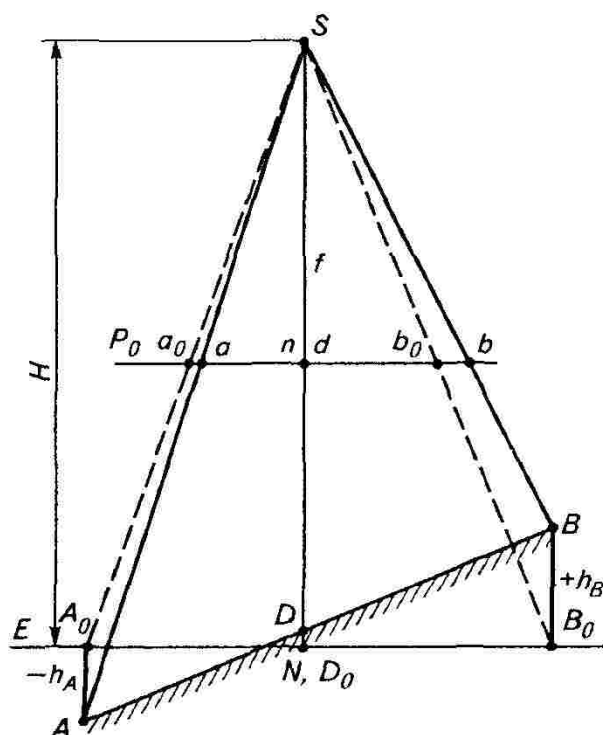


Рис. 8.10. Смещение точек снимка вследствие влияния рельефа местности

Смещения точек за влияние рельефа местности определяют по формуле

$$\delta_h = \frac{r_n h}{H} = \frac{r_n h}{f m}, \quad (8.12)$$

где r_n — отстояние определяемой точки на снимке от точки надира; h — превышение точки над горизонтальной плоскостью, принятой за исходную; H — высота съемки над той же плоскостью; m — знаменатель масштаба изображения, отнесенного к той же плоскости.

8.7. ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ИЗМЕНЕНИЕ МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ МЕСТНОСТИ

Для выяснения влияния рельефа местности на изменение масштаба частей снимка, соответствующих различным расположенным на неровной земной поверхности участкам, воспользуемся рисунком 8.11. На нем показано сечение отвесной плоскостью, проходящей через центр проекции S , горизонтального снимка P_0 , а также четырех участков: наклоненного на угол ν в сторону от точки S — AB , наклоненного под таким же углом к точке S — LG и двух горизонтальных с разными высотами — BD и KL . Ортогональные проекции на плоскость E всех сечений равны между собой — $AB_0 = B_0 D_0 = KL = LG_0$. Очевидно, что в центральной проекции на

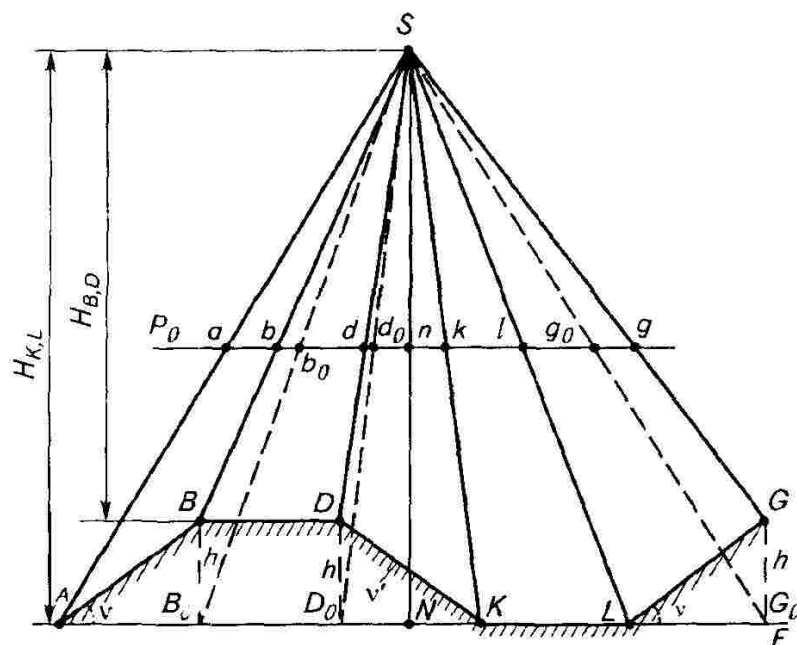


Рис. 8.11. Влияние рельефа местности на масштаб изображения различных расположенных на земной поверхности отрезков

горизонтальный снимок P они изобразятся равными отрезками — ($ab_c = b_0d_0 = kl = lq_0$). По результатам центрального проецирования реальных линий местности можно сделать следующие выводы:

изображение линий, наклоненных от точки S , в центральной проекции всегда будут меньше изображения их в ортогональной проекции. С увеличением угла наклона участка точки A и B могут оказаться на одном проецирующем луче. Линия AB в этом случае изобразится на снимке точкой, а участок местности — линией. При дальнейшем увеличении угла (скаты балок, оврагов и др.) участок окажется в «мертвой зоне» и совсем не отобразится на снимке;

изображение линий, наклоненных к точке S , всегда крупнее изображения их ортогональной проекции. Очевидно, наибольшее различие будет в случае, когда линия будет перпендикулярной проецирующему лучу, проходящему через ее середину;

масштаб изображения линий, располагающихся вдоль ската наклонных участков, будет зависеть от их ориентации относительно центра проекции, значения угла их наклона и отстояния изображения участка от точки надира.

Масштаб изображения ровных горизонтальных участков местности BD и KL зависит от их высоты или, иными словами, от высоты фотографирования над этими участками. Среднее относительное изменение масштаба изображения таких участков можно

выразить формулой

$$\frac{\Delta m}{\bar{m}} = \frac{h}{\bar{H}}, \quad (8.13)$$

где Δm — разность знаменателей масштаба изображения разновысоких равнинных участков; $\bar{m}$ — среднее значение знаменателей масштаба этих участков; h — превышение между участками; $\bar{H}$ — средняя высота съемки.

Очевидно, что масштаб изображения наклонных участков по топографической горизонтали будет постоянным и зависит от ее высоты.

8.8. ИСКАЖЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ ВСЛЕДСТВИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Из результатов анализа влияния рельефа местности на изменение масштаба изображения можно заключить, что соответственно исказятся и площади различно расположенных по рельефу участков.

Искаженная за влияние рельефа сетка показана на рисунке 8.12 утолщенными линиями. Здесь за исходную принята сетка (показана тонкими линиями), преобразованная за наклон снимка. Граница прообраза обозначена утолщенным пунктиром.

Для получения искаженной за рельеф сетки в положение каждого узла ее введены смещения, рассчитанные по формуле*

$$\delta_h = \frac{(r'_n + \delta_h)h}{H}, \quad (8.14)$$

где r'_n — расстояние от точки надира до смещаемой точки.

Превышения узлов над принятой за начальную плоскостью с отметкой 30 определяли по горизонталям, вычерченным тонкими пунктирными линиями.

Из рисунка видно, что на участках со спокойными затяжными скатами (на рис. 8.12 между горизонталями с отметками 20 и 40 м) метрические действия непосредственно по снимку можно выполнять аналогично тому, как это делают на наклонных снимках равнинной местности.

При работе на снимках сильно пересеченной местности, особенно с некрупными формами рельефа, работа с частными масштабами может оказаться малопродуктивной. Метрические действия непосредственно на снимках станут невыгодными.

Для определения возможностей непосредственного измерения

*Вычисления выполняют итерационно.

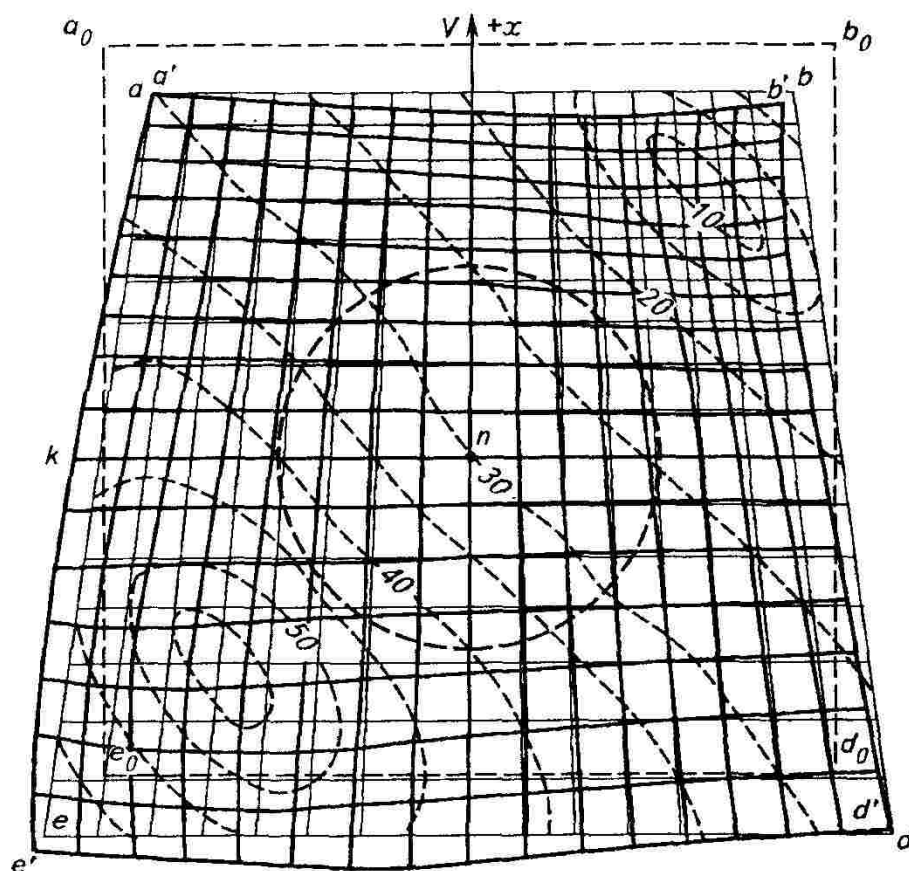


Рис. 8.12. Искажение сетки квадратов вследствие совместного влияния наклона снимка и рельефа местности

площадей участков по снимкам в этом случае можно воспользоваться формулой максимального относительного искажения площади за наклоном участка

$$\frac{\Delta P_h}{P} = \frac{r}{f} \operatorname{tg} v = \frac{rm}{H} \operatorname{tg} v, \quad (8.15)$$

где ΔP_h — погрешность в площади, обусловленная влиянием рельефа; r — максимальное отстояние центра участка от главной точки снимка (строго от точки надира); v — максимальный угол наклона участков снимаемой территории.

8.9. ИСКАЖЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ НА СНИМКЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Влияние рельефа на искажение направлений на снимке показано на рисунке 8.13. Исследуемое направление проходит через точки a и b . Допустим, что соответственная точка A на местности ниже соответственной точки B на величину h . Неискаженное положение точки снимка a можно найти, введя поправку δ_h , вычисленную по формуле (8.12). Направление ba_0 будет неискаженным,

а образовавшийся при точке b угол ϵ_h — величиной искажения направления.

Я. И. Гебгартом предложена формула для определения ϵ_h . Как и в предыдущем случае, знание искажения может оказаться полезным только для определения возможности выполнения на конкретных снимках метрических или проектных действий. Поэтому воспользуемся преобразованной формулой для вычисления максимальных искажений направлений

$$\operatorname{tg} \epsilon_{h \max} = \frac{rh}{Hl}, \quad (8.16)$$

где l — отрезок прямой, искажение направления которого определяют.

Для случая, когда $r = l = 90$ мм, и различных отношений h и H максимальные искажения направлений составят:

h/H	$1/5$	$1/10$	$1/20$	$1/40$
ϵ_h	11°	6°	3°	$1,5^\circ$

Искажения направлений в некоторых случаях могут быть значительными.

Отметим, что в данном случае рассматривают искажение направления, проходящего пространственно через некоторую пару точек, — геометрическое направление. Для выяснения возможностей выполнения проектных работ непосредственно на снимках важно также знать, как влияет рельеф на изменение формы линий, проходящих по земной поверхности.

Анализируя рисунок 8.12, можно сделать следующие выводы:

прямая в натуре линия не будет деформирована, если проходит она по плоскому, сколь угодно наклоненному участку местности. Примером может служить звено $a'k$ линии $a'e'$;

остальная часть этой линии искривилась — стала выпуклой относительно соответственно линии ae . Такое искажение будет в случае, если линия проходит через возвышенность относительно принятой за начальную секущей плоскости. В противном случае искривление будет вогнутым, например на линиях $a'b$ и $b'd'$.

Очевидно, идеально прямолинейная в плане трасса шоссе изобразится на снимке криволинейной, если она проходит по всхолмленной местности и не совпадает с проекцией точки надира.

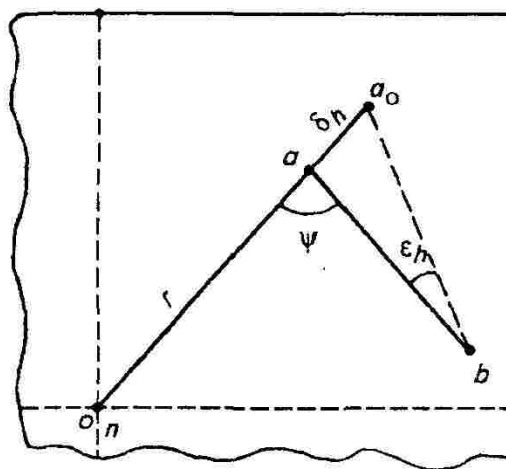


Рис. 8.13. Геометрическая интерпретация влияния рельефа местности на искажение направлений на снимке

8.10. ВЛИЯНИЕ ПРОЧИХ ФАКТОРОВ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СНИМКА

Рассмотренные ранее факторы не нарушают строгости центральной проекции — влияние их обуславливает только отклонение результатов проецирования от ортогональной проекции снимаемого объекта. Аналогично на геометрию снимка влияет кривизна Земли. Расстояние некоторой точки снимка (на рис. 8.14 точки a) от точки надира сократится при этом на значение

$$\delta_r = \frac{Hr^3}{2Rf^2}, \quad (8.17)$$

где R — радиус Земли.

При крупномасштабных съемках с использованием камеры $f=200$ мм максимальное смещение точек изображения будет порядка 0,004 мм, что не повлияет существенно на точность построения плана — влияние кривизны Земли меньше точности измерения на снимке.

Ряд факторов (атмосферная рефракция, дисторсия объектива съемочной камеры, деформация фотопленки, непараллельность плоскостей стеклянного светофильтра, неточность выравнивания аэропленки и др.) нарушают строгость центральной проекции. Однако съемка со сравнительно малых высот современными камерами с использованием новейших фотоматериалов не приведет к погрешностям, выходящим за пределы нескольких микрометров. К тому же некоторые из них, например дисторсию объектива, систематическую деформацию фотоматериалов, учитывают при высокоточных фотограмметрических работах.

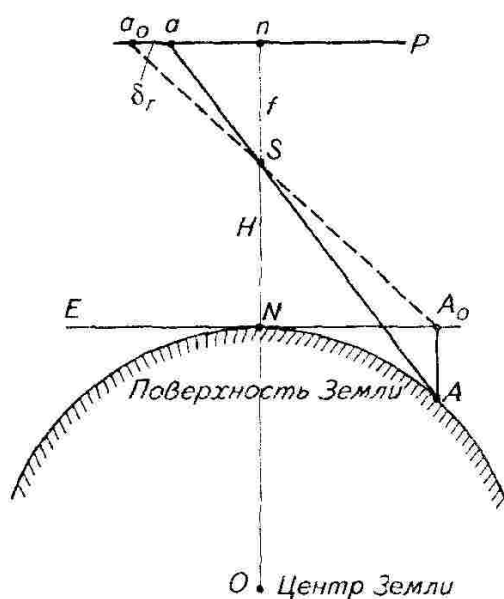


Рис. 8.14. Влияние кривизны Земли на смещение точек снимка

8.11. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И УГЛА НАКЛОНА СНИМКА НА ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Ранее установлено, что метрические свойства снимков зависят в основном от их наклона и рельефа местности.

Влияние этих факторов различно. Значение аргумента α_p в формулах (8.2)...(8.11) может быть любым (в допустимых пределах), но постоянным для каждого снимка. Поэтому распределение значений смеще-

ния точек с соответствующим изменением масштаба изображения и искажением площадей и направлений будет строго регулярным по полю снимка (см. рис. 8.7 и 8.8). Рельеф местности в зависимости от его характера влияет на метрические свойства снимка различно. При съемке сильно пересеченной местности с беспорядочным изменением направлений и крутизны скатов изменение масштаба изображения отдельных участков в пределах кадра с соответствующим искажением длин линий, площадей и др. можно отнести к случайным. Земли, используемые в сельскохозяйственном производстве, редко располагают на таких территориях. Укрупнение съемочного масштаба с соответствующим сокращением отображающейся в кадре земной поверхности сокращает степень стохастичности экспозиций отдельных участков. При выполнении работ по инвентаризации приусадебных земель метрические операции выполняют обычно автономно в каждом населенном пункте. Последние располагают в большинстве случаев на территориях, представляющих собой односкатные плоскости, реже — сочетания двух-трехскатных плоскостей с разными направлениями скатов. Поэтому вероятностный подход к определению совместного влияния анализируемых факторов будет некорректным. Более правильным в данном случае будет определение предельного совместного влияния этих факторов на геометрию снимка с последующей оценкой приемлемости непосредственного использования снимков для измерительных целей.

Предельным искажение будет в случае, когда направление главной вертикали совпадет с направлением ската участка. Предельное относительное искажение площадей можно определить, например, по формуле

$$\frac{\Delta P_{\alpha,h}}{P} = \frac{[\cos(\alpha_p + v) - x \sin(\alpha_p + v)/f]^3}{\left(\cos v - \frac{x}{f}\right)^2 \cos v}, \quad (8.18)$$

где x — максимальная абсцисса центра подлежащих обмеру участков в системе координат: $v_0 v$ — ось абсцисс; $h_0 h$ — ось ординат.

Поскольку направление главной вертикали не известно, то максимальное значение x можно заменить отстоянием наиболее удаленного угла рабочей площади снимка от его главной точки.

Величину $\frac{\Delta P_{\alpha,h}}{P}$ в упрощенном, но достаточно точном варианте можно определить по формулам (8.10), (8.16) и формуле

$$\frac{\Delta P_{\alpha,h}}{P} = \frac{\Delta P_{\alpha}}{P} + \frac{\Delta P_h}{P}. \quad (8.19)$$

Особенности центральной проекции — неравенство метрических характеристик в центральной части снимка и на его периферии — можно использовать для непосредственных измерений центральной зоны каждого снимка. Масштаб для такой зоны будет практически единым. Размеры зоны (радиус окружности) с допустимыми искажениями определяют по формулам, приведенным в данной главе. Пример ограничения такой зоны показан на рисунке 8.12 пунктирной окружностью. Периферийные части снимков используют обычным образом.

Эти же формулы используют и для определения параметров новой съемки с заданными метрическими характеристиками всего снимка или в пределах его рабочей площади.

Контрольные вопросы и задания

1. В разных частях крупномасштабного аэрофотоснимка, полученного АФА с широкоугольным объективом, изобразилось несколько возвышающихся линейных объектов (столбы, углы многоэтажных зданий и т. п.). Можно ли на этом снимке найти положение точки нулевых искажений? 2. Теоретически установлено, что площадь участка равнинной местности, центр которого совместился с точкой c , не искажается. Как это положение можно использовать в практике выполнения измерительных работ? 3. Могут ли площади участков местности, представляющих собой наклонную плоскость, оказаться не искаженными за влияние рельефа? Ответ обосновать аналитически или графически. 4. Предложите технологию измерения площадей непосредственно по снимку с использованием современных технических средств, если установлено, что влияние всех этих факторов на искажение площадей несущественно. 5. Изменяются ли масштабы изображения двух равнинных расположенных на разных высотах участках местности и соотношения этих масштабов при изменении их положения в плоскости горизонтального снимка? Правильность ответа обосновать. 6. Определите необходимые параметры аэрофотосъемки, обеспечивающие возможность непосредственного измерения площадей по снимкам с заданной точностью ($1/2$) при известных углах наклона обмеряемых участков (v). При каком угле наклона снимка перспективными искажениями площадей можно пренебречь? 7. Определите радиус окружности, в пределах которой измерить площади участков можно с заданной точностью непосредственно по снимку: равнины по заданному значению f плановых снимков с $\alpha_p < 2^\circ$; рельефной местности с наклоном участков $v < 3^\circ$ на гиросtabilизированных снимках с $\alpha_p < 20'$, полученных с заданным значением f . 8. Определите возможность использования среднего масштаба снимка для досъемки неотображавшихся элементов ситуации на гиросtabilизированных снимках равнины, полученных АФА с $f = 200$ мм с высоты $H = 1000$ м при формате кадра 180×180 мм и нормальных перекрытиях снимков. 9. В целях сокращения объема полевых определений частных масштабов в разных зонах снимка число непосредственных полевых определений может быть сокращено. Можно ли при этом масштабы промежуточных зон определить путем интерполирования? Если можно, то каким интерполирование должно быть — линейным или нелинейным (в строгой оценке)? Ответ обосновать приведенными в данной главе формулами. 10. В некоторых публикациях прошлых лет рекомендовалась технология непосредственного измерения площадей на снимках рельефной местности — «способ высотных зон». Суть способа исходила из предположения, что изображение местности, заключенной между горизонталями с предельно допустимой разностью отметок (δ_h любой точки относительно средней секущей плоскости зоны не выходит за установленные пределы), практически одномасштабно. Для вычисления площадей рекомендовался «средний зональный масштаб». Оцените корректность способа с обоснованием оценки графически или аналитически. 11. Изменяются ли метрические свойства космических фотоснимков в сравнении с аэрофотоснимками того же масш-

таба? Ответ обосновать с помощью формул. 12. Можно ли использовать формулы для снимков, полученных по законам центральной проекции, в работе со снимками, полученными сканирующими съемочными системами? 13. Прямолинейные (по направлению) дороги, проходящие по всхолмленной местности, изобразятся на снимке криволинейными. Может ли, в частном случае, изображение дороги (при том же рельефе) сохранить прямолинейность на снимке? Ответ обосновать.

Глава 9

ПАРА СНИМКОВ

9.1. ЗРИТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ЧЕЛОВЕКА И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ

Метрическая информация, извлекаемая из одиночных снимков, может быть только двумерной, например размеры объектов в плане, площадь участков и т. п., если не считать определения высот объектов косвенным путем по изображению падающих от них теней или по отображающимся иногда на краях снимка боковым элементам возвышающихся объектов.

Человек, наблюдая окружающее пространство одним глазом, воспринимает его также двумерно, не ощущая глубины. О последовательности расположения объектов по глубине наблюдатель судит при этом по изменению их размеров, четкости восприятия или перекрываемости дальних объектов ближними. То же пространство, наблюдаемое двумя глазами, воспринимается объемным (трехмерным). Видимые раздельно левым и правым глазом «картинки» (до определенной глубины наблюдения) геометрически не одинаковы. Эта «неодинаковость» и несет информацию о третьей координате — удалении элементов пространства при горизонтальном наблюдении или их высоте при наблюдении вертикальном.

Можно предположить, что по двум снимкам, полученным с концов некоторого базиса, независимо от направления съемки можно получить трехмерную информацию об изобразившихся на обоих снимках объектах.

В извлечении этой информации, особенно при обработке пар снимков простейшими средствами, большое значение имеет зрительный аппарат исполнителя.

Глаз представляет собой совершенный биологический орган, с геометрической точки зрения напоминающий съемочную камеру с дискретной матричной регистрацией яркостей (ПЗС-камеру). Функцию объектива в глазу выполняет хрусталик, а поля электронных рецепторов — сетчатка с дискретно реагирующими на излучения окончаниями разветвлений зрительного нерва (палочки и колбочки).

Чувствительные элементы сетчатки реагируют на световые излучения в спектральном диапазоне от 360...400 до 700...760 нм. Заметим, что светочувствительность большинства современных черно-белых аэропленок приходится примерно на ту же область спектра. Поэтому передача ахроматических яркостей элементов ландшафта на снимке, полученном с помощью такой аэропленки, примерно адекватна распределению яркостей этих элементов, наблюдаемых человеком в натуре.

При анализе и измерении снимков человек может рассматривать их непосредственно невооруженными глазами или с помощью оптических устройств. Выделяют три вида зрения — монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое. Монокулярным называют зрение одним глазом, бинокулярным — двумя глазами. Зрение стереоскопическое — частный случай бинокулярного зрения. Наблюдатель при этом, как уже отмечалось ранее, воспринимает пространственно расположение разноудаленных объектов. Разделение по видам не зависит от использования (или неиспользования) при наблюдении оптических устройств.

Важнейшие характеристики зрительного аппарата:

линейное (геометрическое) разрешение (острота зрения, разрешающая сила зрения) — способность воспринимать (обнаруживать) мелкие элементы в натуре или на снимках;

линейная (геометрическая) разрешающая способность — возможность раздельного восприятия ряда одинаковых элементов, например линий;

энергетическое разрешение — способность воспринимать яркостные (тоновые) контрасты на снимке.

Стереоскопическое зрение характеризуется остротой этого вида зрения, выражающей способность зрительного аппарата воспринимать различие в положении по глубине двух элементов пространства.

Рассмотрим каждую из указанных характеристик. Прежде отметим, что возможности зрительного аппарата существенно меняются в зависимости от формы наблюдаемых деталей. Принято определять эти возможности отдельно для случая наблюдения малых компактных деталей (зрение первого рода) и тонких линий (зрение второго рода).

Эмпирически установлено, что *линейное разрешение монокулярного зрения* первого рода ($\gamma_{к,м}^\circ$) и второго рода ($\gamma_{л,м}^\circ$) в угловой мере при наблюдении контрастных деталей выражаются 40" и 20" соответственно. В линейной мере эти характеристики для расстояния наилучшего видения (250 мм) составляют $d_{к,м} \sim 0,050$ мм, $d_{л,м} \sim 0,025$ мм.

При малом контрасте $K = (B - B_{\phi})/B \leq 0,5$ эти характеристики снижаются (здесь B и B_{ϕ} — яркости детали и фона).

Вычислить $d_{к,м}$ и $d_{л,м}$ в этом случае можно по формуле

$$d_{к,л,м} = d_{к,л,м}^{\circ} \left(\frac{K}{1-K} \right)^{-0.5}. \quad (9.1)$$

Линейное разрешение бинокулярного зрения при наблюдении контрастных деталей примерно в два раза больше, чем монокулярно, т. е. $d_{к,б}^{\circ} \sim 0,025$ мм и $d_{л,б}^{\circ} \sim 0,012$ мм. Использование при наблюдении оптических систем позволяет улучшить характеристики зрительного аппарата примерно пропорционально кратности увеличения используемой системы.

Отметим, что возможности обнаружения светлых деталей на темном фоне, при прочих равных условиях, значительно больше, чем темных деталей на светлом фоне (явление иррадиации). Например, космонавты невооруженным глазом с борта космического корабля наблюдали белые катера у морского причала вопреки расчетным возможностям.

Линейная разрешающая способность — характеристика зрительного аппарата, по сути своей близкая к только что рассмотренной характеристике, но выражается она числом раздельно воспринимаемых черных линий в миллиметровом интервале при той же толщине белых промежутков. Эта характеристика более удобна для прикидочных расчетов съемочного масштаба или при приближенном определении кратности увеличения исходных снимков, так как наиболее употребимым критерием изобразительных возможностей фотографических съемочных систем является именно их линейная разрешающая способность.

Рассматриваемая характеристика существенно варьирует в зависимости от многих факторов. Для благоприятных условий при монокулярном наблюдении мы получим

$$R_{м} = \frac{1}{d_{к}^{\circ}} = \frac{1}{0,050 \text{ мм}} = 20 \text{ мм}^{-1},$$

при бинокулярном

$$R_{б} = \frac{1}{d_{л}^{\circ}} = \frac{1}{0,025 \text{ мм}} = 40 \text{ мм}^{-1}.$$

Возможности энергетического разрешения зрительного аппарата будут рассмотрены в главе 14.

Прежде чем приступить к оценке остроты стереоскопического зрения, рассмотрим геометрическую суть этого вида зрения (рис. 9.1).

Остротой стереоскопического зрения первого рода называют минимальную разность параллактических углов двух точек $\gamma_B - \gamma_D = \Delta\gamma$,

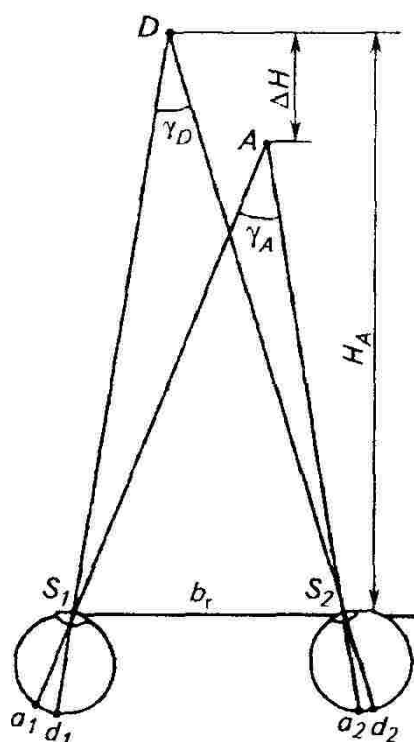


Рис. 9.1. Геометрическая интерпретация принципа стереоскопического зрения:

b_r — глазной базис; A — точка фиксации бинокулярного взора; S_1A и S_2A — лучи; γ_A — угол конвергенции, $\gamma_A = \angle S_1AS_2$; H_A — отстояние точки фиксации от глазного базиса; D — точка, отстоящая от точки A по глубине на некоторое значение ΔH

при которой эти точки воспринимаются разноудаленными. Она равна примерно 30". Величину ΔH можно определить по формуле

$$\Delta H = \frac{H^2 \Delta \gamma}{b_r}. \quad (9.2)$$

Аналогичное определение можно дать и остроте стереоскопического зрения второго рода, но наблюдаемыми деталями здесь будут две параллельные линии. Численно острота в этом случае составляет 10".

9.2. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СЪЕМКА. СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Представим, что используемые ранее точки пространства A и D регистрируются двумя камерами с фокусным расстоянием f , расположенными на концах базиса съемки $B = b_r$ (см. рис. 9.1). В плоскости негативов P'_1 и P'_2 точки A и D изобразятся соответственно точками a_1 и a_2 , d_1 и d_2 . Направление проектирующих лучей, а следовательно, и значения углов γ_A и γ_D останутся теми же, что и при наблюдении этих точек человеком.

Если реальные точки A и D заменить парой позитивных изображений P_1 и P_2 так, чтобы левый глаз наблюдателя видел только левый снимок, а правый глаз — только правый снимок, на сетчатке глаз возникнет ситуация, существовавшая при непосредственном наблюдении этих точек. Наблюдатель воспримет пару плоских изображений пространственно. Такое восприятие называют прямым *стереоэффектом*, а мнимое пространственное изображение снятого объекта, воспринимаемое наблюдателем, — *стереоскопической моделью (стереомоделью)*. Разумеется, стереомодель будет наблюдаться только в пределах перекрытия снимков.

Два смежных частично перекрывающихся снимка, полученных с концов некоторого базиса, называют *стереопарой*, или *парой снимков*. Теперь, очевидно, стало более понятным требование обеспечения определенного продольного перекрытия снимков

(примерно 60 % при съемке равнины). Сокращение перекрытия может привести к риску образования разрывов между стереомоделями и соответственно к усложнению или невозможности процесса получения трехмерной метрической информации со снимков. Увеличение перекрытий уменьшит углы засечки наблюдаемых точек, что приведет к снижению точности в определении разностей их отстояний (превышений).

Если снимки перед глазами поменять местами, то наблюдатель также увидит стереомодель, но с *обратным стереоэффектом* — удаленные элементы ландшафта будут восприниматься близкими, и наоборот, близкие элементы покажутся удаленными. Этот вариант стереоскопического наблюдения снимков используют при анализе отрицательных микроформ рельефа (промоин, канав, кюветов и др.). Может быть еще вариант наблюдения пары снимков, при котором оба снимка разворачиваются в своей плоскости на 90° . Наблюдатель при этом вне зависимости от рельефа увидит плоское пластичное изображение местности. *Стереоэффект*, получаемый при этом, называют *нулевым*.

Точность (детальность) стереоскопического восприятия по снимкам элементов пространственных объектов зависит, как уже отмечалось, от угла засечки этих элементов. Значение угла определяется размерами базиса B и высотой съемки H . Точность восприятия стереомодели зависит также от условий наблюдения снимков. Минимальная разность отстояний (высот) наблюдаемых точек для расстояния наилучшего видения (250 мм)

$$\Delta H = \frac{250 H^2 \Delta \gamma}{B f v} = \frac{250 H \Delta \gamma}{b v}, \quad (9.3)$$

где v — увеличение стереоприбора; b — базис съемки в масштабе снимков.

Пользуясь этой формулой, вычислим ΔH для наблюдения снимков, полученных с некоторых высот, наиболее используемых при выполнении землеустроительных и кадастровых работ, а также при дистанционном зондировании. При этом примем, что наблюдаются снимки формата 18×18 см с продольным перекрытием 60 % с использованием стереоскопа с полуторакратным увеличением.

При высотах съемки 500, 1000, 2000 и 5000 м значения ΔH будут соответственно равны 0,2, 0,3, 0,7 и 1,7 м.

По снимкам, полученным с космических платформ с высоты 300 и 900 км, значения ΔH будут соответственно 102 и 310 м.

Точность восприятия превышений при наблюдении космических снимков можно повышать, увеличивая базис съемки. Сделать это можно за счет увеличения угла поля изображения съемочной системы или использования конвергентной съемки (см. часть I). В первом случае могут быть варианты: увеличение формата кадра

или уменьшение фокусного расстояния съемочной камеры. Последний вариант приведет к уменьшению съемочного масштаба и геометрического разрешения снимков.

9.3. СПОСОБЫ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ СНИМКОВ

Стереоскопически можно рассматривать снимки (негативы и позитивы), непосредственно полученные при съемке с помощью кадровых фотографических систем; визуализированные и отпечатанные на твердой основе снимки, полученные с помощью кадровых нефотграфических съемочных систем; любые перекрывающиеся снимки, записанные в цифровой форме и выведенные на экран монитора.

В любом варианте разномасштабность наблюдаемой пары изображений не должна превышать 16 %. Используемые при наблюдении устройства должны обеспечить возможность раздельного наблюдения каждого снимка из пары левым и правым глазом.

Простейший и наиболее распространенный прибор для стереоскопического наблюдения снимков — *стереоскоп*. Рассмотрим принцип его устройства на примере отечественного линзо-зеркального стереоскопа (ЛЗ).

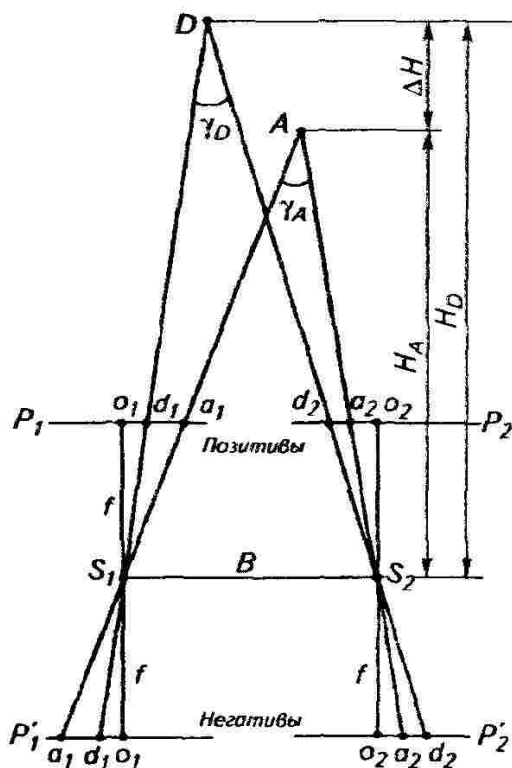


Рис. 9.2. Принцип получения стереоскопического эффекта при наблюдении пары снимков

На планке основы прибора укреплены две пары зеркал — внешние Z_1 и Z_2 и внутренние Z_3 и Z_4 , а также линзы L_1 и L_2 (рис. 9.2). Эту конструкцию на ножках устанавливают на стол. Точками S_1 и S_2 на рисунке обозначены передние узловые точки глаз наблюдателя. Снимки P_1 и P_2 располагают под зеркалами Z_1 и Z_2 так, чтобы в центре поля зрения каждого глаза оказались соответствующие участки снимков. Линейными перемещениями и вращением снимков в их плоскостях добиваются слияния изображений. В результате этого наблюдатель увидит стереоскопическую модель — в частности, точки a_1 и a_2 , а также d_1 и d_2 будут восприниматься пространственно точками A и D . Ход лучей на рисунке 9.3 показан так, как если бы линз не было. Установив линзы, можно укрупнить масштаб стереомодели.

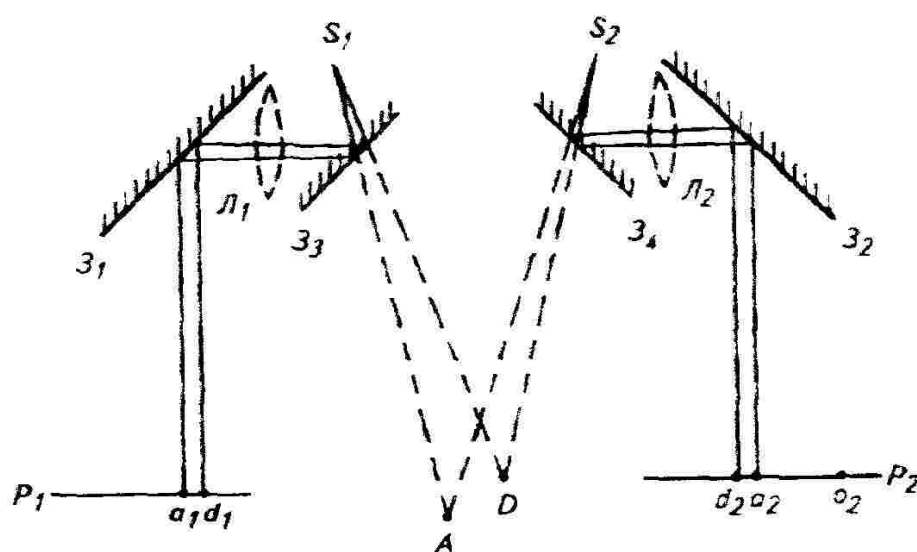


Рис. 9.3. Ход лучей при наблюдении снимков с помощью стереоскопа

Расстояние от глаз наблюдателя по ходу центрального луча до снимка называют фокусным расстоянием стереоскопа f_c . Если в стереоскопе установлены линзы, то f_c измеряют от центра линзы по ходу центрального луча до снимка. Увеличение стереоскопа определяют по формуле, мм,

$$v = \frac{250}{f_c}. \quad (9.4)$$

Если фокусные расстояния стереоскопа и съемочной камеры равны между собой, то вертикальный и горизонтальный масштабы стереомодели будут одинаковыми. В противном случае модель будет казаться деформированной. Знаменатель вертикального масштаба модели m_v связан со знаменателем горизонтального масштаба m_r зависимостью

$$m_v = \frac{m_r f}{250}. \quad (9.5)$$

Очевидно, что сокращение фокусного расстояния съемочной камеры приведет к укрупнению вертикального масштаба модели и соответственно к улучшению условий визуального анализа рельефа вообще и элементов микрорельефа в частности, а также к повышению точности измерения и отображения рельефа.

Стереоскопы используют при наблюдении пары снимков на твердой основе, а также раздельно визуализированных на экране монитора изображений.

При компьютерной стереофотограмметрической обработке снимков широко применяют способы *анаглифический* и *поляроидов*.

В первом из указанных способов левое и правое изображения окрашивают в дополнительные цвета, например в красный и сине-зеленый. Эти изображения могут накладываться одно на другое. Для их наблюдения используют анаглифические очки, фильтры которых обеспечивают дифференцированное восприятие изображений левым и правым глазом. При хорошо сбалансированных цветах изображений и фильтров очков, а также световых потоков для обоих каналов стереомодель будет восприниматься ахроматической. Этим способом можно пользоваться для наблюдений анаглифических изображений как на экране монитора, так и на твердой основе.

Во втором способе левое и правое изображения поляризуются во взаимно перпендикулярных плоскостях при проецировании их на экран монитора с наложением одного на другое. Для наблюдения используют очки с фильтрами-поляризаторами.

В обоих способах можно получить обратный стереоэффект, поменяв местами фильтры в очках.

Применяют также способ поочередной смены наблюдения левым и правым глазом соответственных изображений.

В компьютерных системах этот способ реализуется следующим образом. Левое изображение формируется на четных строках экрана монитора, правое — на нечетных строках. Оператор наблюдает экран через затворные очки на жидких кристаллах. Смена восприятия левым и правым глазом синхронизирована со сменой на экране соответственных изображений. Каналы восприятия сменяют входящим в комплект системы драйвером. Синхронизирующий сигнал на очки может передаваться по проводу или по световому инфракрасному каналу. Частота смены каналов должна обеспечивать непрерывность восприятия стереомодели аналогично тому, как это делается в кинематографе. Увеличение частоты (до 120...150 Гц) создает более благоприятные условия для работы. Обратный стереоэффект получают, изменяя фазы работы очков.

9.4. ПОПЕРЕЧНЫЙ И ПРОДОЛЬНЫЙ ПАРАЛЛАКСЫ ТОЧЕК СНИМКА

Приступая к рассмотрению возможностей получения метрической информации по паре снимков, сформулируем некоторые вводные определения.

Совокупность проектирующих лучей, проходящих через центр проекции, называют *связкой проектирующих лучей*, а плоскость, проходящую через базис съемки и любой проектирующий луч, — *базисной плоскостью*.

Если этим лучом является главный луч, то базисную плоскость называют *главной*. Очевидно, что в момент съемки любая пара соответственных лучей будет располагаться в одной базисной плоскости — *условие компланарности*.

Прямоугольную систему координат, осью абсцисс в которой служила главная вертикаль снимка, а осью ординат — любая из горизонталей, использовали в главе 8. Это удобно при анализе метрических свойств снимков и определении возможностей использования их для непосредственного получения метрической информации: измерения площадей, длин линий и др.

При фотограмметрической обработке снимков применяют иную систему координат — осью абсцисс служит линия, соединяющая противоположные, расположенные вдоль направления маршрута координатные метки, а осью ординат — линия, соединяющая оставшуюся пару координатных меток. Началом в этой системе координат должна быть главная точка снимка. В общем случае точка пересечения указанных координатных осей может не совпадать с главной точкой. Значение несовпадения указывают в паспорте съёмочной системы. Поправки, по необходимости, вводят в измеряемые на снимке координаты точек.

Пара горизонтальных снимков P_1 и P_2 , полученных с горизонтального базиса $B = S_1S_2$, с осями абсцисс, лежащими на одной прямой (идеальный случай съёмки), в позитивном варианте, показана на рисунке 9.4. Отвесная линия AD (на местности — столб, заводская труба и т. п.) отобразилась на снимках отрезками a_1d_1 и a_2d_2 , направленными в точки o_1 и o_2 соответственно, так как точки надира n_1 и n_2 на горизонтальных снимках совмещаются с главными точками. Точки a_1 и a_2 будут иметь равные ординаты $y_{a_1} = y_{a_2}$, так как в идеальном случае съёмки след сечения снимков базисной плоскостью будет параллелен общему направлению осей абсцисс этих снимков. Аналогичное равенство будет справедливым для любой пары соответственных точек.

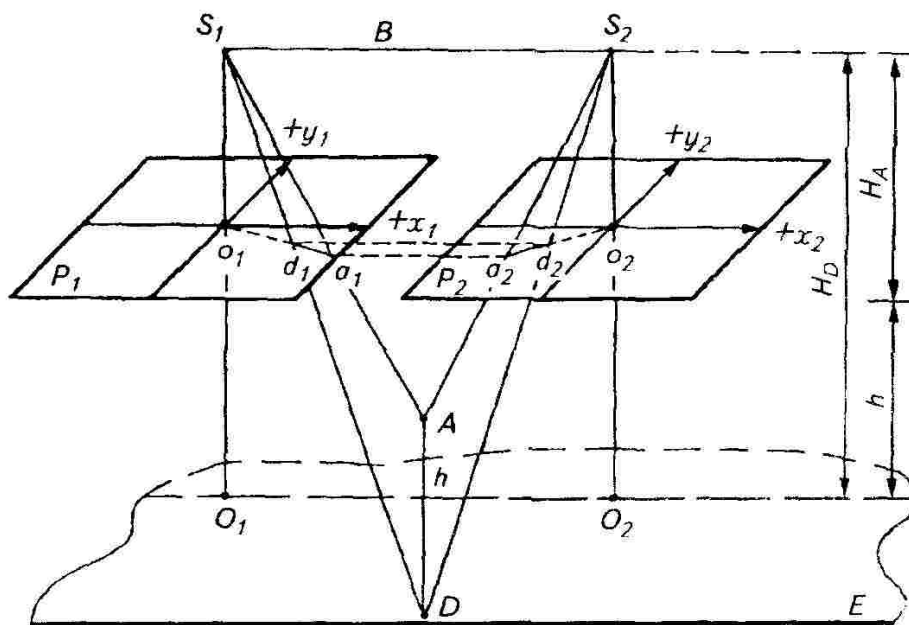


Рис. 9.4. Изображение отвесной линии на паре снимков идеального случая съёмки

Разность ординат соответственных точек пары снимков называют *поперечным параллаксом точки*.

$$y_{i_1} - y_{i_2} = q_i. \quad (9.6)$$

На реальных снимках в общем случае $q \neq 0$. Такие снимки, если значение q превышает определенные допуски, преобразуют (трансформируют). Ординаты после преобразования называют трансформированными и обозначают символами $y_{i_1}^e$ и $y_{i_2}^e$. Для трансформированных ординат должно выполняться условие

$$y_{i_1}^e - y_{i_2}^e = 0. \quad (9.7)$$

Из этого можно сделать вывод: поперечные параллаксы являются функцией некоторых величин, определяющих взаимное положение пары снимков (элементов взаимного ориентирования снимков).

Варианты элементов взаимного ориентирования, их роль в процессе обработки пар снимков будут рассмотрены в главе 12, а в данном разделе — суть технологии использования пары не преобразованных снимков для определения некоторых пространственных характеристик изобразившихся на них объектов, например высот зданий, углов наклона участков местности и др.

Одна и та же пара снимков в различных ракурсах показана на рисунках 9.4 и 9.5. Из них видно, что абсциссы точек изображения изменяются в зависимости от высоты их положения относительно плоскости, принятой за начальную (на рис. 9.4 плоскость E). С увеличением геодезической отметки точки масштаб изображения элементов, лежащих в горизонтальной плоскости, проходящей через эту точку, будет укрупняться. Соответственно увеличатся абсциссы изображения точек, принадлежащих этой плоскости. Следовательно, через абсциссы точек пары снимков можно получить информацию о высотах точек и, в частности, о рельефе местности.

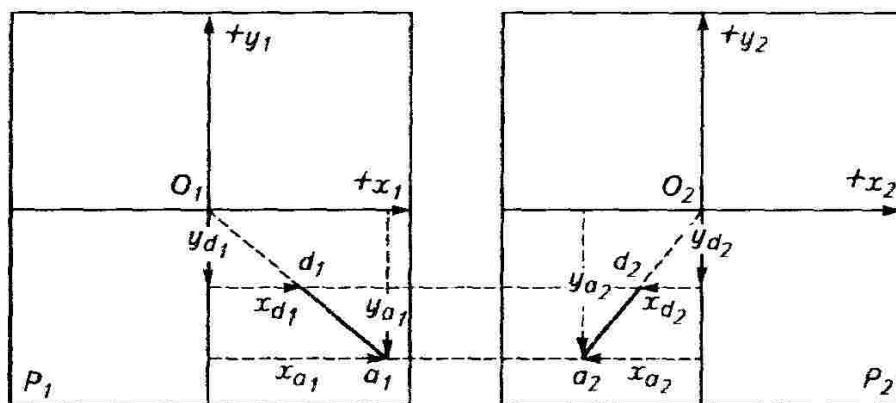


Рис. 9.5. Координаты концов отвесной линии, изображенной на паре снимков

Разность абсцисс пары соответственных точек на левом и правом снимках называют *продольным параллаксом точки*:

$$p_i = x_{i_1} - x_{i_2}. \quad (9.8)$$

На реальных снимках абсциссы и соответственно продольные параллаксы будут искаженными (вспомним о смещении точек снимка вследствие его наклона). Следовательно, продольные параллаксы определяемых точек предварительно должны быть освобождены от искажений, т. е. трансформированы. Аналогично предыдущему трансформированные абсциссы и продольные параллаксы обозначают добавочным символом:

$$p_i^{\circ} = x_{i_1}^{\circ} - x_{i_2}^{\circ}. \quad (9.9)$$

9.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕВЫШЕНИЙ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ ПО ПАРЕ СНИМКОВ

На снимках идеального случая съемки координаты точек не искажены. Следовательно, значения продольных параллаксов зависят только от высот изобразившихся на снимках точек. Превышение одной точки над другой, например точки *A* над точкой *D* (см. рис. 9.4), вычисляют по формуле

$$h = \frac{H_{\text{нач}}}{p_{\text{нач}} + \Delta p^{\circ}} \Delta p^{\circ}, \quad (9.10)$$

где $H_{\text{нач}}$ — высота фотографирования над точкой, принятой за начальную (в примере H_D); $p_{\text{нач}}$ — продольный параллакс той же точки; Δp° — разность продольных параллаксов определяемой и начальной точек.

В практике пары снимков, которые можно было бы отнести к идеальному случаю съемки, встречаются редко. Поэтому возникает задача определения возможностей использования реальных снимков для определения превышений отдельных точек простейшим способом. Необходимость в этом возникает в основном при определении высот (глубин) дешифрируемых объектов, например средней высоты леса, высоты зданий при крупномасштабном картографировании, элементов рельефа антропогенного происхождения (курганов, ям) и др. В большинстве случаев при этом точки, превышение которых определяют, располагаются одна вблизи другой. Поэтому искажения абсцисс этих точек, а следовательно, и продольных параллаксов будут близкими по значению и при определении разностей продольных параллаксов могут не оказать существенного влияния на точность измерения превышений.

Приемлемое расстояние между точками, превышение которых определяют, зависит от степени наклона снимков, поворота их в

своей плоскости относительно используемой при измерении общей для пары снимков оси абсцисс, а также от значения f АФА. По результатам анализа зависимости искажения абсцисс точек снимка от перечисленных факторов с экспериментальным подтверждением результатов установлено:

на плановых снимках отстояние одной точки от другой в 5 мм может привести к погрешности в Δp до 0,05 мм при $f = 200$ мм и до 0,10 мм при $f = 100$ мм;

на гиросtabilизированных снимках погрешности сократятся до 0,02 мм при $f = 200$ мм и до 0,03 мм при $f = 100$ мм.

Приведенные данные позволяют с достаточной точностью определять допустимое значение расстояния между определяемыми точками для других условий съемки, используя при этом линейную интерполяцию. Отметим также, что при работе с гиросtabilизированными снимками (углы наклона $10...20^\circ$) при $f = 200$ мм по паре снимков с достаточной точностью можно определять превышения точек местности, отстоящих одна от другой до 20 мм.

При обработке снимков равнинной и всхолмленной местности формула (9.10) может быть упрощена. В качестве $H_{\text{нач}}$ можно принять среднюю высоту съемки для используемой пары снимков H , если замена не приведет к недопустимым погрешностям в определяемых превышениях точек. Зависимость точности вычисления превышений от точности используемой в вычислениях высоты — линейная, т. е.

$$\frac{H_{\text{max(min)}} - H}{H} = \frac{\Delta H}{H} < \frac{1}{t}, \quad (9.11)$$

где $\frac{1}{t}$ — допустимая относительная погрешность определения превышений точек или высот объектов.

Рассуждая аналогично, можно перейти к использованию среднего значения параллакса в рассматриваемой формуле и одновременно опустить в знаменателе величину Δp° , так как значение p° для снимков с продольным перекрытием около 60 % составляет около 70 мм, а Δp° при определении высот дешифрируемых объектов в сельских поселениях, лесах и т. п. — около 1 мм. Относительная погрешность, обусловленная этим упрощением, составит 1/70, что вполне приемлемо при выполнении этих работ.

Формула (9.10) примет вид:

$$h = \frac{H \Delta p}{p}. \quad (9.12)$$

Продифференцировав ее по переменным h и p и перейдя к

средним квадратическим погрешностям, получим:

$$\sigma_h = \frac{H}{p} \sigma_{\Delta p}. \quad (9.13)$$

С помощью этой формулы можно приближенно рассчитать ожидаемую точность определения высот объектов по имеющимся снимкам, а также определить высоту фотографирования для новой съемки, при которой высоты объектов будут вычислены с заданной точностью. Точность измерения разностей продольных параллаксов с помощью простейших стереоизмерительных приборов около 0,02 мм. Прецизионные стереоприборы и компьютерные измерения позволяют повысить точность до 0,002... 0,005 мм.

Углы наклона участков местности

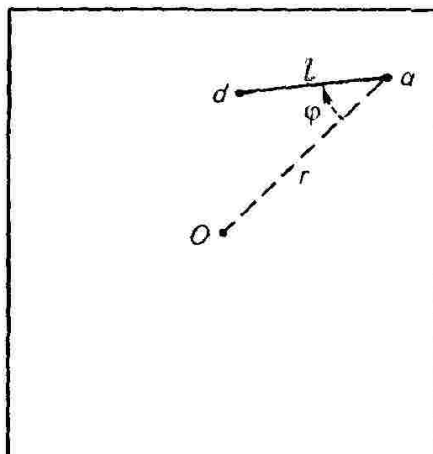


Рис. 9.6. Схема определения углов наклона участков местности с помощью простейших стереоизмерений

$$v = \arctg \frac{f \Delta p}{pl - r \Delta p \cos \varphi}, \quad (9.14)$$

где Δp — разность продольных параллаксов точек отрезка, направленного вдоль ската (на рис. 9.6 a и d); l — длина отрезка ad ; r — расстояние от главной точки снимка до конца отрезка, расположенного выше по скату (на рис. 9.6 до точки a); φ — угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки, между центральным направлением, проходящим через точку a , и отрезком ad .

9.6. ПРОСТЕЙШИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СТЕРЕОПРИБОРЫ

Для выполнения стереоскопических измерений высот объектов, уклонов участков местности стереоскоп должен быть снабжен устройством для измерения разностей продольных параллаксов. Такое устройство может быть автономным (параллаксометр) и использоваться совместно с обычным стереоскопом, например с ЛЗ, или входить составной частью в конструкцию стереоскопа. Например, таким прибором может служить дешифровочный стереоскоп ДС-4. Прибор можно быстро собрать и разобрать. Предназначен он для наблюдения снимков формата до 30 × 30 см при естественном и искусственном освещении. Бинокляр сменный с увеличением 0,9; 3,6 и 7,2 крат. Диаметр поля зрения изменяется от 18,5 до 2,5 см. Снимкодержатель свободно перемещается под наблюдательной системой в горизонтальной плоскости. Система рычагов при этом обеспечивает сохранность ориентирования снимков.

К этому же классу приборов относится стереоскоп с маркирующими механизмами — СММ (рис. 9.7). Прибор можно использовать в полевых и камеральных условиях. Кроме стереоскопических измерений высот дешифрируемых объектов и углов наклона участков местности с помощью СММ можно идентифицировать и маркировать точки на одномасштабных и разномасштабных снимках, а также переносить результаты дешифрирования со снимков на фотопланы (ортофотопланы) при разности масштабов от 0,8 до 4 крат. В полевых условиях обрабатывают снимки формата 180 × 180 мм. Увеличение оптической системы с бинокулярной насадкой в 5 крат. Поле зрения при таком увеличении не менее 30 мм. Средняя квадратическая погрешность идентификации точек одномасштабных снимков не более 0,03 мм.

Технология измерения разностей продольных параллаксов заключается в следующем. Снимки ориентируют по *начальному направлению* — направлению, проходящему через собственную главную точку снимка и главную точку, перенесенную со смежного снимка. Снимки укладывают под наблюдательную систему так, чтобы их главные точки расположились на линии абсцисс прибора или параллельно ей. Перемещая снимки вдоль этой линии, а также вращая их в своей плоскости, добиваются получения стереоэффекта. Начальные направления при этом окажутся примерно на оси абсцисс. Уточняют ориентирование устранением остаточных поперечных параллаксов на главной точке правого снимка, вращая снимок левого, и наоборот. Затем последовательно переходят в зоны расположения объектов, высоты которых определяют. В общем случае в каждой зоне будут наблюдаться по-

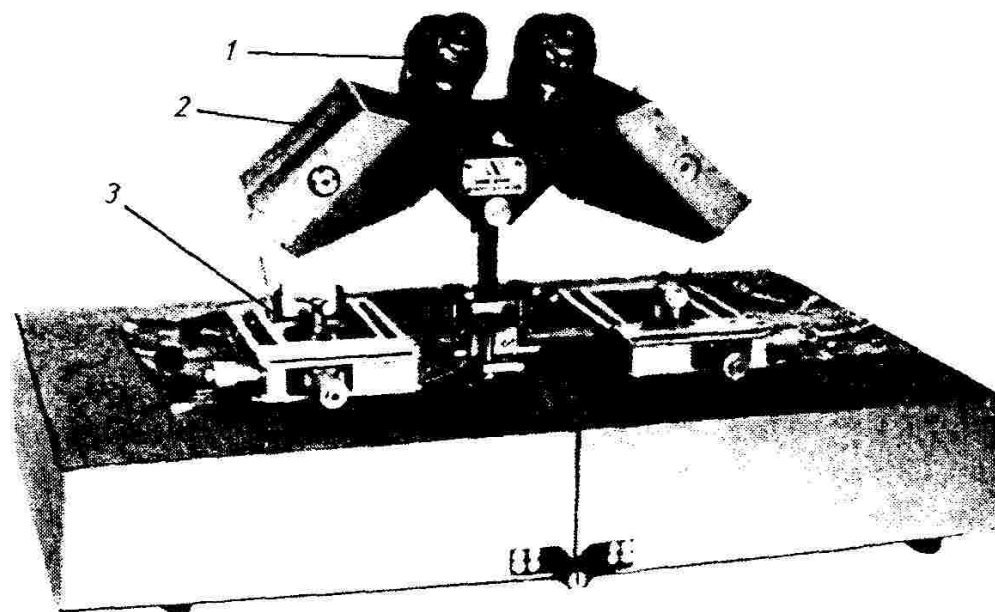


Рис. 9.7. Стереоскоп СММ:

1 — бинокляр; 2 — зеркало; 3 — снимкодержатель

перечные параллаксы. Здесь их перед измерением продольных параллаксов устраняют вертикальным перемещением одной из марок. Совмещают пространственную марку с поверхностью стереомодели (при правильном ориентировании снимков обе марки сольются в одну воспринимаемую наблюдателем пространственно марку) вращением параллактического винта. Разность снимаемых со шкалы винта условных отсчетов при последовательном совмещении марки с точками, превышение которых определяют, будет величиной Δr для данной пары точек.

Кстати, отметим, что по значению возникающих в разных частях рабочей площади стереопар поперечных параллаксов можно судить о примерном значении углов наклона и разворота обрабатываемых снимков и соответственно устанавливать возможные расстояния между наблюдаемыми точками.

Контрольные вопросы и задания

1. Можно ли увеличить глубину стереоскопического зрения? 2. Как получить «стереопортрет» любительской фотокамерой? 3. Как изготовить стереоаэрофотоснимок в границах кадра? Как его рассматривать? 4. Можно ли стереоскопически рассматривать снимки, полученные с помощью нефотграфических съемочных систем? 5. Определите, с какой погрешностью будут измеряться высоты зданий при точности измерения разностей продольных параллаксов 0,02 мм при наличии аэрофотоснимков формата 18×18 см в масштабе 1:5000, полученных АФА с $f=200$ мм. Перекрытие снимков 60 %. 6. Требуется, чтобы высота (глубина) объекта была измерена стереофотограмметрически с погрешностью не более $\sigma_h = \dots$ м. Определите параметры аэрофотосъемки, обеспечивающие получение нужных результатов измерения с помощью простейших стереоприборов (погрешность измерения разностей продольных параллаксов $\sigma_{\Delta p} = 0,02$ мм). 7. Получены снимки с продольным перекрытием 80 %. Возможно ли повышение точности стереоскопического определения высот объектов в данном случае? Если возможно, обоснуйте расчетом ожидаемый выигрыш в точности. 8. По каким снимкам стереоизмерение превышений будет точнее? Каким (в %) будет выигрыш в точности, если имеются две пары снимков, фотографическое качество и разрешающая способность которых одинаковы? Одна из пар получена АФА с $f=200$ мм в масштабе 1:5000, другая — АФА с $f=100$ мм в масштабе 1:8000.

Глава 10

ФОТОСХЕМЫ И СТЕРЕОФОТОСХЕМЫ

10.1. ФОТОСХЕМЫ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Фотосхемой называют фотографическое изображение местности, составленное из рабочих площадей снимков. Материалом для монтажа фотосхем служат контактные и, реже, увеличенные снимки.

Отметим, что при съемке с помощью сканирующих съемочных систем, например ADS-40, получают непрерывное для всего маршрута изображение. Оно, в первичном состоянии, адекватно маршрутной фотосхеме, и его можно использовать для решения задач, перечисленных в начале данной части.

Удобнее изготавливать одномаршрутные фотосхемы. Если возникает необходимость в обеспечении фотосхемами территорий, выходящих по площади за пределы одномаршрутной фотосхемы, монтируют несколько одномаршрутных фотосхем. Наклеивают их на основу одну под другой. Это позволяет избежать в некоторых случаях значительных расхождений ситуационных элементов в полосе поперечного перекрытия фотосхем. Маршрутные границы рабочих площадей фотосхем, проведенные по их идентичным точкам, могут существенно различаться по начертанию. Технология разграничения смежных фотосхем будет рассмотрена в разделе 15.8.

Возможность изготовления единой многомаршрутной фотосхемы при благоприятных условиях (местность равнинная, снимки гиростабилизированные) не исключается.

Важное достоинство фотосхем — для их изготовления не требуется геодезической подготовки снимков и на монтажные работы требуется мало времени.

Расширим определение назначения фотосхем в специальном картографировании и дистанционном зондировании. Фотосхемы можно использовать как приближенный картографический материал на стадии предварительного изучения территорий и эскизного межевания. Проектировщик при этом получает существенные преимущества в сравнении с решением тех же задач по имеющимся графическим планам или картам — фотоизображение содержит большой объем самой свежей информации о состоянии угодий, объектов инфраструктуры, водоемов и др. Фотосхемы — более удобный материал, чем отдельные снимки, для тех видов дешифрирования, в которых требуется выявление взаимосвязей элементов ландшафта, закономерностей строения рельефа на больших территориях, например при почвенном дешифрировании или мелиоративных изысканиях.

И наконец, фотосхемы — незаменимый материал при выполнении дешифровочных работ с борта самолета или вертолета (аэровизуальное дешифрирование).

10.2. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОСХЕМ

Различают два способа монтажа фотосхем — по соответственным точкам и по начальным направлениям.

Первый способ может быть реализован в двух вариантах — индивидуальной и совместной обрезки снимков. При индивидуальной обрезке вблизи средней линии продольного перекрытия снимков выбирают и накладывают на обоих снимках две надежно идентифицирующиеся точки (на рис. 10.1 точки a_1 , d_1 и a_2 , d_2). Разумеется, что эти точки должны располагаться на возможно большем расстоянии одна от другой. Приложив поочередно ли-

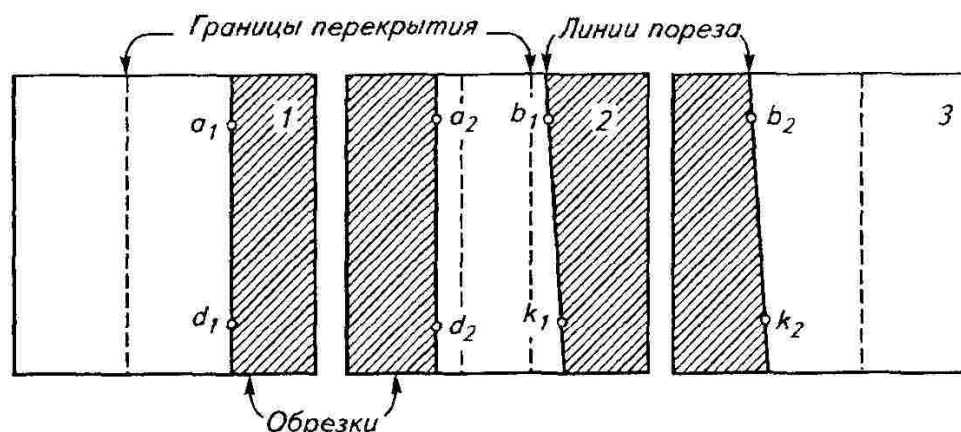


Рис. 10.1. Правила обрезки снимков при монтаже фотосхемы по соответственным точкам

нейку к наколотым точкам на одном и другом снимках, их обрезают по линиям a_1d_1 и a_2d_2 . Аналогично обрезают остальные снимки маршрута.

При работе с гиростабилизированными снимками равнины выгодно использовать в монтаже только четные или нечетные снимки (монтаж через снимок). Линии порезов пройдут примерно по середине оставшегося (примерно 20 %) продольного перекрытия. Объем работ при этом сократится при улучшении или, лучше сказать, предсказуемости метрических свойств фотосхемы.

Для совместной обрезки смежные снимки накладывают один на другой, добиваясь наилучшего совмещения элементов изображения вдоль средней линии перекрытия. Качество укладки контролируют наколами в верхней и нижней частях перекрытия, а также в его средней части. Уклонения контролируемых точек в середине должны быть минимальными, а вверху и внизу направлены вдоль средней линии.

Закрепленные грузиками снимки разрезают совместно по кривой или ломаной линии с небольшими отклонениями от средней линии перекрытия снимков. При выборе направления изгибов линии пореза желательно линейные элементы топографической ситуации и границы угодий проходить под углами, близкими к прямому, а компактные элементы обходить.

Отрезанные средние части снимков наклеивают безводным клеем на лист плотной бумаги, картона или другого материала. Разрезая снимки индивидуально, добиваются минимального расхождения элементов изображения в середине пореза.

Достоинство рассмотренного способа — высокая производительность и простота технологии. Однако влияние рельефа местности и угла наклона снимка на смещение точек, используемых при монтаже, может существенно искривить направление фотосхемы даже при идеальной прямолинейности съемочного маршрута.

Для рассмотрения влияния рельефа местности на искривление одномаршрутной фотосхемы возьмем снимки 1 и 2 (рис. 10.2). Допустим, что точка a выше точки d на некоторую величину h . В соответствии с формулой (8.12) точка a снимка 1 сместится по направлению от главной точки o (строго от точки надира) на $\delta = a_1^\circ a_1$, аналогично сместится и точка a_2 на снимке 2. Линии порезов при этом пройдут по направлениям $a_1 d_1$ и $a_2 d_2$. Искривление направлений пореза ϵ_h для каждого снимка определяют по формуле (8.16). Снимок 2 при этом развернется относительно направления съёмочного маршрута на величину $\epsilon_{h,1} + \epsilon_{h,2}$. Подсоединение последующих снимков в зависимости от особенностей рельефа может привести к нарастанию отклонения и образованию прогиба фотосхемы или к случайным искривлениям ее. Аналогично воздействует на непрямолинейность направления фотосхемы и наклон используемых для монтажа снимков.

Это усложняет процесс ограничения рабочих площадей на смежных одномаршрутных фотосхемах и практически исключает возможность изготовления качественной единой многомаршрутной фотосхемы.

Второй способ монтажа сложнее по технологии и менее производителен, но он позволяет сохранить то направление маршрута, которое было при съёмке, например прямолинейное.

Технология монтажа этого способа следующая. На всех снимках накалывают *рабочие центры* — четкие точки изображения, надёжно опознаваемые на смежных снимках. Они должны располагаться не далее чем $0,05f$ от главной точки снимков. Опознают и накалывают выбранные рабочие центры на смежных снимках. Направления на снимке, исходящие из собственного рабочего центра на рабочие центры, перенесенные со смежных снимков, называют *начальными*.

Примерно в пересечении начальных направлений со средними линиями перекрытия снимков выбирают и накалывают вспомогательные точки (на рис. 10.3 k_1 и k_2). Эти точки опознают и накалывают на смежных снимках. С помощью измерителя устанавливают степень разномасштабности используемых снимков. Для

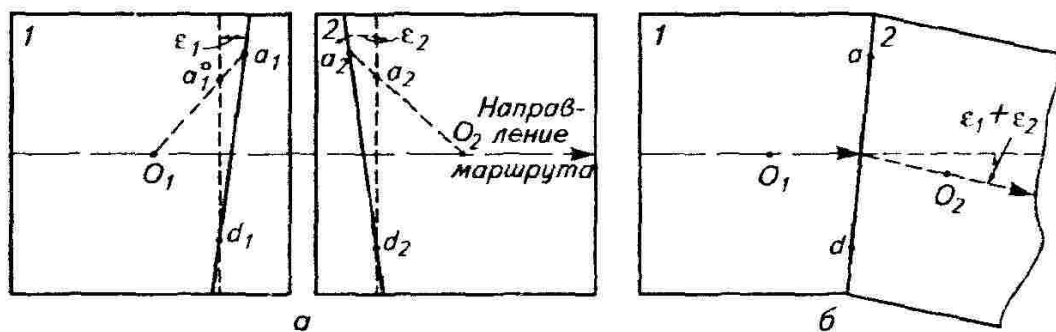


Рис. 10.2. Искривление фотосхемы рельефной местности

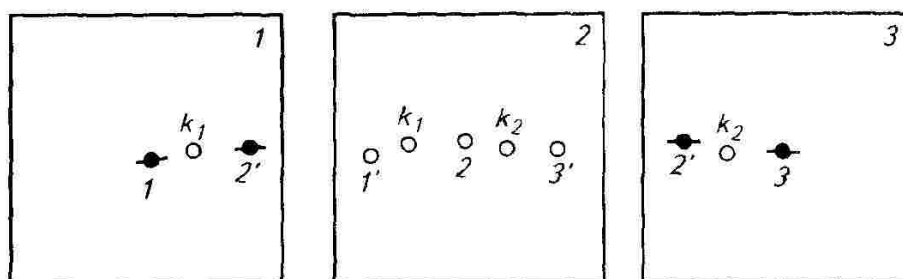


Рис. 10.3. Порядок подготовки снимков при монтаже по начальным направлениям

этого определяют разность расстояний между собственным и перенесенным рабочими центрами каждой пары смежных снимков. Если разности не превышают 1 мм, с помощью пуансона пробивают отверстия на всех наколотых точках. При большей разности отверстия пробивают на вспомогательных точках всех снимков и на рабочих центрах четных или нечетных снимков. На остальных снимках через рабочие центры вдоль начальных направлений прочерчивают штрихи длиной 5 мм (см. рис. 10.3).

Подготовленные снимки попарно укладывают один на другой так, чтобы отверстия на вспомогательных точках совпали точно, а несовмещения отверстий на рабочих центрах были направлены по начальному направлению. Если рабочие центры пробивались через снимок, то штрихи нижнего снимка должны совпадать с центрами отверстий верхнего снимка. Обрезка снимков в данном способе может выполняться только совместно по кривым или ломаным линиям.

Качество монтажа фотосхемы оценивают с помощью обрезков. На каждом порезе можно использовать любой из двух обрезков. Обрезок прикладывают к порезу так, чтобы элементы изображения на нем точно совпали с соответственными элементами вмонтированного в фотосхему фрагмента того же снимка. Иглой вдоль пореза, возможно ближе к нему, через 2...3 см накалывают четкие точки изображения. Сняв обрезок, измеряют отклонения наколов от точек, которые накалывали на обрезке. Аналогично выполняют контроль по другим порезам. Принципиально можно измерять абсолютные отклонения. Но более важно оценить размер смещения накола в продольном направлении. Если накол оказался между линией пореза и точкой, наколотой на обрезке, то изображение в этом участке пореза дублируется — смещение на корректурном листе обозначают знаком «плюс» (рис. 10.4). В противном случае на фотосхеме образовался вырез, размер которого показывают на корректурном листе со знаком «минус». Корректурный лист представляет собой уменьшенное схематическое изображение фотосхемы с примерным сохранением формы порезов.

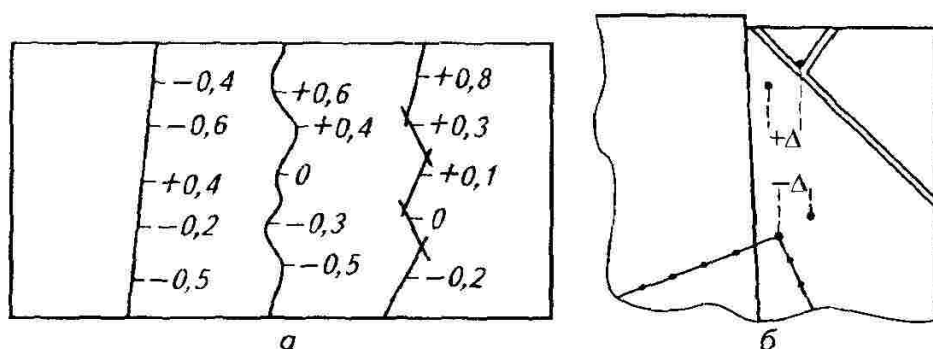


Рис. 10.4. Корректирующий лист (а) и правила определения дублетов и вырезов (б)

Допустимые значения дублетов и вырезов официально не регламентируют, но очевидно, что дублеты предпочтительнее вырезов.

10.3. МАСШТАБ ФОТОСХЕМЫ И ЕЕ МЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Фотосхемы характеризуются средним масштабом. Определить его просто и быстро можно, сопоставив два соответственных базиса, измеренных на фотосхеме и карте. Масштаб карты при этом должен быть не мельче масштаба фотосхемы. Базисы располагают по диагоналям фотосхемы.

При отсутствии подходящей карты средний масштаб фотосхемы может быть определен по опознанным на фотосхеме пунктам государственной геодезической опоры или по высотам съемки использованных при изготовлении фотосхемы снимков. Средний масштаб вычисляют по формуле

$$\frac{1}{\bar{m}} = \frac{f}{\bar{H}}, \quad (10.1)$$

где $\bar{H}$ — средняя высота съемки для использованных при монтаже снимков.

Метрические свойства фотосхемы в пределах вмонтированных в нее рабочих площадей снимков остаются теми же, что и для отдельных снимков (см. гл. 8). Измерения небольших расстояний и площадей через порез могут содержать существенные дополнительные погрешности. О значении их можно судить по результатам оценки качества монтажа. С увеличением расстояний и площадей результаты их измерения будут точнее, так как распределение погрешностей, обусловленных влиянием наклона снимка и рельефа местности, а также наличием вырезов и дублетов на порезах, будет приближаться к нормальному. Можно предположить, что площадь пахотных или других угодий адми-

нистративного района может быть определена по фотосхемам, при корректном определении их среднего масштаба, с точностью, приближающейся к точности решения той же задачи по планам. Разумеется, что рельеф на этой территории будет равнинный или всхолмленный.

10.4. СТЕРЕОФОТОСХЕМЫ, ИХ НАЗНАЧЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

При выполнении некоторых видов проектно-изыскательских и дешифровочных работ возникает необходимость в стереоскопическом изучении рельефа на территории значительной протяженности, например при ограничении площадей водосбора, инженерно-геологическом и почвенном дешифрировании. Казалось бы, для этого можно использовать пару космических кадровых снимков, покрывающую нужную территорию. Но это не так. Средне-масштабные и тем более крупномасштабные плановые космические снимки получают с помощью длиннофокусных съемочных систем с узким углом поля изображения. Отношения базиса к высоте съемки B/H здесь значительно меньше, чем при аэросъемке. Рельеф будет восприниматься сглаженным, за пределами порога стереоскопического восприятия останутся элементы микро- и даже мезорельефа.

Задача расширения обзорности одновременного или, по крайней мере, непрерывно-последовательного стереовосприятия рельефа наиболее просто может быть решена путем создания стереофотосхем. Принцип их изготовления заключается в следующем. Каждый снимок, кроме крайних в маршруте, используют дважды при последовательном стереоскопическом наблюдении: в одной паре как левый, в другой — как правый (рис. 10.5). Если из каждого снимка выделить его левую (л) и правую (п) части путем индивидуального пореза по линиям, проходящим через пары соответственных точек перекрывающихся снимков (на рис. 10.5 обозначены цифрами), и наклеить эти части на отдельные основы, получим пару фотосхем. Наблюдая их под стереоскопом, получим стереомодель маршрута. Некоторые части снимков после пореза окажутся лишними (на рис. 10.5 заштрихованы).

Стереофотосхема — пара фотосхем, одна из которых смонтирована из левых, а другая из правых половин комплекта перекрывающихся снимков.

Пары точек, определяющие направление порезов, должны иметь примерно одинаковые высоты. Вследствие невыполнения этого условия, а также накопления погрешностей монтажа по линиям соединения снимков образуются так называемые провалы — видимые относительные вертикальные смещения или перекосы

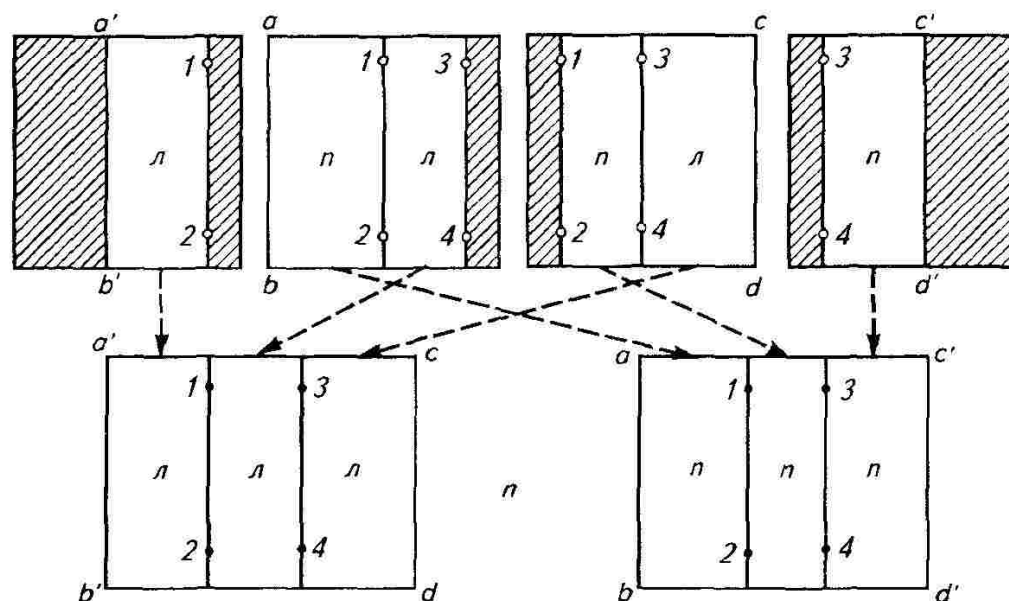


Рис. 10.5. Схема монтажа одномаршрутной стереофотосхемы при индивидуальной обрезке снимков

смежных стереомоделей. Но несмотря на это работать по таким стереофотосхемам удобнее и производительнее, чем по одиночным разрозненным стереопарам.

Практически беспровальные стереофотосхемы можно изготовить, используя стереоскопический способ монтажа. Этот способ менее производителен, но обеспечивает хорошие результаты. Суть его в следующем. Под стереоскопом ориентируют второй и третий по порядку слева снимки маршрута. На второй снимок накладывают первый так, чтобы изображения на них совместились по визуальной оценке наилучшим образом, особенно по краю первого снимка. После этого наблюдатель увидит две стереомодели — одну в узкой полосе тройного перекрытия *A* (рис. 10.6), полученную в результате наблюдения первого и третьего снимков, и другую в полосе *B* при наблюдении второго и третьего снимков. В общем случае вдоль линии *cd* будет наблюдаться провал, который устраняют перемещением и вращением первого снимка. Первый и второй снимки закрепляют на монтажной доске кнопками и совместно разрезают по извилистой линии. Порез должен проходить справа от середины тройного перекрытия снимков. Аналогично ориентируют и разрезают все последующие снимки маршрута. На левый снимок очередной пары накладывают отрезанную часть предыдущего снимка. По завершении первичной обрезки снимков правые части наклеивают последовательно на полосу плотной бумаги. Полученное будет левой частью стереофотосхемы.

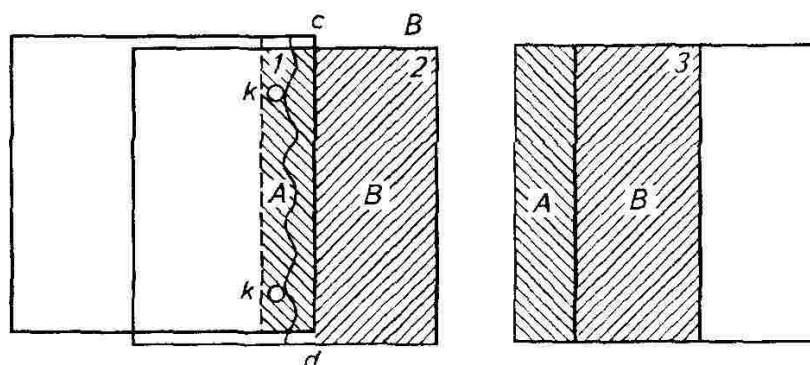


Рис. 10.6. Принцип стереоскопического монтажа стереофотосхемы и положение линий пореза снимков

Левые части снимков разрезают аналогичным образом с той лишь разницей, что под правым зеркалом в качестве вспомогательного изображения будут постоянно использовать готовую левую часть стереофотосхемы. Ее и все подлежащие обрезке снимки разворачивают в своей плоскости на 180° . Порезку снимков выполняют примерно по середине оставшегося перекрытия. Обрезанные левые части снимков наклеиваются на другую полосу бумаги. Полученное — правая часть стереофотосхемы.

Линия порезов на левой и правой частях при рассмотренном способе монтажа не будет проходить по идентичным точкам фотоизображения. Это обеспечивает окончательное «сглаживание» остаточных смещений (провалов) стереомоделей, которые могут возникнуть при недостаточно аккуратной порезке снимков или некоторой разномасштабности их по линиям пореза.

Опыт показывает, что создание беспровальной многомаршрутной стереофотосхемы практически невозможно. Поэтому при необходимости расширения зоны стереоскопического анализа рельефа удобнее изготавливать несколько одномаршрутных стереофотосхем, левые и правые части которых наклеивают на отдельные основы параллельными рядами. Для работы со стереофотосхемами удобно использовать стереоприборы со свободно перемещающейся над ними наблюдательной системой, например интерпретоскоп или специальный стереоскоп, изготовленный фирмой «Вильд».

Контрольные вопросы и задания

1. Погрешности угловой взаимной ориентации смежных снимков в фотосхеме, очевидно, приведут к «клинообразному» изменению расхождений соответственных точек на порезе (см. два правых пореза на рис. 10.3). Возможно ли распределение расхождений, показанное на левом порезе? При положительном ответе объясните причину такого расхождения. 2. Как изменяются расхождения соот-

ветственных точек на порезах фотосхемы, смонтированной по начальным направлениям, в сравнении с расхождениями на фотосхеме, смонтированной по соответственным точкам? Увеличатся они в среднем или уменьшатся? 3. Объясните или мотивированно отвергните утверждение, что с увеличением размеров территории, площадь которой измеряют по фотосхемам, результаты будут точнее. 4. Предложите технологию использования современных технических средств для определения площадей значительных по размерам территорий на стадии эскизного межевания. 5. Можно ли изготовить стереофотосхему так, чтобы обе части ее были совмещены? Если да, то какой должна быть технология изготовления и наблюдения? 6. Можно ли, используя стереофотосхему, определять высоты объектов? Повлияют ли порезы на точность определения высот? 7. Будет ли изготовленная пара фотосхем, одна из которых смонтирована из четных, а другая из нечетных снимков, стереофотосхемой? Ответ обосновать теоретически, используя сведения, приведенные в данном разделе.

Часть III

ВТОРИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ЗЕМЕЛЬНОМ И ГОРОДСКОМ КАДАСТРЕ



Вторичные информационные модели — результат какого-либо преобразования исходных снимков. Можно выделить два основных вида преобразования: фотографическое и геометрическое.

Первый выполняют с целью упрощения процесса извлечения из снимков семантической информации. Способы при этом могут быть разными, например увеличения изображения, повышения его контрастности, устранения влияния некоторых шумов и т. п. В данной части рассматривают наиболее употребляемый в землеустройстве и кадастре способ преобразования — увеличение изображений.

Основная цель второго вида — получение изображения местности в нужной картографической проекции. В землеустройстве и кадастре используют, как правило, крупномасштабные планы (1:10 000...1:2000 и крупнее). Поэтому суть геометрических (фотограмметрических) преобразований в данном случае сводится к преобразованию аэрофотоснимков, полученных в центральной проекции, в изображение местности в ортогональной проекции. Результат при использовании современных технологий фотограмметрической обработки снимков получается в виде цифровых моделей местности, которые при необходимости можно преобразовать в традиционные графические планы (карты) на бумажной основе или ортофотопланы.

Далее рассмотрены теоретические основы аналитического преобразования и технологии цифровой обработки одиночных и пар снимков, а также даны общие представления о сопутствующих процессах. Здесь же изложены основы получения и фотограмметрической обработки наземных снимков при решении задач сельскохозяйственного назначения.

Глава 11

УВЕЛИЧЕННЫЕ СНИМКИ

11.1. ИНФОРМАТИВНОСТЬ И ДЕШИФРИРУЕМОСТЬ ИСХОДНЫХ СНИМКОВ

Говоря об *информативности снимков*, обычно имеют в виду семантическую информативность. Оценивает информативность экспертно-опытный специалист, определяющий потенциальную возможность получения с данных снимков необходимых сведений об изучаемых объектах. При выполнении этой процедуры эксперт использует технические средства — набор луп различной кратности, приборы с панкратической (переменного увеличения) наблюдательной системой. Оценивают информативность словами, например «высокая», «достаточная», «недостаточная». Очевидно, что одни и те же снимки могут быть оценены по-разному специалистами, выполняющими с их помощью различные задачи.

Критерием экспертной оценки снимков является также их *дешифрируемость*. При этом определяют доступность извлечения из снимков конкретной семантической информации. Если вся необходимая информация может быть получена непосредственно с анализируемых снимков, то оценка их информативности и дешифрируемости совпадут.

При недостаточной дешифрируемости высокоинформативных снимков эксперт определяет пути повышения дешифрируемости — увеличение изображения, повышение его контраста, уменьшение смаза, фильтрация и др.

11.2. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ НЕОБХОДИМОСТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ СНИМКОВ

По экономическим соображениям съемку выгодно выполнять в масштабе более мелком, чем масштаб картографирования. Предел уменьшения съемочного масштаба определяется возможностями отображения на снимках необходимых объектов местности (деталей) и обеспечения достаточной точности выполнения метрических действий по ним. В большинстве случаев исходные снимки не обеспечивают достаточной точности, а иногда и возможности, решения определенных задач.

В разделе 9.1 отмечалось, что линейная разрешающая способность зрительного аппарата человека для монокулярного и бинокулярного зрения при благоприятных условиях наблюдения мира абсолютного контраста определяется значениями 20 и 40 мм⁻¹ соответственно. При анализе реальных снимков случаи наблюдения деталей с абсолютным контрастом относительно фона очень редки. Поэтому реальная разрешающая способность зрительного ап-

парата уменьшится по крайней мере вдвое. К тому же многие из анализируемых объектов по их геометрической форме относятся к компактным (зрение первого рода). В итоге оказывается, что средняя реальная разрешающая способность зрительного аппарата при анализе снимков характеризуется значением $7...10 \text{ мм}^{-1}$ и меньше.

Современные аэро- и космические снимки благодаря высокому качеству объективов съемочных систем, использованию компенсирующих смаз изображения устройств и устойчивых в полете носителей имеют разрешающую способность $60...80 \text{ мм}^{-1}$ и более. Это дает возможность соответственно в восемь—десять раз уменьшить съемочный масштаб. Дешифрируемость таких снимков доводят до нужного уровня путем их увеличения. Здесь могут быть использованы два варианта — оптическое и фотографическое увеличение.

В первом варианте при извлечении из снимков семантической информации используют увеличивающие изображения приспособления — лупы, монокуляры и бинокляры специализированных приборов. Этот вариант можно применять при дешифрировании объектов, регистрируемых на снимках немасштабными условными знаками (колодцы, пункты геодезической опоры и т. п.), а также при наблюдении деталей, используемых в качестве индикаторов объектов, подлежащих нанесению на карту (печных труб при раздельном показе жилых и нежилых сельских построек и т. п.).

При дешифрировании малых по площади объектов, обозначаемых на снимках границами с условными знаками внутри контура, переход к более дорогому фотографическому увеличению неизбежен, если дешифрируют непосредственно снимок. Обратимся к примеру. При создании кадастровых карт в масштабе 1:10 000 пашни, многолетние насаждения и культурные пастбища на осушаемых землях наносят на план, если площадь их на плане превышает 2 мм^2 . Допустим, что участок имеет квадратную форму. Сторона участка будет равной 1,4 мм. На снимках, полученных с расчетом использования четырехкратного увеличения, размер стороны окажется равным 0,35 мм. Ограничение такого участка на контактном снимке и размещение внутри него хотя бы одного условного знака невозможно. Выше отмечалось, что в производстве используют значительно большие коэффициенты увеличения.

Необходимость увеличения снимков обуславливается также обеспечением достаточной точности выполнения метрических работ. Такие работы возникают в основном при полевой инструментальной досъемке не отобразившихся на снимках объектов. Абсолютная погрешность фиксации концов измеряемых на снимках отрезков остается примерно постоянной при значительном (до 4...6) увеличении изображения. Дальнейшее увеличение кратнос-

ти приводит к монотонному возрастанию погрешности. Поэтому относительная погрешность измерения отрезков на оптимально увеличенном снимке сокращается примерно пропорционально кратности увеличения.

Очевидно, точность измерения координат точек по увеличенным снимкам с помощью дигитайзера, координатографа и других измерительных устройств будет аналогично повышаться.

11.3. ОПТИМИЗАЦИЯ КРАТНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ СНИМКОВ

Выбор коэффициента увеличения снимков имеет важное значение как с технической, так и с экономической точек зрения. При избыточном коэффициенте увеличения возрастают затраты на фотоматериалы и химикаты, усложняется работа со снимками завышенного формата. При недостаточном — появляется необходимость в дополнительном оптическом увеличении изображения при поиске и опознавании мелких деталей, снижается точность регистрации результатов дешифрирования, выполнения измерений.

Кратность увеличения зависит от формы, размера и контраста необходимых деталей исходного изображения.

В практике использовали «устоявшиеся» в конкретной технологии фотограмметрической обработки снимков коэффициенты увеличения, определяемые размерами рабочей площади снимка и планшета карты. В результате возникли технологические термины «снимок — планшет» или «снимок — четыре планшета». Именно это, а не специфика ситуации обрабатываемой территории превалировало при определении кратности увеличения снимков.

Современные компьютерные технологии фотограмметрической обработки снимков позволяют выполнять электронное масштабирование изображения в любых пределах. Но точность результата на выходе определяется полнотой и точностью дешифрирования снимков и точностью их геодезической подготовки. Поэтому коэффициент увеличения снимков находят, исходя из конкретных условий — характера ситуации и качества ее отображения на снимках.

Оптимизацию кратности увеличения снимков можно выполнять расчетным путем или эмпирически. В качестве первого варианта рассмотрим технологию, предложенную профессором Б. Н. Родионовым.

Коэффициент увеличения снимков может быть найден из отношения

$$K_{ув} = \frac{d_{ув}\rho}{\rho'_c}, \quad (11.1)$$

где $d_{ув}$ — некоторая константа; ρ и ρ'_c — характеристики линейного разрешения зрительного аппарата и деталей на снимке при одинаковых факторах формы a_R и контраста b_R .

Фактор формы вычисляют по формуле

$$a_R = \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_y}}, \quad (11.2)$$

где ρ_x — длина; ρ_y — ширина детали изображения.

Фактор контраста определяется выражением

$$b_R = 2 \left(\frac{K_\Phi}{2 - K_\Phi} \right)^n, \quad (11.3)$$

где K_Φ — контраст изображения детали и фона на снимке, $K_\Phi = (D - D_\Phi)/D$; n — показатель степени, подбираемый эмпирически.

Формулу (11.1) для контрастных деталей в развернутом виде можно представить следующим образом:

$$K_{ув} = d_{ув} \rho_0 \left(\frac{K_\Phi}{2 - K_\Phi} \right)^n / \rho'_0 \left(\frac{K}{1 - K} \right)^{0,5}, \quad (11.4)$$

где $K = (B - B_\Phi)/B$; B и B_Φ — видимые яркости соответственно детали и фона; ρ_0 и ρ'_0 — характеристика линейного разрешения зрительного аппарата и деталей снимка при абсолютном контрасте.

Для лучшего зрительного восприятия целесообразно иметь контраст изображения равным 0,5 и более. Если обозначить контраст детали на увеличенном снимке K'_Φ и принять $K = K'_\Phi = 0,5$, то формула (11.4) примет вид

$$K_{ув} = d_{ув} \frac{\rho_0}{\rho'_0} \left(\frac{K_\Phi}{2 - K_\Phi} \right)^n. \quad (11.5)$$

Из этого следует, что чем меньше контраст K_Φ увеличиваемого изображения, тем меньше должен быть коэффициент увеличения.

Увеличение более чем в ρ_0/ρ'_0 раз нецелесообразно, так как избыточное увеличение не улучшает дешифрируемость изображения и может ухудшить восприятие малоконтрастных деталей. Поэтому $d_{ув}$ должен быть 1,0...1,25.

Эмпирическую оптимизацию выполняют оперативно с достаточной точностью. С помощью качественного увеличителя получают ряд увеличенных изображений с типичного для данной территории негатива при различных коэффициентах увеличения. Шаг изменения коэффициента может быть любым. Среднее значение коэффициента при испытаниях устанавливается, исходя из

опыта выполнения предыдущих работ в близких условиях. Оптимальное значение коэффициента определяется экспертно по результатам анализа полученных материалов.

Другой вариант эмпирической оптимизации кратности увеличения применяется при наличии прибора с панкратической оптикой. Эксперт, изменяя плавно коэффициент оптического увеличения, находит предел, за которым прирост полезной информации прекращается. Этот предел и будет коэффициентом фотографического увеличения, близким к оптимальному. Также задача может быть решена с помощью комплекта луп разной кратности.

11.4. МЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УВЕЛИЧЕННЫХ СНИМКОВ

Увеличенные снимки рассматривались раньше в основном как носители семантической информации. Остановимся на анализе их метрических возможностей. Для этого выпишем из главы 8 необходимые для этого формулы:

влияние наклона снимка на положение его точек выражается формулой

$$\delta_{\alpha} = \frac{mr^2 \cos \varphi \sin \alpha_p}{H};$$

искажение площадей участков местности вследствие влияния наклона снимка определяют по формуле

$$\frac{\Delta P_{\alpha}}{P} = \frac{3mx \sin \alpha_p}{H};$$

смещение точек снимка за рельеф местности рассчитывают по формуле

$$\delta_n = \frac{rh}{H};$$

искажение площадей, обусловленное рельефом местности, вычисляют по формуле

$$\frac{\Delta P_h}{R} = \frac{m \times \operatorname{tg} v}{H}.$$

Сформулируем конкретно цель анализа: можно ли увеличенный снимок использовать как план для снятия метрической информации? Такой информацией при выполнении наиболее актуальных работ в землеустройстве и кадастре являются сведения о площадях и координатах поворотных пунктов границ землепользований (землевладений).

Очевидно, что возможным это будет в случае, если смещения точек изображения или искажение площадей не превысят пределов, установленных нормативными документами для конкретных работ.

Заметим, что в формулы для определения δ_α и δ_h на увеличенных снимках должны быть введены коэффициенты $K_{ув}$. Остальные формулы останутся неизменными — на увеличенных снимках возрастут значения ΔP и ΔR , но соответственно увеличатся и площади участков P .

Общее для всех формул — пропорциональное уменьшение абсолютных и относительных погрешностей при увеличении высоты фотографирования H . Увеличивая H при определении основных параметров аэрофотосъемки, необходимо соответственно увеличить и f АФА для сохранения оптимизированного уже по критерию информативно-семантической достаточности масштаба. Увеличение f при неизменном формате кадра приведет к уменьшению угла поля изображения АФА (2β). Связка проектирующих лучей при этом сужается — центральная проекция снимка будет приближаться к ортогональной. С некоторого момента (при увеличении H и f) смещения точек снимка за его наклон и рельеф местности войдут в установленные для данного вида работ нормы. Такой снимок по его метрическим свойствам может быть приравнен к фотоплану. Масштаб его в общем случае не будет стандартным, но он может быть определен и использован для измерения расстояний, площадей и др. Для определения масштаба могут быть использованы измеренные на снимке и в натуре соответственные базисы, опознанные на снимке точки государственной и межевой опорной сети, определенные с помощью установленного на борту приемника GPS или радиовысотомера высоты фотографирования. По тем же данным снимки при их увеличении могут быть приведены к стандартному масштабу.

Разберемся в сути и мере влияния анализируемых факторов на геометрию снимка при увеличении параметров H и f . На рисунке 11.1, а дана геометрическая интерпретация зависимости смещения точки изображения за влияние рельефа местности от высоты фотографирования при неизменном масштабе снимка:

$$\frac{1}{m} = \frac{f_1}{H_1} = \frac{f_2}{H_2}.$$

Значения смещения соотносятся с высотой съемки следующим образом:

$$\frac{a_1^* a_1}{a_2^* a_2} = \frac{H_2}{H_1}.$$

Наиболее употребимой метрической информацией, извлекае-

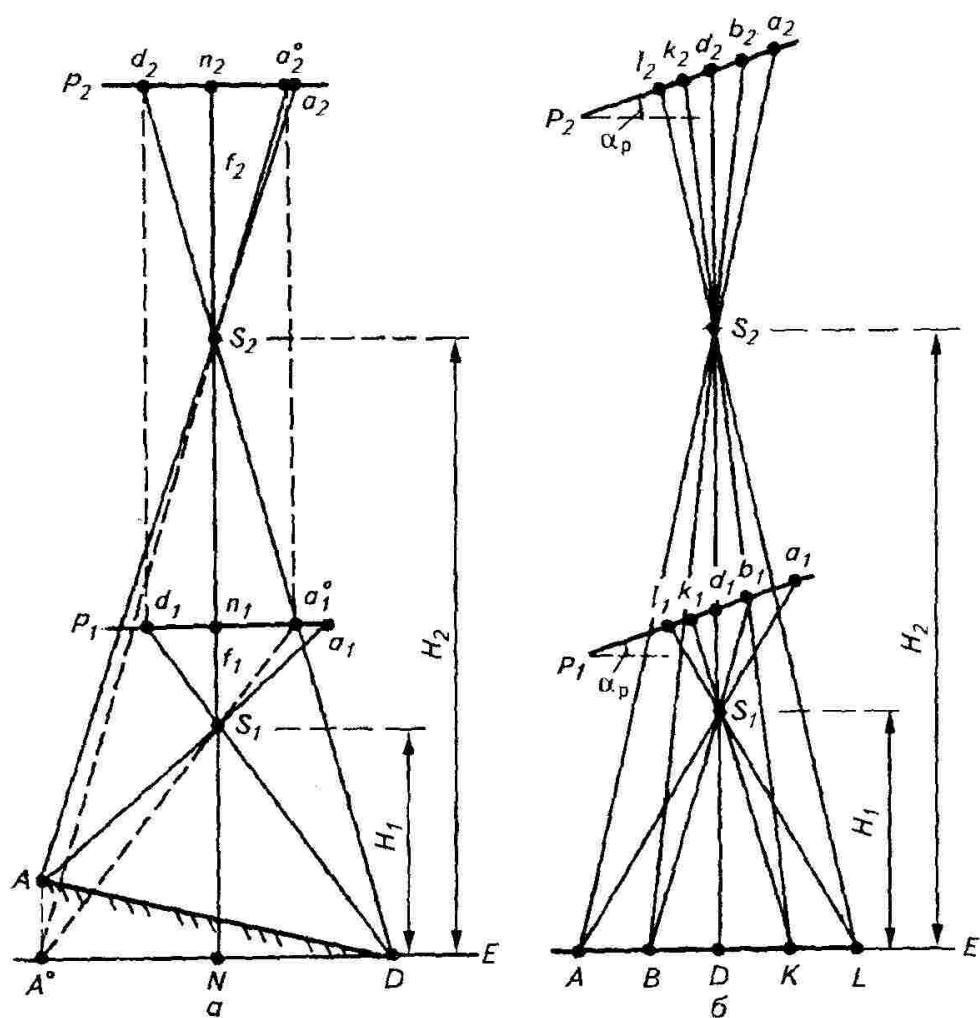


Рис. 11.1. Геометрическая интерпретация смещения точек изображения вследствие влияния рельефа местности (а) и наклона снимка (б) при изменении высоты фотографирования и неизменном масштабе снимка

мой из материалов аэрофотосъемки землеустроителями, являются площади участков. Проиллюстрируем степень зависимости точности изображения площадей на горизонтальном снимке от f АФА. Предельные углы наклона участков, вычисленные по формуле (8.15), при которых на исходных или увеличенных снимках в пределах всего кадра или их рабочей площади можно непосредственно измерять площади, приведены в таблице 11.1

11.1. Предельные углы наклона ν измеряемых участков

1/l	Используемая часть снимка	x, мм	ν при f , мм						
			70	100	140	200	350	500	1000
1/100	Весь снимок	100	24'	34'	50'	1°10'	2°	2°50'	5°40'
	Рабочей площади	70	34'	50'	1°10'	1°40'	2°50'	4°	8°10'
1/25	Весь снимок	100	31'	2°20'	3°10'	4°35'	8°	11°20'	21°50'
	Рабочей площади	70	2°20'	3°20'	4°40'	9°40'	11°20'	15°50'	20°40'

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что площади земельных участков большинства регионов нашей страны могут быть обмерены непосредственно по снимкам при правильном определении параметров их получения.

Влияние наклона снимка на его метрические свойства более наглядно иллюстрируется изменением масштаба изображения равновеликих линий местности $AB = BD = DK = KL$ (рис. 11.1, б). Разномасштабность снимка сокращается с увеличением высоты фотографирования.

С помощью формулы (8.9) составлена таблица 11.2, в которой приведены предельные углы наклона снимков, при которых непосредственное измерение площадей по ним будут выполнять с той же точностью, что и в предыдущем случае.

11.2. Предельные углы наклона снимка α_p

1/1	Используемая часть снимка	x, мм	α_p при f , мм						
			70	100	140	200	350	500	1000
	Весь снимок	100	8'	11'	16'	23'	40°	1°	1°52'
1/100	Рабочей площади	70	11'	16'	23'	33'	1°	1°20'	2°42'
	Весь снимок	100	33'	48'	1°04'	1°36'	2°10'	4°	7°40'
1/25	Рабочей площади	70	48'	1°04'	1°36'	2°08'	4°	5°20'	11°

По данным таблицы можно сделать вывод: гиостабилизированные снимки обладают большими метрическими возможностями даже при использовании АФА со сравнительно небольшими значениями f (200...300 мм). Камеры с $f = 500...1000$ мм позволяют с достаточно высокой точностью определять площади непосредственно по плановым снимкам равнинной местности.

Следовательно, при правильно выбранных параметрах фотографирования увеличенные снимки по их метрическим характеристикам могут быть приравнены к фотоплану. Масштаб его определяют по данным, приведенным ранее.

Это свойство увеличенных длиннофокусных снимков использовано профессором Б. Н. Родионовым при создании фотопланов, названных им *сельские фотопланы*.

В заключение отметим: здесь выполнен анализ влияния наклона снимка и рельефа местности на метрические свойства увеличенного изображения. Очевидно, что с увеличением снимка возрастает пропорционально кратности влияние на метрические свойства этих снимков таких факторов, как дисторсия объектива АФА, погрешности выравнивания пленки в плоскость при ее экспонировании, деформация пленки и др. Влияние их должно быть оценено и при необходимости учтено при работе с увеличенными снимками.

11.5. МЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТДЕЛЬНО ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ЧАСТЕЙ УВЕЛИЧЕННОГО СНИМКА

В предыдущем разделе предполагалось, что увеличенный снимок в целом по точности соответствует требованиям, предъявляемым к точности выполняемых работ. Очевидно, что каждая часть такого снимка при автономном использовании ее обладает также достаточной точностью. Однако возможности увеличения высоты аэрофотографирования не безграничны — аэроноситель АФА имеет ограниченную высоту полета. С увеличением высоты могут возникнуть трудности с обеспечением требований к фотограмметрическому качеству результатов съемки и др. Поэтому в некоторых случаях достаточной точностью могут обладать только центральные зоны увеличенных снимков. Планшеты (части снимка), вписывающиеся в эти зоны, можно использовать как план. Оценкой метрических свойств периферийных частей увеличенного снимка занимался профессор Я. И. Гебгарт. Воспользуемся результатами его исследований.

Ранее отмечалось, что в производственных предприятиях используют коэффициенты увеличения больше 5. Конкретный коэффициент выбирают, исходя из реальных возможностей увеличения обрабатываемых снимков, а также возможностей разделения рабочей площади увеличенного снимка на определенное число планшетов стандартного формата. Если увеличивают снимок формата 180×180 мм в пределах его рабочей площади, ограниченной через снимок, можно разместить 4 планшета размером 500×500 мм при $K_{ув} = 7$, или 9 планшетов при $K_{ув} = 10$, или 16 планшетов при $K_{ув} = 15$. Разумеется, увеличенный снимок для каждого планшета изготавливают отдельно. Назовем его ча-

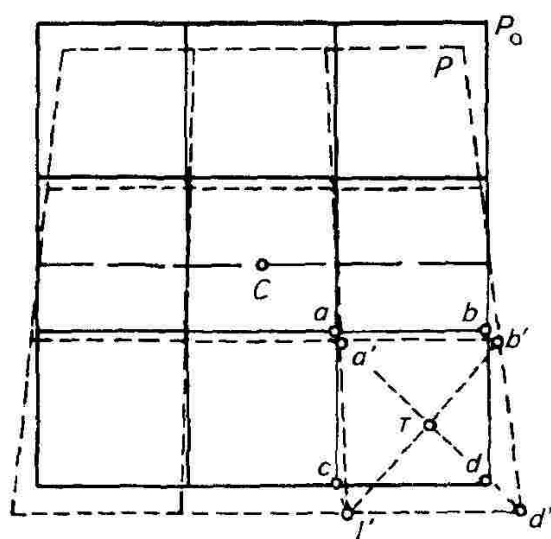


Рис. 11.2. Распределение смещений точек за влияние наклона целого снимка и его части

стью снимка. Возникает вопрос: каковы метрические свойства автономно используемых частей?

Рассмотрим отдельно влияние угла наклона исходного снимка α_P и рельефа местности на метрические свойства частей. Угол α_P вызовет искажения в пределах всего снимка, выражающиеся рассмотренными ранее функциями. Например, сетка квадратов равнинной местности на горизонтальном снимке изобразится без искажений (на рис. 11.2 изображена сплошными линиями). При наклоне снимка вдоль одной из сторон

сетки изображение превратится в совокупность закономерно преобразующихся трапеций (на рис. 11.2 показаны пунктирными линиями).

На рисунке видно, что наименьшим искажениям подверглись квадраты, расположенные вдоль горизонтали h_ch_c . Масштабы изображения сетки на горизонтальном и наклонном снимках вдоль линии h_ch_c будут одинаковыми (см. разд. 8.3). По мере удаления изображения квадратов от точки нулевых искажений с значения смещения их углов возрастают вследствие увеличения аргумента r_c в формуле (8.2). Однако взаимное смещение, например, углов a и d будет меньше, чем смещение угла d относительно точки c . Изображение квадрата, претерпевая определенные искажения формы, в целом смещается от или к точке нулевых искажений. Значит, перспективные смещения углов квадрата или участка иной формы в пределах планшета относительно его центра (на рис. 11.2 точка T) будут меньше, чем относительно общего центра рабочей площади снимка (точки c).

Иными словами, перспективные искажения увеличенного снимка могут быть локализованы для каждого выделенного планшета.

Наибольшее смещение в пределах увеличенной части имеют точки с максимальным значением y (в системе координат: ось абсцисс — горизонталь h_ch_c ; ось ординат — главная вертикаль). Вычисляют эти величины по формуле

$$\delta r'_{\alpha \max} = \left| \frac{K_{ув} y'_{\max} \sin \alpha_p}{2f} (y_{\max} + y'_{\max}) \right|, \quad (11.6)$$

где $K_{ув}$ — коэффициент увеличения; $y'_{\max}$ — ордината дальнего от точки c угла части; α_p — угол наклона снимка; f — фокусное расстояние АФА.

Эту формулу можно выразить иначе:

$$\delta r'_{\max} = \left| \frac{y'_{ув \max} \sin \alpha_p}{2f} \left(y_{\max} + \frac{y'_{ув \max}}{K_{ув}} \right) \right|, \quad (11.7)$$

где $y_{ув \max}$ — расстояние от центра увеличенной части до его угла.

Для случая гиросtabilизированной съемки ($\alpha_p = 40'$) с использованием АФА с $f = 350$ мм при $y_{\max} = 100$ мм ниже приведены максимальные смещения точки за влияние α_p на части ($\delta r'_{\alpha \max}$) и целом снимке ($\delta r_{\alpha \max}$), мм:

$K_{ув}$	7	10	15
$\delta r'_{\alpha \max}$	0,9	0,8	0,7
$\delta r_{\alpha \max}$	2,3	3,3	5,0
$\delta r_{\alpha \max} / \delta r'_{\alpha \max}$	2,7	4,2	6,9

Соотношение смещения точек возрастает с увеличением $K_{ув}$. Отметим также: полученные результаты не позволяют считать в данном случае, что самые удаленные от точки C части увеличенного снимка имеют допустимые смещения. Следовательно, эти части подлежат фотограмметрической обработке по используемой технологии. Пользуясь приведенными формулами, можно определить, в каких частях перспективные искажения окажутся в допустимых пределах. Эти части масштабируются с помощью указанных выше данных.

Влиянием рельефа на метрические свойства частей увеличенного снимка можно пренебречь только в тех случаях, когда отклонение высоты любой точки местности от средней секущей плоскости для данной части не приведет к недопустимым смещениям изображения этих точек на плане.

Контрольные вопросы и задания

1. На какие характеристики фотобумаги, используемой для получения увеличенных снимков, следует обратить особое внимание? 2. Какой разрешающей способностью должен обладать объектив фотоувеличителя, чтобы потеря в линейном разрешении увеличенных снимков за счет этого не превышала 10 %?

Глава 12

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ, ПЛАНЫ, КАРТЫ

12.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЛАНОВО-КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ

Использование новейших типов съемочных систем, переход к компьютерным технологиям и информационным системам позволяют получать и хранить полученную информацию о местности в виде цифровых моделей, которые при необходимости могут быть представлены в визуализированном виде (на экране монитора или в графическом виде на бумаге). Графические планы и карты стали вторичны по отношению к цифровым моделям местности.

Что же такое модель? И как частный случай — цифровая модель?

Моделью принято называть результат описания (моделирования) какого-либо объекта, процесса или явления. Модель позволяет заменить изучаемый объект или явление его упрощенной формой без потери необходимой информации о нем. Модель не обязана быть абсолютно тождественной самому прообразу, но должна обладать достаточностью. Под достаточностью модели понимают такое ее приближение к прообразу, при котором погрешности модели не превышают допустимые погрешности измерения параметров прообраза.

Процесс создания и изучения моделей — моделирование — одна из основных категорий теории познания: на идее моделирования, по существу, базируется любой метод научного исследования, как теоретический, так и экспериментальный.

Моделирование может быть семантическим (словесным), аналоговым и математическим.

В фотограмметрии наиболее широкое распространение получило математическое моделирование, которое описывает изучаемые объекты или явления в виде:

- формул (аналитические модели);
- геометрических образов (геометрические модели);
- массивов чисел (цифровые модели).

Цифровая модель местности (ЦММ) представляет собой многомерную цифровую запись информации о местности на магнитном носителе. В цифровых информационных потоках информация хранится поэлементно. Каждый элемент ЦММ имеет *n* численных характеристик, три из которых — пространственные координаты точки местности, остальные — закодированные числами семантические характеристики этой точки.

Цифровую модель местности, содержащую информацию о пространственном положении объектов местности, а также семантическую информацию об этих объектах, можно представить как совокупность цифровой модели рельефа (ЦМР) и цифровой модели ситуации (ЦМС).

Под ЦМР понимают массив чисел, являющихся пространственными координатами точек местности. ЦМС также представляет собой массив чисел, каждым элементом которого являются плановые координаты поворотных точек границ объектов и закодированная числами семантическая информация об этих объектах. Содержание контуров определяется тематикой модели ситуации — это могут быть топографические элементы, сельскохозяйственные угодья, лесотаксационные единицы, почвенные разности и т. п.

Цифровые модели местности являются базой для создания широкого спектра картографической продукции, используемой землеустроительными и кадастровыми службами. Это цифровые (электронные) карты, фотопланы, контурные фотопланы, топографические фотопланы, ортофотопланы, фотокарты, топографические планы, 3D-изображения.

Цифровая (электронная) карта (ЦК) — это объединение цифровой модели рельефа и нескольких цифровых моделей ситуации. Каждая ЦМС представляет собой так называемый слой ЦК. Все слои ЦК связаны между собой посредством ЦМР.

Как правило, в цифровых картах используют географические координаты, поэтому цифровые карты не имеют масштаба. При визуализации цифровая карта может быть представлена в любом

масштабе, но не крупнее того, точность которого соответствует точности исходных данных для создания ЦК.

Цифровые карты содержат значительно больший объем информации, нежели традиционные графические карты, благодаря послойному ее хранению.

Кроме того, цифровые карты физически не устаревают, не ветшают. Информацию о местности на современном уровне поддерживают ведением непрерывного мониторинга и картографического дежурства.

Фотоплан — фотографическое одномасштабное изображение местности в заданном, обычно стандартном масштабе, на которое нанесена координатная сетка. Как правило, фотопланы изготавливают в рамках трапеций государственной или условной разграфки или на территорию отдельных землепользований.

На контурных фотопланах условными знаками показаны необходимые элементы ситуации, некоторые элементы естественного рельефа: бровки балок, оврагов, линии резкого изменения крутизны склонов, а также искусственные формы рельефа.

На *топографических фотопланах* условными знаками показана ситуация и нанесены горизонтالي.

После удаления фотоизображения контурные и топографические фотопланы превращаются соответственно в *контурные* и *топографические планы*.

Иногда, например при проектировании противоэрозионных мероприятий, целесообразно сохранить фотоизображение, несущее максимум информации об эрозионных процессах. В таких случаях на топографических фотопланах число условных знаков уменьшается до необходимого минимума. В результате получается продукция, называемая *фотокартой*.

Ортофотоплан — фотографическое изображение местности в ортогональной проекции. Первоначально по экономическим соображениям ортофотопланы изготавливали преимущественно на горные территории. В настоящее время ортофотопланы получают на различные районы местности с любыми превышениями и формами рельефа.

3D-изображение — это изображение трехмерных объектов на плоскости. Эта новая форма представления пространственной информации находит широкое применение в различных сферах научной и производственной деятельности.

12.2. СИСТЕМЫ КООРДИНАТ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ФОТОГРАММЕТРИИ

В фотограмметрии обычно используют следующие системы координат.

Для определения положения точки на снимке, как уже описывалось в части II, применяют правую плоскую прямоугольную *си-*

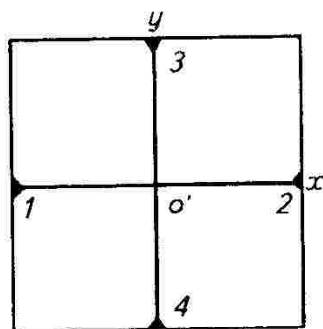


Рис. 12.1. Плоская система координат снимка

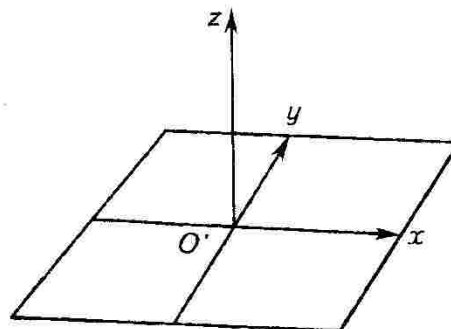


Рис. 12.2. Пространственная система координат снимка

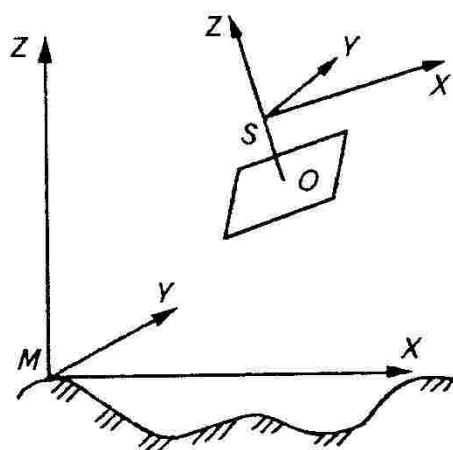


Рис. 12.3. Пространственные фотограмметрические системы координат

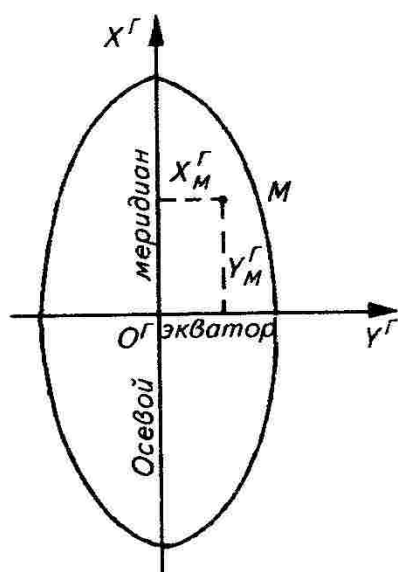


Рис. 12.4. Геодезическая система координат

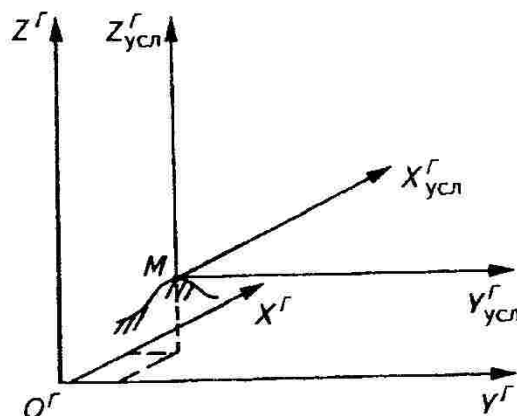


Рис. 12.5. Условная геодезическая система координат

стему координат снимка $o'xy$ (рис. 12.1). Началом системы координат является точка o' — точка пересечения прямых, соединяющих координатные метки снимка 1—2 и 3—4. Ось x совпадает с прямой 1—2, а ее положительное направление — с направлением полета. Ось y перпендикулярна оси x и проходит через o' . Координаты точек (x, y) , измеренные в системе координат снимка, называют плоскими координатами.

Для определения положения центра проекции S относительно снимка используют пространственную систему координат снимка $o'xyz$ (рис. 12.2). В этом случае начало системы координат и оси x и y те же, что и в плоской системе координат снимка. Ось $o'z$ перпендикулярна плоскости снимка и дополняет систему до правой.

Взаимное положение точек местности определяют в *пространственной фотограмметрической системе координат*. Это правая система координат. Начало системы и направления координатных осей выбирают произвольно. Часто начало системы координат совмещают с центром проекции S — $SXYZ$ или с какой-либо точкой местности M — $MXYZ$. Плоскость XY принимают горизонтальной или параллельной плоскости снимка (рис. 12.3).

Положение точек местности определяют в левой *геодезической системе* прямоугольных координат Гаусса — $O^r X^r Y^r Z^r$. Начало геодезической системы координат O^r находится в точке пересечения осевого меридиана данной зоны и экватора. Плоскость $X^r Y^r$ — горизонтальная. Ось Y^r направлена на восток, ось X^r — на север (рис. 12.4). *Условная геодезическая система координат* может иметь началом любую точку местности, а ее оси сонаправлены соответствующим осям системы координат Гаусса (рис. 12.5).

12.3. ЭЛЕМЕНТЫ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ОДИНОЧНОГО СНИМКА

Различают элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

Элементы внутреннего ориентирования определяют положение центра проекции S относительно снимка. Ими являются координаты точки S в пространственной системе координат снимка (рис. 12.6, а). Поскольку проекцией точки S на плоскости снимка является главная точка o , то их плановые координаты x и y в системе координат снимка совпадают, аппликатой точки S является расстояние So , т. е. фокусное расстояние АФА f . Таким образом, элементами внутреннего ориентирования снимка являются координаты главной точки снимка x_0, y_0 и фокусное расстояние АФА f . Эти элементы почти всегда известны с высокой точностью и записаны в паспорте АФА. Например, $f = 100,020$ мм; $x_0 = -0,012$ мм; $y_0 = +0,023$ мм.

Элементы внутреннего ориентирования снимка формируют связку проектирующих лучей, существовавшую при съемке. Ее положение в пространстве определяют *элементы внешнего ориентирования* снимка. Их шесть. Это три линейных элемента — гео-

Рис. 12.6. Элементы ориентирования снимка:

a — внутреннего; b — внешнего

дезические координаты центра проекции S (X_S , Y_S , Z_S) и три угловых элемента наклона и поворота снимка (рис. 12.6, б):

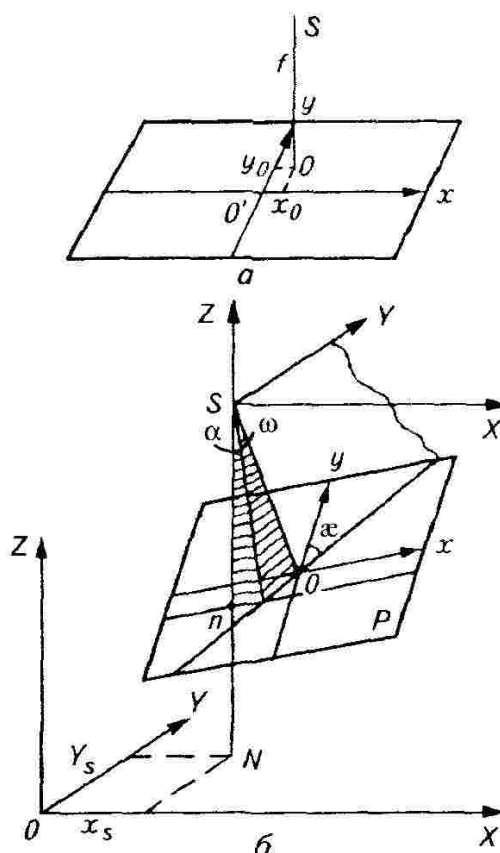
α — продольный угол наклона снимка (угол между осью Z и проекцией главного луча на плоскость XZ);

ω — поперечный угол наклона снимка (угол между главным лучом и проекцией главного луча на плоскость XZ);

φ — угол поворота снимка (угол на снимке между осью y и следом сечения плоскости снимка с плоскостью, построенной на главном луче и оси Y).

В аналитической фотограмметрии горизонтальным снимком называют снимок, все три угла наклона и поворота которого равны нулю, т. е. $\alpha = \omega = \varphi = 0$.

Следует заметить, что для всех снимков, полученных данным АФА, элементы внутреннего ориентирования можно считать постоянными известными величинами. Однако элементы внешнего ориентирования у каждого снимка свои и, как правило, неизвестны.



12.4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ

Конечная цель фотограмметрической обработки снимков — преобразование их в заданную картографическую проекцию местности. В Российской Федерации, как известно, такой проекцией является конформная проекция Гаусса—Крюгера. Преобразование снимков в проекцию Гаусса—Крюгера требует выполнения громоздких вычислений. При крупномасштабном картографировании проекция Гаусса—Крюгера как математическая основа топографической карты часто заменяется близкой к ней по геометрическим свойствам ортогональной проекцией.

В фотограмметрии под *трансформированием* понимают преобразование аэро- или космических снимков, полученных в большинстве случаев в центральной проекции, в ортогональную или какую-либо иную картографическую проекцию.

Суть *аналитического трансформирования* заключается в преобразовании координат точек снимка в координаты соответствующих точек местности с использованием строгих математических зависимостей.

Три пространственные геодезические координаты точки местности $A (X^r Y^r Z^r)$ связаны с плоскими координатами точки a снимка (x, y) с помощью элементов ориентирования снимка.

$$\begin{aligned}\frac{X_A^r - X_S^r}{Z_A^r - Z_S^r} &= \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ \frac{Y_A^r - Y_S^r}{Z_A^r - Z_S^r} &= \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}.\end{aligned}\quad (12.1)$$

Уравнения (12.1) называются *уравнениями коллинеарности* проецирующих лучей, или *формулами связи координат* точек снимка и местности. В этих формулах коэффициенты $a_1, a_2, \dots, c_2, c_3$ называются *направляющие косинусы*.

Направляющие косинусы определяют угловое ориентирование двух развернутых относительно друг друга систем координат — пространственной системы координат снимка и геодезической системы координат. Это косинусы углов, образованных парами координатных осей этих систем координат. Пары координатных осей, взятых по одной из каждой системы, образуют 9 углов, косинусы которых приведены в таблице 12.1.

12.1. Направляющие косинусы

Оси геодезической системы координат	Оси пространственной системы координат снимка		
	x	y	z
X^r	a_1	a_2	a_3
Y^r	b_1	b_2	b_3
Z^r	c_1	c_2	c_3

Строки таблицы названы осями геодезической системы координат, столбцы — осями пространственной системы координат снимка. На пересечении строки и столбца находится косинус угла, составленного соответствующими осями. Так, направляющий косинус b_1 — косинус угла, образованного осью x снимка и осью Y^r геодезической системы.

Девять направляющих косинусов связаны между собой шестью независимыми уравнениями:

$$\begin{aligned}a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1; \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1; \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 &= 0; \\a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3 &= 0; \\c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3 &= 0.\end{aligned}$$

Поэтому девять направляющих косинусов зависят от трех углов. В фотограмметрии этими углами являются три угла наклона и поворота снимка — α , ω , α .

Направляющие косинусы являются функциями угловых элементов внешнего ориентирования снимка, и вычисляют их по следующим формулам:

$$\begin{aligned}a_1 &= \cos \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \alpha; \\a_2 &= -\cos \alpha \cdot \sin \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \alpha; \\a_3 &= -\sin \alpha \cdot \cos \omega; \\b_1 &= \cos \omega \cdot \sin \alpha; \\b_2 &= \cos \omega \cdot \cos \alpha; \\b_3 &= -\sin \omega; \\c_1 &= \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \alpha; \\c_2 &= -\sin \alpha \cdot \sin \alpha + \cos \alpha \cdot \sin \omega \cdot \cos \alpha; \\c_3 &= \cos \alpha \cdot \cos \omega.\end{aligned}$$

Если направляющие косинусы известны, то можно определить угловые элементы внешнего ориентирования снимка:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctg(a_3/c_3); \\\omega &= \arcsin(-b_3); \\\alpha &= \arctg(b_1/b_2).\end{aligned}$$

Для горизонтального снимка матрица направляющих косинусов превращается в единичную матрицу, все элементы которой равны нулю, кроме элементов, стоящих на главной диагонали $a_1 = b_2 = c_3 = 1$.

Как следует из анализа формул (12.1), связь между геодезическими координатами точки местности и ее плоскими координатами на снимке осуществляется посредством элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

Если элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка известны с необходимой точностью, то для любой точки местности, изобразившейся на снимке, можно составить два независимых уравнения связи координат вида (12.2). В этих уравнениях искомыми величинами будут геодезические координаты точки местности $X^r Y^r Z^r$.

$$\begin{aligned}X^r &= X_S^r + (Z^r - Z_S^r) \frac{a_1(x-x_0) + a_2(y-y_0) - a_3 f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3 f}, \\Y^r &= Y_S^r + (Z^r - Z_S^r) \frac{b_1(x-x_0) + b_2(y-y_0) - b_3 f}{c_1(x-x_0) + c_2(y-y_0) - c_3 f}.\end{aligned}\tag{12.2}$$

Задачу по определению геодезических координат точки местности по измеренным координатам ее изображения на снимке называют *прямой фотограмметрической засечкой*.

Однако система из двух уравнений с тремя неизвестными не имеет однозначного решения. Следовательно, по одиночному снимку нельзя определить все три пространственные координаты точки местности. Однозначности решения достигают в том случае, если одну из неизвестных величин задают с достаточной точностью. При аналитической обработке одиночного снимка этой величиной является высотная координата Z^T точки местности.

Существует несколько способов задания высоты точки местности для решения прямой фотограмметрической засечки.

Если требуется вычислить плановые координаты небольшого числа точек, то высоты этих точек могут быть определены по имеющимся планам с горизонталями при отождествлении на них этих точек.

В случае равнинной местности всем точкам присваивают одинаковую высоту $Z_{\text{ср}}$, равную средней отметке снимаемой местности. Возможность использования этого способа определяется предварительным расчетом допустимых перепадов высот снимаемой местности. Предварительный расчет проводят по формуле

$$h_{\text{пред}} = \frac{2\delta_{h\text{доп}} Mf}{r_{\text{мах}}}, \quad (12.3)$$

где $h_{\text{пред}}$ — допустимый перепад высот снимаемой местности; $\delta_{h\text{доп}}$ — допустимое смещение точек за рельеф на плане; M — знаменатель масштаба создаваемого плана; f — фокусное расстояние АФА; $r_{\text{мах}}$ — расстояние от точки надира до угла рабочей площади снимка.

Действительный перепад высот на снимаемой местности можно определить по существующим планам с горизонталями. Если он меньше допустимого, рассчитанного по формуле (12.3), то местность можно считать равнинной и всем точкам местности присвоить одинаковую высоту $Z_{\text{ср}}$.

В случае когда действительный перепад высот превышает допустимый, создают цифровую модель рельефа. Высоты точек местности определяют посредством ЦМР.

Точность определения плановых геодезических координат X^T , Y^T точки местности зависит от точности задания высотной координаты Z^T . Таким образом, одиночный снимок дает возможность вычислять плановые геодезические координаты X^T , Y^T точек местности, если известны элементы ориентирования снимка и имеется информация о рельефе местности.

12.5. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

Цифровая модель рельефа (ЦМР) — это цифровое представление земной поверхности как непрерывного явления, описывающее ее с определенной точностью. Под ЦМР понимают множество точек с известными геодезическими координатами (X^T , Y^T , Z^T) и правило определения высоты Z^T любой другой точки, не входящей в это множество. Точки с известными геодезическими координатами в данном случае принято называть высотными пикетами. Правило определения высоты называют правилом интерполяции высот, или *аналитической моделью рельефа* (АМР).

Методы построения цифровых моделей рельефа различаются по схемам расположения высотных пикетов и по способам интерполяции высот в промежутках между ними.

По схемам расположения высотных пикетов ЦМР делят на регулярные, полурегулярные и структурные.

В *регулярных моделях* высотные пикеты расположены в узлах сеток квадратов, прямоугольников или равносторонних треугольников (рис. 12.7). Недостатком этих моделей является то, что наиболее значимые точки рельефа, находящиеся на линиях тальвегов и водоразделов, перегибах скатов, могут оказаться между узлами сетки и не отобразиться на ЦМР. В связи с этим важно выбрать оптимальный шаг сетки, так как с его увеличением возрастают погрешности ЦМР, а с уменьшением — объем ЦМР, время и средства на ее создание.

В *полурегулярных моделях* (рис. 12.8) высотные пикеты располагают на поперечниках к заданным линиям. Пикеты могут находиться на поперечниках либо на одинаковых расстояниях друг от

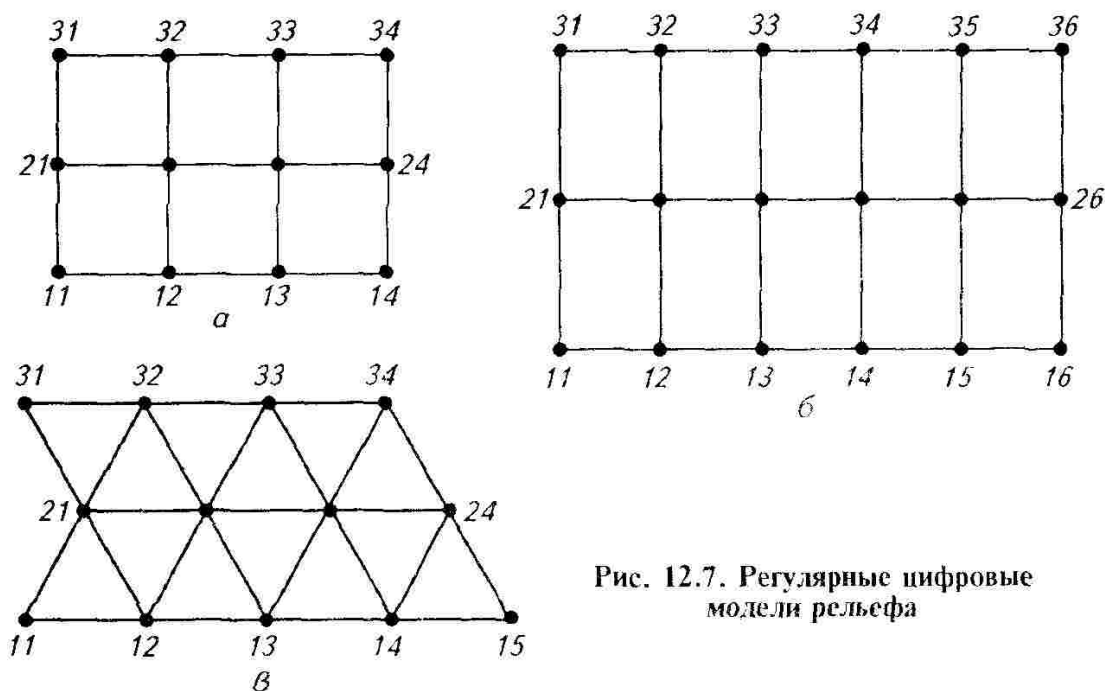


Рис. 12.7. Регулярные цифровые модели рельефа

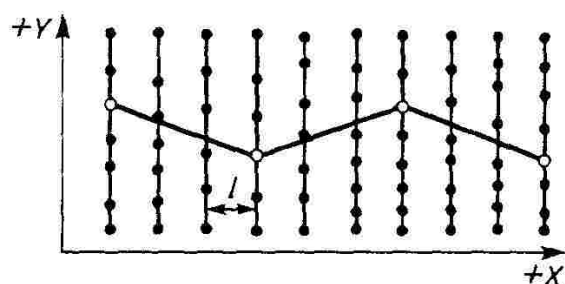


Рис. 12.8. Полурегулярная цифровая модель рельефа

друга, либо на перегибах скатов. Полурегулярные ЦМР в основном используют при проектировании трасс линейных сооружений (дорог, линий электропередач, нефте- и газопроводов и т. п.).

Для наиболее правильного описания характера рельефа меньшим числом высотных пи-

кетов создают *структурные* ЦМР (рис. 12.9). В этих моделях положение высотных пикетов определяется структурой рельефа — их выбирают в его характерных точках.

Координаты высотных пикетов, используемых для построения ЦМР, могут быть получены в результате полевых геодезических измерений, по топографическим картам, по результатам воздушного и космического лазерного сканирования, путем стереофотограмметрической обработки снимков.

Для определения отметок точек, находящихся между высотными пикетами, применяют различные способы линейного и нелинейного интерполирования.

При использовании регулярных ЦМР с малым шагом сетки отметки промежуточных точек можно определить двойным линейным интерполированием (рис. 12.10).

$$Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 Y_i^2. \quad (12.4)$$

Полный полином второй степени содержит шесть неизвестных коэффициентов a_i . Эти коэффициенты определяют, решая систему уравнений вида (12.4), составленных для высотных пикетов, находящихся вблизи определяемой i -й точки с координатами (X_i, Y_i) .

Для каждой определяемой точки подбирают свой полином, который может отличаться как коэффици-

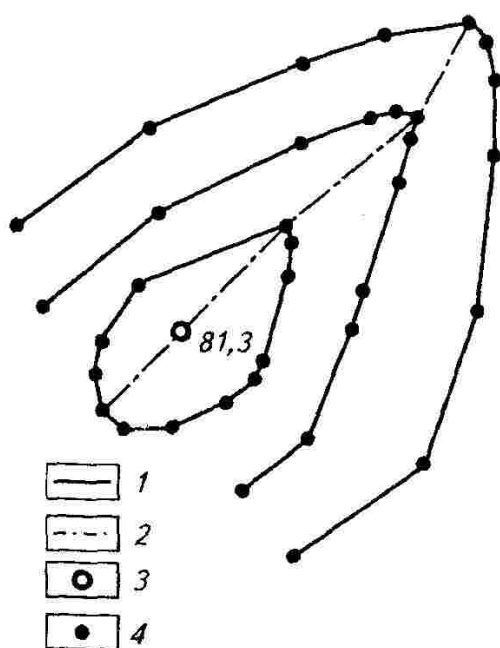
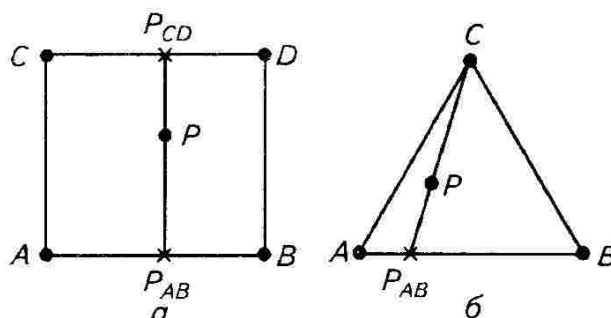


Рис. 12.9. Структурная цифровая модель рельефа:

1 — горизонталы; 2 — орографические линии; 3 — экстремальные точки; 4 — высотные пикеты для моделирования рельефа

Рис. 12.10. Принцип двойного интерполирования высот в регулярных ЦМР:

а — вычисляют высоты точек P_{CD} и P_{AB} интерполированием соответственно по линиям CD и AB и высоту точки P интерполированием по линии $P_{CD}P_{AB}$; *б* — вычисляют высоту точки P_{AB} интерполированием по линии AB и высоту точки P интерполированием по линии CP_{AB}



ентами, так и числом входящих в него членов. Выбор высотных пикетов, используемых для вычисления коэффициентов a_i , зависит от задаваемого радиуса R зоны их поиска.

В структурных ЦМР применяют, как правило, линейные методы интерполяции.

Цифровые модели рельефа используют при изготовлении ортофотопланов, для создания оригинала рельефа в горизонталях и как самостоятельный слой в геоинформационных системах (ГИС).

12.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА

Решение прямой фотограмметрической засечки возможно при условии, что элементы ориентирования снимка известны.

Элементы внутреннего ориентирования, как правило, известны. Их определяют при калибровке АФА с точностью 0,001 мм и записывают в его паспорт.

Элементы внешнего ориентирования снимка можно определить различными способами. Их делят на две группы.

Первую группу составляют способы определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете с помощью специальных приборов. Например, координаты центров проекций находят по показаниям GPS-приемников, установленных на борту летательного аппарата. Угловые элементы внешнего ориентирования определяют с помощью инерциальных систем навигации. Координаты центров проекции в этом случае определяют с точностью 10...20 см, а угловые элементы с точностью 3...4'.

Способы второй группы позволяют определять элементы внешнего ориентирования снимков по опорным точкам. *Опорными точками* (опознаками) называют точки с известными геодезическими координатами. Опорные точки могут быть плановыми — для них известны только плановые координаты (X, Y); высотными — с известной высотной координатой; планово-высотными — с тремя известными координатами (X, Y, Z). Определение элементов внешнего ориентирования снимков с использованием опорных точек называют *обратной фотограм-*

метрической засечкой, или задачей по ориентированию снимка. Ее решают аналитически с использованием уже известных из раздела 12.4 уравнений (12.2) связи координат точек снимка и местности.

В правых частях уравнений (12.2) содержатся все шесть искомых элементов внешнего ориентирования снимка. Для одной опорной точки с геодезическими координатами (X^r, Y^r, Z^r) и измеренными координатами (x, y) ее изображения на снимке можно составить два независимых уравнения вида (12.2) с шестью неизвестными величинами $X_S^r, Y_S^r, Z_S^r, \alpha, \omega, \kappa$. Чтобы однозначно определить все шесть элементов внешнего ориентирования, необходимо объединить в систему не менее шести независимых уравнений, содержащих искомые элементы. Для этого требуется не менее трех планово-высотных опорных точек.

Для решения обратной фотограмметрической засечки с контролем используют четыре опорные точки и более, расположенные по углам снимка. Увеличение числа опорных точек позволяет также отбраковывать грубые измерения.

12.7. РАЗДЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКА ПРИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЕГО ЧАСТЕЙ

При решении обратной фотограмметрической засечки способом, описанным в разделе 12.6, важно, чтобы координаты опорных точек (x, y), входящие в уравнения связи координат, были измерены в системе координат снимка (o', x, y). Это не всегда возможно. Например, при работе с частями увеличенных снимков координатные метки могут не попасть на обрабатываемый фрагмент или число изобразившихся на фрагменте координатных меток недостаточно для восстановления системы координат снимка.

В этом случае для определения элементов внешнего ориентирования снимка можно использовать способ, не зависящий от выбора системы координат на снимке. Это способ раздельного определения линейных и угловых элементов ориентирования снимка. Сначала находят линейные элементы X_S^r, Y_S^r, Z_S^r .

Для этого используют условие равенства углов между проектирующими лучами в треугольнике Sab и в треугольнике SAB (рис. 12.11). Очевидно, что угол ASB равен углу aSb . Косинусы этих углов также равны и могут быть вычислены с использованием теоремы косинусов из соответствующих треугольников Sab и SAB ,

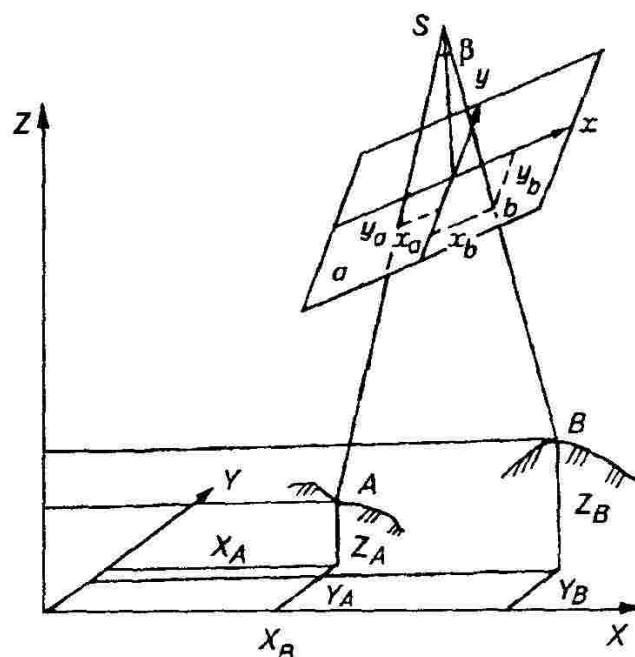


Рис. 12.11. Принцип раздельного определения элементов внешнего ориентирования снимка

а затем приравнены между собой. В итоге получают уравнение

$$\frac{x_a x_b + y_a y_b + f^2}{l_a l_b} = \frac{(X_A^r - X_S^r)(X_B^r - X_S^r) + (Y_A^r - Y_S^r)(Y_B^r - Y_S^r) + (Z_A^r - Z_S^r)(Z_B^r - Z_S^r)}{L_A L_B} \quad (12.5)$$

где l_a, l_b — длины векторов Sa и Sb соответственно; L_A, L_B — длины векторов SA и SB соответственно, которые рассчитывают по формулам:

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2};$$

$$L_i = \sqrt{(X_i^r - X_S^r)^2 + (Y_i^r - Y_S^r)^2 + (Z_i^r - Z_S^r)^2}.$$

Для двух опорных точек A и B можно составить одно уравнение вида (12.5), в котором $(X_A^r; Y_A^r; Z_A^r)$ и $(X_B^r; Y_B^r; Z_B^r)$ — геодезические координаты соответственно точек A и B .

$(x_a; y_a); (x_b; y_b)$ — координаты точек a и b на снимке. Причем для измерения этих координат можно построить на снимке прямоугольную систему координат с произвольным началом и произвольной ориентацией осей.

Неизвестными величинами в уравнении (12.5) являются геодезические координаты центра проекции $(X_S^r; Y_S^r; Z_S^r)$, входящие в правую часть уравнения.

Для их нахождения требуются как минимум три опорные точки; n опорных точек позволяют составить $n(n-1)/2$ уравнений вида (12.5), чтобы решить задачу с контролем.

Найдя координаты центра проекции, можно найти угловые элементы внешнего ориентирования снимка. Их вычисляют, также используя опорные точки, по следующим формулам:

$$\begin{aligned}(X^r - X_S^r)k &= a_1x + a_2y - a_3f; \\ (Y^r - Y_S^r)k &= b_1x + b_2y - b_3f; \\ (Z^r - Z_S^r)k &= c_1x + c_2y - c_3f,\end{aligned}\tag{12.6}$$

где X_S^r, Y_S^r, Z_S^r — геодезические координаты опорных точек; k — масштабный коэффициент, $k = 1/L$; x, y — координаты опорных точек в системе координат снимка.

В этих формулах угловые элементы внешнего ориентирования снимка являются аргументами формул, определяющих направляющие косинусов $a_1, a_2, \dots, a_3$.

По найденным направляющим косинусам вычисляют углы:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctg(a_3/c_3); \\ \omega &= \arcsin(-b_3); \\ \alpha &= \arctg(b_1/b_2).\end{aligned}$$

В некоторых случаях, например при работе с архивными снимками, элементы внутреннего ориентирования АФА могут быть неизвестными. Фотограмметрическая обработка снимков с неизвестными элементами внутреннего и внешнего ориентирования возможна. Для их нахождения также можно использовать опорные точки. В этом случае для нахождения девяти неизвестных элементов ориентирования снимка: $x_0, y_0, f, X_S^r, Y_S^r, Z_S^r, \alpha, \omega, \alpha$ — составляют систему уравнений коллинеарности как минимум для пяти опорных точек, не лежащих на одной прямой и в одной плоскости.

12.8. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Рассмотренные варианты решения обратной фотограмметрической засечки предполагают составление и решение систем нелинейных уравнений, в которых число неизвестных более двух. При решении таких систем в фотограмметрии достаточно широко используют метод функциональной итерации (метод Ньютона).

Суть этого метода заключается в том, что исходные нелинейные уравнения вида $f(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$ линеаризируют (приводят к линейному виду), раскладывая в ряд Тейлора.

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) = a_i \delta x_1 + b_i \delta x_2 + \dots + g_i \delta x_k + r_i,$$

где i — номер уравнения, $i = 1, 2, \dots, n$; $x_1, x_2, \dots, x_k$ — искомые неизвестные; $a_i, b_i, \dots, g_i$ — коэффициенты при поправках — частные производные исходной функции по соответствующим неизвестным. Так, $a_i = \partial f_i / \partial x_1$, $b_i = \partial f_i / \partial x_2, \dots, g_i = \partial f_i / \partial x_k$; $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_k$ — поправки к приближенным значениям неизвестных; $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$ — приближенные значения неизвестных; r_i — свободный член, значение данной функции при приближенных значениях неизвестных.

Таким образом, получают систему линейных уравнений, где неизвестными являются поправки к приближенно заданным значениям искомых неизвестных параметров:

$$a_i \delta x_1 + b_i \delta x_2 + \dots + g_i \delta x_k + f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) = 0. \quad (12.7)$$

Составленную систему линейных уравнений поправок решают по способу наименьших квадратов, поскольку число неизвестных k всегда меньше общего числа уравнений поправок n .

Найденными поправками исправляют первоначально заданные значения неизвестных, получают новые приближенные их значения. После этого составляют новую систему уравнений относительно новых поправок к новым приближенным значениям неизвестных. Начинается следующая итерация — следующий цикл в решении системы уравнений поправок. С каждой новой итерацией значение поправок уменьшается.

Вычисления повторяют до тех пор, пока значения поправок не станут меньше заранее заданного значения, которое определяют исходя из требуемой точности. Важно при выборе начальных значений неизвестных попасть в некоторую окрестность искомых величин.

Таким образом, при аналитическом решении многих фотограмметрических задач возникает необходимость в исходные данные включать приближенные значения искомых величин.

Рассмотрим пример. Для решения задачи ориентирования планового одиночного снимка требуется задать приближенные значения его элементов внешнего ориентирования: X_S^r ; Y_S^r ; Z_S^r ; α , ω , κ . Как это сделать?

Сначала определимся с угловыми элементами. Поскольку снимок плановый, его продольный α и поперечный ω углы наклона не превышают 3° .

Поэтому в качестве первого приближения этих величин можно задать их значения, равные 0° . Угол κ зависит от направления аэрофотосъемочного маршрута и приблизительно $\kappa = \alpha_d - 90^\circ$ (где α_d — дирекционный угол направления маршрута). Для определения по снимку дирекционного угла направления съемки можно воспользоваться опорными точками. Выбирают две из них, определяющие направление, приблизительно параллельное оси x

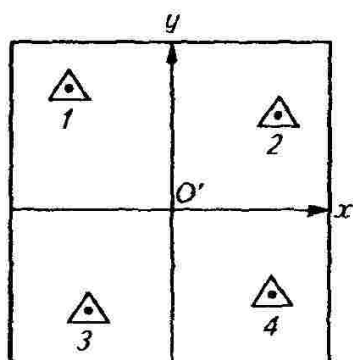


Рис. 12.12. Пример использования опорных точек для определения приближенных значений угла α и плановых координат центра проекции

снимка. Например, точки 1—2 или 3—4 на рис. 12.12. По координатам этих опорных точек вычисляют дирекционный угол этого направления. Затем его используют для вычисления приближенного значения угла α .

Для определения приближенных значений координат центра проекции также можно воспользоваться опорными точками. Плановые координаты $(X_S^r; Y_S^r)$ центра проекции S совпадают с плановыми координатами проекции точки надира

$N(X_N^r; Y_N^r)$. На плановом снимке точка надира n находится, как известно, вблизи начала координат снимка. Поэтому приближенные координаты проекции точки надира $(X_N^r; Y_N^r)$ можно заменить на координаты точки O' местности. Ее же приближенные плановые геодезические координаты определяются как среднее арифметическое соответствующих геодезических координат опорных точек:

$$X_S^r = (X_1^r + X_2^r + X_3^r + X_4^r) / 4;$$

$$Y_S^r = (Y_1^r + Y_2^r + Y_3^r + Y_4^r) / 4.$$

Высотную координату центра проекции Z_S^r определяют как сумму средней отметки опорных точек и высоты фотографирования:

$$Z_S^r = (Z_1^r + Z_2^r + Z_3^r + Z_4^r) / 4 + H,$$

где H — высота фотографирования, $H = mf$ (здесь m — знаменатель масштаба снимка, который также можно вычислить с помощью опорных точек, $m = L/l$, где L — расстояние между опорными точками i и j на местности, а l — расстояние

между теми же опорными точками на снимке, $L = \sqrt{(X_j^r - X_i^r)^2 + (Y_j^r - Y_i^r)^2}$.

В результате для всех шести элементов внешнего ориентирования снимка вычислены приближенные значения, которые будут уточняться в процессе решения обратной фотограмметрической засечки методом функциональной итерации.

12.9. ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОДИНОЧНОГО СНИМКА

Фотограмметрическая обработка одиночного снимка состоит из нескольких этапов:

подготовительные работы;

ввод изображения;
векторизация и корректировка векторизованного изображения;
трансформирование векторизованного изображения;
соединение (сшивка) трансформированных снимков или их фрагментов;
создание контурного плана.

Подготовительные работы включают подбор негативов, контактных снимков, существующих топографических планов и карт на объект работ. Также подбирают материалы полевой привязки аэрофотоснимков и фототриангуляции. Кроме того, получают паспортные данные АФА (элементы внутреннего ориентирования, эталонные координаты меток и контрольных крестов, данные о дисторсии объектива) и параметры аэрофотосъемки (масштаб и высоту фотографирования). Если при производстве аэрофотосъемки на борту летательного аппарата были установлены GPS-приемники и инерциальные системы навигации, то в ходе подготовительных работ подбирают результаты обработки их показаний.

В качестве исходного изображения при фотограмметрической обработке можно использовать негативы аэрофильма, дешифрованные снимки или их увеличенные фрагменты.

Ввод изображения осуществляют преимущественно сканированием. Выбирают сканирующее устройство по ряду критериев: требуемым техническим характеристикам (разрешающая способность, позиционная точность) и соотношению цена/производительность.

Рассчитывают необходимые технические характеристики сканера следующим образом. Минимальная линейная разрешающая способность может быть определена по линейной разрешающей способности обрабатываемых снимков. Например, в случае использования снимков с разрешающей способностью $25...30 \text{ мм}^{-1}$ минимальный элемент изображения на снимке будет иметь размер $1/50...1/60 \text{ мм}$, т. е. приблизительно $0,02 \text{ мм}$. Во избежание потери информации при сканировании необходимо, чтобы на минимальный элемент изображения приходилось не менее двух пикселей. Требуемая разрешающая способность сканера в этом случае будет составлять $2 \times 25,4 \text{ мм} / 0,02 \text{ мм} = 2500 \text{ dpi}$.

Позиционная точность сканера должна быть не хуже требуемой точности измерения координат на снимке, которая составляет примерно $2...5 \text{ мкм}$. Такой высокой позиционной точностью обладают лишь дорогостоящие фотограмметрические сканеры. Однако использование программ геометрической коррекции растра позволяет применять непрофессиональные офисные сканеры при фотограмметрической обработке снимков.

Векторизация — процесс представления результатов дешифрирования в векторной форме. Векторизацию можно осуществлять в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

При ручной векторизации оператор курсором последовательно обходит все поворотные точки границ контуров дешифрованных объектов. Эту операцию проводят на экране монитора с помощью «мыши». При этом автоматически записываются в память компьютера координаты (x, y) этих точек. Ручную векторизацию можно выполнять в случае сканирования дешифрованного изображения, а также в случае ввода недешифрованного изображения, например негативов аэрофильма. В таком варианте дешифрирование проводят на увеличенных снимках, и его результаты оператор переносит на сканированное изображение в процессе векторизации.

Полуавтоматическую векторизацию выполняют на дешифрованном сканированном изображении. Оператор наводит курсор на одну из точек границы контура на экране монитора. При этом автоматически записываются координаты (x, y) всех поворотных точек границы указанного контура.

При автоматической векторизации происходит автоматическое считывание координат поворотных точек границ всех дешифрованных объектов. В этом случае оператор лишь контролирует и при необходимости корректирует данный процесс.

Кроме того, при векторизации по материалам привязки или фототриангуляции на сканированное изображение переносят опорные точки. При этом осуществляется автоматическое измерение их координат. В ряде случаев на сканированном изображении указываются координатные метки.

Координатные метки позволяют перейти из системы координат монитора, в которой происходит автоматическое измерение координат точек снимка, в систему координат снимка. Такой переход не всегда обязателен (см. разд. 12.7). Его необходимость зависит от используемого алгоритма решения обратной фотограмметрической засечки.

Корректировка векторизованного изображения заключается в исключении погрешностей процесса векторизации. Такими погрешностями могут быть незамкнутость границ контуров, наличие двойных линий границ, выходы границ в точках пересечения и т. п. Корректировка выполняется автоматически. Оставшиеся после этого погрешности устраняет оператор.

Далее следует процесс *трансформирования*. Для опорных точек создается файл их геодезических координат. Кроме того, оператор вводит при необходимости приближенные значения элементов внешнего ориентирования снимка. По известным из раздела 12.4 зависимостям автоматически решается обратная фотограмметрическая засечка. Контролем решения задачи ориентирования снимка являются остаточные расхождения в геодезических координатах опорных точек. Эти расхождения в плановых координатах не должны превышать 0,2 мм в масштабе создаваемого плана, а по высоте не превышать $1/5$ высоты сечения рельефа. Недопустимые

расхождения на опорных точках возникают из-за их неправильной идентификации на экране монитора, ошибок создания файла геодезических координат и файла элементов внутреннего ориентирования, а также возможных ошибок определения приближенных значений элементов внешнего ориентирования. При избыточном числе опорных точек можно не искать возникшую ошибку, а исключить из процесса обработки опорные точки с недопустимыми расхождениями. Оставшиеся опорные точки должны удовлетворять необходимым требованиям для решения задачи ориентирования снимка или его фрагмента.

При допустимых расхождениях на опоре переходят к решению прямой фотограмметрической засечки для всех точек векторизованного изображения.

Сведения о рельефе, необходимые при решении прямой фотограмметрической засечки по одиночному снимку, могут быть получены из ЦМР, которую предварительно импортируют из других программ. В случае равнинной местности рельеф представляется либо горизонтальной плоскостью, высота которой равна среднему арифметическому из высот опорных точек, либо наклонной плоскостью, наименее удаленной по высоте от опорных точек. Уравнения этих плоскостей вычисляют по опоре автоматически.

Полученные трансформированные снимки или их увеличенные фрагменты *объединяются* (сшиваются) в общее электронное изображение. По линиям их соединения могут возникать расхождения в плановом положении одних и тех же контуров. Расхождения считаются допустимыми, если они не превышают 1 мм в масштабе создаваемого плана. В этом случае необходимо выполнять сводку контуров по границам объединяемых изображений, аналогично процедуре сводки по планшетах при геодезической съемке.

Главная причина возникновения расхождений контуров — рельеф, а точнее, создаваемые и используемые при решении прямой фотограмметрической засечки модели рельефа. Плановые координаты одной и той же точки контура, лежащей на линии объединения двух трансформированных изображений, вычисляют, используя высоты, полученные из моделей рельефа соответственно для первого и второго снимков. Если их высоты не равны, то в этом случае вычисленные координаты (X , Y) точки контура на первом и втором снимках также будут различаться. Поэтому возникает расхождение контуров на линии объединения. Различия в координатах будут тем больше, чем больше разница между высотами, полученными из двух моделей, и чем дальше точка контура находится от точек надира трансформированных снимков. Для уменьшения работ по сводке объединенных изображений линию сшивки целесообразно выбирать по возможности вдоль линейных объектов (дорог, рек, улиц в поселениях и т. п.).

В результате объединения получают единое трансформированное электронное изображение на всю картографируемую территорию или ее часть.

Далее по материалам дешифрирования проводят процедуру присвоения каждому выделенному контуру условных знаков. После этого в автоматическом режиме выполняется разделение единого плана на планшеты в соответствии с государственной разграфкой, принятой для данного масштаба. В результате получен контурный план.

12.10. ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Элементы внешнего ориентирования пары снимков определяют их пространственное положение во время фотографирования. К ним относятся:

$$\left. \begin{matrix} X_{S_1}^r Y_{S_1}^r Z_{S_1}^r \\ X_{S_2}^r Y_{S_2}^r Z_{S_2}^r \end{matrix} \right\} \text{ геодезические координаты левого и правого центров проекции } S_1 \text{ и } S_2;$$

$$\left. \begin{matrix} \alpha_1 \omega_1 \alpha_1 \\ \alpha_2 \omega_2 \alpha_2 \end{matrix} \right\} \text{ углы наклона и поворота левого и правого снимков.}$$

Таким образом, пара снимков имеет 12 элементов внешнего ориентирования.

Расположить пару снимков в геодезическом пространстве так, как она располагалась во время фотографирования, можно, используя иные 12 элементов ориентирования: 5 элементов взаимного ориентирования пары снимков и 7 элементов внешнего (геодезического) ориентирования построенной модели местности.

12.11. ЭЛЕМЕНТЫ ВЗАИМНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАРЫ СНИМКОВ

Элементы взаимного ориентирования — угловые элементы — определяют взаимное положение пары снимков во время фотографирования, при котором каждая пара соответственных лучей пересекается. Все множество точек пересечения соответственных лучей является пространственной моделью местности.

В фотограмметрии используются две системы взаимного ориентирования пары снимков, которые отличаются выбором системы пространственных координат. В обеих системах началом является левый центр фотографирования S_1 .

В первой системе — базисной — ось X совмещена с базисом фотографирования, главный луч левого снимка находится в плоско-

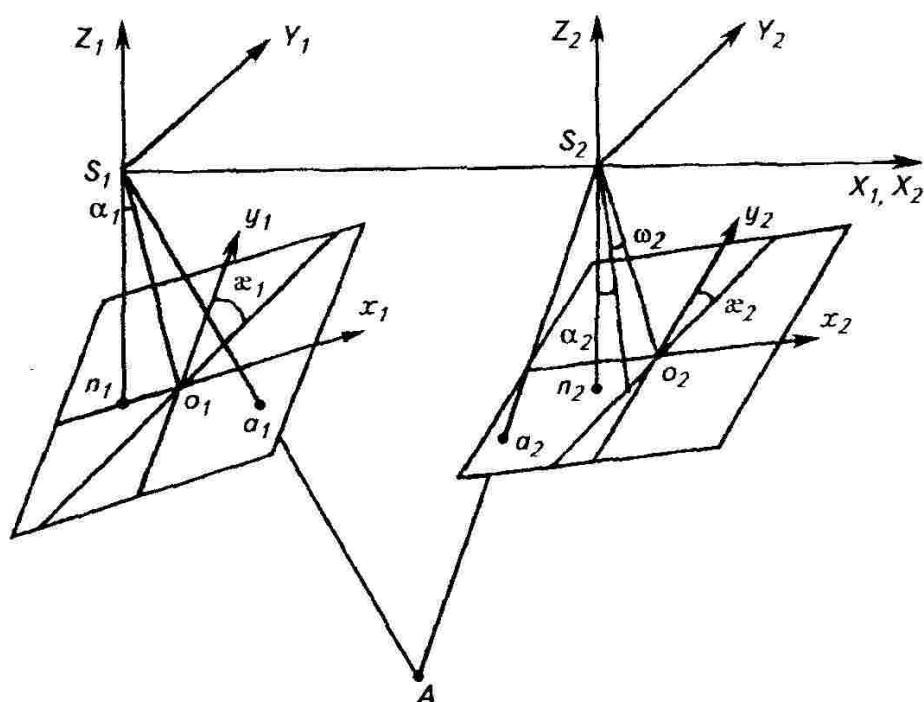


Рис. 12.13. Базисная система элементов взаимного ориентирования пары снимков

сти XZ (рис. 12.13). Таким образом, в этой системе координат у левого снимка отсутствует поперечный угол наклона ω_1 . Элементами взаимного ориентирования в базисной системе являются пять углов: α_1 , α_2 , ω_2 , α_1 , α_2 . Суть каждого из этих углов аналогична соответствующему углу ориентирования одиночного снимка.

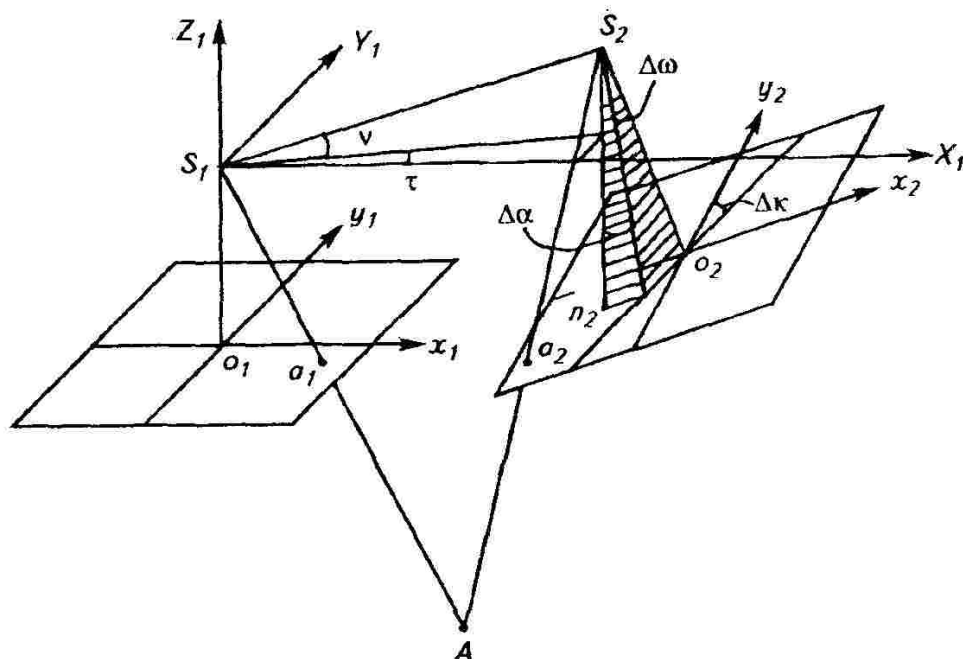


Рис. 12.14. Система левого снимка элементов взаимного ориентирования пары снимков

Во второй системе — левого снимка — оси X , Y соответственно параллельны осям x , y левого снимка, ось Z совпадает с его главным лучом (рис. 12.14). У левого снимка в этой системе координат отсутствуют углы наклона и поворота. Угловыми элементами ориентирования правого снимка будут:

взаимные углы наклона снимков $\Delta\alpha$ — продольный, $\Delta\omega$ — поперечный и $\Delta\epsilon$ — угол поворота снимков.

Направление базиса фотографирования определяют углы τ (горизонтальный угол поворота базиса) и ν (вертикальный угол наклона базиса).

Элементы взаимного ориентирования в системе левого снимка: $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\epsilon$, τ , ν .

12.12. ВЗАИМНОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ ПАРЫ СНИМКОВ

Условие пересечения пары соответственных лучей — их принадлежность одной базисной плоскости. Если два снимка взаимно ориентированы, то любая пара соответственных точек лежит в одной базисной плоскости, т. е. четыре точки S_1 , S_2 , a_1 , a_2 принадлежат одной плоскости (рис. 12.15). Напомним (см. разд. 9.14), что это условие называют условием компланарности проектирующих лучей. Аналитически оно выражается в виде уравнений взаимного ориентирования. Для плановых снимков они имеют вид:

в базисной системе

$$-\frac{x_1 y_2}{f} \alpha_1 + \frac{x_2 y_1}{f} \alpha_2 + \left(f + \frac{y_1^2}{f} \right) \omega_2 - x_1 \epsilon_1 + x_2 \epsilon_2 - q = 0; \quad (12.8)$$

в системе левого снимка

$$p\tau + \frac{y_1 p}{f} \nu + \frac{x_2 y_1}{f} \Delta\alpha + \left(f + \frac{y_1^2}{f} \right) \Delta\omega + x_2 \Delta\epsilon - q = 0; \quad (12.9)$$

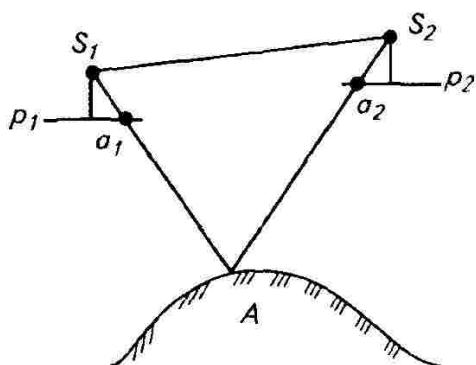


Рис. 12.15. Условие пересечения пары соответственных лучей

где x_1 , y_1 , x_2 , y_2 — координаты соответственных точек на левом и правом снимках стереопары в системах координат левого и правого снимков соответственно; p — продольный параллакс определяемой точки; q — поперечный параллакс той же точки.

Как видно из уравнений (12.8) и (12.9), коэффициенты при элементах взаимного ориентирования зависят от элементов внутреннего ориентирования и измеренных координат соответственных точек на левом и правом снимках стереопары.

Уравнения (12.8) и (12.9) нестро-

гие, и их используют лишь для плановых снимков, углы наклона которых не превышают 3° .

Для каждой точки местности, изображенной в зоне двойного перекрытия, т. е. на левом и правом снимках, можно составить одно уравнение взаимного ориентирования вида (12.8) или (12.9) с пятью неизвестными элементами.

Чтобы определить пять элементов взаимного ориентирования пары снимков, необходимо объединить в систему не менее пяти уравнений взаимного ориентирования, составленных для пяти точек из зоны перекрытия. Это должны быть надежно идентифицированные точки местности на левом и правом снимках. Обычно для взаимного ориентирования используют шесть стандартно расположенных точек: две вблизи главных точек левого и правого снимков и четыре по углам зоны перекрытия (рис. 12.16). У этих точек измеряют координаты на левом и правом снимках и составляют систему из шести уравнений вида (12.8) или (12.9). При использовании шести точек систему полученных уравнений решают с контролем.

Решают систему уравнений взаимного ориентирования по способу наименьших квадратов до тех пор, пока значение свободного члена (остаточного поперечного параллакса) не будет меньше заранее заданного значения. Значение остаточного поперечного параллакса устанавливают, исходя из требуемой точности конечной продукции.

Найденные элементы взаимного ориентирования пары снимков позволяют получить фотограмметрическую модель местности, являющуюся совокупностью фотограмметрических координат ее точек.

12.13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ТОЧЕК МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Результат взаимного ориентирования пары снимков — построение фотограмметрической модели местности в произвольном масштабе и свободно ориентированной в геодезическом пространстве. Фотограмметрические координаты точек модели не являются геодезическими координатами точек местности.

Пространственные координаты X^M , Y^M , Z^M точек фотограмметрической модели определяют в системе координат, в которой определяли элементы взаимного ориентирования (в базисной или в системе левого снимка), по следующим формулам:

$$X^M = NX_1; Y^M = NY_1; Z^M = NZ_1,$$

где X_1 , Y_1 , Z_1 — пространственные координаты точки левого снимка (рис. 12.17) в

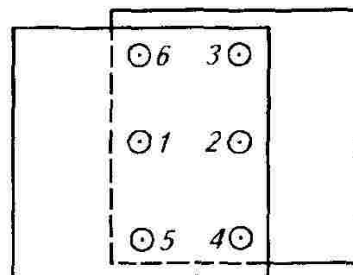


Рис. 12.16. Стандартная схема расположения точек для взаимного ориентирования пары снимков

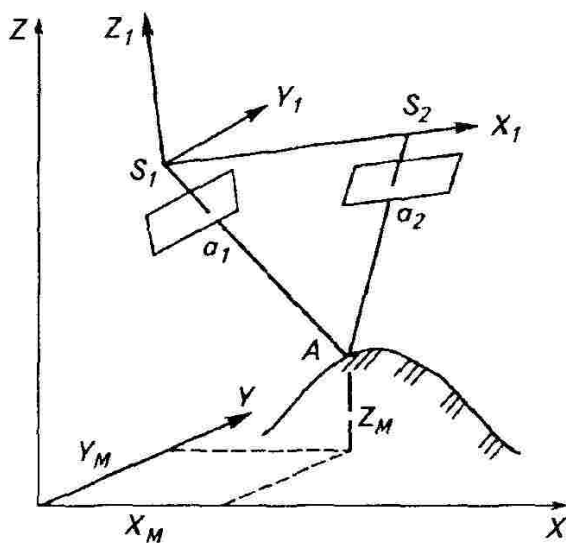


Рис. 12.17. Принцип определения пространственных координат точек фотограмметрической модели

системе координат построения модели, которые в общем случае зависят от элементов взаимного ориентирования; N — масштабный коэффициент, определяющий масштаб построенной модели и зависящий от величины базиса проектирования b , элементов взаимного ориентирования и измеренных координат соответственных точек a_1 и a_2 стереопары.

В частном случае, когда левый и правый снимки горизонтальны и получены с одной высоты фотографирования, т. е. с горизонтального базиса, масштабный коэффициент можно вычислить по формуле

$$N = b/p,$$

где b — базис проектирования; p — продольный параллакс определяемой точки.

Таким образом, для определения пространственных фотограмметрических координат точек модели необходимо знать элементы внутреннего ориентирования снимков, вычислить элементы их взаимного ориентирования и измерить координаты соответственных точек на левом и правом снимках.

12.14. ВНЕШНЕЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

Внешнее ориентирование модели местности позволяет перейти от ее фотограмметрических координат к геодезическим координатам точек местности. Элементы внешнего ориентирования модели

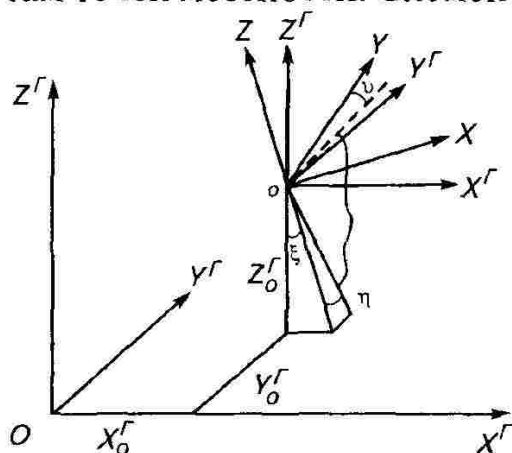


Рис. 12.18. Элементы внешнего ориентирования фотограмметрической модели

местности определяют ее масштаб и положение в геодезическом пространстве (рис. 12.18). Их семь:

t — знаменатель масштаба модели, $t = B/b$ (B — базис фотографирования; b — базис проектирования);

X_o^r , Y_o^r , Z_o^r — геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат. В случае использования описанных ранее систем взаимного ориентирования это геодезические координаты левого центра фотографирования S_1 ;

ξ, η, ν — углы наклона и поворота модели относительно геодезической системы координат.

Геодезические координаты точек местности и фотограмметрические координаты тех же точек модели связаны зависимостями:

$$\begin{aligned} X^r &= X_o^r + (a_1 X^M + a_2 Y^M + a_3 Z^M) t; \\ Y^r &= Y_o^r + (b_1 X^M + b_2 Y^M + b_3 Z^M) t; \\ Z^r &= Z_o^r + (c_1 X^M + c_2 Y^M + c_3 Z^M) t, \end{aligned} \quad (12.10)$$

где $a_{1...3}, b_{1...3}, c_{1...3}$ — направляющие косинусы, являющиеся функциями угловых элементов ξ, η, ν внешнего ориентирования модели.

Уравнения (12.10) используют для вычисления геодезических координат точек местности, если элементы внешнего ориентирования модели известны. Для вычисления этих элементов служат эти же уравнения и опорные точки, располагающиеся в зоне перекрытия снимков. Для опорных точек по измеренным координатам их изображений на левом и правом снимках и найденным элементам взаимного ориентирования вычисляют их фотограмметрические координаты.

Таким образом, для опорных точек известны их геодезические координаты и пространственные фотограмметрические координаты. Используя эти данные, можно составить уравнения вида (12.10), в которых неизвестными величинами являются элементы внешнего ориентирования модели. Для каждой планово-высотной опорной точки можно составить все три уравнения, для плановой — первые два, для высотной — одно последнее. Полученные уравнения объединяют в систему, которую решают относительно семи неизвестных элементов внешнего ориентирования модели. Для бесконтрольного решения системы уравнений достаточно трех опорных точек, не лежащих на одной прямой: двух планово-высотных и одной высотной. Набор опорных точек может быть различным. Важно, чтобы создаваемая система содержала не менее семи уравнений со всеми семью неизвестными элементами внешнего ориентирования модели.

Рассмотренный способ определения геодезических координат точек местности по паре снимков носит название двойной обратной фотограмметрической засечки.

12.15. ПРЯМАЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ЗАСЕЧКА ПО ПАРЕ СНИМКОВ

Определить геодезические координаты точек местности по паре снимков можно также на основе использования уравнений коллинеарности. Для этого необходимо знать элементы внешнего

ориентирования левого и правого снимков. Тогда для любой точки местности, расположенной в зоне перекрытия, можно составить четыре уравнения коллинеарности:

$$\begin{aligned} X^r &= X_{S_1}^r + (Z^r - Z_{S_1}^r) \frac{a_1(x_1 - x_0) + a_2(y_1 - y_0) - a_3 f}{c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) - c_3 f}, \\ Y^r &= Y_{S_1}^r + (Z^r - Z_{S_1}^r) \frac{b_1(x_1 - x_0) + b_2(y_1 - y_0) - b_3 f}{c_1(x_1 - x_0) + c_2(y_1 - y_0) - c_3 f}, \\ X^r &= X_{S_2}^r + (Z^r - Z_{S_2}^r) \frac{a'_1(x_2 - x_0) + a'_2(y_2 - y_0) - a'_3 f}{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2(y_2 - y_0) - c'_3 f}, \\ Y^r &= Y_{S_2}^r + (Z^r - Z_{S_2}^r) \frac{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2(y_2 - y_0) - b'_3 f}{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2(y_2 - y_0) - c'_3 f}. \end{aligned} \quad (12.11)$$

В полученной системе уравнений искомыми величинами являются X^r , Y^r , Z^r — геодезические координаты точки местности.

Первые два уравнения выражают связь геодезических координат точки местности и плоских координат ее изображения на левом снимке. Последние два уравнения выражают ту же связь, но с использованием правого снимка.

Систему из четырех уравнений с тремя неизвестными решают с контролем при условии, что элементы внутреннего и внешнего ориентирования левого и правого снимков известны.

Для определения двенадцати элементов внешнего ориентирования снимков:

$$X_{S_1} Y_{S_1} Z_{S_1} \alpha_1 \omega_1 \varepsilon_1 X_{S_2} Y_{S_2} Z_{S_2} \alpha_2 \omega_2 \varepsilon_2$$

используют опорные точки, которые обязательно должны быть планово-высотными, но не обязательно располагаться в зоне перекрытия снимков.

Возможные схемы расположения опоры показаны на рисунке 12.19.

Каждая опорная точка, находящаяся в зоне перекрытия, даст четыре уравнения коллинеарности вида (12.11). Опорная точка, расположенная вне зоны перекрытия, позволяет составить только два таких уравнения: либо первое и второе, либо третье и четвертое.

Таким образом, используя опору, показанную на рисунке 12.19, а, можно составить 12 уравнений коллинеарности, содержащие 12 неизвестных элементов внешнего ориентирования пары

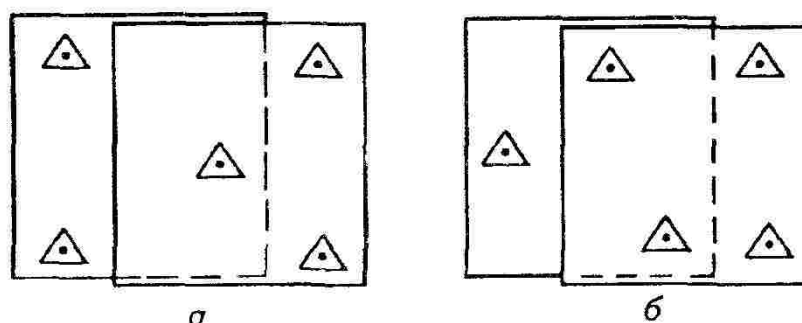


Рис. 12.19. Схемы расположения опорных точек для решения прямой фотограмметрической засечки по паре снимков

снимков, объединить их в систему и решить ее без контроля. Опора на рисунок 12.19, б дает 14 уравнений коллинеарности и решение с контролем.

12.16. ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ

Результат цифровой стереофотограмметрической обработки снимков — создание ортофотоплана, который изготавливают на цифровых фотограмметрических рабочих станциях (ЦФРС) и персональных компьютерах, обеспеченных специализированными программами. Одновременно могут обрабатываться несколько блоков, состоящих из сотен снимков.

Ввод изображения осуществляется высокоточными фотограмметрическими сканерами. В процессе сканирования предусмотрена возможность улучшения фотографических качеств исходного изображения (увеличение или уменьшение коэффициента контрастности, проработка в тенях и светлых участках и т. п.). В современных сканерах в автоматическом режиме может быть выполнено сканирование до пяти сотен снимков.

После ввода изображений осуществляется внутреннее ориентирование снимков путем введения в файл параметров АФА элементов внутреннего ориентирования.

Далее следует выполнение фототриангуляции, в процессе которой каждая стереопара обеспечивается опорными точками либо для всех снимков, включенных в обработку, определяются элементы внешнего ориентирования. Развивается фототриангуляция согласно составленному проекту, о котором более подробно написано в разделе 13.2.

Особенность стереофотограмметрической обработки снимков — необходимость измерения координат на перекрывающихся снимках всех точек, включенных в обработку, т. е. для каждой измеряемой точки необходимо найти соответствующую точку на соседнем снимке. В современных программах стереофотограмметрической обработки снимков процесс идентификации соответ-

ственных точек автоматизирован. Как правило, оператор один раз вручную отождествляет две соответственные точки. При этом координаты (x_1, y_1, x_2, y_2) этих точек на левом и правом снимках определяются автоматически. Разность абсцисс можно принять за средний продольный параллакс p точек стереопары, а разность ординат — за средний поперечный параллакс q тех же точек. В дальнейшем оператор курсором отмечает измеряемые точки лишь на левом снимке стереопары. Для них автоматически определяются координаты (x_1, y_1) на левом снимке и вычисляются приближенные координаты (x_2, y_2) соответственных точек на правом снимке:

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 - p; \\y_2 &= y_1 - q.\end{aligned}$$

Далее работает программа сравнения цифровых изображений левого и правого снимков вблизи соответственных точек. Участок левого снимка с центром в точке (x_1, y_1) сравнивается с участком правого снимка с центром в точке (x_2, y_2) . В окрестностях точки (x_2, y_2) на правом снимке автоматически отыскивается точка, вокруг которой оптическая плотность распределена так же, как на левом снимке вокруг точки (x_1, y_1) . Точность идентификации определяется коэффициентом корреляции: чем больше коэффициент корреляции, тем надежнее идентификация.

После развития фототриангуляции строят цифровую модель рельефа. В ЦФРС как регулярные ЦМР, так и структурные ЦМР строятся автоматически. Густота сетки пикетов для построения ЦМР задается оператором в зависимости от сложности и высоты сечения рельефа. Построение ЦМР сопровождается автоматическим проведением горизонталей. Однако полностью автоматизированное построение ЦМР в существующих ЦФРС не производится. Неизбежны ошибки при проведении горизонталей по лесным массивам, через реки, по застроенным территориям и т. п. В подобных случаях оператор корректирует построение цифровой модели рельефа при ее стереоскопическом наблюдении на экране монитора. Для этого в цифровых станциях предусмотрены режим выведения пары снимков на экран монитора и возможность получения стереоэффекта с помощью специальных очков, например поляризационных. Одиночные цифровые модели рельефа, построенные по стереопарам, объединяются в единую цифровую модель рельефа на всю картографируемую территорию. Фрагменты единой ЦМР используются при ортофототрансформировании снимков.

При ортофототрансформировании выполняется трансформирование каждого пикселя или площадки, состоящей из нескольких смежных пикселей. Каждому элементу трансформирования (пикселю или площадке) ставится в соответствие определенная высотная координата, полученная из ЦМР. При таком трансфор-

мировании наиболее полно учитывается влияние рельефа местности. В результате ортофототрансформирования получают одиночные ортофотоснимки, которые затем сшивают в единое изображение. Объединение ортофотоснимков подобно аналогичному процессу сшивки векторных изображений.

Далее следует деление единого ортофотоизображения на планшеты (трапеции) принятой государственной разграфки с соответствующим зарамочным оформлением. Такую продукцию называют ортофотопланом.

12.17. УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цифровые технологии фотограмметрической обработки снимков предусматривают использование специального комплекса технических средств — цифровых фотограмметрических рабочих станций (ЦФРС), включающих устройства ввода-вывода изображений и вычислительный комплекс.

Поскольку исходным материалом для цифровых технологий в большинстве случаев остаются аэрофотоснимки, их необходимо преобразовать в цифровой вид — цифровать. Цифрование может производиться в двух вариантах: растровом и векторном.

Получение *растрового* изображения — поэлементная запись исходного изображения в трехмерном коде: плановые координаты точки на изображении (x , y) и закодированная оптическая плотность или цвет этой точки. Технические средства, осуществляющие растровое цифрование, — сканеры, сам процесс цифрования изображения сканером называют сканированием. Если сканированное полутоновое изображение визуализировать на экране дисплея, то снова получают полутоновое изображение.

Сущность процесса *векторизации* описана в разделе 12.9. Векторизацию можно проводить вручную с помощью дигитайзеров, а также на экране монитора в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режимах.

В зависимости от конструкции и принципа действия различают планшетные и барабанные сканеры.

Планшетные сканеры имеют следующие конструктивные особенности:

- сканируемый материал (фотоснимок) размещается на горизонтальном предметном стекле;

- приемником излучения является линейка светочувствительных элементов (ПЗС-линейка);

- объектив, строящий изображение на ПЗС-линейке, неподвижен относительно нее.

Вариант конструкции планшетного сканера показан на рисунке 12.20.

Сканируемый фотоснимок помещают на предметное стекло. Под стеклом может перемещаться подвижная каретка I , на кото-

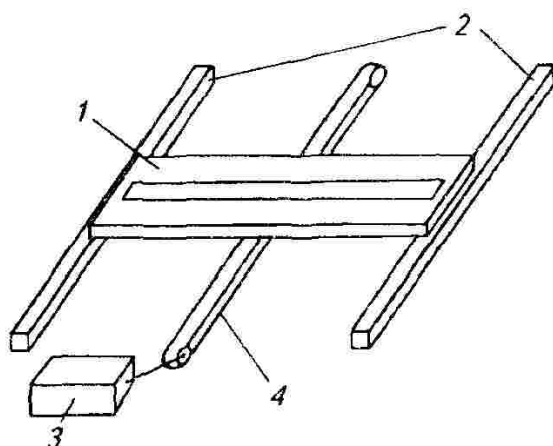


Рис. 12.20. Схема планшетного сканера:

1 — подвижная каретка; 2 — направляющие;
3 — механический привод; 4 — ремennая передача

рой находится фотометрический блок. Он состоит из объектива и ПЗС-линейки. Приемник излучения одновременно регистрирует отраженную энергию от всех элементов строки изображения. Таким образом осуществляется электронная строчная развертка.

Кадровую развертку выполняют в результате пошагового движения каретки по направляющим 2 перпендикулярно сканирующей линейке. Каретку приводит в движение механический привод 3 посредством ремennой передачи 4.

Рассмотрим подробнее процесс формирования растра.

На каждом шаге сканирования светочувствительные элементы

ПЗС-линейки считывают информацию с элементарных площадок сканируемого изображения. Центр площадки называют *точкой позиционирования*, а *растром* изображения — упорядоченное множество точек позиционирования.

Процесс формирования растра показан на рисунке 12.21.

ПЗС-линейка, жестко связанная с объективом, перемещается вдоль оси Y . В идеальном случае точки позиционирования располагаются в узлах регулярной сетки квадратов и растр имеет строго прямоугольную форму. В каждой точке позиционирования кодируется среднее значение оптической плотности элементарной площадки оригинала.

На практике мы имеем дело не с идеальным, а с искаженным растром. Точки позиционирования искаженного растра не лежат в узлах сетки квадратов. Приблизить реальный растр к идеальному

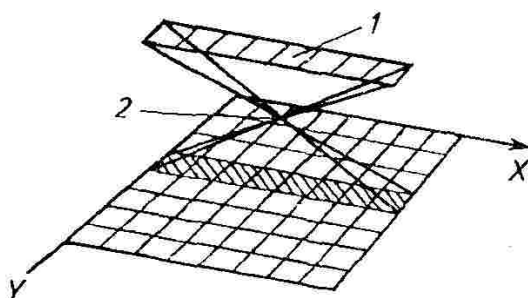


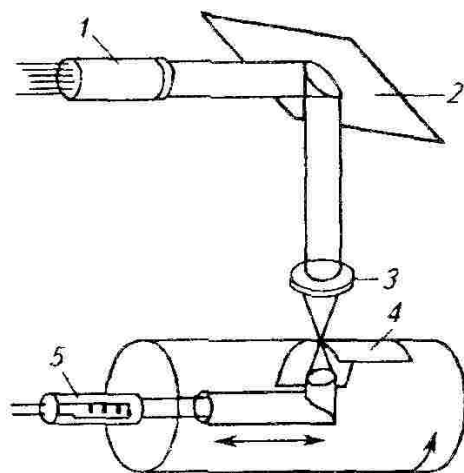
Рис. 12.21. Процесс формирования растра:

1 — ПЗС-линейка; 2 — объектив

можно двумя способами — совершенствуя конструкцию сканера, повышая точность юстировки его узлов или создавая на основе калибровки сканера математическую модель искажений, используемую в дальнейшем для коррекции растра.

Первый путь ведет к значительному повышению стоимости сканеров (приблизительно в 10...40 раз).

Ведущие фирмы-изготовители



12.22. Схема барабанного сканера:

1 — ФЭУ; 2 — зеркало; 3 — объектив; 4 — оригинал; 5 — лампа

сканеров пошли по второму пути. В комплекте со сканером они поставляют программное обеспечение для исправления метрических искажений раstra, так называемую коррекционную программу. Такая программа восстановления раstra позволяет учесть искажения изображения, возникшие в процессе сканирования, а также искажения, вызванные деформацией основы фотоматериала (пленки или бумаги). Для этого на снимок в момент экспонирования впечатывают контрольную сетку крестов, координаты которых известны с высокой точностью.

В барабанных сканерах (рис. 12.22) в качестве приемников излучения используют фотодиоды, которые обладают лучшими фотометрическими характеристиками, чем ПЗС-линейки. Сканируемый материал закрепляют на прозрачном барабане, который вращается над неподвижным приемником излучения. Таким образом, строчная развертка в барабанных сканерах осуществляется электронным способом, а кадровая — вращением барабана.

Основные технические характеристики сканеров:

позиционная точность;

линейная разрешающая способность;

энергетическая разрешающая способность.

У цветных сканеров — еще и глубина цвета.

Линейная разрешающая способность показывает размер элементарной площадки сканирования и измеряется в dpi (количество пикселей в дюйме изображения). Разрешающая способность 600 dpi означает, что на один дюйм (25,4 мм) длины изображения приходится 600 элементарных площадок сканирования (пикселей), т. е. размер одного пикселя 0,042 мм.

Энергетическая разрешающая способность сканера зависит от вида приемника излучения. У фотодиодов она выше, чем у ПЗС-линеек.

Позиционная точность сканера характеризует степень нарушения подобия сканируемого и отсканированного изображений и представляет собой максимальное значение расхождений в положении точек реального и идеального раstra. Она во многом зависит от его конструкции и измеряется в микрометрах.

Глубина цвета характеризует максимальное число цветов, различаемых сканером, ее измеряют в битах на точку растрового изображения. Глубина цвета 24 бит/точку превосходит возможности человеческого глаза.

Лучшие аэрофотоаппараты с компенсацией продольного и углового сдвигов изображения могут обеспечить получение снимков с линейной разрешающей способностью $80 \dots 100 \text{ мм}^{-1}$. Во избежание потери информации при сканировании фотоснимков необходимо использовать сканеры с линейной разрешающей способностью, по крайней мере, вдвое большей, чем исходный снимок. Цифрование с таким разрешением при обработке снимков крупных форматов представляет значительную трудность, поскольку требуется большой объем памяти. Поэтому широко применяют так называемое «on line цифрование» с изменяющейся разрешающей способностью. Высокая разрешающая способность необходима при работе в зонах координатных меток, опорных точек и т. п.; более низкая достаточна при наборе пикетов для ЦМР или ЦМС.

Дигитайзеры — устройства для ручного ввода графической информации. Дигитайзер представляет собой электронный планшет стандартного формата (от A4 до A0) и связанное с ним устройство указания — курсор — небольшая панель с кнопками и визир, который имеет электромагнитную связь с электронным планшетом дигитайзера.

Изображение, подлежащее цифрованию, помещают на рабочее поле электронного планшета дигитайзера, закрепляют прижимным устройством. Затем визир курсора вручную наводят на точки изображения и нажимают одну из кнопок панели. При этом происходит автоматическая запись координат (x , y) соответствующей точки рабочего поля дигитайзера (наблюдаемой точки изображения в системе координат дигитайзера).

Для повышения точности визирования применяют специальные средства: курсоры с подсветкой визира, увеличительные линзы (насадки на визир), подсветку рабочего поля флюоресцентными лампами. Точность определения координат при помощи дигитайзера составляет 0,1 мм.

Сравним векторный и растровый способы цифрования.

Оцифровка с использованием дигитайзера — трудоемкий и кропотливый процесс, требующий ручного труда квалифицированного специалиста. Оцифрованная информация в векторной форме занимает небольшой объем памяти компьютера и поэтому

не требует больших компьютерных ресурсов. Кроме того, сами дигитайзеры значительно дешевле сканеров.

Сканеры — автоматизированное средство цифрования изображений. Они незаменимы при вводе фотоизображений, однако требуют больших компьютерных ресурсов.

Устройства, позволяющие вывести на печать цифровую информацию, называют плоттерами или принтерами. *Плоттеры* выводят изображение на широкоформатные материалы (бумагу, пленку, кальку). Для вывода малоформатных изображений используют принтеры.

По принципу построения изображения различают векторные и растровые плоттеры. В векторных плоттерах пишущими элементами являются фломастеры, рапидографы, ручки. Они перемещаются по полю выводимого изображения и рисуют различные линии. Растровые плоттеры, так же как и принтеры, формируют изображение построчно в одном направлении. Векторные плоттеры в фотограмметрии практически не применяют.

В растровых плоттерах используют различные способы печати. В связи с этим их разделяют на электростатические, термовосковые, лазерные, струйные и др., наиболее широко применяют струйные плоттеры, печатающая система которых состоит из картриджей, заполненных чернилами, и струйной головки. Последняя имеет вид матрицы, состоящей из крохотных сопел, через которые капельки чернил из картриджей выдавливаются на носитель. Существует два основных вида струйной печати: термopечать и пьезоэлектрическая. Термopечать осуществляется горячими чернилами, пьезоэлектрическая — холодными. В связи с этим разрешающая способность пьезоэлектрической струйной печати достигает 1440 dpi, в то время как термopечать может обеспечить максимальную разрешающую способность 720 dpi.

12.18. АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ

Цифровую фотограмметрическую обработку снимков можно производить на персональных компьютерах (PC) с последними поколениями процессоров Intel; персональных рабочих станциях (PC Workstation — PC WS); RISK — UNIX рабочих станциях (UNIX WS). Выбор того или иного аппаратного средства зависит от вида и объемов работ и используемого материала.

Профессиональная работа со снимками осуществляется на UNIX рабочих станциях, включающих, как правило, несколько мощных процессоров с большой емкостью памяти на жестком диске (Винчестере) и высокой тактовой частотой (не менее 450 МГц).

Персональные рабочие станции — это настольные ЭВМ, сравнимые по функциональности и производительности с UNIX рабо-

чими станциями, а по стоимости — с обычными персональными компьютерами. PC WS появились в качестве новой категории аппаратных средств в 1996 г. Они заняли промежуточное положение между персональными компьютерами и UNIX рабочими станциями благодаря трем факторам:

появлению более дешевых процессоров Pentium Pro и Pentium II, по производительности сравнимых с процессорами PA — RISC; SPARC MIRS, используемыми в UNIX WS;

внедрению 32-битной операционной системы Windows NT, функциональные возможности которой занимают промежуточное положение между Windows NT и вычислительными платформами UNIX WS (HP UNIX; Solaris IRIX и др.);

применению высокопроизводительной графической подсистемы Open GL.

Основа аппаратных средств — компьютеры, важнейшими характеристиками которых, с точки зрения потребителя, можно считать тактовую частоту процессора, емкость жесткого диска и его быстродействие. Рост значений этих характеристик увеличивает стоимость компьютера. Поэтому при выборе аппаратного средства важно найти оптимальное соотношение между его стоимостью и требуемыми функциональными возможностями.

12.19. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Внедрение способов цифровой фотограмметрии и особенно ее переход на использование персональных компьютеров позволили самим пользователям осуществлять фотограмметрическую обработку снимков. Теперь нет необходимости в дорогостоящих и сложных оптико-механических приборах и высококвалифицированных кадрах для работы на них. Термин «обработка снимков» вытесняется термином «работа со снимками». Этому способствуют два фактора:

во-первых, доступность и возможности компьютерной техники позволяют выполнить весь процесс фотограмметрической обработки снимков самими пользователями, а не только немногочисленными специализированными организациями;

во-вторых, профессиональные пакеты программ, обладая логичной структурой, удобством пользовательского интерфейса, стали доступны для работы специалистам различных прикладных областей: землеустроителям, почвоведом, кадастровикам.

Фотограмметрическое программное обеспечение имеет свои специфические особенности. Это прежде всего необходимость работы с огромными по объему файлами и пространственная привязанность информации.

Черно-белый снимок камеры МСК-4 при размере пикселя 6 м на местности будет иметь объем файла примерно 380 Мбайт. В цветном виде соответственно в 3 раза больше. Оцифрованный

снимок камеры КВР-1000 при разрешении на местности 2 м занимает объем 1,5 Гбайта. Для фотограмметрической обработки снимков требуется в 2...5 раз больше дискового пространства, чем занимает обрабатываемый снимок.

Для работы с большими объемами файлов используют специальные форматы данных: иерархические, блоковые и др. Иерархическая структура представляет собой пирамидные слои. Это серии цифровых изображений одного и того же снимка, полученных с различной разрешающей способностью. От слоя к слою разрешающая способность уменьшается в 2...4...8 раз и т. д. (рис. 12.23).

Сблокированная структура — совокупность блоков небольших квадратных участков изображения с прямым доступом к каждому из них.

Использование специальных форматов данных решает одну из проблем работы с оцифрованными снимками — вывод записанного растрового изображения на экран дисплея. Проблема возникает из-за того, что на экране обычно можно разместить 2048×1536 пикселей, размер же снимка может составлять $10\,000 \times 10\,000$ пикселей. Часто обрабатываемый снимок изображается в двух окнах. В одном окне — весь снимок с уменьшенной разрешающей способностью (прореженный), в другом окне — фрагмент (блок) оригинального снимка. Все действия оператора отображаются в обоих окнах.

Современные пакеты программ обработки снимков разработаны таким образом, чтобы хранить не результаты обработки, а исходные снимки и алгоритмы, позволяющие в нужный момент получить нужный результат.

Это объясняется следующим. Во-первых, каждое преобразование ведет к потере исходной информации и заранее, как правило, неизвестно, насколько важна эта потеря. Во-вторых, быстрое действие современных компьютеров и высокая стоимость дисковой памяти делают экономически выгодным повторять при необходимости операции с исходным изображением, чем заполнять память преобразованными изображениями.

Фотограмметрическое программное обеспечение подразделяют на два больших класса: программы обработки одиночных снимков и программы стереофотограмметрической обработки.

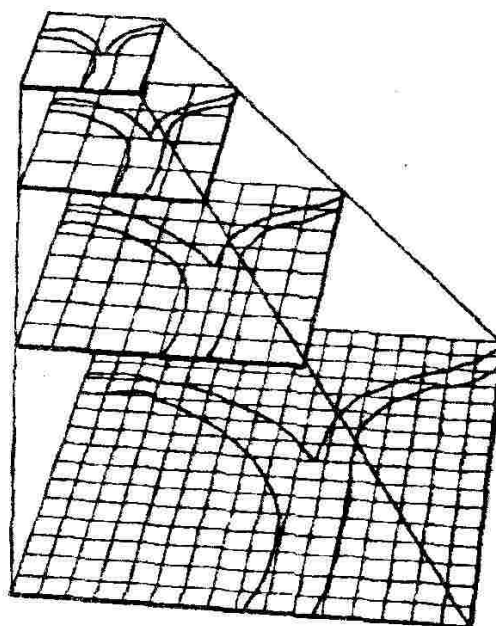


Рис. 12.23. Иерархическая структура хранения информации

12.20. ПОНЯТИЕ О 3D-ИЗОБРАЖЕНИИ

Цифровую модель местности можно визуализировать в виде традиционного планово-картографического материала, а также в виде трехмерного пространственного изображения, так называемого 3D-изображения [3-dimensional (англ.) — трехмерный].

В современном понимании 3D-изображение — это изображение трехмерных объектов на плоскости, дающее максимально возможное представление об их пространственных формах и размерах. Существует большое разнообразие проекций (ортогональная, аксонометрическая, изометрическая и др.), позволяющих изображать пространственные объекты на плоскости.

Привычной для человеческого восприятия является центральная проекция, поскольку изображение окружающего нас мира строится на сетчатке глаза человека именно по законам центральной проекции, которую иначе называют перспективой. Законы перспективы позволяют нам судить о глубине пространства (см. ч. II). Более удаленные объекты изображаются мельче, чем находящиеся вблизи, к тому же могут быть частично или полностью ими закрыты.

Пример изображения трехмерных объектов на плоскости в центральной проекции — фотоснимок этих объектов, полученный кадровым фотоаппаратом. Удачно выбранный ракурс, т. е. точка фотографирования и угол зрения, позволит извлечь максимум информации о форме, размерах и взаимном расположении объектов.

Современные технологии цифровой обработки аэрофотоснимков позволяют получать визуализированное изображение местности, аналогичное фотографическому, в любом ракурсе.

3D-изображение создается на основе ранее построенной цифровой модели рельефа и ортофотоснимков. 3D-изображение можно назвать макетным фотоснимком, поскольку его получают не фотографированием, а компьютерной графикой.

Ортофотоснимок территории сельского поселения показан на рисунке 12.24*, а 3D-изображение той же территории — на рисунке 12.25. Постройки (а) и стоянка автомобилей (б) не восстановлены на 3D-изображении по высоте (показано только их плановое положение).

Рассмотрим подробнее алгоритм построения макетного фотоснимка. В его основе заложено использование уравнений коллинеарности, связывающих координаты точки создаваемого макетного снимка (x, y) с геодезическими координатами соответствующей точки местности.

*Рисунки 12.24...12.27 заимствованы из журналов Arc User, Arc News и Arc Review.

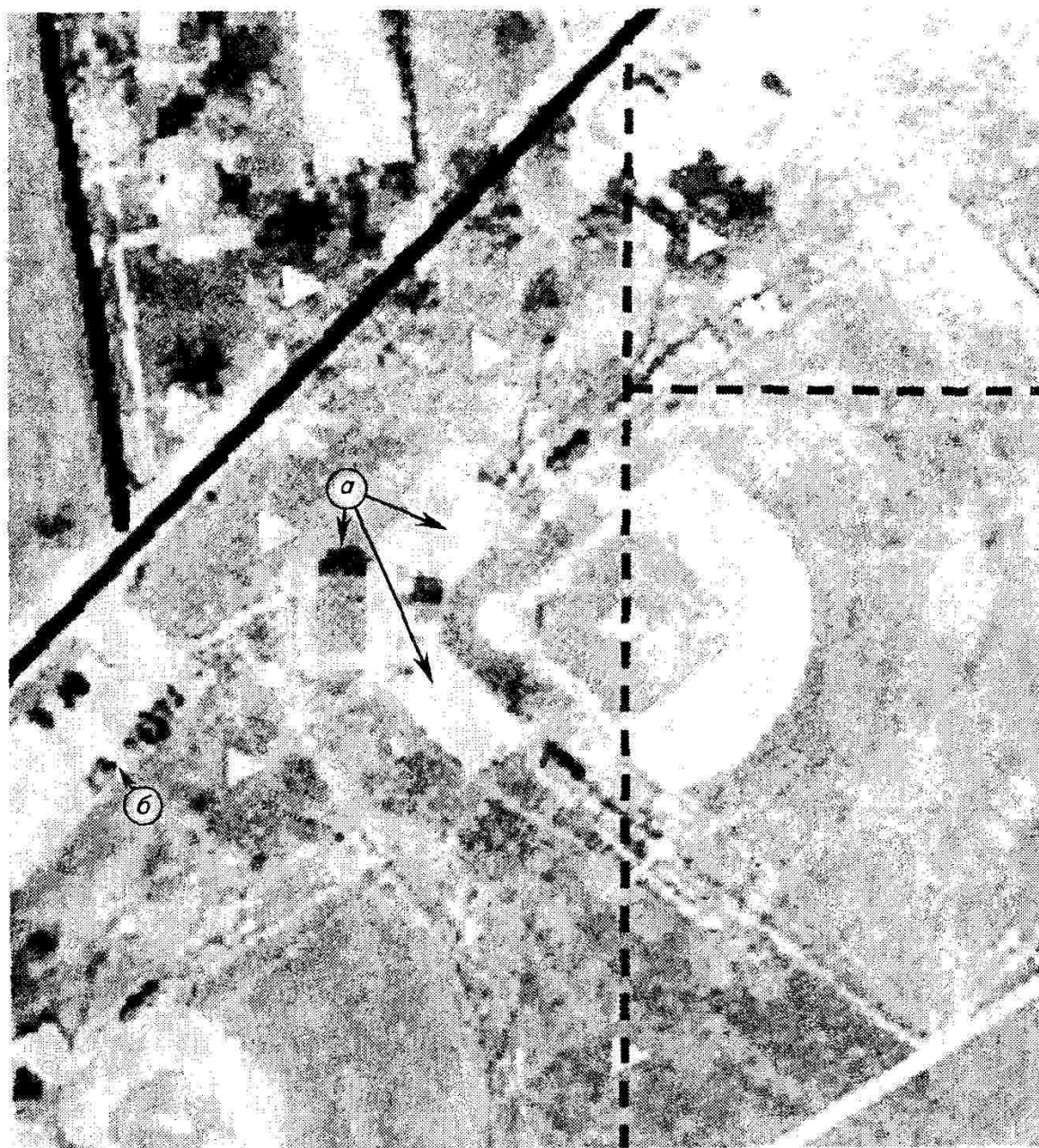


Рис. 12.24. Фрагмент аэрофотоснимка сельского поселения

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 - f \frac{a_1(X^r - X_S) + b_1(Y^r - Y_S) + c_1(Z^r - Z_S)}{a_3(X^r - X_S) + b_3(Y^r - Y_S) + c_3(Z^r - Z_S)}, \\
 y &= y_0 - f \frac{a_2(X^r - X_S) + b_2(Y^r - Y_S) + c_2(Z^r - Z_S)}{a_3(X^r - X_S) + b_3(Y^r - Y_S) + c_3(Z^r - Z_S)},
 \end{aligned}
 \tag{12.12}$$

где x ; y — координаты изображения точки местности на цифровом макетном снимке; x_0 , y_0 , f — элементы внутреннего ориентирования создаваемого макетного

снимка; X^r, Y^r, Z^r — геодезические координаты точки местности, определяемые по ЦМР; a_i, b_i, c_i — направляющие косинусы, содержащие угловые элементы внешнего ориентирования создаваемого макетного снимка; X_s, Y_s, Z_s — геодезические координаты точки, из которой получен макетный снимок (координаты центра псевдофотографирования).

При создании макетного снимка технолог задает элементы внешнего и внутреннего ориентирования. При этом руководствуются желаемым ракурсом просмотра местности, т. е. ЭВО определяют точку и угол зрения на объект съемки.

Цифровую модель рельефа, используемую для создания 3D-изображения, в большинстве случаев получают на основе стереофотограмметрической обработки аэрофотоснимков. Однако на аэро-снимках невидимыми, как правило, остаются фасады зданий. Для их представления на 3D-изображении используют материалы наземной съемки, например полученные цифровой фотокамерой.

Каждой точке макетного снимка с вычисленными по формулам (12.12) координатами присваивают оптическую плотность, определенную для этой точки местности по исходному ортофотоснимку.

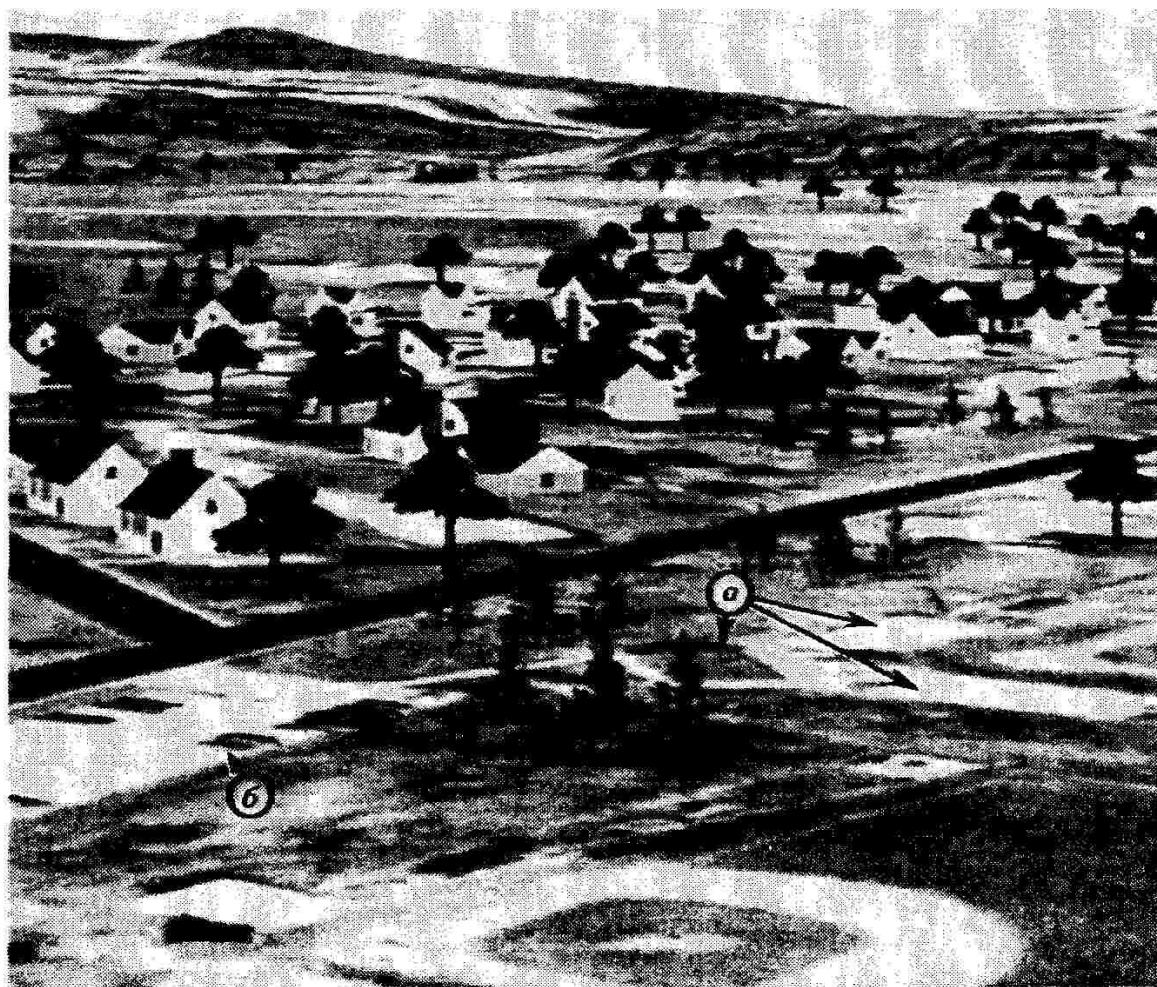


Рис. 12.25. 3D-изображение территории сельского поселения

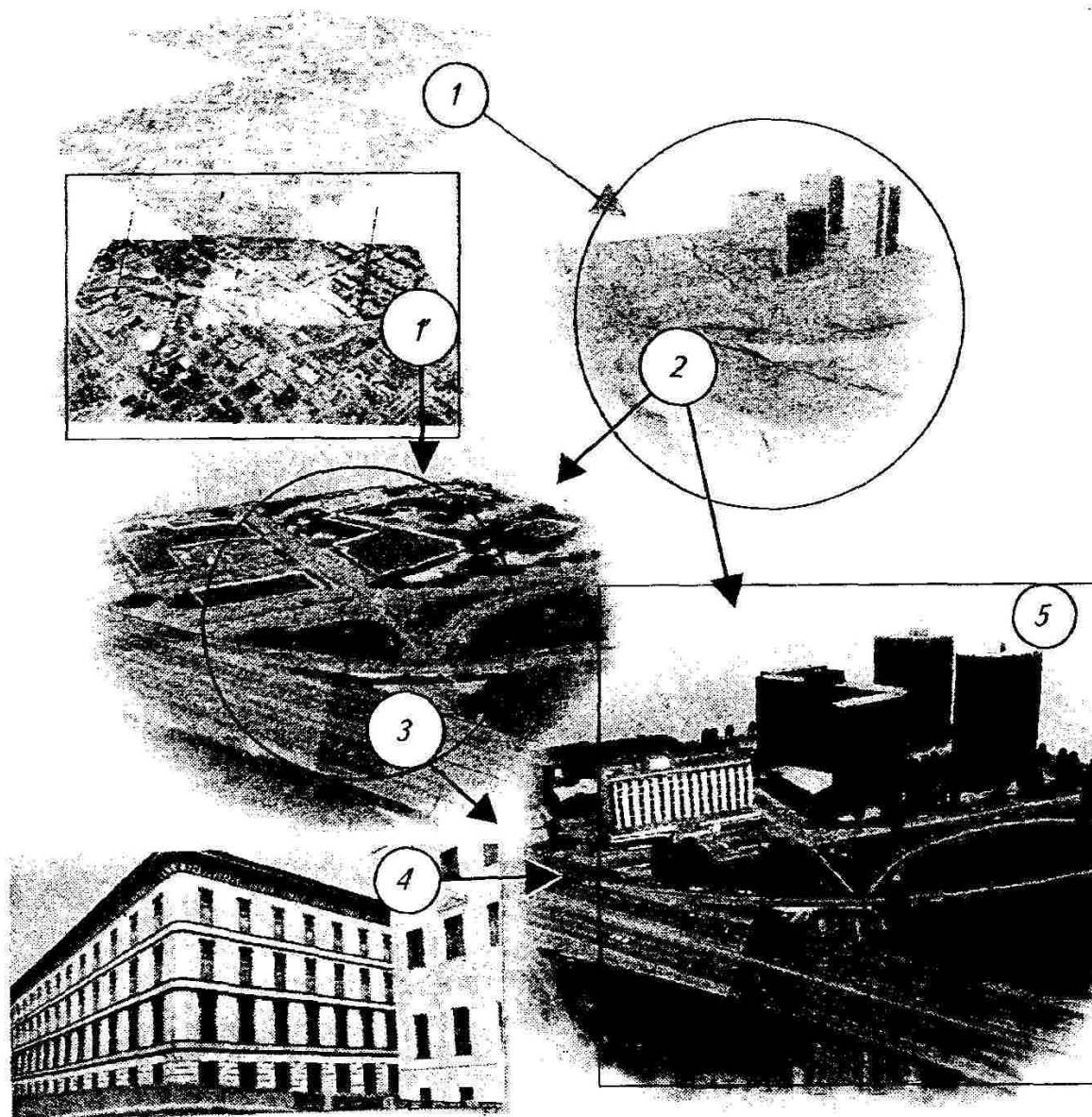


Рис. 12.26. Схема преобразования аэрофотоснимков в 3D-изображение

Таким образом, цифровой макетный снимок представляет собой массив чисел, каждым элементом которого являются три числа — координаты (x, y) в системе координат снимка и закодированная оптическая плотность этой точки.

Визуализация цифрового макетного снимка представляет собой 3D-изображение.

Схема преобразований аэрофотоснимков в 3D-изображение показана на рисунке 12.26:

на основе пары снимков 1 создается цифровая модель рельефа 2;

ЦМР 2 позволяет преобразовать одиночный снимок 1' в ортофотоизображение 3;

на базе ортофотоизображения 3, ЦМР 2 и наземных снимков фасадов зданий 4 создано 3D-изображение 5.

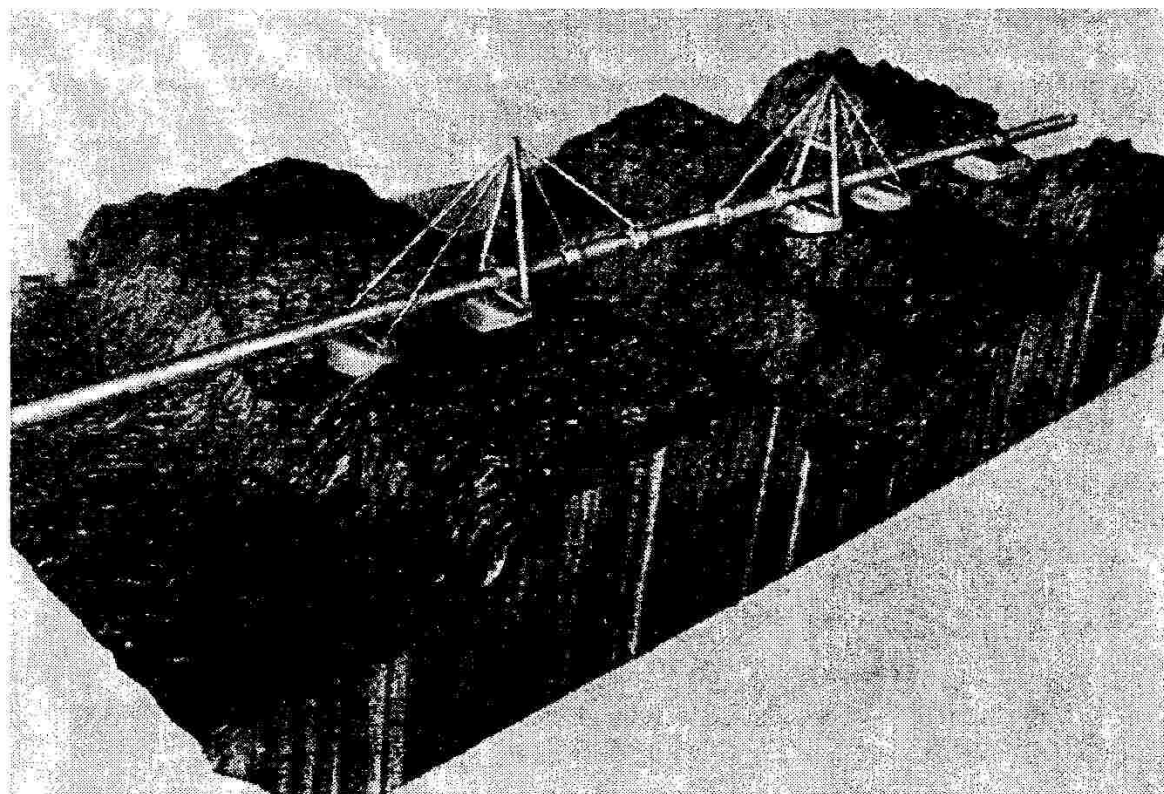


Рис. 12.27. 3D-изображение виртуальной строительной площадки

Для одной и той же территории можно создать серию 3D-изображений, полученных из разных центров проекций, расположенных вдоль некоторой траектории. Последовательный просмотр таких изображений в режиме мультипликации создает иллюзию обхода или облета данной территории.

3D-изображения позволяют анализировать исследуемую территорию, представленную в виде пространственной модели. На базе 3D-изображений создают электронные макеты местности, включающие в себя, помимо рельефа, произвольные трехмерные объекты (здания и сооружения, растительность и т. п.).

Виртуальная строительная площадка — проектирование участка трассы нефтепроводов через реку — показана на рисунке 12.27. Наглядное пространственное изображение дает возможность корректировать проектные решения.

3D-изображения позволяют осуществлять трехмерную интерполяцию какого-либо признака. Исходной информацией для трехмерной интерполяции служит нерегулярная сеть пунктов, в которых проведены измерения некоторого признака (уровня кислотности почв, содержания CO в воздухе и т. п.). Программа интерполяции создает математическую модель поведения исследуемого признака на заданном участке. С помощью данной модели рассчитывают наиболее вероятные значения признака в любой точке пространства, формируют изоповерхности, представляю-

щие собой геометрические места точек с одинаковыми значениями признака.

Кроме того, 3D-изображения дают возможность построить любое сечение: горизонтальной, вертикальной или иной плоскостью. Также возможно построение сечения произвольной поверхностью. Подобные построения позволяют исследовать поведение интерполируемого признака на данных сечениях.

3D-изображения широко используют в городском кадастре и градостроительстве, экологическом мониторинге, при изучении эрозионных процессов, при рекультивации нарушенных земель, т. е. в тех областях, где измерения проводят в трехмерном пространстве.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему для аналитического трансформирования одиночного снимка в большинстве случаев необходимо создание ЦМР? Ответ обосновать аналитически. 2. Как расположение зоны обработки снимка (центральная, периферийная) влияет на точность построения ЦМР? 3. Можно ли решить обратную фотограмметрическую засечку с использованием только плановых опорных точек? 4. Почему при аналитическом решении некоторых фотограмметрических задач в исходные данные включают приближенные значения искомых величин? 5. Нужны ли опорные точки при взаимном ориентировании пары снимков? 6. Какие элементы ориентирования снимков необходимо знать для построения фотограмметрической модели? 7. Почему для внешнего ориентирования фотограмметрической модели опорные точки необходимо располагать в зоне перекрытия? 8. Почему для создания 3D-изображения необходимо предварительно получить ортофотоизображение?

Глава 13

ПОНЯТИЕ О ПРОЦЕССАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СНИМКОВ В ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ И ПЛАНЫ

13.1. ПЛАНОВО-ВЫСОТНАЯ ПРИВЯЗКА АЭРОФОТОСНИМКОВ

Фотограмметрическая обработка как одиночного снимка, так и пары снимков предполагает наличие опорных точек. Опорные точки позволяют производить трансформирование одиночных снимков и геодезическое ориентирование пространственных моделей местности. Геодезические координаты опорных точек можно получить с помощью геодезических измерений в поле или камерально фотограмметрическим методом.

Процесс опознавания на снимках точек местности и определение координат этих точек геодезическими методами называют *привязкой аэрофотоснимков*. В качестве опорных точек выбирают надежно идентифицируемые на снимках точки местности. Привязку, обеспечивающую каждый снимок или каждую стереопару опорными точками в количестве, необходимом для фотограммет-

рической обработки, называют *сплошной*, а в противном случае — *разреженной*.

Если в результате привязки у каждой опорной точки определены все три геодезические координаты, то привязка называется *планово-высотной*, если только плановые координаты — *плановой*, если только высотная координата — *высотной*.

Привязка аэрофотоснимков состоит из следующих этапов: подготовки материалов; составления проекта привязки; рекогносцировки и закрепления на местности опорных точек; полевых измерений; вычислительных работ; оформления материалов и сдачи работ.

Подготовка материалов включает подбор комплектов контактных или увеличенных снимков и репродукций накидного монтажа на объект работ. На репродукцию накидного монтажа переносят пункты геодезической сети с имеющихся топографических карт.

Составление проекта привязки аэрофотоснимков проводят на репродукции накидного монтажа. Как правило, при разреженной привязке опорные точки располагают рядами поперек аэрофотосъемочных маршрутов (рис. 13.1). Расстояние между опорными точками зависит от масштаба создаваемого плана, высоты сечения рельефа, параметров аэрофотосъемки и выражается числом базисов фотографирования. Число базисов n определяют подбором по формулам:

между высотными опознаками

$$n\sqrt{n+3} = \frac{M_z p^2 y}{0,09 H f^2 \sigma_q}; \quad (13.1)$$

между плановыми опознаками

$$n\sqrt{n+3} = \frac{M_d p y}{0,17 H f \sigma_q};$$

где M_z , M_d — средние квадратические погрешности наиболее слабо определяемых точек соответственно по высоте и в плане относительно опорных точек; p — среднее значение продольных параллаксов (мм), приближенно равное базису фотографирования на снимках (мм); y — среднее значение ординат связующих точек;

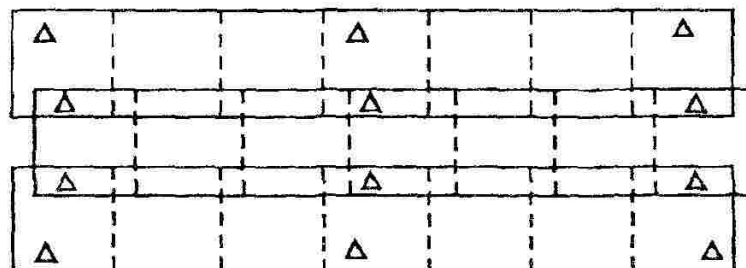


Рис. 13.1. Схема расположения опорных точек при разреженной привязке снимков

H — высота фотографирования; σ_g — средняя квадратическая погрешность определения поперечного параллакса (для аналитических методов 0,010...0,015 мм).

Значения M_z и M_d выбирают по таблице 13.1.

13.1. Значения M_z и M_d в зависимости от масштаба плана и высоты сечения рельефа

Масштаб плана	Высота сечения рельефа, м	M_z , м	M_d , мм на плане
1:5000...1:10000	1,0	0,2	0,20
1:10000...1:25000	2,0	0,4	0,20...0,25
1:10000...1:25000	2,5	0,5	0,20...0,25
1:10000...1:25000	5,0	1,2	0,20...0,25

Места расположения проектируемых опорных точек показывают на репродукции накидного монтажа кружками диаметром 5 мм красной тушью и на одном из перекрывающихся снимков красным карандашом. Опорные точки стараются располагать на середине продольных и поперечных перекрытий, чтобы они изобразились на максимальном числе снимков. Опорные точки нельзя размещать ближе 1 см от края снимка.

Если привязку снимков выполняют с помощью GPS-аппаратуры, то зоны расположения опорных точек намечают на открытых пространствах, чтобы обеспечить радиовидимость необходимого числа спутников.

В процессе *рекогносцировки и закрепления на местности* опорных точек опознают и накалывают на снимки существующие пункты триангуляции государственной сети, выбирают окончательное положение каждой опорной точки и уточняют метод ее геодезического определения. В качестве опорной точки выбирают такую точку местности, которая надежно идентифицируется на всех перекрывающихся снимках. Погрешность опознавания опорной точки на местности не должна превышать 0,1 мм в масштабе создаваемого плана.

Опознанные опорные точки закрепляют на местности кольями длиной 0,3...0,5 м и окапывают треугольником со сторонами 1,2...1,5 м. На снимках эти точки накалывают с погрешностью не более 0,1 мм и обводят двумя красными концентрическими окружностями диаметром 8 и 10 мм. Каждой опорной точке присваивают номер.

Далее проводят *геодезические измерения с помощью современных электронных тахеометров и GPS-аппаратуры*.

В результате *вычислительных работ* получают геодезические координаты опорных точек.

Для каждой трапеции государственной разграфки, землепользования или поселения формируют техническое дело, в которое входят все материалы полевых и камеральных работ:

репродукции накидного монтажа, снимки с оформленными опорными точками, полевые журналы, каталоги геодезических координат и т. п.

13.2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

Фототриангуляцией называют способ определения координат точек местности фотограмметрическими методами. Фототриангуляцию развивают по снимкам одного или нескольких маршрутов. В зависимости от этого различают *одномаршрутную* (маршрутную) и *многомаршрутную* (блочную) фототриангуляцию.

Если в процессе фототриангуляции определяют только плановые координаты точек местности, то это *плановая* фототриангуляция, если все три пространственные координаты, — *пространственная* фототриангуляция.

Существует несколько способов развития пространственной фототриангуляции: способ независимых моделей, способ частично зависимых моделей, способ связок и др.

В способе независимых моделей каждая модель строится независимо от других моделей в своей системе координат и в своем масштабе. Созданные модели объединяют в общую модель с помощью связующих точек — точек, расположенных в зоне тройных перекрытий и поэтому принадлежащих двум соседним моделям.

После этого по опорным точкам выполняют внешнее ориентирование общей модели секции маршрута или блока и вычисление геодезических координат определяемых точек.

Способ частично зависимых моделей также предполагает построение всех моделей фототриангуляционного ряда. Однако в отличие от предыдущего способа угловое ориентирование всех моделей одинаково. Различаются лишь масштабы. Последующую модель приводят к масштабу предыдущей с помощью связующих точек. Общую модель масштабируют и геодезически ориентируют по опорным точкам.

Способ связок реализует идею определения пространственных координат точек местности прямой фотограмметрической засечкой по паре снимков. Для этого необходимо знать элементы внешнего ориентирования всех снимков фототриангуляционного ряда или блока в условной или геодезической системе координат. Эти элементы определяют с помощью связующих точек последовательным решением прямых и обратных фотограмметрических засечек. Если элементы внешнего ориентирования всех снимков и координаты определяемых точек были найдены в условной системе координат, то проводят внешнее ориентирование фототриангуляционного ряда по опорным точкам.

Независимо от способа фототриангуляции при ее развитии используют три вида точек, для которых измеряют координаты на снимках. Это опорные точки, связующие и определяемые. У каждого вида точек свое назначение.

Определяемые точки — точки, ради которых развивается фототриангуляция, — получают геодезические координаты. Определяемые точки в дальнейшем можно использовать в качестве опорных при фотограмметрической обработке одиночного снимка или пары снимков.

Связующие точки позволяют либо объединить одиночные модели местности в единую модель (способы независимых и частично зависимых моделей), либо определить элементы внешнего ориентирования всех снимков ряда в единой системе координат (способ связок). Иными словами, связующие точки дают возможность восстановить взаимное положение всех снимков фототриангуляционного ряда.

Опорные точки ориентируют построенный фототриангуляционный ряд или блок в геодезическом пространстве.

Для правильного расположения и обеспечения необходимого числа точек каждого вида составляют проект фототриангуляции.

Составление проекта начинают с подбора снимков фототриангуляционного ряда или блока. На них отождествляют и перекалывают с материалов полевой привязки опорные точки. Затем выбирают и накалывают определяемые точки. Каждой из них присваивают свой номер. Связующие точки выбирают в зоне тройных продольных перекрытий. При развитии блочной фототриангуляции также выбирают и накалывают связующие точки в зонах поперечных перекрытий. Их желательно располагать по разные стороны от середины зоны перекрытия (рис. 13.2, *а*). В каждом тройном продольном перекрытии должно быть не менее трех связующих точек. Оптимальным считают выбор 6...9 связующих точек (рис. 13.2, *б*).

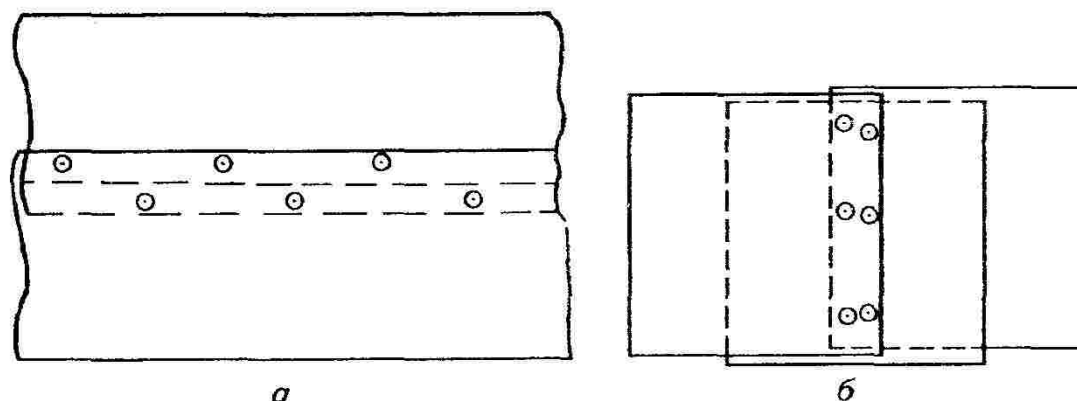


Рис. 13.2. Схема расположения связующих точек:

а — в поперечных перекрытиях снимков; *б* — в тройных продольных перекрытиях снимков

Измеряют координаты точек, вошедших в проект, как правило, в цифровых фотограмметрических рабочих станциях.

Результаты измерений обрабатывают по программам аналитической пространственной фототриангуляции. Итогом является каталог геодезических координат определяемых точек.

13.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ

Выбор параметров АФС определяется прежде всего видом конечной планово-картографической продукции (контурный или топографический план) соответствующего масштаба, а также применяемой технологией ее создания.

Поскольку в цифровых технологиях фотограмметрической обработки снимков основным результатом является вычисление геодезических координат точек местности, то выбор параметров АФС должен основываться на обеспечении требуемой точности их получения. Необходимая точность обусловлена типом задач, которые будут решать с помощью создаваемых планово-картографических материалов. Меньшая точность не позволит качественно решать поставленную задачу, избыточная ведет к увеличению материальных, трудовых и временных затрат.

В зависимости от выбранной технологии планово-картографическую продукцию можно изготовить на основе фотограмметрической обработки одиночного снимка либо стереопары.

Рассмотрим подробнее подход к выбору параметров АФС для каждого из этих двух способов.

Расчет параметров аэрофотосъемки при фотограмметрической обработке одиночного снимка. Конечной продукцией могут быть цифровая модель ситуации (ЦМС) и ее производные (контурный план, фотоплан и т. п.). ЦМС не содержит информации о рельефе, поэтому при ее создании предъявляются требования к точности плановых координат точек местности.

Использование современных типов аэрофотопленок с высокой разрешающей способностью и высококачественных объективов АФА позволяет применять большие коэффициенты увеличения $K = m/M$ (m — знаменатель масштаба съемки; M — знаменатель масштаба создаваемого плана).

Большие коэффициенты увеличения дают возможность выполнять аэрофотосъемку в масштабе мельче, чем создаваемые планы и карты. Экономически это выгодно: меньшее число полученных снимков, покрывающих территорию, соответственно сокращаются затраты на производство летно-съемочных работ, расходы на фотоматериалы, химикаты, привязку снимков и фотограмметрическую обработку снимков. Коэффициент увеличения может составлять 8...10 крат и более.

Таким образом, исходя из знаменателя масштаба создаваемого плана и задаваясь возможным коэффициентом увеличения, рассчитывают знаменатель масштаба аэрофотосъемки по формуле $m = KM$.

Далее выбирают фокусное расстояние АФА и вычисляют высоту фотографирования, используя известное соотношение $1/m = f/H$. Как видно из формулы, существует множество пар значений f и H , удовлетворяющих рассчитанному значению m . Выбирают такую пару значений, которая обеспечит получение требуемой точности определения плановых координат $\sigma_{пл}$.

Для этого сначала рассчитывают значение фокусного расстояния АФА по формуле

$$f_{расч} = hr / (2\sigma_{пл}M), \quad (13.2)$$

где h — перепад высот точек местности в пределах рабочей площади снимка; r — расстояние от главной точки снимка до угла рабочей площади (при продольном перекрытии $p_x = 60\%$, поперечном перекрытии $p_y = 40\%$ и формате снимка 180×180 мм $r = 70$ мм); $\sigma_{пл}$ — требуемая точность получения плановых координат в масштабе создаваемого плана; M — знаменатель масштаба создаваемого плана.

Значение фокусного расстояния АФА выбирают ближайшим большим к $f_{расч}$.

Высоту фотографирования рассчитывают по формуле

$$H = fm,$$

при этом абсолютная высота фотографирования H_0 не должна превышать потолка полета аэросъемочного самолета:

$$H_0 = H + Z_{ср},$$

где $Z_{ср}$ — среднее превышение снимаемого участка над уровнем моря.

Абсолютную высоту фотографирования используют как один из факторов, определяющих выбор типа самолета, — предельная высота полета самолета (потолок) должна быть не менее абсолютной высоты фотографирования H_0 .

Пример: рассмотрим расчет параметров аэрофотосъемки для создания кадастрового плана масштаба 1:2000 на территорию поселений с перепадом высот 15 м; допустимая точность получения плановых координат соответствует 0,3 мм в масштабе создаваемого плана; продольные и поперечные перекрытия соответственно равны $p_x = 60\%$ и $p_y = 40\%$; размер снимка 180×180 мм.

Примем возможный коэффициент увеличения $K = 5$. Таким образом, получаем знаменатель масштаба съемки $m = 5 \cdot 2000 = 10\,000$.

Исходя из заданных условий, вычислим фокусное расстояние $f_{расч}$, при этом будем считать, что перепад высот приходится на

территорию, покрываемую одним снимком (критичный случай). Аргументы, входящие в формулу (13.2), составят: $h = 15$ м, $r = 70$ мм, $\sigma_{\text{пл}} = 0,3$ мм, $M = 2000$. Таким образом, $f_{\text{расч}} = 15 \text{ м} \times 70 \text{ мм} / (2 \cdot 0,3 \text{ мм} \cdot 2000) = 0,875 \text{ м} = 875 \text{ мм}$. Ближайшее большее стандартное значение фокусного расстояния АФА $f = 1000$ мм.

Зная знаменатель масштаба аэрофотосъемки и фокусное расстояние АФА, рассчитаем высоту фотографирования $H = 1 \cdot 10\,000 = 10\,000$ м. Для съемки с такой высоты по техническим характеристикам может быть использован самолет Ту-134СХ, потолок которого составляет 11 800 м.

В случае, когда рассчитанная высота фотографирования превышает потолок используемого аэрофотосъемочного самолета, необходимо либо уменьшить принятый коэффициент увеличения, либо выбрать АФА с меньшим фокусным расстоянием, а в последующей фотограмметрической обработке использовать цифровую модель рельефа.

Анализ формулы (13.2) показывает, что уменьшить $f_{\text{расч}}$ при тех же исходных данных можно, уменьшив расстояние r от главной точки снимка до угла рабочей площади (уменьшив рабочую площадь), т. е. увеличив продольные и поперечные перекрытия снимков.

Если технические возможности позволяют импортировать в программу фотограмметрической обработки одиночного снимка цифровую модель рельефа, то точность используемой ЦМР должна обеспечить требуемую точность получения плановых геодезических координат точек местности. В этом случае минимально возможное

$$f_{\text{расч}} = \Delta h / (2\sigma_{\text{пл}} M),$$

где Δh — точность построения ЦМР.

Расчет параметров аэрофотосъемки при стереофотограмметрической обработке снимков. При стереофотограмметрической обработке получают планово-высотные координаты точек местности. Решение разных задач с использованием получаемого планово-картографического материала требует различной его точности.

Так, при составлении проекта противоэрозионной организации территории используют планы в масштабе 1:10 000 с сечением рельефа 5 м (в хозяйствах со сложным рельефом с сечением 1 м или 2,5 м), проект размещения оросительной сети составляют в том же масштабе 1:10 000 с сечением рельефа 0,5...1,0 м. В том и другом случае требуемая точность получения плановых координат будет одинаковой, точность получения высот — различной. Следовательно, разными должны быть и параметры съемки, обеспечивающие эту точность.

При выборе параметров АФС прежде всего вычисляют макси-

мально допустимую высоту фотографирования:

$$H_{\max} = p\sigma_h/(\sigma_{\Delta p}), \quad (13.3)$$

где p — среднее значение продольных параллаксов точек стереопары, приближенно равное базису фотографирования в масштабе снимка. При продольном перекрытии $p_x = 60\%$ и формате снимков 180×180 мм $p = 70$ мм; σ_h — допустимая ошибка определения высотных координат точек местности, зависящая от высоты сечения рельефа h , $\sigma_h = 1/3h \dots 1/5h$; $\sigma_{\Delta p}$ — ошибка определения разности продольных параллаксов точек стереопары. В цифровых технологиях ее значение принимают $0,010 \dots 0,015$ мм.

Таким образом, для аэрофотосъемки с продольным перекрытием 60% и при формате снимков 180×180 мм максимальная высота фотографирования $H_{\max} = 7000\sigma_h \dots 5000\sigma_h$.

Далее рассчитывают знаменатель масштаба съемки по формуле

$$m \leq M\sigma_{\text{пл}}/\sigma_{\text{сн}}, \quad (13.4)$$

где $\sigma_{\text{пл}}$ — допустимая погрешность точки на плане; $\sigma_{\text{сн}}$ — погрешность отождествления и измерения координат точки на снимке.

Выбрав $H_{\max}$ и m , можно вычислить фокусное расстояние АФА по формуле

$$f_{\text{расч}} = H/m.$$

Стандартное фокусное расстояние АФА выбирают ближайшим меньшим к расчетному. Затем вычисляют окончательное значение масштаба фотографирования.

П р и м е р: рассчитать параметры АФС для создания топографического плана масштаба $1:2000$ с сечением рельефа 1 м; погрешность определения высотных координат точек при этом примем $1/5$ от высоты сечения рельефа, т. е. $\sigma_h = 0,2$ м. Аэрофотосъемку выполнить с перекрытиями $p_x = 60\%$ и $p_y = 30\%$, размер снимка 180×180 мм.

При таких исходных данных высоту аэрофотографирования определим, исходя из следующих величин, входящих в формулу (13.3): $p = 70$ мм, $\sigma_h = 0,2$ м, $\sigma_{\Delta p} = 0,010$ мм.

$$H_{\max} = (70 \text{ мм} \cdot 0,2 \text{ м})/0,010 \text{ мм} = 1400 \text{ м}.$$

Полагая, что $\sigma_{\text{пл}} = 0,3$ мм и $\sigma_{\text{сн}} = 0,03$ мм, рассчитывают знаменатель масштаба съемки по формуле (13.4): $m = 0,3 \text{ мм} \times 2000/0,03 \text{ мм} = 20\,000$.

Используя рассчитанные значения высоты и знаменателя фотографирования, рассчитываем фокусное расстояние АФА $f_{\text{расч}} = 1400/20\,000 = 0,070 \text{ м} = 70 \text{ мм}$. Окончательный знаменатель масштаба АФС $m = 20\,000$.

Выбирая параметры АФС, следует учитывать коэффициент увеличения, а также возможности дешифрирования полученных снимков, что подробнее будет рассмотрено далее.

1. Какие требования предъявляют к опорной точке при ее выборе? 2. Для каких целей выполняют фототриангуляцию? 3. Каковы принципиальные отличия способов производства фототриангуляции? 4. Каково назначение связующих и опорных точек при фототриангуляции? 5. Как следует выбирать параметры аэрофотосъемки, чтобы увеличить расстояние λ между опознаками с целью сокращения полевых работ по привязке аэроснимков? 6. Почему применение АФА с меньшим фокусным расстоянием, чем рассчитанное по формуле (13.2), требует построения ЦМР при последующей фотограмметрической обработке одиночных снимков?

Глава 14

НАЗЕМНАЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

14.1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НАЗЕМНЫХ СНИМКОВ

Наземная фотограмметрическая съемка основана на фотографировании местности с точек земной поверхности. Определенный участок местности фотографируется с двух точек (станций фотографирования). Полученную при этом стереопару в дальнейшем обрабатывают стереофотограмметрическим методом, в результате чего получают цифровую модель местности и цифровую карту. Фотографируют специальными съемочными системами, называемыми фототеодолитами. Поэтому такой вид съемки называют *фототеодолитной съемкой*.

Фототеодолит представляет собой фотокамеру, соединенную с угломерным прибором (теодолитом) и снабженную уровнями. Угломерный прибор и уровни позволяют устанавливать теодолит в определенное положение с высокой точностью. При производстве съемки фототеодолит крепят на штативе над точкой съемочного обоснования.

Стереофотограмметрическая обработка наземных снимков подобна стереообработке аэрофотоснимков. Однако имеются некоторые различия.

Координаты точек на наземных снимках измеряют в прямоугольной системе координат $x'o'z$ (рис. 14.1), где начало системы

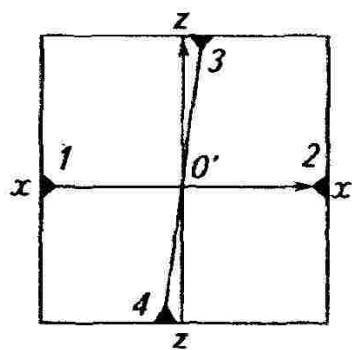


Рис. 14.1. Плоская система координат наземного снимка

координат o' находится в точке пересечения линий, соединяющих координатные метки. Ось xx проходит через координатные метки 1—2. Ось zz перпендикулярна оси xx и проходит через точку o' .

При изготовлении фототеодолита стремятся к совмещению главной точки снимка o с точкой o' . В результате координаты главной точки (x_0, z_0) близки к нулю.

Элементами внутреннего ориентирования наземных снимков являются фокусное расстояние объектива съемочной камеры f и координаты главной точки снимка (x_0, z_0) .

Положение снимков стереопары в геодезической системе координат определяется двенадцатью элементами внешнего ориентирования снимков: геодезические координаты левого и правого центров фотографирования $X_{S_1}^r, Y_{S_1}^r, Z_{S_1}^r, X_{S_2}^r, Y_{S_2}^r, Z_{S_2}^r$, дирекционные углы α_1 и α_2 и углы наклона оптических осей фотокамер ω_1 и ω_2 , а также углы поворота снимков α_1 и α_2 .

При проведении фототеодолитной съемки определяют координаты фотостанций геодезическими методами: с помощью GPS-приемников, прямыми, обратными и комбинированными засечками, теодолитными ходами или построением съёмочной триангуляционной сети.

Таким образом, плановые геодезические координаты центра фотографирования X_S, Y_S совпадают с плановыми координатами фотостанции. Высотная координата Z_S равна сумме высотной координаты Z фотостанции и превышению центра объектива над точкой станции h_S .

Как правило, этими способами определяют координаты одного из концов базиса, например левого. Координаты второго (правого) конца базиса $X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$ вычисляют с использованием измеренных базиса фотографирования, направления и угла наклона базиса по формулам, известным из геодезии.

Углы наклона ω оптической оси фотокамеры и поворота α снимка приводят к значениям, равным нулю, с помощью уровней, закрепленных на фотокамере. После приведения пузырьков уровней на середину главный луч и ось xx снимка займут горизонтальное положение.

Дирекционный угол α оптической оси фотокамеры вычисляется с высокой точностью по измерениям горизонтальных углов, произведенным угломерным прибором фототеодолита.

В результате все двенадцать элементов внешнего ориентирования пары наземных снимков могут быть известны с необходимой точностью.

Для определения геодезических координат точек местности по паре снимков используют известные фотограмметрические зависимости — уравнения коллинеарности проектирующих лучей. Для наземных снимков они имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X^r &= X_{S_1}^r + (Y^r - Y_{S_1}^r) \frac{a_1(x_1 - x_0) + a_2 f + a_3(z_1 - z_0)}{b_1(x_1 - x_0) + b_2 f + b_3(z_1 - z_0)}, \\ Z^r &= Z_{S_1}^r + (Y^r - Y_{S_1}^r) \frac{c_1(x_1 - x_0) + c_2 f + c_3(z_1 - z_0)}{b_1(x_1 - x_0) + b_2 f + b_3(z_1 - z_0)}, \\ X^r &= X_{S_2}^r + (Y^r - Y_{S_2}^r) \frac{a'_1(x_2 - x_0) + a'_2 f + a'_3(z_2 - z_0)}{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2 f + b'_3(z_2 - z_0)}, \\ Z^r &= Z_{S_2}^r + (Y^r - Y_{S_2}^r) \frac{c'_1(x_2 - x_0) + c'_2 f + c'_3(z_2 - z_0)}{b'_1(x_2 - x_0) + b'_2 f + b'_3(z_2 - z_0)}, \end{aligned} \right\} \quad (14.1)$$

где X^r, Y^r, Z^r — геодезические координаты точки местности; $X_{S_1}^r, Y_{S_1}^r, Z_{S_1}^r, X_{S_2}^r, Y_{S_2}^r, Z_{S_2}^r$ — координаты левого и правого центров фотографирования соответственно; $a_i, b_i, c_i, a'_i, b'_i, c'_i$ — направляющие косинусы ориентирования левого и правого снимков, зависящие от углов α, ω, φ и $\alpha', \omega', \varphi'$; x_1, z_1 и x_2, z_2 — измеренные координаты точки на левом и правом снимках стереопары соответственно.

Координаты каждой точки местности, изобразившейся на паре снимков, можно вычислить прямой фотограмметрической засечкой с использованием уравнений (14.1).

В большинстве случаев фототеодолитную съемку выполняют при горизонтальном положении главного луча фотокамеры, т. е. $\omega_1 = \omega_2 = 0$. При этом оптические оси обеих камер могут быть по-разному ориентированы относительно базиса фотографирования. В зависимости от этого различают три вида съемки: нормальный, равноотклоненный, конвергентный.

В нормальном виде съемки оптические оси обеих камер перпендикулярны базису (рис. 14.2, а), в равноотклоненном виде оптические оси параллельны между собой, но не перпендикулярны базису (рис. 14.2, б), в конвергентном виде (рис. 14.2, в) оптические оси пересекаются под некоторым углом γ (углом конвергенции).

В зависимости от используемого вида съемки формулы (14.1) связи геодезических координат точек местности с измеренными координатами на снимке видоизменяются (упрощаются). Так, для нормального вида фототеодолитной съемки, наиболее часто используемого на практике, они принимают вид:

$$X^r = X_{S_1}^r - B \frac{x_1}{x_1 - x_2} \sin \alpha_1 + B \frac{f}{x_1 - x_2} \cos \alpha_1;$$

$$Y^r = Y_{S_1}^r + B \frac{x_1}{x_1 - x_2} \cos \alpha_1 + B \frac{f}{x_1 - x_2} \sin \alpha_1;$$

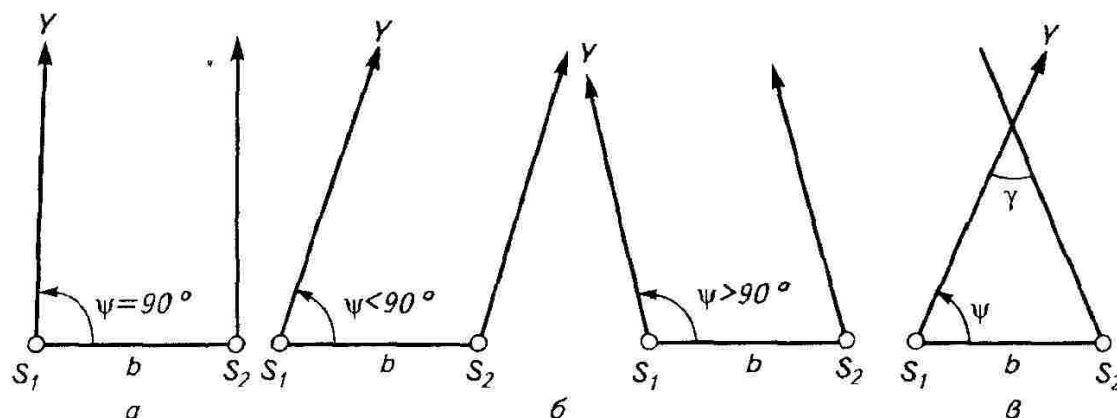


Рис. 14.2. Виды наземной стереосъемки:

а — нормальный; б — параллельный; в — конвергентный

$$Z^r = Z_{S_1}^r + B \frac{z_1}{x_1 - x_2},$$

где B — проекция базиса фотографирования на горизонтальную плоскость (горизонтальное положение базиса фотографирования).

14.2. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПРИ НАЗЕМНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

Подготовительные работы при наземной стереофотограмметрической съемке предусматривают составление проекта съемки и подготовку съемочных инструментов и оборудования.

Проект съемки включает пояснительную записку и графическую часть.

Пояснительная записка содержит:

описание района работ, представляющее собой характеристику всех физико-географических факторов, влияющих на проведение полевых работ (рельефа, гидрографической сети, путей сообщения и т. п.);

сведения о геодезической опорной сети;

расчеты по сгущению опорной сети;

расчеты, связанные с наземной стереофотограмметрической съемкой.

В графическую часть проекта входят следующие схемы:

расположения и сгущения пунктов опорной геодезической сети;

определений фотостанций и контрольных точек;

наземной стереофотограмметрической съемки, на которой указывают границы съемки с каждой станции и так называемые «мертвые» зоны.

Все схемы составляют на имеющихся планах и картах, масштаб которых в 4...5 раз мельче масштаба съемки.

При составлении схемы размещения фотостанций стремятся к тому, чтобы снять всю необходимую территорию с наименьшего числа точек. Для этого выполняют некоторые предрасчеты. Прежде всего определяют предельное расстояние от базиса фотографирования до дальней границы снимаемого участка $Y_{пр}$.

Для нормального вида съемки его вычисляют по формуле

$$Y_{пр} = f\sigma_d / (8\sigma_p),$$

где σ_d — заданная средняя квадратическая погрешность (скп) планового положения точек относительно ближайших пунктов съемочного обоснования. Для равнинной местности $\sigma_d = 0,3$ мм в масштабе создаваемого плана, для горной местности $\sigma_d = 0,5$ мм в масштабе плана; σ_p — скп измерения параллаксов точек снимков.

Минимально допустимая длина базиса фотографирования для

нормального вида съемки

$$B_{\min} = Y_{\text{пр}}/8.$$

Расстояния до ближайшей границы съемки вычисляют по формуле

$$Y_{\min} = 4B.$$

Выполненные расчеты используют при выборе местоположения станций фотографирования на плане. При этом руководствуются следующими положениями:

точки фотографирования выбирают на возвышенных участках местности;

угол наклона базиса фотографирования не должен превышать 10° ;

между концами базиса должна быть прямая видимость.

Проектируемые станции фотографирования и зоны съемки с каждого базиса наносят на схему наземной съемки. Далее составляют схему геодезической привязки фотостанций. Причем для каждого базиса достаточно определить координаты только одного из его концов. Координаты второго конца базиса определяют из решения прямой геодезической задачи, используя измерения длины базиса, его угла наклона и направления.

14.3. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ ПРИ НАЗЕМНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКЕ

Полевые работы предусматривают выполнение следующих процессов: рекогносцировки; фотографирования; геодезических работ; дешифрирования снимков.

Рекогносцировку участка работ проводят с целью уточнения предварительного проекта наземной съемки и выноса его в натуру. При этом на местности уточняют расположение фотостанций, точек съемочного обоснования и контрольных точек и проводят их закрепление и маркирование.

Работа на фотостанции предусматривает: фотографирование участка местности; измерение длины базиса фотографирования, его угла наклона и направления, а также другие необходимые геодезические измерения. Перед фотографированием на обоих концах базиса центрируют штативы, на одном из которых устанавливают фототеодолит, а на другом — визирную марку, и измеряют высоту инструмента. Для фотографирования выбирают такое время суток, когда солнце находится сзади или сбоку от объектива.

Геодезические работы на фотостанции имеют целью определение геодезических координат второго конца данного базиса фото-

графирования, а также координат контрольных точек. Эти работы проводят в соответствии с ранее разработанной и уточненной схемой определений фотостанций и контрольных точек. Средняя квадратическая погрешность планового положения фотостанций и контрольных точек не должна превышать 0,1 мм в масштабе создаваемого плана, скп высотных координат этих точек — 0,1 высоты сечения рельефа.

Дешифрирование выполняют на контактных или увеличенных фотоснимках. В процессе дешифрирования опознают и фиксируют все элементы ситуации, подлежащие нанесению на создаваемый план, а также замаркированные пункты геодезического съемочного обоснования, фотостанции и контрольные точки. Причем все вышеперечисленные точки дешифрируют на фотосхемах, составленных из снимков, полученных с левых концов базисов, а элементы ситуации — на фотосхемах, составленных из правых снимков стереопар. Досъемка неизобразившихся объектов местности аналогична такому же процессу, выполненному при дешифрировании аэроснимков и описанному в разделе 15.9.

После окончания полевых работ проводят их контроль и приемку.

14.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ ПРИ РЕШЕНИИ НЕТОПОГРАФИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Основное назначение наземной стереофотограмметрической съемки — создание цифровых моделей местности в горных и высокогорных районах. Однако наземную фотограмметрию применяют и для решения нетопографических задач.

Материалы наземной стереофотосъемки используют при составлении проекта рекультивации нарушенных земель. Технологическая схема рекультивации выработанных грунтовых карьеров предусматривает работы по выравниванию поверхности. Для выравнивания откосов с целью обеспечения допустимой крутизны склонов рассчитывают объем снятого грунта, равный объему насыпного грунта.

Объем земляных работ определяют по фототеодолитным снимкам стереофотограмметрическим способом. Для этого проводят периодическую фототеодолитную съемку ведущихся выработок грунта с закрепленных на местности базисов фотографирования.

Известны различные способы аналитического определения объемов земляных работ: способ горизонтальной сетки, вертикальной сетки, способ уступов, способы вертикальных и горизонтальных сечений и т. п. Наиболее удобен способ использования ЦМР, который заключается в следующем.

Пусть с некоторого базиса было проведено n последовательных фототеодолитных съемок с начала выработки карьера и до ее окончания. По каждой из n полученных стереопар создают циф-

ровую модель рельефа. Таким образом, получают n моделей рельефа на интересующую территорию за некоторый временной интервал. Высотные пикеты для построения ЦМР выбирают на характерных точках рельефа. Модель рельефа представляет собой многогранник, вершинами которого являются высотные пикеты, а гранями — треугольники. Объем каждой ЦМР определяют численным интегрированием. Разность объемов двух последовательных во времени ЦМР — объем земляных работ за соответствующий промежуток времени.

Наземную фотограмметрическую съемку применяют при освоении склонов с крутизной более 5° в районах интенсивного земледелия. На таких склонах в зависимости от их крутизны проектируют широкополосное, напашное или бульдозерное террасирование. Террасы используют для выращивания высокодоходных культур (виноград, плодовые, цитрусовые). Топографический план и профили для составления проекта террасирования склонов изготавливают наземным стереофотограмметрическим методом.

Методы наземной стереофотограмметрической съемки используют для контроля за ходом строительства террас, составления исполнительного плана и осуществления авторского надзора. Обработывая материалы периодических наземных фотосъемок с постоянных базисов, в случае необходимости определяют степень и скорость размыва террас.

По материалам наземной стереофотограмметрической съемки ведут регулярное наблюдение за динамикой эрозионных процессов: скоростью роста оврагов, смещением оползней и т. п.

Для этого периодически производят наземные фотосъемки с постоянных, закрепленных на местности базисов.

По результатам одной съемки устанавливают ширину оврагов L , их глубину h и объем V .

Сопоставление этих значений, полученных по результатам разновременных съемок, дает возможность судить о динамике роста оврагов.

Ширину оврага L вычисляют как расстояние между его бровками в определенном поперечном сечении:

$$L = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2},$$

где ΔX и ΔY — разности между соответствующими геодезическими координатами левой и правой бровок оврага. Геодезические координаты точек бровок вычисляют, решая системы уравнений вида (14.1).

Глубина оврага h — разность геодезических высот точек бровки и дна оврага $h = Z_6^r - Z_d^r$, также определяемых из решения системы уравнений (14.1).

Для вычисления объема оврага строят несколько его сечений с различными интервалами D_i между ними, определяют площадь

каждого поперечного сечения P_i как площадь полигона с вершинами в основных точках перегибов его контура, а затем объем оврага по формуле (14.2):

$$V = \sum_{i=1}^m \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \cdot D_i. \quad (14.2)$$

Построение поперечных сечений и вычисление их площадей удобно производить на трехмерном визуализированном изображении — 3D-изображении.

Контрольные вопросы и задания

1. Что общего и в чем различие в стереофотограмметрической обработке наземных и аэрофотоснимков? 2. Как используется угломерный прибор в фототеодолите? 3. Как объяснить требования к выбору местоположения станций фотографирования? 4. Нужны ли опорные точки при стереофотограмметрической обработке наземных снимков с известными элементами внешнего ориентирования?

Часть IV

ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

●

Определение сути процесса дешифрирования дано во введении. Это определение соответствует случаю использования снимков для создания топографических и специальных планов и карт инженерного назначения, например земельно-кадастровых. Съемку при этом выполняют топографическими съемочными системами в видимой области спектра электромагнитного излучения. Дешифрирование в этом случае выполняют только визуально.

Переход к цифровой фотограмметрической обработке снимков расширил технические возможности визуального дешифрирования, особенно при досъемке не изобразившихся элементов ситуации и нанесении их и границ землепользований и землевладений на составляемые планы и карты.

Глава 15

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

15.1. ДЕШИФРИРОВАНИЕ — ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ СО СНИМКОВ

Любую необходимую для решения некоторой задачи информацию о местности, расположенных на ней объектах можно получить путем непосредственных наблюдений (контактный способ). У этого способа сбора информации есть определенные преимущества — возможность тщательного натурного изучения объектов и взятия при необходимости проб для лабораторного анализа. Это обеспечивает самый высокий уровень достоверности получаемых сведений. Но наряду с этим способу свойственны и существенные недостатки. Например, ограниченность зоны одновременного обзора, анализа и выявления взаимосвязей между элементами природного и антропогенного ландшафтов, ограниченность спектральной чувствительности зрительного аппарата человека, невысокая производительность и оперативность выполнения обследований, сложность работы в труднодоступных районах, довольно

сложная в ряде задач процедура документирования результатов обследований и др.

Аэро- и космические средства и методы получения семантической информации о местности, объектах и процессах в значительной мере восполняют недостатки контактного способа сбора информации, а в некоторых случаях полностью заменяют его. Некоторые задачи, особенно поисковые (разведывательные), решают только с помощью аэро- и космических съемок.

Дешифрирование входит составной частью в технологический процесс топографического и ландшафтного картографирования, а также является важнейшим технологическим компонентом дистанционного зондирования.

Поскольку между съемкой и дешифрированием иногда возникает существенный временной разрыв, в течение которого могут произойти некоторые изменения ситуации, в обязанности дешифровщика войдет полевая инструментальная корректировка — досъемка вновь появившихся элементов или исключение из дешифрирования элементов утраченных. Очевидно, что досъемке подлежат также объекты, не отразившиеся по тем или иным причинам на снимках, например объекты с недостаточным яркостным контрастом относительно фона или объекты, оказавшиеся за пределами линейной разрешающей способности съемочной системы.

15.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Дешифрирование классифицируют по содержанию и технологии выполнения. В зависимости от содержания дешифрирование делят на следующие виды: *топографическое* (при мелкомасштабном картографировании — ландшафтное) и *специальное* (тематическое, отраслевое). При топографическом дешифрировании выявляют, анализируют и показывают условными знаками элементы ландшафта, подлежащие нанесению на топографические карты (при ландшафтном — на географические карты).

Набор объектов при специальном дешифрировании носит избирательный характер. Так, при земельно-кадастровом дешифрировании основными объектами анализа являются сельскохозяйственные угодья и границы землепользований и землевладений; при геоботаническом — естественные кормовые угодья или посевы культурных растений; при экологическом — зоны природных или антропогенных нарушений нормального состояния окружающей человека среды и т. д. Одновременно с целевыми объектами специального дешифрирования на дешифрируемых материалах показывают в большинстве случаев и топографические элементы в упрощенном виде. Они облегчают привязку специальной информации при нанесении ее на имеющиеся карты, или их используют для составления специальных карт, если подходящая топографическая основа отсутствует.

По технологии выполнения можно выделить следующие основные методы дешифрирования (рис. 15.1):

визуальный, в котором информацию считывает со снимков и анализирует человек; в зависимости от места выполнения выделяют камеральный, полевой и комбинированный способы, которые можно поделить на варианты;

машинно-визуальный, в котором с помощью компьютера или специализированных устройств выполняют предварительную обработку первичных снимков с целью облегчения их визуального дешифрирования. Способы данного метода могут быть: синтезирование изображений, квантование уровней видеосигналов, фильтрация изображений и др.;

автоматизированный, в котором интерпретационная обработка снимков выполняется машиной в диалоговом режиме — оператор выбирает способ обработки, выполняет «обучение» системы, контролирует качество работы классификатора, вносит коррективы в программы и др.; в данном методе можно выделить два наиболее употребляемых способа — классификации, в котором анализируемые элементы изображения сразу же относятся к определенному эталонированному классу объектов, и кластеризации, в котором элементы изображения предварительно разбиваются на группы (кластеры) по сходству некоторых признаков с последующей идентификацией этих групп;

автоматический, в котором интерпретационная система решает отложенные задачи без вмешательства оператора.

Принципиальная схема дешифровочного процесса в любом методе остается неизменной — *распознавание* выполняют путем сопоставления и определения степени близости некоторого набора



Рис. 15.1. Технологическая классификация дешифрирования

признаков дешифрируемого объекта с соответствующими эталонными признаками, находящимися в памяти человека или машины.

Отметим, что способы не всегда четко разделяются между собой и по мере их совершенствования и изменения функции человека в их реализации они могут переходить из одного в другой.

15.3. ВИЗУАЛЬНЫЙ МЕТОД ДЕШИФРИРОВАНИЯ. ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА И СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ

Визуальное дешифрирование представляет собой сложный многоэтапный процесс логического анализа изображений. Распознавание объектов и определение их характеристик часто сливаются в единый процесс с многократным чередованием анализа ситуаций в целом, а также их отдельных элементов и фрагментов. Человек превосходит машину в решении логических задач. Он может на основе ограниченной информации, используя логический аппарат, преобразовывать дешифровочные признаки применительно к конкретным временным и пространственным условиям, учитывать изменение признаков в зависимости от положения анализируемого участка в кадре и изменения условий освещения дешифрируемых объектов, использовать существующие природные и функциональные взаимосвязи между элементами ландшафта, исключать некоторые шумы и др. (феномен восприятия). Поэтому визуальное дешифрирование во многих случаях превосходит машинное (автоматизированное) по достоверности результатов.

Одна из важнейших психологических особенностей визуального дешифрирования — использование относительных оценок характеристик объектов на изображении. Например, общественные здания и сооружения отделяются от индивидуальных зданий в сельском поселении не по абсолютным размерам их изображения, а по относительным. Для этого не требуется даже знания масштаба изображения. Участки пашни с повышенным увлажнением поверхности или кормовых угодий с более мощным травостоем выделяются не по абсолютному значению оптической плотности, а по ее локальному изменению. То же можно сказать и о выявлении участков со смытыми или подверженными дефляции почвами (рис. 15.2, 15.3).

В дешифрировании отдельных объектов обычно выделяют три ступени: обнаружения, опознавания и определения характеристик.

Рассмотрим отдельно возможности человека в выделении элементов изображения на некотором фоне, определении их формы, а также в разделении элементов по уровню оптической плотности.

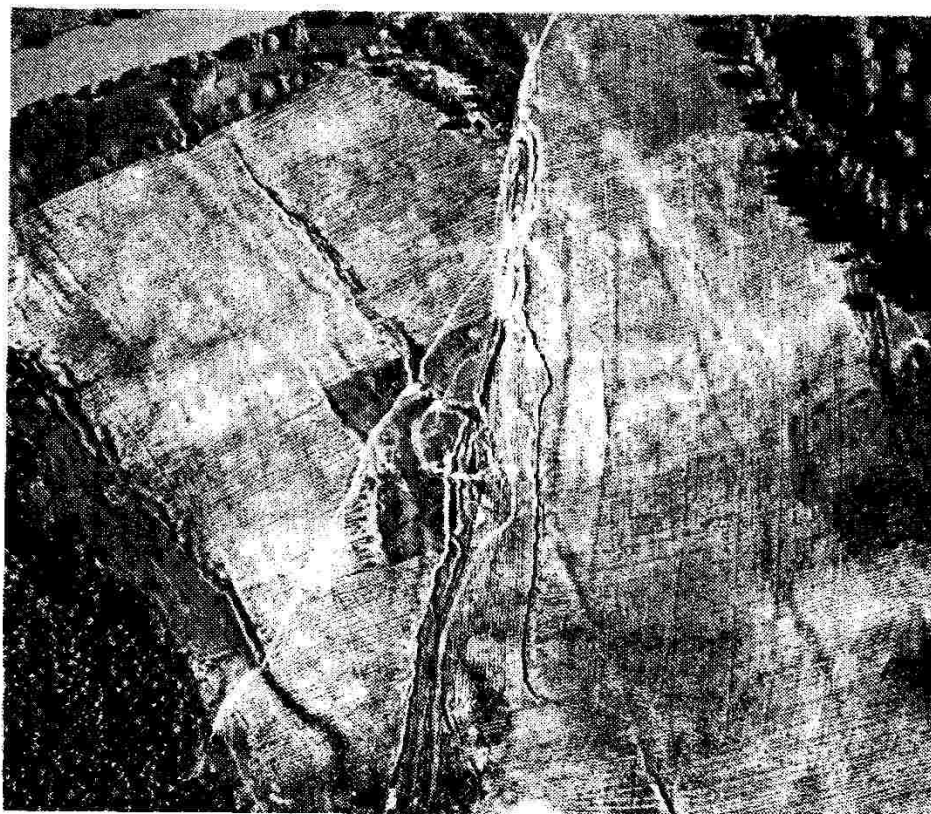


Рис. 15.2. Изображение участка бывшей пашни, подверженного интенсивной линейной и плоскостной эрозии



Рис. 15.3. Частично погибающие виноградники на участках, непригодных для этой культуры

Обнаружительная способность зрительного аппарата человека (выделение элемента изображения без определения его сути) зависит от остроты зрения, контраста и резкости изображения наблюдаемых элементов, освещенности изображения, продолжительности наблюдения. Минимальный поперечник компактного и ширина протяженного объектов с полосой размытости на краях / при разности оптических плотностей объекта и фона δ могут быть определены соответственно по формулам:

$$d_k \geq 1,4/\delta^{-1/2}; d_n \geq 0,6/\delta^{-1/2}. \quad (15.1)$$

Форма компактного объекта может быть опознана, если его поперечник не менее чем в 2,5 раза превышает порог обнаружения.

Возможности визуального разделения элементов изображения по уровню оптической плотности зависят от порога световой чувствительности зрительного аппарата. Порог может быть абсолютным, разностным или дифференциальным.

Абсолютным порогом называют минимальную обнаруживаемую наблюдателем яркость объекта $B_{\text{пор}}$ на черном фоне в условии темновой адаптации глаз. При рассматривании снимка яркость фона может быть любой. Поэтому удобнее пользоваться *разностным порогом*:

$$\Delta B = B_o - B_{\text{ф}}, \quad (15.2)$$

где B_o — яркость объекта; $B_{\text{ф}}$ — яркость фона.

Дифференциальный порог (пороговый контраст)

$$K = \Delta B / B_{\text{ф}}. \quad (15.3)$$

Значение K в некотором диапазоне яркостей постоянно. При крайних значениях яркости постоянство не сохраняется. Для нормальных условий наблюдения изображений и четких границ участков с различными оптическими плотностями $K \approx 2\%$. Это значит, что в оптическом ступенчатом клине человек может различить до 50 ахроматических ступеней. С уменьшением четкости границ, а также с увеличением расстояния между сопоставляемыми по оптической плотности площадками значение K возрастет до 5 % и более. Следовательно, на реальном изображении выделить объект на фоне или разделить объекты по оптической плотности можно, если разность оптических плотностей не меньше 0,1, что соответствует возможности выделения на изображении 10...20 градаций.

Возможность визуальной дифференциации элементов цветного изображения по цветовому тону, насыщенности и светлоте значительно большая — число различаемых человеком хроматических полей доходит до нескольких тысяч.

Как отмечалось ранее, в визуальном методе дешифрирования можно выделить три основных способа: полевой, камеральный и комбинированный.

Полевой способ дешифрирования выполняют, сличая снимок с местностью. Специалист при этом может находиться на земле (наземный вариант) или на борту летательного аппарата (аэровизуальный вариант). Полевое дешифрирование характеризуется наивысшей полнотой и достоверностью результатов. Однако ввиду сезонности и трудоемкости выполнения, а также повышенной себестоимости применяют его только в случаях, когда камеральное дешифрирование не обеспечивает нужного качества результатов.

Камеральный способ дешифрирования заключается в логическом анализе изображения с использованием всего комплекса дешифровочных признаков (визуально-логический вариант). В процессе дешифрирования используют вспомогательные материалы (карты, данные о юридических границах землепользований и др.).

Достоверность камерального дешифрирования повышается при использовании снимков-эталонов типичных участков, дешифрованных в поле (эталонный вариант).

Комбинированный способ дешифрирования сочетает в себе процессы и технологические приемы предыдущих способов. В зависимости от последовательности их чередования могут быть выделены варианты. В одном из них предварительно выполняют камеральное дешифрирование, а затем полевую доработку сложных участков с попутным контролем результатов камерального дешифрирования. В другом — сначала выполняют избирательное полевое дешифрирование (обычно вдоль транспортных путей), а затем камеральное с использованием дешифрованных в поле снимков в качестве эталонов.

Комбинированное дешифрирование сочетает в себе достоинства первых двух способов.

15.4. МАТЕРИАЛЫ СЪЕМКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Производительность дешифрирования и качество получаемых результатов в значительной степени зависят от вида дешифрируемых материалов, их информационных свойств (см. разд. 11.1), удобства использования при стереонаблюдении и досъемке не изобразившихся объектов, точности регистрации результатов и др.

Для дешифрирования используют фотоснимки и другие изображения в исходном масштабе, увеличенные изображения, фото-схемы, стереофото-схемы, фотопланы, ортофотопланы и различные сочетания перечисленных материалов.

Контактные фотоснимки являются основным, наиболее дешевым и быстро изготавливаемым материалом. По ним и визуализи-

рованным изображениям, полученным с помощью нефототрафических съемочных систем, решают многие задачи сельскохозяйственного назначения (картографические, поисковые, оперативного управления и др.). Кадастровые фото- и телевизионные снимки удобны для стереоскопического наблюдения и выполнения простейших стереофотограмметрических определений высот объектов, уклонов эрозионно опасных участков местности и др. Материалы многозональных съемок используют для получения синтезированных изображений¹.

Зональные снимки используют и индивидуально с отбором наиболее информативных из них.

Основные трудности использования первичных изображений: недостаточная дешифрируемость их при создании планов и карт; сложность регистрации подлежащих дешифрированию малых по размерам объектов; досъемка не изобразившихся объектов.]

Увеличенные изображения, как уже отмечалось в разделе 11.2, обладают большей дешифрируемостью и позволяют повысить точность регистрации результатов дешифрирования. Очевидно, что с увеличением снимков будет сокращаться и площадь одновременно анализируемого пространства при стереоскопическом и нестереоскопическом наблюдении их.

Фотосхемы позволяют расширить обзорность, сократить объем работ по согласованию результатов дешифрирования на смежных снимках. Если необходимо, то их изготавливают из увеличенных снимков. С их помощью оперативно решают многие информационные задачи, например при различных видах мониторинга, поисковых работах. Одномаршрутные фотосхемы незаменимы при аэровизуальном дешифрировании в малообжитых регионах. Недостаток фотосхем — сложность стереоскопического наблюдения.

Стереофотосхемы восполняют недостаток фотосхем. Они позволяют анализировать рельеф на больших территориях. Получаемая информация важна при выполнении почвенных, мелиоративных и других задач, например при различных видах мониторинга, при выявлении закономерностей почвообразования, развития эрозионных процессов и др.

Фотопланы и ортофотопланы свободны от недостатков рассмотренных материалов. Дешифрирование изображений территорий с большим объемом досъемочных работ рационально выполнять именно на этих материалах. Это может случиться, например, при крупномасштабном картографировании поселений с многоэтажной застройкой, большим количеством зеленых насаждений, развитой сетью подземных коммуникаций. Недостатки рассматриваемых материалов — практическое исключение возможности

¹Изображения, полученные путем оптического или электронного совмещения двух-, трехзональных снимков с цветовой окраской их (см. разд. 18.1).

непосредственного стереоскопического наблюдения их и некоторое снижение разрешающей способности. Но известны технологии создания ортофотопланов с дополнительным изображением для их стереоскопического наблюдения.

15.5. ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Основная задача дешифрирования — опознавание объектов (явлений, процессов) на изображении и определение их характеристик. Суть решения этой задачи существенно отличается от натурных обследований тех же объектов. Основное отличие заключается в ракурсе наблюдения — при натурном обследовании исполнитель рассматривает объекты «сбоку», с высоты своего роста; аэро- или космические съемки местности выполняют «сверху» и, в большинстве случаев, при отвесном направлении оптической оси кадровой съемочной системы. Поэтому дешифровщик, анализируя снимки, должен трансформировать сложившиеся представления о геометрии изучаемых объектов. Это, даже при сравнительно небольшом опыте работы со снимками, не вызывает существенных трудностей при их дешифрировании.

Для опознавания объектов на снимках используют геометрические и оптические характеристики этих объектов — **п р я м ы е д е ш и ф р о в о ч н ы е п р и з н а к и**: форма и размер объектов в плане и по высоте; общий (интегральный) тон черно-белого (ахроматического) или цвет цветного (хроматического) изображения, а также текстура изображения.

Форма в большинстве случаев является достаточным признаком для разделения объектов природного и антропогенного происхождения. Объекты, созданные человеком, как правило, отличаются правильностью конфигурации. Так, любые здания и сооружения имеют обычно правильные геометрические формы. То же можно сказать о каналах, шоссейных и железных дорогах, парках и скверах, пахотных и культурных кормовых угодьях и других объектах (рис. 15.4). Проявление определенной «геометричности» искусственных объектов наблюдается даже при преднамеренном стремлении специалистов придать проектируемым объектам свободные естественные формы.

Определению пространственной формы рельефного объекта способствует его собственная тень, покрывающая не освещенную прямыми солнечными лучами часть поверхности самого объекта, и тень, падающая на земную поверхность от возвышающихся объектов.

На плановых снимках, полученных камерой с узкоугольным объективом, видна форма возвышающихся объектов в плане. С



Рис. 15.4. Снимок различно используемых земель:

1 — пашня; 2 — сенокос по редколесью; 3 — сенокос с кустарником; 4 — сенокос чистый; 5 — усадьбы; 6 — парк с аллеей; 7 — молодой сад; 8 — салозащитная лесополоса

увеличением угла поля зрения объектива и по мере приближения изображения этих объектов к краю кадра начинает отображаться их форма по высоте. Очевидно, что общие очертания изображения возвышающихся объектов будут изменяться.

Форма не возвышающихся над земной поверхностью объектов, например полей пашни, изменяется в зависимости от рельефа местности (величины и направления наклона поля относительно центра проекции) и их удаленности от точки надира. На плановом снимке перспективные искажения формы объектов визуальнo не воспринимаются.

Размеры дешифрируемых объектов в большинстве случаев, как уже отмечалось ранее, оценивают относительно. Об относительной высоте объектов судят непосредственно по их изображению на краях снимков, полученных с помощью широкоугольных съемочных систем. О размерах, а также и о форме по высоте можно судить по падающим от объектов теням (см. рис. 15.4). Разумеется, площадка, на которую падает тень, должна быть горизонтальной.

Тон изображения является функцией яркости объекта в пределах спектральной чувствительности приемника излучений съемочной системы. В фотометрии аналог тона — оптическая плот-

ность, выражающаяся через десятичный логарифм непрозрачности изображения (см. разд. 4.3). Тон оценивают визуально путем отношения его интенсивности к определенной ступени нестандартизированной ахроматической шкалы, например тон светлый, светло-серый, серый и т. д. Число ступеней определяется порогом световой чувствительности зрительного аппарата человека.

Значимость тона изображения в дешифровочном процессе довольно противоречива. С одной стороны, именно непостоянство тона формирует изображение — изменение тона связано с изменением формы некоторого объекта, его свойств, состояния или с появлением иного объекта. При правильно выбранных спектральной чувствительности приемника излучения съемочной системы (при фотосъемке — типа аэропленки и светофильтра) и условиях съемки на снимках хорошо разделяются по тону участки обнаженных почв с различным содержанием гумуса, локальные изменения их увлажненности, эродированности (см. рис. 15.2), засоленности и др.

С другой стороны, этот признак не обладает достаточной специфичностью и инвариантностью. Одинаковый тон могут иметь на снимке совершенно разные объекты, например поверхность водоемов и чистых сенокосов. Наряду с этим важнейший объект дешифрирования при создании кадастровых планов и карт — пашня на снимке может изобразиться любым тоном в зависимости от ее состояния (вспаханная, боронованная, сухая, влажная и др.) и времени съемки, а также от вида культур, фазы их развития на занятых полях.

Отметим также, что тон изображения объектов одного класса может существенно изменяться в пределах кадра и на перекрывающихся снимках вследствие неортотропности их поверхности, различной спектральной яркости компонентов полихроматических геосистем и других факторов.

Рассмотрим детальнее влияние неортотропности поверхности объектов на изменение оптической плотности их изображения. Допустим, что пространственная отражательная способность некоторой однородной поверхности E характеризуется индикатрисой рассеяния I (рис. 15.5, *a*). Очевидно, что оптическая плотность изображения поверхности в точках снимка a , b и c будет различной, так как векторы интегральной яркости в точках местности A , B и C не равны между собой. Аналогично один и тот же участок местности на паре перекрывающихся снимков изобразится различной оптической плотностью (рис. 15.5, *б* и 15.6).

Тоновый контраст смежных объектов также может изменяться, и в ряде случаев знак контраста может поменяться на обратный. Например, объект A на рисунке 15.7 в положении 1 создает большую оптическую плотность на негативе, нежели объект B . В положении 2 знак контраста изменяется. А в положении 3 оптические плотности их будут одинаковыми.

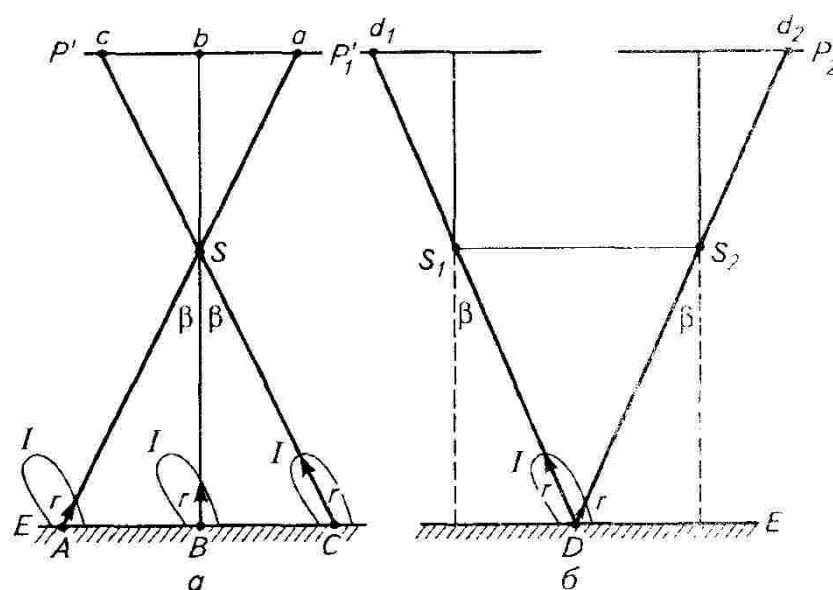


Рис. 15.5. Влияние неортоотропности поверхности на различие оптической плотности ее изображения в различных частях снимка (а), пары снимков (б)

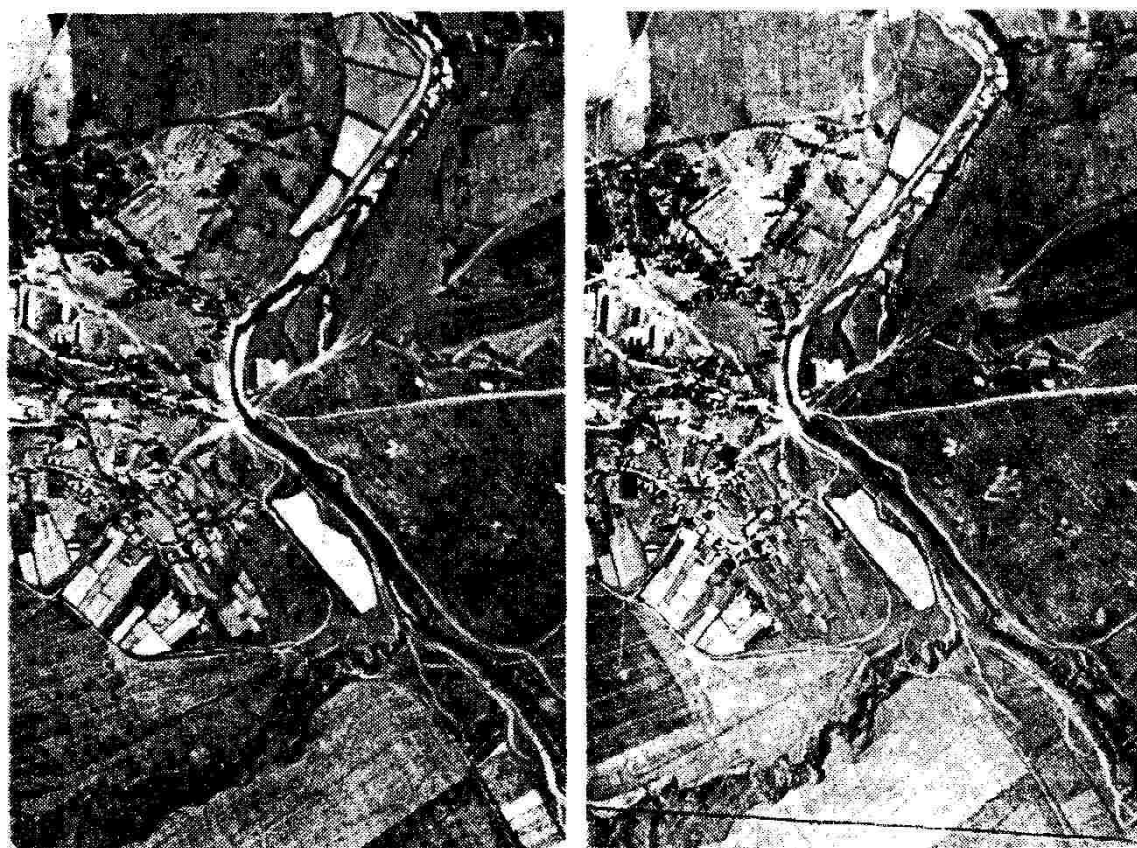


Рис. 15.6. Иллюстрация различия оптических плотностей изображения соответственных объектов на паре реальных снимков

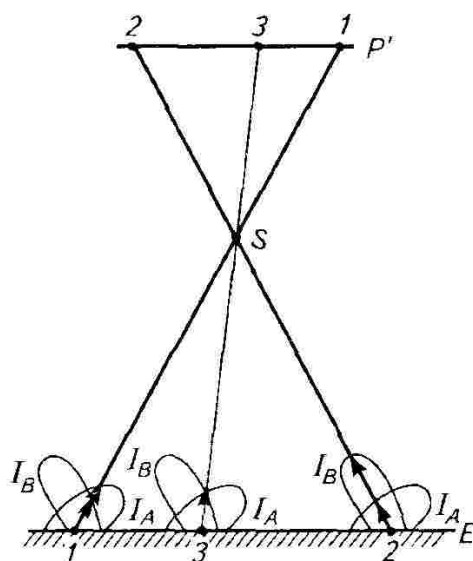


Рис. 15.7. Иллюстрация изменения контраста изображения двух смежных объектов на одном снимке

Значимость тона изображения в процессе распознавания объектов снижается также вследствие ограниченности световой чувствительности зрительного аппарата человека (не более 10...20 различных уровней тона), что явно недостаточно при огромном многообразии элементов ландшафта и значительном варьировании их свойств.

Цвет изображения — более информативный признак, чем тон черно-белого изображения. Хроматическая чувствительность зрительного аппарата человека, как уже отмечалось в разделе 15.3, примерно на два порядка выше, чем ахроматическая. Использование псевдоцветных изображений (спектрозональных, синтезированных) существенно повышает

достоверность решения некоторых дешифровочных задач за счет создания искусственных цветовых контрастов. Но одновременно отметим, что в ряде случаев использование более дорогих цветных снимков не дает заметного преимущества в достоверности решения дешифровочных задач. К таким задачам можно отнести, например, дешифрирование сельскохозяйственных угодий. Цвет при их распознавании не имеет существенного значения. Необходимые топографические объекты, дешифрируемые при этом, достаточно надежно опознаются и характеризуются по черно-белым снимкам.

Рассмотренные ранее факторы, обуславливающие непостоянство тона изображения, примерно так же влияют и на изменчивость цвета изображения в полости кадра. Поэтому при решении дешифровочных задач, в которых тон или цвет изображения имеют большое значение, особое внимание должно быть обращено на некоторые параметры используемой для съемки съемочной системы. О методике отбора нужной системы будет сказано в разделе 18.3.

Текстура изображения — характер распределения оптической плотности по полю изображения объекта на снимке. Через текстуру передаются структурные особенности объекта (форма, размер и взаимное положение слагающих объект или образующих его поверхность элементов и их яркость). Например, текстура массива леса образуется изображением на снимках крон отдельных деревьев, а при высоком разрешении съемочной системы и укрупнении масштаба съемки — изображением также элементов крон (ветвей или даже листьев); текстура чистой пашни формируется отображением пахотных борозд или отдельных комьев.

По мере уменьшения масштаба съемки текстура создается более крупными элементами местности, например отдельными полями пашни.

В формировании текстуры значительное значение имеют собственные и падающие тени. Текстура является признаком, производным от совокупности рассмотренных ранее признаков. Ее иногда относят к группе комплексных признаков.

При визуальном дешифрировании текстура достаточно описывается одним-двумя прилагательными, например линейчатая, губчатая, радиально-струйчатая.

Текстура относится к наиболее информативным признакам. Именно по текстуре человек безошибочно опознает леса, сады, поселения и многие другие объекты (см. рис. 15.4). Для перечисленных объектов текстура сравнительно устойчива во времени. Текстура изображения пашни может существенно меняться в течение съемочного сезона, так как после вспашки, боронования, всходов рядовых посевов, смыкания растений, уборки урожая структура поверхности преобразуется. Кроме того, на текстуру пашни и даже таких устойчивых по структуре объектов, как леса, сады, виноградники, будет заметно влиять положение солнца в момент съемки.

Во многих случаях прямые признаки не могут обеспечить достаточную достоверность результатов дешифрирования. Уровень достоверности может быть повышен за счет привлечения к анализу дополнительной информации — путем использования, например, известных взаимосвязей и взаимообусловленностей элементов ландшафта. Эти признаки принято называть *косвенными*. Их можно разделить на три основные группы: природные, антропогенные и природно-антропогенные.

Природные косвенные признаки выражают взаимосвязи и взаимообусловленности естественных объектов и явлений. Их называют также *ландшафтными*. Такими признаками могут быть, например, зависимость вида естественного травяного покрова от типа почвы, ее засоленности, кислотности и увлажненности или связь рельефа с геологическим строением местности и их совместная роль в почвообразовательном процессе. В некоторых случаях по косвенным признакам дешифрируют объекты, вообще не изобразившиеся на снимках, например, по изобразившимся растениям ведут разведку залежей грунтовых вод в аридной зоне, полезных ископаемых.

Объекты, с помощью которых ведется поиск и определение характеристик не дешифрирующихся напрямую объектов, называют *индикаторами*, а дешифрирование *индикационным*. Такое дешифрирование может быть многоэтапным, когда непосредственные индикаторы опознаются с помощью вспомогательных индикаторов.



Рис. 15.8. Снимок сельского поселения. Вверху слева — животноводческая ферма; внизу — пастбище; К — копани для водопоя

С помощью *антропогенных* косвенных признаков опознают объекты, созданные человеком. При этом используют функциональные связи между объектами, их положение в общем комплексе сооружений, зональную специфику организации территорий, коммуникационное обеспечение объектов и др. Например, животноводческая ферма сельскохозяйственного предприятия (рис. 15.8) может быть опознана по совокупности основных и вспомогательных построек, внутренней планировке территории, интенсивно выбитым прогонам, положению дешифрируемого комплекса относительно жилой зоны, характеру обслуживающей дорожной сети. Заметим, что каждое из сооружений комплекса отдельно, вне связи с прочими, не дешифрируется.

К *природно-антропогенным* косвенным признакам относятся: зависимость хозяйственной деятельности человека от определенных условий, проявление свойств природных объектов в деятельности человека и др. Например, по размещению некоторых видов культур можно составить суждение о свойствах почв, их увлажненности; по изменению влажности поверхности и соответствующему изменению мощности травостоя, по регулярно расположенным линиям дешифрируют элементы закрытой осушительной системы.

Дешифровочные признаки обычно используют совокупно, без разделения их на какие-либо группы. Изображение на дешифрируемом участке воспринимается человеком как единое целое — модель местности. На основе результатов анализа модели создается предварительная гипотеза о сути объекта (явления). Правильность подтверждается или отвергается (иногда многократно) с помощью дополнительных признаков.

15.6. ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Методика генерализации информации при дешифрировании базируется в основном на методике картографической генерализации, так как основной объем дешифровочных работ выполняют в целях создания топографических и специальных планов и карт.

Картографическая генерализация представляет собой процесс выявления, отбора и обобщения типичных свойств картографируемых объектов (явлений) и обобщения их границ в соответствии с назначением и масштабом составляемой карты.

Типичные свойства подлежащих нанесению на карты объектов выявляют в результате их предварительного изучения. От индивидуальных (особенных) качественных и количественных характеристик к обобщенным (типичным) характеристикам переходят с целью повышения наглядности карты, упрощения передачи информации картографическим путем. При этом должна быть сохранена достоверность и обеспечена достаточность информации для решения практических задач. Тем же принципом руководствуются и при обобщении границ площадных объектов, а также формы линейных объектов. Одновременно малые изгибы границ и формы объектов можно утрировать в целях упрощения ориентирования по карте на монотонной по ситуации местности.

Нормы отбора при генерализации — минимальные размеры и число отдельных подлежащих дешифрированию объектов; минимальное проявление частных особенностей объекта, учитываемых при определении его обобщенной характеристики; минимальная доля компонентов в формировании комплексных характеристик и др. зависят от предельной нагрузки составляемой карты и практической значимости дешифрируемых объектов и явлений. Нормы устанавливаются действующими инструкциями, наставлениями и другими нормативными документами, а частные отклонения от них — редакционными указаниями (предписаниями). При составлении нестандартных карт устанавливают согласованные с заказчиком индивидуальные нормы. Аналогично устанавливают нормы при выполнении исследовательских, поисковых и других работ.

Нормы контурной генерализации и точности нанесения границ дифференцируются в зависимости от значимости объектов и дешифрируемости границ. Например, требования к точности выделения пашни из массива других угодий должны быть выше, чем точность разграничения однотипных различающихся качественно угодий (пашня чистая и засоренная камнями и т. п.).

Процедура генерализации в дешифровочном процессе несколько отличается от аналогичной процедуры при наземных топографических съемках, так как на снимках при правильном выборе элементов съемочной системы и параметров съемки происходит естественная генерализация границ и яркостных характеристик поверхности объектов. Дешифровщик контролирует соответствие такой генерализации принятым нормам и вносит необходимые коррективы.

15.7. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Необходимость в использовании технических средств при визуальном дешифрировании возникает в целях: оптического увеличения изображения, стереоскопического наблюдения дешифрируемых материалов, определения количественных характеристик некоторых объектов.

Для оптического увеличения анализируемых изображений используют набор луп. Кратность их увеличения подбирают эмпирически. Повышение кратности обычно влечет за собой уменьшение поля зрения лупы. Поэтому их используют в основном для обнаружения и опознавания малых по размерам объектов (водоразборных колонок, маркированных перед съемкой поворотных пунктов границ землепользования и т. п.) или индикаторов, с помощью которых определяют функциональное назначение зданий, сооружений (наличие печных труб при выделении жилых построек в сельском поселении, бочек на складе топливно-смазочных материалов и др.).

Стереоскопически наблюдать пару снимков можно, при некоторой тренировке, без специальных приборов. Стереоскоп облегчает наблюдение и, кроме того, позволяет более полно извлечь содержащуюся в снимках информацию за счет увеличения изображения — большинство стереоскопов снабжено увеличительными линзами или более сложными оптическими устройствами. Дешифрируемость снимков при их стереоскопическом рассматривании возрастает также вследствие более полного использования геометрических дешифровочных признаков объектов — пространственное изображение объектов легче отождествляется с привычным пространственным образом самих объектов. Информация о рельефе местности по стереоскопической модели получается с не

меньшей полнотой, чем непосредственно на местности, так как расширение зоны одновременного обзора позволяет с большей достоверностью установить общие закономерности его строения. Этому способствуют также более удобный, чем непосредственно на местности, ракурс наблюдения и возможность утрирования вертикального масштаба стереоскопической модели.

Стереоскопическое наблюдение снимков упрощает и ускоряет процесс нанесения границ возвышающихся объектов, бровок балок и линий резких изменений крутизны склонов. Поэтому использование стереоскопов рекомендуется даже при полевом дешифрировании.

Простейшее приспособление для стереоскопического наблюдения снимков — стереоочки, снабженные оптическими клиньями для дивергенции оптических осей глаз и соответственно увеличения расстояния между рассматриваемыми снимками. Стереоочки можно использовать с линзами. Диаметр поля зрения стереоочков 11...13 см при увеличении 1,2...2^x.

Удобны для наблюдения снимков в поле карманные стереоскопы, например П-5 с диаметром поля зрения около 5 см при увеличении 2^x или топопрет с диаметром поля зрения 6 см при увеличении 2,8^x.

Наиболее распространен стереоскоп ЛЗ (см. разд. 9.3) с полем зрения 12 см при увеличении 1,4^x, а также отечественные стереоизмерительные приборы ДС-4 и СММ (см. разд. 9.6).

15.8. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛЬНОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Во всех видах дешифрирования, выполняемых в инженерных целях (картографирование, инвентаризация угодий и объектов и т. п.), можно выделить общие технологические процессы — ограничение рабочих площадей дешифрируемых материалов, свodka результатов дешифрирования. Рассмотрим технику выполнения этих процессов.

Ограничение рабочих площадей снимков, фотосхем и других дешифрируемых материалов выполняют с целью исключения случаев пропусков или повторного дешифрирования территорий. Границы рабочих площадей на снимках и других материалах при этом должны проходить по идентичным точкам смежных изображений. На снимках равнинной и слабовсхолмленной местности, особенно в случае использования при съемке узкоугольных съемочных систем, границы будут практически прямолинейными. Для их фиксации достаточно использовать точки, расположенные примерно в пересечениях мнимых линий, проходящих по середине продольных P_x и поперечных P_y перекрытий снимков. В этих условиях появляется возможность дешифрирования только четных

или нечетных снимков. Внутримаршрутные перекрытия при этом будут около 20 %, рабочие площади увеличатся вдвое. Это позволит сократить объем работ по сводкам результатов дешифрирования и оформлению дешифрированных снимков. Остальные снимки используют как вспомогательные при стереоскопическом наблюдении снимков дешифрируемых.

С увеличением рельефа изображенной на снимках местности точки, расположенные на прямолинейной границе одного снимка, будут все больше отклоняться от соответственной прямой линии смежного снимка. Допустимое значение отклонения зависит от контурной ситуации в зоне прохождения границы и вида дешифрирования. Если отклонение окажется недопустимым, можно использовать два основных варианта выхода из создавшегося положения. Первый — границы рабочей площади расширяют на максимальное отклонение. Очевидно, что при этом вдоль границ окажутся дублирующиеся участки и объем дешифровочных работ несколько увеличится. Второй — общие точки разграничиваемых снимков выбирают на главных перегибах земной поверхности вдоль основного направления границы, используя при этом стереоскоп. Границы в этом варианте окажутся ломаными, но избыточное дешифрирование исключается.

Ограничение рабочих площадей крупномасштабных снимков поселений при выполнении инвентаризационных работ требует выполнения дополнительного условия — сохранения на каждом снимке целостности изображения участков всех землепользователей. Поэтому границы рабочих площадей проводят вдоль улиц, переулков, по границам землепользований и т. п. с минимальным отклонением от срединных линий перекрытия снимков.

Ограничению рабочих площадей снимков и других предназначенных для дешифрирования материалов обычно предшествует процесс нанесения на них предварительного положения границ территории, в пределах которой выполняют дешифровочные работы. Такими границами могут быть рамки трапеций принятой разграфки, границы землепользований сельскохозяйственных и других предприятий, разделительные линии между отдельными дешифровщиками. И только после выполнения этого процесса приступают к ограничению рабочих площадей каждого снимка, фотосхемы и других материалов.

Правила ограничения рабочих площадей фотосхем примерно те же, что и на снимках. Если местность равнинная, по углам фотосхем примерно на середине их перекрытия выбирают хорошо опознающиеся точки изображения. Через них карандашом проводят разграничительные прямые линии на обеих фотосхемах. Затем определяют значение отклонения соответственных точек, лежащих на линии одной из фотосхем, от линии, проведенной на другой фотосхеме. Обычно отклонения бывают невелики. Но с увеличением рельефа отклонения могут оказаться недопустимыми,

особенно в случае монтажа фотосхем по соответственным точкам. Тогда на одной из фотосхем граница может быть оставлена прямолинейной, а на другой она будет состоять из звеньев. Точки, фиксирующие концы этих звеньев, выбирают на прямолинейной границе в местах стыковки снимков обеих фотосхем и идентифицируют визуально на смежной фотосхеме. После этого границы вычерчивают тушью.

Сводку результатов дешифрирования выполняют по границам смежных рабочих площадей дешифрируемых материалов, вдоль рамок трапеций или границ землепользований предприятий. Цель сводки — согласование результатов классификации объектов, определение их качественных и количественных характеристик по границам смежных рабочих площадей, а также исключение пропусков объектов. Правильность инструментального нанесения на дешифрируемые материалы не изобразившихся объектов контролируют промерами от двух-трех надежно идентифицируемых на смежных изображениях точек. Желательно, чтобы эти точки располагались возможно близко от контролируемого объекта и по разные стороны от него.

Работы по внутренней сводке выполняет исполнитель по завершении дешифрирования очередного снимка (фотосхемы и др.). С соседними исполнителями сводки проводят как в процессе работы, так и после окончания ее. Если смежный объект (в широком понимании слова) завершен ранее, исполнитель на подготовительном этапе изготавливает на восковке выкопировку ситуации в полосе порядка 2 см вдоль границы и по ней выполняют сводку.

Завершив работу по сводке, исполнитель записывает вдоль границы, с каким материалом выполнена сводка, когда и кем.

15.9. ДОСЬЕМКА НЕ ИЗОБРАЗИВШИХСЯ НА СНИМКАХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ

Ранее отмечалось, что на снимках могут не изобразиться некоторые из подлежащих дешифрированию объектов. Для нанесения на дешифрируемые материалы этих объектов используют простейшие, обеспечивающие достаточную точность, способы. В качестве опорных используют точки изображения, хорошо опознающиеся на местности.

При значительном объеме досъемочных работ дешифрируют копии изготовленных фотопланов (ортофотопланов). Изображение на них приведено к единому, обычно стандартному, масштабу. Для досъемки в этом варианте можно использовать любые геодезические способы с одновременным фиксированием на фотоплане полученных результатов.

В другом варианте дешифрируют увеличенные до масштаба плана снимки. Снимаемый объект примерно наносят на снимок. Данные для точного нанесения его на план фиксируют на схеме досъемки (абрисе). Оператор использует эти данные при компьютерной фотограмметрической обработке снимков.

При создании планов и карт можно использовать технологии, при которых в компьютер вводят дешифрованные снимки. В этом случае на снимках должно быть нанесено точное положение доснимаемых объектов. Это исключает возможность применения угломерных способов досъемки и вызывает необходимость использования в каждой части (зоне) снимка *частного масштаба*.

Для определения частного масштаба пользуются результатами измерения двух соответственных базисов на снимке и местности. Концами их служат надежно идентифицируемые точки. На снимке они накалываются. Погрешность идентификации и накалки не должна превышать 0,1 мм. Размер базисов должен быть примерно таким же, что и максимальные по длине линии, используемые при досъемочных работах. Уменьшение длины базисов приведет к снижению точности этих работ.

Рассмотрим методику определения минимального размера базисов. Допустим, что дешифрирование ведут для последующего выполнения работ, например земельно-инвентаризационных, требующих определения масштаба с точностью не грубее $1/t = 1/100$. Очевидно, что точность определения масштаба будет зависеть от точности измерения базисов на снимке — на местности базисы могут быть измерены с любой точностью. Суммарная погрешность идентификации и накалки точек на снимке, а также измерения базиса δ_l будет примерно 0,2 мм. Вычислим минимальную длину базиса l на снимке для следующих условий:

$$1/t = \delta_l/l; 1/100 = 0,2/l; l = 20 \text{ мм.}$$

Использование двух базисов позволяет контролировать результаты определения масштаба (исключает грубые ошибки), выявить предельную разномасштабность по различным направлениям в зоне и оценить возможную точность выполнения метрических действий с помощью среднего значения частного масштаба. Очевидно, что базисы не должны иметь общих фиксируемых точек. На гиростабилизированных снимках разномасштабность возникает в основном вследствие влияния рельефа местности. Поэтому при работе на такой местности один из базисов следует расположить вдоль, а другой — поперек основного направления ската участка. Базисы при этом окажутся примерно взаимно перпендикулярными. Если плечи относительно точки их пересечения будут примерно симметричными, то среднее значение частного масштаба будет в этой точке.

На равнинной местности взаимное положение базисов желательно сохранить тем же. Возможное равенство масштабов по двум базисам в данном случае еще не свидетельствует о том, что перспективные искажения изображения на данном снимке не существенны. Для выяснения степени влияния наклона снимка на его разномасштабность в зоне следует использовать третий базис с диагональным направлением относительно основных базисов.

За окончательное значение знаменателя частного масштаба принимают среднее из двух (трех) определений:

$$\bar{m} = (m_1 + m_2) / 2, \quad (15.4)$$

где m_1 и m_2 — знаменатели масштаба изображения по базисам.

Затем оценивают точность, которую обеспечит использование для измерений среднего масштаба, по формуле

$$1/t = \Delta m / \bar{m}, \quad (15.5)$$

в которой $\Delta m = (m_i - \bar{m})$.

Базисы на снимке измеряют с помощью измерителя и масштабной линейки, на местности — рулеткой. Точность измерения с помощью рулетки достаточна. Даже при дециметровой погрешности измерение линий в натуре обеспечивает точность 1/500, что в несколько раз превышает точность измерения базисов на снимках.

Наиболее удобное средство измерения базисов в натуре — ручные лазерные безотражательные дальномеры («лазерные рулетки»). Дальность измерения с их помощью до 200 м и более. Погрешность измерения 1,5...3 мм. Масса 300...400 г.

Значения частных масштабов обычно не «круглые». Для работы удобно использовать клиновой масштаб. Строят его так. На плотной основе (бумага, пластик) прочерчивают прямую линию длиной 15...20 см (рис. 15.9). На нее наносят шкалу длин линий на местности. В точке шкалы с максимальной длиной восстанавливают перпендикуляр, на котором откладывают отрезок, равный этой длине, выраженной в среднем масштабе определенной зоны снимка. Верхний конец отрезка соединяют с нулевой точкой шкалы. Для удобства пользования полученным графиком через остальные деления шкалы проводят линии, параллельные перпендикуляру. С помощью полученного графика можно переводить измеренные на снимке отрезки в расстояния на местно-

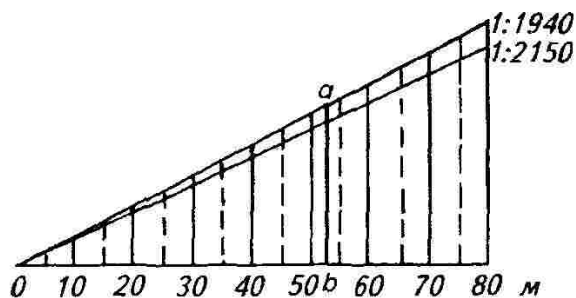


Рис. 15.9. Клиновой масштаб

сти и наоборот. Например, измеренный на снимке в масштабе 1:1940 отрезок ab соответствует на местности линии длиной 53 м. На основе той же шкалы можно построить клиновой масштаб и для работы в других зонах.

15.10. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОСТРОЕК НА ДЕШИФРИРУЕМЫХ СНИМКАХ ПРИ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЗЕМЕЛЬ

Как уже отмечалось, контуры жилых домов и капитальных построек на дешифрируемых снимках должны соответствовать положению их фундаментов. Однако фундаменты в большинстве случаев по всему периметру не отображаются — они бывают закрыты самим строением, его крышей, расположенной рядом растительностью и др. Дополнительная проблема возникает при выполнении дешифровочных работ на снимках территорий с многоэтажной застройкой — здесь здания могут закрывать собой также другие подлежащие дешифрированию объекты. Простейшим выходом из этого положения может быть выбор таких параметров аэрофотосъемки, при которых смещение изображения верхних элементов построек относительно фундамента окажется в допустимой норме, например δ_h не более 0,2...0,3 мм. Достичь этого можно, используя длиннофокусные (узкоугольные) АФА с соответствующим увеличением высоты фотографирования для сохранения нужного съемочного масштаба. Высота фотографирования может быть вычислена по формуле (8.13) с введением в нее коэффициента $K_{ув}$, определяемого из соотношения знаменателей масштабов съемочного и картографирования:

$$H = rhK_{ув}/\delta_h, \quad (15.6)$$

где h — высота здания.

Из формулы видно, что ту же задачу можно решить уменьшением величины r . Этого достигают, сокращая размеры рабочей площади снимка путем увеличения продольных и поперечных перекрытий снимков при съемке. Разумеется, этот прием должен быть экономически обоснован, так как в этом случае увеличивается число маршрутов (время съемки) и расход фотоматериалов, а также число обрабатываемых снимков.

При съемке сельских поселений с одно-двухэтажной застройкой получение снимков, свободных от недопустимых смещений изображения крыш относительно фундаментов, не составляет особых затруднений, если выбор высоты съемки не регламентируется требованиями стереофотограмметрической обработки снимков. Здесь остается только процесс учета свесов крыш, если значение их вносит недопустимые погрешности в положение контура постройки.

При работе со снимками, на которых смещение крыш за высоту зданий больше установленной нормы, введение поправок в положение крыш может быть выполнено следующими способами: аналитическим; графическим с использованием видимых на фотоизображении смещений; графическим с использованием изображения теней, падающих от здания; графическим с использованием изображения дешифрируемых зданий на перекрывающихся снимках; стереоскопическим. Рассмотрим суть перечисленных способов.

Аналитический способ. На снимках накалывают изобразившиеся углы основания здания g_o, a_o, b_o (рис. 15.10) и измеряют отстояние изображения каждого угла от главной точки дешифрируемого снимка. Напомним, что в строгом варианте расстояния измеряют от точки надира. Положение ее в некоторых случаях может быть определено по изображению трех и более отвесных объектов (столбов, углов высоких зданий и т. п.). Затем вычисляют смещения изображения углов крыш по формуле (8.13). Высоту здания h определяют в поле или с помощью простейших стереофотограмметрических измерений (см. разд. 9.5). Вычисленные смещения вводят поправками в положение углов крыши на снимке по направлению к его главной точке. Полученные точки $a_o, b_o, k_o, d_o, l_o, g_o$ будут углами основания дешифрируемого здания. По величине несовмещения полученных таким образом точек с уже наколотыми точками g_o, a_o и b_o можно судить о точности выполнения задачи и, в частности, о возможности пренебрежения размерами карнизов и свесов крыш. Дополнительным контролем может служить степень параллельности противоположных сторон основания и перпендикулярности стыкующихся сторон.

Если высота зданий в поселении изменяется в небольших пре-

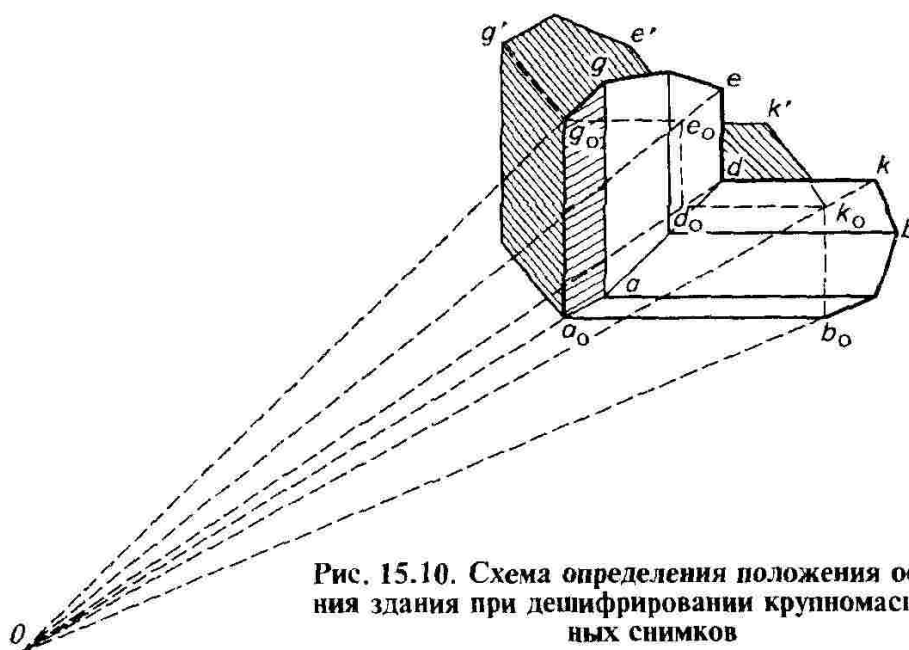


Рис. 15.10. Схема определения положения основания здания при дешифрировании крупномасштабных снимков

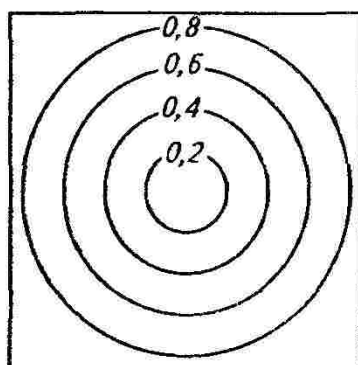


Рис. 15.11. Номограмма поправок при дешифрировании зданий

делах, например при одноэтажной застройке сельских поселений, значение h в формуле (8.13) можно принять за постоянное (исключения должны быть отмечены при выполнении полевой части дешифрирования). На обороте снимка в этом случае строят номограмму поправок (рис. 15.11) с любым шагом изменения значения Δh . Вокруг главной точки описывают окружности — линии равных поправок. Нужные поправки для каждого здания считывают с номограммы при рассмотрении снимка «на просвет».

Данный способ можно использовать в случаях, когда дешифрируют полный снимок, или при дешифрировании увеличенной части снимка с расположенной на ней главной точкой. При работе на прочих частях могут быть использованы приемы нанесения главной точки на подклеенную к части снимка полосу бумаги.

Графический способ с использованием видимых на снимке смещений. Суть способа заключается в том, что смещение изображения некоторых углов крыши (точек g , a и b на рис. 15.10) относительно соответственных точек основания здания может быть измерено непосредственно на снимке. Среднее значение из измеренных смещений принимают за смещение других близлежащих точек той же крыши и используют для введения поправок в положение этих точек. Поправки вводят по направлениям к главной точке или, если этой точки нет на части снимка, — параллельно видимым смещениям других точек. При этом допускают некоторые погрешности, обусловленные непостоянством отстояния разных углов от главной точки снимка. Пределы изменений r точек с одинаковыми высотами определяют по формуле

$$\Delta r = H \Delta_{\text{пред}} / h, \quad (15.7)$$

где $\Delta_{\text{пред}}$ — допустимая погрешность в определении положения точек контура зданий.

В данном способе также удобно воспользоваться номограммой поправок, если высоты зданий примерно одинаковы и в пределах дешифрируемого изображения располагается главная точка.

Графический способ использования падающих от здания теней. Тени отвесных объектов (в данном случае от углов зданий), падающие на плоскую поверхность при освещении их солнцем, параллельны между собой. Следовательно, по изображению теней верхних углов здания g' , e' и k' (см. рис. 15.10) и одного из вертикальных ребер его, например $a'a_0$, можно найти направления, на которых лежат соответственные углы основания g_0e_0 и k_0 . Этими

направлениями будут линии, проведенные через точки g' , e' и k' параллельно линии $a'a_0$. Затем, используя центральные исходящие из главной точки снимка направления, определяют остальные углы основания зданий. При отсутствии на дешифрируемом изображении главной точки к определению положения недостающих углов основания привлекают линии, проводимые параллельно изобразившимся на снимке сторонам основания или крыши, например линии a_0b_0 или ab ; a_0g_0 или ag .

Удовлетворительные результаты данного способа можно получить при достаточной длине теней (не короче 3 мм). Если тени коротки, более точное направление их можно параллельно перенести с другой части снимка, падающие от более высокого здания или другого объекта с отвесными элементами.

Графический способ с использованием изображения дешифрируемого здания на перекрывающихся снимках. Изображение одних и тех же объектов получают на двух-трех снимках маршрута. Кроме того, эти же объекты изображают на двух-трех снимках смежного маршрута в зоне поперечного перекрытия. На всех снимках объект изображается по-разному — проецируется он с разных точек (центров проекции). Особенности многоракурсной съемки можно использовать при дешифрировании зданий. Очевидно, из такого комплекта снимков можно подобрать в качестве вспомогательного такой снимок, на котором окажутся открытыми те элементы основания здания, которые закрыты на дешифрируемом снимке. В некоторых случаях может оказаться рациональным использование и других снимков. Рассмотрим пример. На рисунке 15.12 схематически изображены два снимка. Левый основной, правый вспомогательный. На основном снимке хорошо дешифрируются точки g_0 , a_0 и b_0 . Точки e и c можно нанести на этот снимок с помощью линейных засечек с точек 1, 2, 3 и точек 3, 4, 5

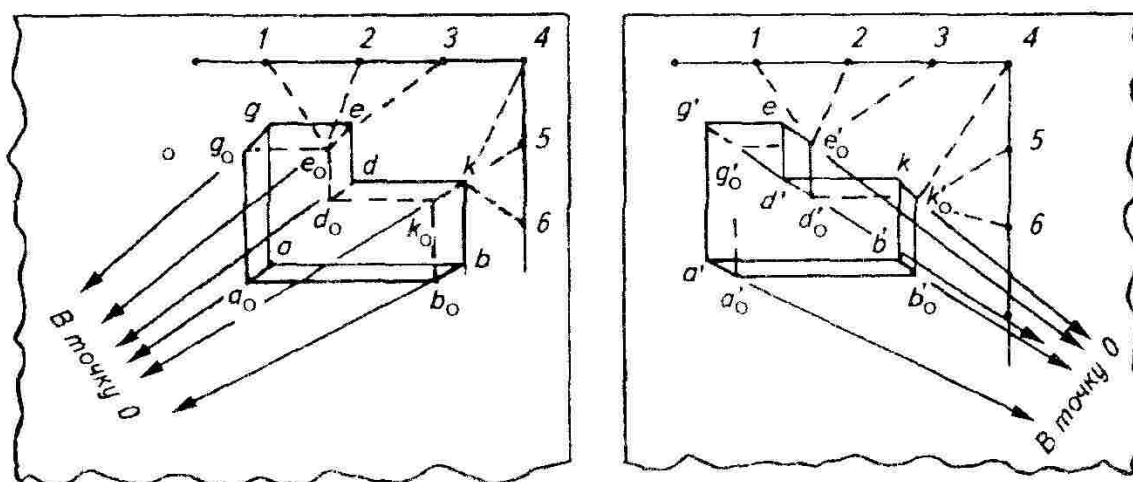


Рис. 15.12. Схема определения основания здания по паре снимков

соответственно. Промеры для засечек снимают со вспомогательного снимка. Точки, с которых выполняют засечку, должны надежно идентифицироваться на снимках. Объекты, используемые в качестве этих точек, не должны быть высокими в натуре — смещение верха изображения объекта на снимке за его высоту не должно превышать 0,1 мм. В примере использованы столбики низкой ограды. Для нахождения положения точки d_0 можно использовать снимок верхнего маршрута, но можно воспользоваться приемами, изложенными в уже рассмотренных способах.

Разномасштабность перекрывающихся снимков при хорошо выполненной аэрофотосъемке не мешает реализации способа, особенно при небольших размерах засекающих отрезков (20... 30 мм).

Стереоскопический способ. Здесь используется то же свойство перекрывающихся снимков, что и в предыдущем способе. Но перенос недостающих элементов со вспомогательного снимка на дешифрируемый выполняют путем стереоскопического отождествления. Способ очень производителен, но требует определенного навыка в выполнении.

Рассмотренные способы применяют отдельно или в совокупности в зависимости от конкретной ситуации — качества фотоизображения, проработки деталей в тенях, степени озелененности поселения и др.

Если установлено, что карнизы и свесы крыш существенно (более 0,2 мм в масштабе плана) влияют на точность определения положения основания здания, в смещенные уже контуры крыш вводят поправки. Если положение построек определяют по внешней границе отмосток, то учет свесов крыш становится излишним.

При цифровой фотограмметрической обработке снимков положение основания здания (координаты углов) может быть определено без введения поправок в положение крыш в процессе дешифрирования. Если обрабатывают одиночные снимки, высота каждого здания должна быть известна. При стереоскопической обработке снимков знание высот зданий не требуется.

Контрольные вопросы и задания

1. Можно ли управлять информативностью прямых дешифровочных признаков при формировании заказа на аэрофотосъемку? Как? 2. Можно ли управлять информативностью косвенных дешифровочных признаков при формировании заказа на аэрофотосъемку? Как именно? 3. Можно ли заранее определить рациональность использования цветной аэрофотосъемки при решении конкретной дешифровочной задачи? Ответ обосновать примерами. 4. Предложите технологию выполнения аэровизуального дешифрирования с использованием современных технических средств.

Глава 16

ДЕШИФРИРОВАНИЕ АЭРОФОТОСНИМКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАЗОВЫХ КАРТ (ПЛАНОВ) СОСТОЯНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ

16.1. ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ КАДАСТРОВОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ СНИМКОВ

Данный вид дешифрирования выполняют в целях создания кадастровых карт межселенных земель в масштабах 1:10 000 и в малообжитых регионах — 1:25 000, а также кадастровых планов поселений в масштабах 1:500...1:2000.

Кадастровые карты и планы, являясь специализированными моделями местности, служат пространственной основой для формирования базы кадастровой информации. С их помощью проводят инвентаризацию земель сложившихся землепользований и землевладений, учитывают объекты недвижимости. Их используют также при проведении изыскательских работ землеустроительного назначения и межевании земель.

Кадастровые карты и планы могут служить топографической основой при создании специальных карт (почвенных, геоботанических, гидрогеологических, подземных коммуникаций и др.), используемых в качестве информационных слоев в ГИС.

Исходя из сказанного, можно сформулировать основные требования к контурно-информационному содержанию кадастровых карт и планов:

объем топографической (ситуационной) информации должен обеспечить: достаточно точную пространственную привязку (нанесение на карты и планы) специальных сведений о землях; свободное ориентирование на местности при выполнении полевых работ; возможность принятия правильных проектных решений и вынесения проекта в натуру;

объем специальной информации должен обеспечить правильное решение любой из перечисленных задач. Особое внимание уделяют правильности показа границ землепользований, землевладений, характеристике расположенных на картографируемой территории земель, определению положения объектов недвижимости на планах.

Содержание кадастровых карт и планов земель должно постоянно находиться в соответствии с фактическим состоянием местности. Обеспечивается это или непрерывным картографическим дежурством (внесение поправок в реальном времени), или строго периодическими корректировками ситуации.

16.2. ОБЪЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ БАЗОВЫХ КАРТ ЗЕМЕЛЬ МАСШТАБА 1:10 000...1:25 000 И ИХ ПРИЗНАКИ

Один из важнейших объектов данного вида дешифрирования — *границы* землепользований и землевладений, поселений и земель государственного запаса. Границы с точки зрения дешифрирования относятся к особым объектам. Материализованным проявлением их на местности являются преимущественно межевые знаки, служащие поворотными пунктами. Только в некоторых случаях, когда часть границы проходит по урочищу или совпадает с линейными топографическими элементами местности, она материализуется в виде берега реки, ручья, просеки, дорог и т. п. Поэтому разговор о дешифровочных признаках самой границы сводится в основном к анализу признаков межевых знаков. Они могут отобразиться на аэрофотоснимках светлыми точками при достаточном яркостном контрасте окопки столбов на окружающем фоне, при этом диаметр окопки должен превышать линейное разрешение дешифрируемых материалов. Поиск изображения межевых знаков на дешифрируемых материалах не должен быть случайным. Необходимо знать их примерное положение. Опознавание существенно упрощается, если сохранившиеся межевые знаки перед аэрофотосъемкой маркируют (известью, опилками и др.) крестообразными или иной формы знаками.

Пашня — земельный участок, систематически обрабатываемый и используемый под посевы сельскохозяйственных культур, включая посевы многолетних трав, а также пары. К пашне не относят распаханное с целью коренного улучшения сенокосы и пастбища, а также используемые под посевы междурядья садов. Особенность дешифрирования пашни — дифференциация ее по качественным характеристикам. Выделяют пашни с оросительной сетью, пашни лиманного орошения, осушенные (с указанием способа осушения) с двусторонним регулированием водного режима, заливные, богарные (в районах орошаемого земледелия), чистые, засоренные камнями. Отдельно выделяют пашни под посевами риса, показывают теплицы, парники и оранжереи. Выделяют также приусадебные участки и индивидуальные огороды, расположенные вне поселений.

Основные дешифровочные признаки пашни — четкость границ и определенная «геометричность» формы полей (см. рис. 15.4, 15.6). Для определенных периодов съемки достаточно информативным признаком пашни является текстура изображения, но она неустойчива во времени. Тон пашни может варьироваться в большом диапазоне — он изменяется в зависимости от состояния данного участка, произрастающей на нем культуры, фазы развития этой культуры и др.

Заливные земли, в том числе и пашня, выделяются по горизонталям на крупномасштабных топографических картах. Данные о среднем уровне воды за три последних года получают от постов Гидрометеослужбы. Определенные по карте границы разлива переносят по контурам или с помощью проекторов на дешифрируемые материалы. При полевом обследовании границу уточняют по опросам местных жителей и по непосредственным признакам разлива на местности. Большие массивы сельскохозяйственных угодий могут разделяться границей разлива на заливные (пойменные) и незаливные (суходольные). Мелкие участки (до 50 мм² на плане) полностью относятся к тому или иному подвиду угодий.

Наиболее вероятные ошибки дешифрирования пашни: отнесение некоторых участков пашни к залежи и наоборот, а также отнесение к пашне сенокосов и пастбищ, распахиваемых с целью коренного улучшения.

К *залежи* относят участки бывшей пашни, не используемые более одного года (начиная с осени) для посева сельскохозяйственных культур и не подготовленные под пар. Залежи при дешифрировании разделяют на чистые, засоренные камнями, заросшие кустарником или порослью леса, засевавшиеся ранее рисом, богарные (на орошаемых массивах). Отдельно показывают залежи лиманного орошения, с оросительной сетью, расположенные в зоне орошения, заливные и осушенные с указанием способа осушения.

Дешифровочные признаки залежи и пашни очень близки. Границы и следы обработки почвы и соответственно линейная текстура изображения сохраняются многие годы. Однако со временем появляются признаки прекращения обработки — локальная нечеткость текстуры, возникновение в текстуре пятен (зерен отображения сорняков и древесной растительности). Косвенный признак залежи — приуроченность ее к междоугольным овражным и балочным участкам (рис. 16.1), к сильно эродированным участкам (см. рис. 15.2).

К *сенокосам* относят участки, травостой которых систематически используют для сенокосения. Сенокосы при дешифрировании разделяют на заливные, суходольные и заболоченные. Все их подразделяют на чистые, покрытые кочками, заросшие кустарником, порослью леса или редким лесом и залесенные. Заболоченные сенокосы делят по типу растительности на заросшие камышом, рогозом или тростником и отдельно — заросшие осокой. Особо выделяют сенокосы орошаемые с указанием способа орошения и осушения, а также заливные и суходольные, подвергающиеся коренному улучшению.

Форма и размеры участков сенокосов неопределенные, так как их границами служат границы пашни, залежи, леса, а также топографические элементы местности (реки, ручьи, дороги и др.). Тек-

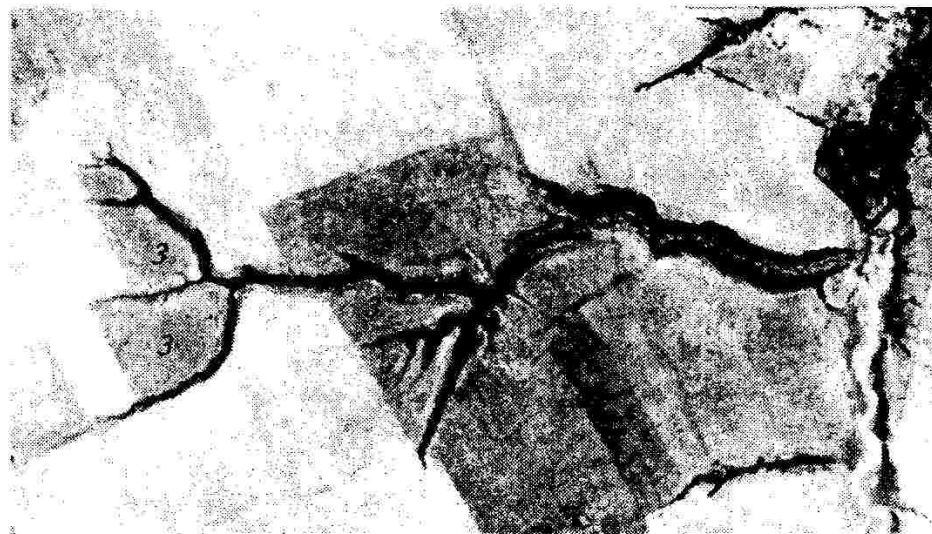


Рис. 16.1. Изображение участков залежи, располагающихся между отрогами оврага:

З — залежь

стура изменяется в зависимости от качественных характеристик сенокосов. Наибольшую надежность опознавания сенокосов обеспечивает съемка, выполненная в период сенокосения и после него, до вывоза сена и маскирования следов уборки отавой.

При дешифрировании сенокосов важное значение имеют косвенные признаки: приуроченность к определенным природным комплексам, отсутствие возможности прогона скота к участку и вообще отсутствие признаков систематического выпаса.

Пастбище — земельный участок, травостой которого систематически используется или пригоден для выпаса скота, но не используется как сенокос и не является залежью. Пастбища делят на пойменные, суходольные и заболоченные с последующим разделением на чистые, покрытые кочками, заросшие кустарником, порослью леса или редким лесом и залесенные. Суходольные пастбища подразделяют на культурные, коренного улучшения, засоренные камнями, каменистые и расположенные на задернованных песках.

В степной, полупустынной и пустынной зонах пастбища разделяют в зависимости от произрастающей на них растительности, обводненности и сезонного использования. Отдельно показывают орошаемые и осушенные пастбища. На пастбищах дешифрируют изгороди и все специальные сооружения.

Пастбища, так же как и сенокосы, не имеют четко выраженных прямых дешифровочных признаков. Распознают их в основном по косвенным признакам: положение относительно поселений и, в частности, относительно скотных дворов с установлением возможности прогона скота к пастбищному участку, наличие множества выбитых скотом троп, вытопанных у водопоев и на местах

стоянок травостоя, наличие специальных сооружений (загонов, навесов и т. п.).

Многолетние насаждения — земельные участки под древесными, кустарниковыми или многолетними травянистыми искусственными насаждениями, предназначенными для получения плодово-ягодной или технической продукции (чая, эфирных масел, хмеля и т. п.).

Отдельно дешифрируют сады цитрусовые, фруктовые субтропические, фруктовые с виноградниками, фруктово-ягодные, виноградники, ягодники, а также тутовники, хмельники, различные плантации и питомники древесно-кустарниковых культур. Выделяют орошаемые и осушаемые многолетние насаждения с указанием типа орошения и осушения, а также пойменные насаждения. Сады на приусадебных участках не дешифрируются. Коллективные сады показывают отдельными землепользованиями. Постройки на них не дешифрируются.

Основной дешифровочный признак многолетних насаждений — текстура изображения (см. рис. 15.4). При наличии сведений о типах насаждений, встречающихся в районе выполнения работ по дешифрированию, и использовании эталонных снимков достоверность камерального распознавания насаждений достаточно высокая.

Дешифрирование *сельских поселений* при создании базовых карт земель имеет свои особенности. На дешифрируемые материалы наносят юридические границы, если они установлены и соответствуют фактической границе.

Индивидуальные постройки в поселении независимо от функционального назначения и характеристик строений объединяют поквартально общим контуром или при рассредоточенной застройке разделяют по группам, если расстояние между группами более 5 мм в масштабе плана. Отдельно стоящие строения внутри кварталов не дешифрируются.

Также поквартально, без внутренней детализации, условным знаком огорода показывают приусадебные участки. Из общих массивов приусадебных земель выделяют не переданные в индивидуальное пользование участки. На изображении ставят пояснительные надписи и условные знаки их фактического использования.

Границы выделенных кварталов образуют улицы, площади, переулки, проезды, тупики. При односторонней застройке для обозначения границы улицы по внешней стороне проезжей части проводят дополнительную тонкую линию.

В поселениях с рассредоточенной застройкой постоянные проезды показывают условным знаком дорог; улицы и площади при этом не выделяют.

Отдельно показывают общественные хозяйственные постройки и их границы (черным цветом). Выделяют (красным цветом) участ-

ки посторонних землепользований (школ, больниц, контор связи и др.) с обобщенным показом строений внутри участков. Условное отображение общественных хозяйственных объектов и посторонних землепользователей сопровождаются сокращенными пояснительными подписями.

В сельском поселении дешифрируются сельскохозяйственные угодья общественного пользования и топографические объекты: реки, ручьи, овраги, леса, кустарники, парки, скверы и др.

Дешифрированию подлежат также хутора, бывшие хутора, хозяйственные постройки, расположенные вне поселения (полевые станы, склады и т. п.), и используемые для их обслуживания земли. Эти объекты показывают, сопровождая пояснительными подписями.

Специфичность дешифровочных признаков сельских поселений, хуторов, отдельных зданий и сооружений исключает возможность перепутывания с прочими объектами. Элементы поселения (полосы застройки, приусадебные земли, улицы, площади, проезды) легко опознаются при камеральном и особенно при стереоскопическом наблюдении дешифрируемых материалов. Большинство общественных хозяйственных объектов с высокой степенью достоверности опознаются с помощью косвенных признаков, например по расположению объекта в поселении, функциональной обусловленности изобразившихся элементов комплекса сооружений, изображению машин, бочек и других предметов на территории дешифрируемого объекта.

Леса в рассматриваемом виде дешифрирования не разделяются по породам. Отдельно показывают молодые посадки, участки под дикорастущими плодовыми деревьями. В лесах выделяют буреломы, вырубки, поросли леса, кустарники и кустарнички.

Дешифрированию подлежат полевозащитные и сажозащитные лесополосы, защитные насаждения вдоль оросительных и осушительных каналов, бровок оврагов, берегов водоемов, древесная и кустарниковая обсадка дорог и судоходных каналов, защитные лесонасаждения по дну и откосам оврагов и на песках.

Из общих массивов леса выделяют орошаемые и осушаемые леса, заболоченные леса и кустарники, раскорчеванные участки для вовлечения в сельскохозяйственное производство.

Основной дешифровочный признак лесов и кустарников — текстура фотоизображения (см. рис. 15.4). По характеру текстуры и высоте насаждений, определяемой по теням или стереоскопической модели, достаточно надежно разделяются зрелые леса, естественная поросль леса, молодые посадки леса, редколесья, кустарники. Уверенно опознаются просеки, а во многих случаях и лесные дороги. Заболоченность лесов и кустарников иногда хорошо отображается на черно-белых и особенно хорошо на цветных спектральных аэрофотоснимках. К определению заболочен-

ности привлекаются косвенные признаки (характер рельефа местности, наличие и характер близлежащих водоемов и др.).

Лесополосы и защитные лесонасаждения надежно распознаются по прямым признакам с помощью стереоскопа.

На дешифрируемых материалах показывают все *дороги*, в том числе строящиеся. Если дороги имеют полосы отвода, на изображение наносят их границы. В пределах границ показывают земли, находящиеся непосредственно под дорогой, с канавами, насыпями и выемками, а также сельскохозяйственные угодья и другие подлежащие дешифрированию объекты.

Для всех железных, так же как и для автомобильных, дорог применяют один (свой) условный знак. Если граница полосы отвода располагается от условного знака дороги ближе 0,5 мм в масштабе плана, то границу не показывают, а на дешифрируемых материалах указывают ширину полосы отвода.

Все сооружения на дорогах показывают обобщенно. Границы станций, разъездов и других дорожных служб наносят на дешифрируемые материалы по геодезическим данным, а при их отсутствии — по фактическому состоянию.

Временные дороги в лесах и на сельскохозяйственных угодьях не дешифрируются.

Дешифрируют межки с разделением на чистые, с камнями, с отходами корчевания. Если межки не выражаются в масштабе плана (менее 1,5 мм), то на дешифрируемых материалах указывают их ширину.

Дороги имеют специфические прямые дешифровочные признаки — на обычных широкозональных аэрофотоснимках Нечерноземной зоны они отображаются светлыми линиями (полосами) (см. рис. 15.6 и 15.8).

Мосты и путепроводы дешифрируют по прямым признакам; наличие водопропускных труб определяют косвенно по пересечению дорог с водотоками при отсутствии мостов.

При дешифрировании *гидрографических объектов* показывают береговые линии всех естественных и искусственных водоемов, гидротехнические сооружения (каналы, открытые и закрытые коллекторы, канавы, арыки, наземные и подземные водопроводы в районах орошаемого земледелия, колодцы, водопойные пункты и др.), а также ключи, родники, сухие канавы. Дешифрированию подлежит древесно-кустарниковая растительность по берегам водоемов.

Если ширина водотока не выражается в масштабе плана, с интервалом примерно в 1 дм показывают среднюю ширину зеркала воды в метрах. Кроме того, показывают ширину полос обслуживания каналов. Вдоль каналов и канав дешифрируют валы высотой более 1 м. Полосы отвода при каналах дешифрируют аналогично полосам отвода при железных и шоссейных дорогах. На реках, каналах и канавах стрелками обозначают направление течения воды.

Водные объекты с высокой степенью достоверности дешифрируют на черно-белом и особенно надежно на цветных аэрофотоснимках по прямым признакам (рис. 16.2, 16.3, см. рис. 15.6). Задача нанесения на дешифрируемые материалы береговой линии существенно облегчается, если аэрофотосъемка выполнена в период, когда уровень воды в крупных водохранилищах соответствовал нормальному подпорному уровню, а в реках, озерах и прудах — среднему устойчивому уровню в летний период. В противном случае к решению этой задачи привлекают вспомогательные материалы (гидрографические проекты, крупномасштабные топографические карты) или береговую линию наносят инструментально в поле в период нормального уровня воды в водоемах.

Направление течения в реках определяют по косвенным признакам (форме островов и наносов на отмелях, см. рис. 16.2, по направлению впадения притоков) или с помощью топографической карты.

Мелиоративные каналы и канавы относятся к категории контрастных объектов, поэтому они, даже при малой ширине, хорошо отображаются на аэрофотоснимках (см. рис. 16.2, 16.3). При правильном выборе времени аэрофотосъемки и элементов съемочной системы на снимках достаточно хорошо отображается и подземная дренажная сеть.

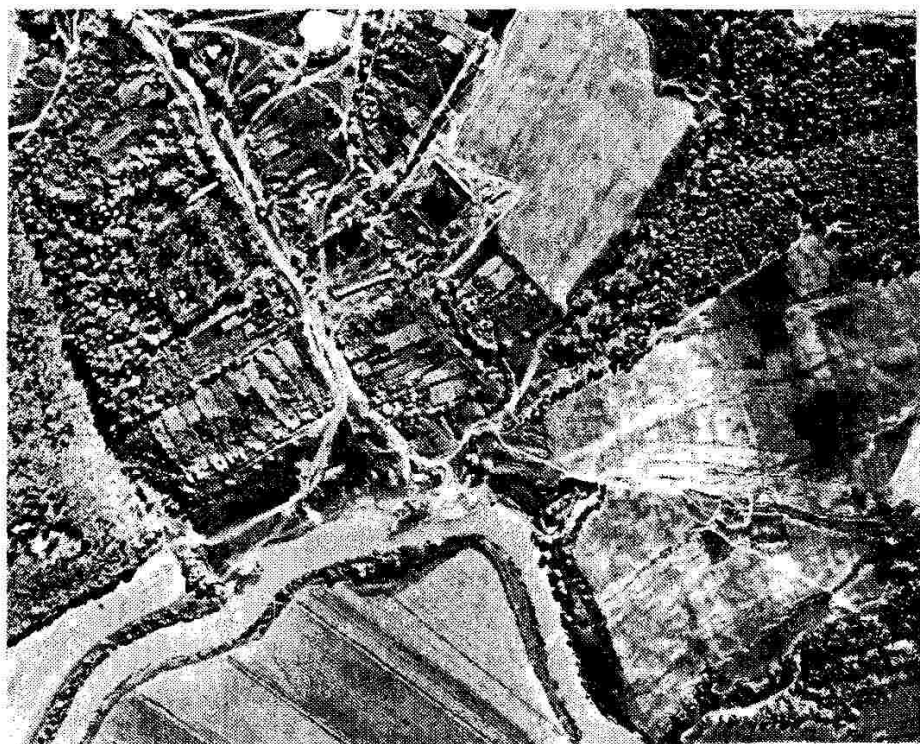


Рис. 16.2. Снимок поселения с участком, подверженным эрозии, изображенным также на рисунке 14.2



Рис. 16.3. Снимок того же поселения, полученный через 10 лет. Эродированный участок залесен

Чтобы обнаружить мелкие компактные гидрографические объекты и гидрографические сооружения (ключи, родники, колодцы и т. п.), используют косвенные признаки (геоморфологическую приуроченность, наличие сходящихся к одной точке троп, изменение тона изображения растительности и грунта в местах выхода на поверхность грунтовых вод). Сведения о качестве воды обычно получают из справок, карт и других источников.

Болота подразделяют на низинные, верховые и переходные с выделением в них окон чистой воды, участков с растительностью, пригодной при раннем скашивании на корм скоту, осушенных, но не используемых в сельскохозяйственном производстве участков, торфоразработок и участков, покрытых древесно-кустарниковой растительностью.

Основной дешифровочный признак болот — текстура изображения. Она в зависимости от типа болот, их закустаренности (залесенности), проходимости и других характеристик очень разнообразна и неоднородна. Но в большинстве случаев она достаточно специфична. Косвенные признаки болот: приуроченность к обширным плоско-горизонтальным участкам местности, отсутствие следов сельскохозяйственной обработки, наличие проселочных и полевых объездных дорог, а также наличие торфоразработок и др.

Состав растительного покрова болот в камеральных условиях распознается неуверенно.

Дешифрируются земли, не используемые в сельскохозяйственном производстве: пески, галечники, каменистые россыпи, выходы коренных пород, takyры, солончаки, участки, загрязненные и занятые отходами промышленного производства, места добычи полезных ископаемых, участки с нарушенным почвенным слоем и др.

Многие из перечисленных объектов имеют специфические прямые признаки (тон, текстура) и косвенные (определенная территориальная приуроченность, природно-климатическая обусловленность и т. п.). Достоверность камерального опознавания некоторых из этих объектов недостаточна.

Из естественных *форм рельефа* дешифрируют: сухие русла, овраги и промоины, обрывы, осыпи, скалы, оползни, карстовые воронки, линии резкого изменения крутизны задернованных склонов, бровки балок и др. Показывают также искусственные элементы рельефа: валы, дамбы, участки террасированных склонов, изрытые места, курганы и ямы, если их диаметр и высота (глубина) более 1 м.

Большинство указанных элементов выявляют и опознают при помощи стереоскопа. Топографические элементы местности показывают без их количественных характеристик (эксплуатационных характеристик мостов, численных параметров леса, глубин бродов и др.).

16.3. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ РАССМАТРИВАЕМОГО ВИДА ДЕШИФРИРОВАНИЯ. НОРМЫ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ

При дешифрировании материалов аэрофотосъемки для составления карт в масштабе 1:10 000 и 1:25 000 установлены следующие требования к точности нанесения элементов ситуации (в масштабе плана):

ошибка нанесения четкой границы объекта относительно ее изображения не должна превышать 0,2 мм;

уклонение контрольных определений нечетко выраженной в натуре границы (например, сенокос суходольный и заболоченный) не должно превышать 1,5 мм;

уклонение контрольных определений инструментально нанесенной на дешифрируемые материалы четкой в натуре границы (положения) объекта не должно превышать 0,3 мм.

В порядке генерализации информации элементы ситуации не дешифрируют, если площадь их в масштабе плана не превышает:

2 мм² для пашни, многолетних насаждений и культурных пастбищ на орошаемых и осушаемых массивах, а также для других угодий и несельскохозяйственных земель, вкрапленных в перечисленные угодья;

4 мм² для тех же объектов на немелиорированных землях;

10 мм² для остальных сельскохозяйственных угодий, а также для вкрапленных в них несельскохозяйственных земель;

50 мм² для различающихся по качественным признакам сельскохозяйственных угодий (например, пашни чистой и засоренной камнями), а также для несельскохозяйственных земель;

100 мм² для различающихся по характеристикам участков древесной и кустарниковой растительности в общем массиве.

Озера, пруды, мочажины, колки дешифрируют независимо от их площади. Острова на водоемах показывают, если их площадь более 5 мм². Отдельные ореховые и тутовые деревья показывают во всех случаях, а остальные — только на пашне. Промоины на пашне дешифрируют, если их длина в масштабе плана более 5 мм; длина прочих линейных элементов ситуации должна превышать 10 мм.

16.4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПРИ ДЕШИФРИРОВАНИИ СНИМКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАДАСТРОВЫХ КАРТ

Такое дешифрирование выполняют преимущественно комбинированным способом. В технологии способа можно выделить следующие основные этапы: подготовительный; камеральное дешифрирование; полевая доработка и контроль результатов дешифрирования; оформление и сдача заказчику.

Подготовительному периоду предшествует составление и согласование с заказчиком технического предписания (ТП) на производство съемочных работ. Для этого изучают физико-географические особенности картографируемого района, технические условия создания или обновления карт. Подготовительные работы для дешифрирования проводят согласно ТП. От тщательности выполнения этих работ в значительной мере зависит качество комбинированного дешифрирования.

Главным в выполнении подготовительного этапа являются: сбор, систематизация, анализ и подготовка к использованию юридических, картографических, инженерно-экономических сведений и материалов, а также подлежащих дешифрированию материалов аэросъемки, к которым относятся:

районные карты землепользований и землевладений, включая участки бессрочного пользования, по состоянию на 1 ноября предшествующего дешифрированию года;

списки основных землепользований и землевладений в пределах дешифрируемой территории и размещающихся в их границах других землепользователей (школы, больницы, карьеры и др.) с указанием их наименований и закрепленных за ними площадей; сведения о ширине полос отвода дорог подтверждают справкой дорожного отдела;

выкопировки (на прозрачной основе) границ землепользований и землевладений с планов государственных актов на право пользования землей с землеустроительных планов, с планов участков посторонних землепользователей; ведомости координат поворотных пунктов границ, а также сведения об изменении границ;

фотокарты (вычерченные фотопланы) или материалы дешифрирования прежних лет, а при их отсутствии штриховые, желательно корректированные, планы землепользований сельскохозяйственных предприятий с выделенными участками сенокосов и пастбищ коренного улучшения, заложенных на пашне культурных пастбищ;

экспликация земель на момент выполнения подготовительных работ;

планы (схемы, рабочие чертежи) осушительных и оросительных систем и сооружений на них; материалы инвентаризации мелиорированных земель и обводненных пастбищ; справки и документы о режиме водоемов;

копии официальных документов и соответствующие графические материалы о переводе одних сельскохозяйственных угодий в другие, а также об исключении из учета мелиорированных земель;

топографические карты наиболее крупного масштаба последнего издания.

Все юридические материалы заверяет представитель землеустроительной службы района.

На район работ подбирают снимки, анализируют их дешифрируемость. При этом выясняют необходимость и кратность увеличения изображения. Масштаб изображения должен обеспечить извлечение необходимой информации и удобство фиксирования результатов дешифрирования. Важно, чтобы формат дешифрируемого материала был удобен для работы, особенно в поле. Поэтому, например, аэроснимки масштаба 1:40 000 обычно увеличивают не до масштаба изготавливаемого плана (1:10 000), а до масштаба 1:15 000...1:17 000. Формат увеличенных до масштаба плана отпечатков (70 × 70 см) уменьшается при этом примерно до размера 45 × 45 см, качество дешифрирования при этом остается достаточным. При меньшем различии масштабов фотографирования и плана для дешифрирования можно изготавливать фото-схемы.

На основе анализа собранных материалов разрабатывают редакционное предписание на производство дешифровочных работ, в котором указывают состав исполнителей, особенности района работ и категорию трудности, дают соответствующие рекомендации по технологии камерального дешифрирования, полевого обследования, контроля качества и оформления результатов дешифрирования, устанавливают сроки выполнения работ. Затем исполнителям выдают задание с четким определением границ их рабо-

ты. Такими границами могут служить рамки планшетов принятой разграфки, границы землепользований, линейные элементы местности (реки, дороги и т. п.).

На дешифрируемые материалы возможно точно наносят предварительное положение границ сельскохозяйственных предприятий, землепользований и землевладений или рамки планшетов, если дешифрирование выполняют по планшетах. Распределяют подлежащую картографированию территорию между исполнителями. На дешифрируемых материалах ограничивают рабочие площади.

Границы рабочих площадей вычерчивают синей тушью, а границу участка работы исполнителя — черной. Для сводки результатов уже выполненного на смежных участках дешифрирования в полосе шириной 2 см вдоль границы с внешней стороны наносят полученную ранее ситуацию. Ниже рабочей площади ставят штамп для указания времени дешифрирования, должности и фамилии исполнителя, а также должностного лица, проверявшего и принявшего работу.

16.5. ТЕХНОЛОГИЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дешифрирование начинают с нанесения точного положения границ основных землепользований и землевладений. Рассмотрим общую технологию их дешифрирования. При этом может оказаться, что межевые знаки (поворотные пункты границ) сохранились на местности и надежно опознаются на фотоизображении; межевые знаки сохранились на местности, но не опознаются на фотоизображении; межевые знаки на местности не сохранились.

Дешифрирование границ в первом случае сводится к простому опознаванию, фиксированию наколами и соответствующему оформлению опознанных знаков на дешифрируемых материалах. Реализации этого варианта, как уже отмечалось, способствует маркирование знаков перед аэросъемкой.

Во втором случае межевые знаки наносят на фотоизображение в поле геодезическим путем с использованием приемов, описанных в разделе 15.9. Для решения той же задачи в камеральных условиях данные о положении границ получают с дешифрованных снимков или фотопланов прежних лет, если граница с тех пор не изменилась. Отождествление точек фотоизображения выполняют стереоскопически или с помощью линейных засечек (пропорциональным циркулем) от сохранившихся и надежно отождествляемых точек фотоизображения.

В третьем случае, при отсутствии координат поворотных пунктов, границу дешифрируют по указанию уполномоченных смежных землепользователей в поле.

Если фактическая граница землепользования не соответствует юридической, то на дешифрируемые материалы наносят обе границы с внесением соответствующего примечания в акт сдачи-приемки результатов дешифрирования.

Опознанные надежно в камеральных условиях участки границ вычерчивают тушью. Оставшиеся участки дешифрируют в поле.

Границы поселений наносят на изображение по их фактическому положению. Распознавание границ существенно упрощается, если на местности они обозначены канавами, изгородами, рядами деревьев или кустарников, совпадают с дорогами.

Если фактическая граница поселения совпадает с юридической, то на дешифрируемых материалах их обозначают сплошной красной линией, в противном случае, а также при отсутствии юридической границы на местности — точечным пунктиром.

Границы орошаемых и осушенных земель на дешифрируемые материалы наносят с планов инвентаризации мелиорированных земель, с планов их графического учета или исполнительных чертежей, составленных при сдаче этих земель в эксплуатацию.

При камеральном дешифрировании прочих объектов необходимы полный комплекс признаков, а также материалы, собранные на подготовительном этапе. Дешифрирование в большинстве случаев выполняют по принципу последовательного перехода от общего к частному. Сначала дешифрируют основные линейные топографические объекты (дороги, гидрографические элементы), затем общие контуры лесных массивов и сельскохозяйственных угодий и далее анализируют каждый из выделенных массивов. Используют и другие варианты последовательности дешифрирования.

Названия поселений, рек, озер, урочищ, сведения о характеристиках лесов, болот, границы затопления земель устанавливают с помощью топографических карт.

Условные знаки надежно опознанных элементов ситуации вычерчивают тушью. Неуверенно дешифрированные и вообще не дешифрирующиеся участки (объекты) выделяют на снимках и переносят на репродукцию накидного монтажа или фотосхему. На основе этих материалов, а также с учетом полученных в местных землеустроительных органах сведений о происшедших после аэросъемки изменениях в районе работ проектируют маршруты полевой доработки и контроля результатов камерального дешифрирования.

Полевые работы в зависимости от числа и плотности нуждающихся в полевом обследовании участков, от общей ситуационной плотности района работ и от местных дорожных условий выполняют путем пешего обхода или с привлечением наземных и воз-

душных транспортных средств. Последние варианты должны быть экономически обоснованы.

Вдоль свободных от сводки границ участка дешифрируют полосу за его пределами шириной 1 см в масштабе плана.

Полевую часть работ выполняют при участии уполномоченного представителя землепользования, землевладения. По необходимости для консультации привлекают должностных лиц хозяйств и представителей землеустроительной службы района.

Результаты дешифрирования в поле фиксируют с помощью жесткого карандаша или притупленной иглы с обязательным ежедневным вычерчиванием результатов тушью. Дешифровщики Госземкадастрсъемки для нанесения на дешифрируемые материалы (преимущественно ортофотопланы) условных знаков используют цветные «ручки-корректоры» (типа фломастеров). Другим концом такой ручки можно удалить с дешифрируемого изображения ошибочно нанесенные элементы ситуации.

Обнаруженные в поле не изобразившиеся объекты наносят на фотоизображение приемами, изложенными в разделе 15.9.

По мере выполнения дешифрирования исполнитель согласует (сводит) результаты по смежным границам рабочих площадей, планшетов, хозяйств.

В целях предупреждения методических ошибок дешифрирования руководитель подразделения контролирует все этапы работ, особенно на начальной стадии. Замечания по работе и рекомендации заносят в акт текущего контроля.

Завершив работу, исполнитель формирует «Дело по дешифрированию», включив в него дешифровочные материалы и документы, перечень которых устанавливают согласно действующим инструкциям или другим нормативным указаниям.

Законченную работу принимает руководитель работ с обязательным выездом на место работы. При этом устанавливают соответствие результатов дешифрирования требованиям инструкции и дополнительным техническим условиям. Обращается внимание на выполнение рекомендаций, указанных в актах текущего контроля, на качество вычерчивания результатов дешифрирования и выполнения сводок, на наличие и правильность оформления необходимых документов. Полноту и достоверность результатов дешифрирования контролируют выборочно, непосредственно в поле, на наиболее сложных участках. Обнаруженные недостатки устраняет исполнитель.

Дальнейшая приемка выполненных работ осуществляется руководством экспедиции и представителем технического отдела с оформлением актов. Принятые материалы представляют для проверки и согласования с представителями организации-заказчика.

16.6. ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ ПОСЕЛЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ КАДАСТРА И ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЗЕМЕЛЬ

Результаты, получаемые в процессе дешифрирования снимков, используют для создания базовых планов состояния и использования земель, информационных земельно-кадастровых баз данных и геоинформационных систем (ГИС). Планово-картографические материалы и информационные базы данных, хранящиеся на бумажной основе или на магнитных носителях, являются основой для ведения Государственного земельного кадастра. Содержащиеся в них сведения используют при регистрации прав собственности, организации постоянного контроля за использованием земель, налогообложении и т. п. Наибольшее внимание Федеральная землеустроительная служба и местная администрация уделяют территориям городов, поселков городского типа и сельским поселениям.

При выполнении работ по дешифрированию руководствуются инструкциями и наставлениями, принятыми в производстве, а также техническим заданием, определяющим требования к содержанию и объему получаемой информации.

Дешифрирование выполняют полевым или комбинированным способом на увеличенных фотоизображениях. Масштаб увеличенных снимков (или их фрагментов) соответствует масштабу создаваемого кадастрового плана. Для сельских поселений используют масштаб 1:1000...1:2000, для городов — 1:500...1:1000.

В границах сельских поселений и городов подлежат дешифрированию следующие земельные участки:

- жилой застройки (земли под многоэтажными строениями и земли между ними, функционально связанные и закрепленные за зданиями и сооружениями, а также территории для их технологического обслуживания);

- общественной застройки (земли под учреждениями образования, науки, здравоохранения, культуры, искусства, общественно-го питания, торговли, гаражами и др.);

- земли общественного пользования (улицы, площади, проспекты, дороги, проезды, переулки, парки, лесопарки, бульвары, скверы, набережные, пляжи и др.);

- под промышленной, коммунальной и складской застройкой; транспорта, связи, инженерных коммуникаций (железные и автомобильные дороги, речной транспорт; земли под трубопроводами, линиями электропередач, под сооружениями радиовещания и телевидения и т. д.);

- природно-заповедного, природоохранного, оздоровительного, рекреационного и историко-культурного назначения;

- водного фонда (занятые водными объектами: реками, озерами, водохранилищами, водоохранными зонами, гидротехничес-

кими и водохозяйственными сооружениями и другими водными объектами);

сельскохозяйственного назначения (сельскохозяйственные угодья, земли акционерных и фермерских хозяйств, колхозов, муниципальных и подсобных хозяйств, земли под коллективными садами и огородами и т. п.);

запаса;

военных объектов, режимных зон и иные земли;

прочие земли (карьеры, копаные места, каменистые территории и т. п.).

Классификатор объектов может быть расширен или уменьшен в зависимости от поставленной задачи.

Подготовительные работы при дешифрировании снимков. Дешифрирование снимков для целей кадастра и инвентаризации земель имеет свои отличительные особенности, обусловленные спецификой определяемой информации. Поэтому подготовительные работы — наиболее ответственный этап в технологическом комплексе работ. Просчеты, допущенные на этом этапе, могут привести к увеличению материальных и трудовых затрат, сроков выполнения работ и в итоге к увеличению стоимости конечной продукции.

На подготовительном этапе выполняют следующие виды работ:

подбирают увеличенные снимки или их фрагменты на участки изучаемой территории;

отграничивают рабочие площади на отобранных снимках;

подбирают топографические материалы на участки работ: топографические планы (фотопланы) крупных масштабов $1\text{ м} = 1:500 \dots 1:5000$, топографические карты масштаба $1:10\ 000$, $1:25\ 000$ и мельче, копии районных карт масштаба $1:50\ 000$ с нанесенными кадастровыми номерами, специальные карты и планы (почвенные, геоботанические, лесные и т. п.);

получают копии генеральных планов и другой градостроительной документации, перспективные планы развития и правила застройки городов и поселений;

собирают материалы (копии) предыдущих инвентаризаций, документы и материалы по отводу земельных участков, выносу в натуру, установлению и восстановлению границ землевладений, землепользований и поселений;

получают материалы обследований индивидуальных земельных участков и построек, выполненных бюро технической инвентаризации (БТИ), и материалы исполнительной съемки, в которых отражены сведения о землевладельцах, землепользователях;

получают сведения о наличии зон ограничения и обременения по данным организаций, в ведении которых находятся линии электропередач, связи, трубопроводы, коммунальные сети и т. п.;

составляют списки землепользователей (физических и юридических лиц);

собирают на каждое поселение сведения о распределении земель по целевому назначению, оформляют в виде таблиц и заверяют подписью и печатью председателя райкомзема (горкомзема) и местной администрации;

проводят по данным районной землеустроительной службы разделение объекта на кадастровые зоны, массивы и кварталы;

согласуют существующие и проектные границы поселений в архитектурно-планировочных управлениях (отделах).

Технология дешифрирования снимков при кадастровых работах и инвентаризации земель состоит из двух этапов: камеральной подготовки и полевого обследования территории. На первом этапе, используя материалы подготовки, дешифрируют все объекты, подлежащие отображению на базовом плане. При этом наносят границы тех объектов, дешифрирование которых не вызывает сомнения, а также границы поселений, кадастровых зон, массивов, кварталов. На втором полевом этапе опознают объекты, достоверность дешифрирования которых в камеральных условиях была низкой, а также обследуют все камеральные дешифрированные объекты. Выполняют досъемку не изобразившихся объектов. Комбинированный способ позволяет уменьшить объемы чертежных работ в полевых условиях, сократить время полевых работ при одновременном повышении достоверности, полноты и точности результатов дешифрирования. Полевой этап дешифрирования выполняют опытные специалисты с участием представителей местных администраций или рай(гор)комземов.

Дешифрирование административных границ поселений выполняют аналогично изложенному в разделе 16.2. На увеличенных снимках (фрагментах) по согласованным на этапе подготовке материалам накалывают и обозначают поворотные точки границ поселений и границ кадастровых зон, массивов, кварталов. Их нанесение уточняют в полевых условиях в присутствии представителя администрации. В случае согласованного изменения границы ее новое положение вычерчивают сплошной линией (красного цвета), а старую границу аккуратно зачеркивают и делают пояснительную запись в журнале полевого дешифрирования. Достоверность установления и нанесения границ подтверждают на каждом дешифрированном снимке (фрагменте) подписями и печатями представителей администрации, председателя рай(гор)комзема или главного архитектора района (города).

Дешифрирование границ землевладений, землепользований — ответственная, сложная и юридически значимая часть полевых работ. Положение поворотных точек и межевых знаков границ участков определяют в натуре и опознают (или уточняют) на снимках совместно с представителем местной администрации и, желательно, в присутствии землевладельца, землепользователя. При этом определяют и наносят на снимки границы участков по их фактическому использованию. Непосредственно опознаваемые поворот-

ные точки наносят на увеличенные снимки с точностью 0,1 мм. Если поворотные точки не изобразились на снимке или плохо распознаются, то для их нанесения выполняют промеры рулеткой от ближайших трех четких контурных точек. Результаты измерений и абрис заносят в журнал полевого дешифрирования. Чтобы перенести результаты измерений на снимок, определяют масштаб в данной зоне снимка (частный масштаб зоны). В компьютерных технологиях обработки снимков при кадастровых съемках и инвентаризации земель применяют два способа отображения неизобразившихся объектов по результатам полевых измерений. В первом способе объекты наносят на изображение, выведенное на мониторе компьютера, после фотограмметрических преобразований снимков. Во втором случае фотограмметрически преобразованные снимки печатают на принтере или плоттере. Получают одномасштабные изображения на бумажной основе, а далее по результатам промеров неизобразившиеся объекты наносят в полевых условиях.

В границах земельных участков показывают жилые дома и капитальные строения. При этом должно выполняться условие — положение здания и сооружения определяется по его основанию (цоколю). В зависимости от вариантов изображения построек применяют различные приемы их нанесения на крупномасштабных снимках (эти приемы рассмотрены в разд. 14.10).

При наличии внутри землевладения участка, принадлежащего другому землевладельцу, определяют и согласовывают границы каждого с выделением земель общего пользования (проезды, проходы, земли технологического назначения и т. п.).

В присутствии землевладельца заполняют декларацию о факте использования земельного участка физическим или юридическим лицом. В декларации записывают анкетные данные, адрес и кадастровый номер, юридические документы, указывающие на право владения земельным участком, вид собственности на землю и ее целевое назначение, площадь участка по документам, вычерчивают схему участка и т. п. Декларацию подписывает землевладелец, а информацию, занесенную в нее, используют в дальнейшем при создании кадастровых баз данных.

В случае выявления спорных границ в полевом журнале и в акте согласования границ отмечают существо заявленного спора, а сами границы показывают пунктирной линией со слов землевладельцев.

Для повышения точности кадастровых планов и результатов инвентаризации земель, выполняемых по увеличенным снимкам, в состав работ по дешифрированию включают линейные промеры. Их делают вдоль фасадных линий земельных участков, между поворотными точками границ землевладений, землепользований, а также отмеряют капитальные здания и сооружения. Линейные измерения выполняют с точностью 0,1 м.

Дешифрирование линейных объектов (улиц, проездов, автомобильных и железных дорог, различных трубопроводов, линий электропередач и связи) имеет свои особенности. Большинство линейных объектов имеют полосы отчуждения (отвода) или охранные зоны, которые подлежат дешифрированию и обозначению соответствующим условным знаком. Объекты, расположенные в охранных зонах, дешифрируют в обязательном порядке, а находящиеся в полосах отвода — по дополнительным требованиям.

При дешифрировании улиц выделяют:

проезжую часть по линии бордюрного камня, по ширине твердого покрытия или по факту использования;

тротуары, располагающиеся между фасадной линией и проезжей частью улицы;

газоны, находящиеся между проезжей частью улицы и тротуаром;

канавы.

В границах поселений дешифрируют шоссе, бульвары, проспекты, проезды, тупики, включая сооружения на них (например, остановки общественного транспорта, трансформаторные подстанции и т. п.). При наличии в поселениях названий улиц, площадей, бульваров, нумерации построек их наносят на дешифрируемый материал.

Профилированные дороги (шоссе, автостреды) дешифрируют по ширине твердого покрытия с указанием его типа и ширины полосы отвода. Дешифрированию подлежат находящиеся на них сооружения.

Грунтовые дороги дешифрируют за пределами застроенной территории.

Железные дороги дешифрируют в границах полосы отвода.

Границы полосы отвода и охранной зоны определяют на основании правоустанавливающих документов или по материалам земельного отвода.

Садово-дачные кооперативы и товарищества, земли, предоставленные жителям поселения во временное пользование, земли под застройкой гаражами, сараями и т. п. дешифрируют одним общим контуром с указанием кадастрового номера.

В границах поселений дешифрируют по дополнительным требованиям выходы подземных инженерных коммуникаций (смотровые колодцы, выходы подземных переходов, трубопроводов), наземные инженерные коммуникации и сооружения на них.

Качество дешифрирования определяют полевым контролем и при окончательной приемке работ. Для этого проверяют 15...30 % объема выполненных работ. Контролируют точность нанесения границ объектов, для чего выборочно промеряют между поворотными точками границы землевладений, определяют достоверность и полноту семантической информации о землевладельцах, землепользователях.

По результатам дешифрирования формируют «Дело по дешифрированию», в которое входят дешифрованные увеличенные аэрофотоснимки (фрагменты), фотопланы или ортофотопланы; журналы полевого обследования, декларация о факте использования земель физическими или юридическими лицами, акты полевого контроля и т. п.

16.7. ВЫБОР СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ И УСЛОВИЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ДЕШИФРОВОЧНЫХ РАБОТ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ КАДАСТРОВЫХ КАРТ И ПЛАНОВ

Основными условиями решения поставленных в данном разделе задач являются:

достаточность семантической информации на получаемых снимках;

минимальная стоимость аэрофотосъемки.

Последнее условие связано с масштабом фотографирования (чем мельче съемочный масштаб, тем дешевле аэрофотосъемка). Предел уменьшения масштаба регламентируется отображаемостью на снимках минимальных по размерам элементов местности, подлежащих дешифрированию или используемых в качестве индикаторов при их опознавании. Заметим, что иногда может оказаться более выгодной полевая инструментальная досъемка некоторых мелких по размерам объектов, нежели укрупнение съемочного масштаба для их отображения на снимках.

Элементы местности, обеспечение отображаемости которых обязательно, относят преимущественно к группе протяженных (линейных) объектов. Это дороги, тропы, осушительные и оросительные каналы, различные ограждения, межки и т. п. Вспомним (раздел 2.2), что разрешающая способность R фотообъектива, аэроплёнки и съемочной системы в целом определяется именно числом линий, раздельно отображающихся в погонном миллиметровом интервале. Следовательно, с достаточно высокой степенью корректности можно воспользоваться величиной R съемочной системы при предвычислении знаменателя минимального масштаба аэрофотосъемки, применяя при этом упрощенную (не учитывающую форму объектов) формулу

$$m = 2R_c L_f K^{0,36}, \quad (16.1)$$

где L_f — необходимое разрешение (на местности) съемочной системы; K — яркий контраст объект/фон, определяемый по формуле

$$K = (\gamma_{об} - \gamma_{ф}) / \gamma_{об}, \quad (16.2)$$

здесь $\gamma_{об}$ и $\gamma_{ф}$ — интегральные коэффициенты яркости объекта и фона, берут из публикаций или собственных спектрометрических исследований.

В качестве иллюстрации к сказанному определим отображаемость на снимках масштаба 1:40 000 дорог и троп на сухих песчаных и глинистых грунтах, проходящих по покрытой зеленой растительностью территории. Яркостный контраст будет порядка 0,7. При разрешающей способности съемочной системы 25 мм^{-1} на снимках изобразятся тропы, ширина которых более 0,8 м. На снимках, полученных АФА с $R_c = 80 \text{ мм}^{-1}$, ширина отображающихся троп уменьшится примерно в три раза.

При выполнении этих расчетов следует также учитывать, что обнаружению на снимках малоконтрастных возвышающихся объектов способствуют собственные и особенно падающие от них тени. К таким объектам относят, например, изгороди и заборы, геодезические пирамиды и отдельные кусты и т. п. Столбы линий электропередач обнаруживаются в большинстве случаев только по падающим теням. Отображаемость светлых элементов на темном фоне существенно повышается также вследствие иррадиации (см. разд. 9.1). Благодаря этому явлению отображаемость светлых троп и дорог на темном фоне зеленой растительности возрастает.

Отметим, что в производстве иногда многие годы используют единый «традиционный» съемочный масштаб независимо от характеристик используемого АФА и специфики картографируемой территории.

Рассчитанный масштаб аэрофотосъемки может быть получен в результате различных комбинаций фокусного расстояния АФА и высоты фотографирования. При оптимизации этих параметров в целях дешифрирования следует иметь в виду, что угол поля изображения АФА (2β) при том же значении f существенно изменяется в зависимости от формата кадра используемой камеры. Например, при $f = 300 \text{ мм}$ и формате кадра $18 \times 18 \text{ см}$ $2\beta = 47^\circ$, а при формате кадра $30 \times 30 \text{ мм}$ $2\beta = 70^\circ$. Значение 2β важно при съемке и дешифрировании поселений с многоэтажной застройкой. С увеличением угла расширяется изображаемая на снимке площадь и соответственно увеличиваются участки, закрытые зданиями («мертвые» зоны) (рис. 16.4). Необходимые объекты, располагающиеся в этих зонах, доснимают инструментально.

Дешифрирование снимков выполняют в пределах их рабочих площадей. Поэтому угол поля используемого изображения сократится до значения $2\beta'$, которое, как это уже отмечалось в разделе 16.10, может быть сокращено путем увеличения продольных и поперечных перекрытий снимков с обязательным экономическим обоснованием этого варианта. Размеры (длина) мертвой зоны (см. рис. 16.4)

$$L = hl/f, \quad (16.3)$$

где h — высота здания; l — расстояние от главной точки снимка до наиболее удаленной точки рабочей площади.

С помощью этой формулы в частном случае можно определить необходимое фокусное расстояние АФА по заданному значению L .

При съемке поселений с разреженной многоэтажной застройкой и с малым количеством древесно-кустарниковой растительности вблизи зданий можно использовать и широкоугольные АФА. В этом случае положение фундаментов определяется с помощью перекрывающихся снимков данного и смежных маршрутов как в ручном варианте (см. разд. 16.10), так и при компьютерной фотограмметрической обработке. Отметим, что при этом отпадает необходимость введения поправок за ширину карнизов и свесов крыш, а также решается проблема «мертвых» зон.

По ближайшему стандартному значению f и уже выбранному съемочному масштабу определяют необходимую высоту фотографирования.

При камеральном дешифрировании сельскохозяйственных угодий тон изображения, как было установлено ранее, не обладает существенной информативностью. Разнотонность изображения угодий нужна главным образом для территориального разделения их, т. е. для разграничения. Решению этой задачи способствуют структурные особенности их поверхности, расположенные вдоль границ дороги, межки, канавы, изгороди, а также тени возвышающихся массивов культурных растений. Поэтому с точки зрения разграничения сельскохозяйственных угодий оптимизация времени съемки и сочетание типа аэропленки и светофильтра в зависимости от сезонного изменения яркости поверхности угодий не имеют большого значения. Дешифрируемость прочих объектов (топографических и сельскохозяйственного назначения) также мало зависит от времени съемки и съемочной системы. Поэтому аэрофотосъемку в целях выполнения землеустроительных и кадастровых работ выполняют обычно с использованием панхроматических и изопанхроматических аэропленок с фильтрами, ограничивающими влияние атмосферной дымки. Единственное условие, выполнение которого желательно, как уже отмечалось, — обеспечение правильного показа береговой линии водных объектов (уровень воды в водоемах при аэросъемке должен соответствовать среднему устойчивому уровню летнего периода).

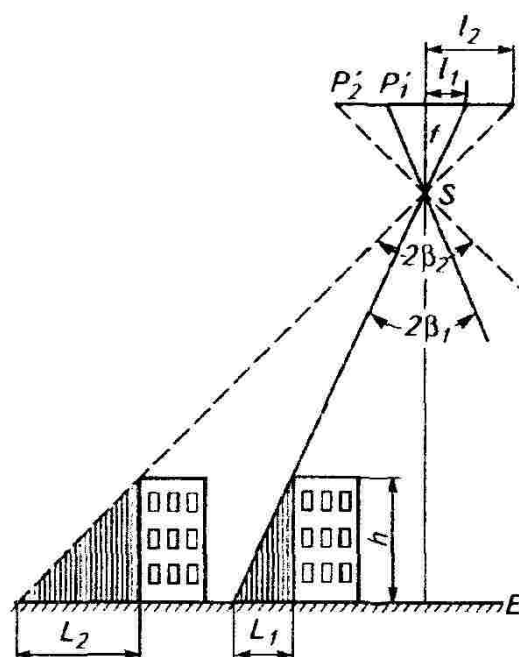


Рис. 16.4. Схема образования «мертвых» зон при съемке поселений с многоэтажной застройкой

Аэросъемку поселений с большим количеством древесно-кустарниковой растительности выгодно выполнять до распускания листвы или после ее опадения. Аэросъемка поселений с многоэтажной застройкой может быть эффективной при сплошной высокой облачности.

Результаты оптимизации параметров и условий аэросъемки не всегда совпадают с требованиями фотограмметрической обработки снимков. Этот аспект оптимизации рассматривался в разделе 13.3. Основные противоречия возникают при выборе высоты фотографирования и соответственно фокусного расстояния съемочной системы, если предполагается стереофотограмметрическая обработка крупномасштабных снимков поселений с многоэтажной застройкой. О возможных путях устранения противоречия уже отмечалось.

Контрольные вопросы и задания

1. Можно ли выбором параметров аэрофотосъемки исключить процедуру субъективной генерализации, заменив ее естественной фотографической генерализацией? Ответ обосновать. 2. Досъемку неизобразившихся элементов ситуации на снимках обычно выполняют с помощью линейных промеров. Можно ли использовать для выполнения этих работ угловые измерения? 3. Рассчитать, с какой точностью следует определять высоту зданий при вычислении поправок в положение изображения их крыш.

Глава 17

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ

Технологическая схема представляет собой последовательность взаимосвязанных технических и организационных процессов, в результате выполнения которых получают цифровую модель местности. При создании моделей местности по материалам аэро- и космических съемок:

- разрабатывают технико-экономический проект;
- выполняют аэро- или космическую съемку;
- осуществляют геодезическую привязку снимков;
- проводят дешифрирование снимков;
- выполняют фотограмметрическую обработку снимков и получают цифровые модели местности.

Каждый из перечисленных процессов имеет свои особенности и способы реализации. Поэтому, сочетая их, можно получить множество вариантов технологий создания цифровых моделей местности. На выбор технологической схемы прежде всего влияет вид конечной продукции: требуемая метрическая точность, содержание и объем семантической информации модели. Существенные факторы, определяющие выбор технологии, — техническое

обеспечение (компьютеры, программы, устройства ввода-вывода), квалификация исполнителей и сроки выполнения работ. Помимо этого учитывают физико-географические и климатические факторы района производства работ. С позиций экономики технология должна обеспечивать минимальные затраты на единицу выходящей продукции, например затраты на создание планово-картографической продукции на 1 га или 1 км².

Рассмотрим некоторые технологические схемы получения информационных моделей местности.

17.1. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СЕЛЬСКИХ ФОТОПЛАНОВ НА ТЕРРИТОРИИ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Технология, предложенная профессором Б. Н. Родионовым, базируется на теоретическом обосновании и выводах, выполненных в части II. Сельскими фотопланы называются потому, что их используют для организации и управления сельскохозяйственным производством, обеспечивая достаточную точность определения длин линий и площадей. Технология создания подобных фотопланов предельно проста и экономична. Их изготавливают и передают пользователю в кратчайшие сроки после аэрофотосъемки. Суть технологии заключается в минимизации влияния угла наклона снимка и рельефа при аэрофотографировании. Аэрофотоснимки получают с самолетов Ту-134СХ, обеспечивающих без гиросtabilизирующих установок углы наклона не более 1 градуса с высоты 10 000 м аэрофотоаппаратами с фокусным расстоянием объектива 1000 мм. Полученные снимки увеличивают до масштаба выпускаемых сельских фотопланов, равного 1:2000. Фотопечать осуществляют на листах малодеформируемой фотобумаги размером 50 × 60 или 60 × 60 см. Один такой лист покрывает на местности участок площадью 120 или 144 га. Для большинства регионов центрально-европейской части России в пределах такой площади редко встречается разность высотных координат более 40 м, т. е. отклонение от средней секущей плоскости не более 20 м. При таких высотах участков местности и высоте аэрофотографирования 10 000 м влиянием рельефа можно пренебречь. При большой разности высот точек снимаемой местности размер листа фотоплана уменьшают так, чтобы на местности, изображенной на нем, разность высот была не более заданного значения. Каждый лист масштабируют отдельно. Точность получаемых таким способом фотопланов не ниже 1/100. На этом процесс фотограмметрической обработки заканчивается. Пользователи, а ими являются сотрудники местных администраций, райкомземов, управлений архитектуры и т. п., получают для работы материалы, соответствующие современному состоянию территории и достаточной точности.

Сельские фотопланы называют также свободными, так как их изготавливают без опорных точек, имеющих геодезические координаты. Поэтому на них нет сетки геодезических координат и рамок трапеций государственной разграфки. Разграфка листов фотопланов приурочена к границам населенного пункта и кварталов застройки. На лицевой стороне каждого листа указаны направление на север и номинальный масштаб 1:2000, название населенного пункта и порядковый номер листа, когда изображение населенного пункта размещается на нескольких листах. На оборотной стороне приводят схему взаимного расположения листов. Для обеспечения более высокой точности измерений можно выпускать сельские фотопланы в масштабе 1:1000 и 1:500, для чего потребуется выполнять аэрофотосъемку в более крупных масштабах. Разумеется, при этом значительно возрастут материальные и трудовые затраты.

Сельские фотопланы могут служить основой для создания кадастровых планов. При небольших навыках работы с фотоизображением с помощью сельских фотопланов сотрудники администраций могут определять линейные и площадные размеры участков, решать спорные вопросы о границах соседних земельных участков, определять самозахваты земель и использование земель не по назначению и т. п.

17.2. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ БАЗОВЫХ ПЛАНОВ СОСТОЯНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ФРАГМЕНТОВ УВЕЛИЧЕННЫХ СНИМКОВ

Рассмотрим два варианта данной технологии. Эти варианты различаются последовательностью выполнения этапов дешифрирования и фотограмметрических преобразований.

В первом варианте дешифрирование предшествует фотограмметрической обработке. Для этого после аэрофотосъемки выполняют увеличенную печать фрагментов снимков с помощью прецизионных фотоувеличителей на недеформируемой фотографической бумаге. Таким образом, дешифрирование выполняется на разномасштабных фотоизображениях. Фотограмметрические преобразования дешифрированных снимков проводят для границ дешифрированных контуров в векторной форме.

Во втором варианте аэроснимки (негативы) сканируют, полученные растровые изображения трансформируют, выводят на печать с помощью картографических плоттеров. После этого производят дешифрирование одномасштабных изображений.

Технологическая схема последовательности выполнения основных процессов в первом варианте показана на рисунке 17.1.

Остановимся на содержании отдельных видов работ данной технологической схемы.



Рис. 17.1. Технологическая схема создания базового плана на основе фотограмметрической обработки одиночного снимка (вариант 1)

На подготовительном этапе собирают планово-картографические материалы на территорию работ, изучают наличие пунктов геодезической сети, рельеф, дорожную сеть, водные объекты, природно-климатические особенности района работ и т. п. В соответствии с требуемой точностью создаваемых планов рассчитывают параметры аэрофотосъемки, выбирают типы аэрофотоаппаратов, сроки производства аэрофотосъемочных работ.

Базовые планы поселений изготавливают в масштабе 1:500...1:2000, аэрофотосъемку же производят в масштабах в 5...10 раз мельче. Технические характеристики отечественных аэрофотоаппаратов и пленок позволяют выдерживать соотношение съемочного масштаба и плана до 5 крат. Применение съемочных средств и материалов зарубежных фирм увеличивает это соотношение до 10 крат и более. Фокусное расстояние объектива АФА выбирают возможно большим, а съемку выполняют с больших высот.

При составлении проектов и графиков выполнения основных видов работ используют следующие документы: договор с заказчиком, календарный план сдачи продукции, аэроснимки и репродукции накидного монтажа новой аэросъемки. При планировании используют схемы геодезической сети, каталоги координат пунктов геодезической сети, существующие планы и карты, материалы аэрофотосъемок прошлых лет и др. Технический проект составляют опытные высококвалифицированные специалисты. В проекте рассчитывают трудовые и денежные затраты по каждому виду камеральных и полевых работ и составляют графики их выполнения. На графиках указывают номенклатуру трапеции или номера участков и сроки выполнения работ. Графики позволяют установить взаимосвязь между отдельными видами работ, оптимально распределить специалистов, контролировать сроки выполнения и сдачи продукции заказчику.

Изготавливают фрагменты увеличенных снимков с помощью специальных прецизионных проекционных приборов, имеющих оптические системы с высокой разрешающей способностью и малой дисторсией. В качестве таких увеличителей могут быть использованы также фототрансформаторы, например Rectimat. Увеличенные фрагменты печатают с небольшим перекрытием, обеспечивающим нахождение в них общих для фрагментов снимка опорных точек. Выбранные точки используют в дальнейшей обработке для объединения изображений в единый электронный базовый план.

Общий подход к привязке снимков рассмотрен в разделе 13.1. Привязка фрагментов увеличенных снимков имеет некоторые методические особенности. В соответствии с наставлениями по созданию базовых планов первоначально создают опорную межевую сеть (ОМС) в данном поселении. Для этого на местности

закрепляют опорные межевые знаки (ОМЗ), координаты которых определяют в общегосударственной или условной системе. Среднеквадратическая погрешность положения межевого знака относительно пунктов государственной геодезической сети — не более 0,1 мм в масштабе создаваемого плана. Средняя квадратическая погрешность взаимного положения опорных межевых знаков составляет не более 0,05 мм в масштабе создаваемого плана. К ОМЗ осуществляют геодезическую привязку фрагментов увеличенных снимков. Опорные точки располагают на увеличенных фрагментах снимков по границе изображенного на них поселения, а также в зонах перекрытия фрагментов. Для повышения точности и надежности фотограмметрической обработки снимков число опорных точек увеличивают до 6...8. При значительных уклонах местности для учета влияния рельефа опорные точки размещают внутри территории поселения, как правило, координируя углы кварталов, однозначно идентифицируемых на изображении.

В случае, когда базовые планы создают в условной системе координат и нет необходимости их перевычисления в государственную геодезическую систему координат, возможно применение камеральной привязки снимков. Для этого используют старые планы и снимки новой аэрофотосъемки. Масштаб используемых планов должен обеспечить требуемую точность определения координат опорных точек. На данных материалах намечают и идентифицируют опорные точки, затем по старым планам определяют их геодезические координаты и составляют каталоги координат. Такой способ привязки снимков уступает по точности полевой привязке. Однако затраты на камеральную привязку снимков или их фрагментов существенно меньше по сравнению с полевым способом.

Технологии дешифрирования, ввода изображения, фотограмметрической обработки одиночных снимков и фрагментов увеличенных снимков, объединение (сшивка) снимков или фрагментов рассмотрены в соответствующих разделах учебника.

Редактирование электронного плана предусматривает в основном устранение погрешностей ввода изображения. Ввод изображения, как уже рассмотрено ранее, осуществляют с помощью дигитайзера или сканера. В первом случае получают векторное изображение в системе координат дигитайзера. Во втором случае от растрового изображения, полученного при сканировании снимков (или фрагментов), переходят к векторному. Первичное векторное изображение имеет пропуски, разрывы контуров, различные шумы (дублирование линий, образование малых замкнутых фигур в точках пересечения и т. п.). Для устранения погрешностей используют специальный программный редактор и ручную коррекцию. На этом же этапе по результатам полевых обмеров

на экране монитора наносят не изобразившиеся при аэрофотосъемке объекты.

Перенос результатов дешифрирования заключается в следующем. Используя дешифрованные увеличенные фрагменты снимков, материалы полевого обследования (декларации, полевые журналы) и иную информацию, оператор присваивает каждому контуру электронного плана семантическую характеристику. Для этого оператор из программного классификатора вызывает обозначение определенного класса объектов, устанавливает курсор на обучаемый контур и нажатием кнопки «мыши» завершает операцию. Классифицированный контур окрашивают в соответствующий цвет или заполняют условными знаками. Выполнив подобную операцию с каждым контуром, составляют экспликацию земель в границах поселения. Сумма площадей земель по классам и площадь поселения в его границах должны быть равны.

В результате выполнения рассмотренных технологических этапов создается базовый план. При сдаче заказчику базового плана оценивают:

- точность метрической информации (сравнивают геодезические координаты или длины, полученные с плана и в результате полевых измерений);

- достоверность семантической информации;

- сводный баланс земель в границах поселения;

- отражение фактической ситуации в отношении сложившихся границ и использования земельных участков.

После создания базового плана приступают к организации банка (базы) земельно-кадастровой информации. Базовый план при этом является картографической основой и предназначен для пространственного размещения земельно-кадастровой информации. Перечень сведений, подлежащих сбору и отражению в информационной базе, определяется нормативно-техническими документами и (или) техническим заданием.

Результатами работ, выполняемых в соответствии с рассмотренной технологической схемой, являются:

- кадастровые планы (планшеты с разграфкой, соответствующей масштабам 1:500...1:2000) на территорию поселения;

- планы отдельных земельных участков (с указанием владельца, фактической площади, длин линий, румбов сторон участка, смежников);

- база земельно-кадастровой информации.

Материалы могут быть представлены заказчику на магнитном носителе (на дискетах или CD-дисках) или на бумажной основе. Для исключения погрешностей при печати тиражирование на бумажном носителе выполняют с помощью прецизионных плоттеров.

Технологическая схема создания базовых планов по второму

варианту имеет преимущества перед ранее рассмотренной схемой. В ней отсутствует фотографическая печать фрагментов увеличенных снимков. Камеральное дешифрирование выполняется на экране монитора, что позволяет увеличивать изображение, изменять его контрастность, повышая проработку деталей в тенях, и более надежно идентифицировать поворотные точки границ земельных участков. При полевом дешифрировании используют одномасштабное частично дешифрированное фотографическое изображение, полученное в результате компьютерного увеличения цифрового изображения. Одномасштабность изображения позволяет точнее наносить неизобразившиеся объекты или их элементы по данным линейных промеров. Отпадает необходимость ведения полевого журнала измерений. При создании плана по рассмотренной технологической схеме снижаются затраты и ускоряется выпуск конечной продукции.

17.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЗДАНИЯ ОРТОФОТОПЛАНА СПОСОБОМ ЦИФРОВОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В данной схеме (рис. 17.2) технической базой является автоматизированная система кадастрового картографирования Intergraph.

Отличительная особенность данной технологии — использование стереоскопической обработки снимков, при которой в полной мере учитывается рельеф местности. Методы цифровой фотограмметрии позволяют организовать процесс изготовления ортофотопланов с требуемой точностью, но с меньшими материальными, трудовыми и временными затратами.

Рассмотрим основные этапы создания ортофотоплана.

Полевая *маркировка* представляет собой процесс установления на местности искусственных опорных знаков (опознаков). Маркировку искусственными опознавательными знаками выполняют на местности, где нет естественных контуров, уверенно опознаваемых на снимках. Эту работу проводят до аэрофотосъемки. На местности роют неглубокие канавы, наносят линии известью или используют иные материалы. Форма опознавательного знака может быть различной: крест, квадрат и т. п. Размер знака зависит от масштаба получаемых снимков. Маркировку осуществляют в заранее намеченных зонах, удовлетворяющих требованиям фотограмметрической обработки снимков. Для облегчения нанесения границ маркируют сохранившиеся поворотные пункты границ землепользований.

Масштаб аэрофотосъемки, высоту фотографирования рассчитывают таким образом, чтобы обеспечить необходимую точность определения плановых и высотных координат.

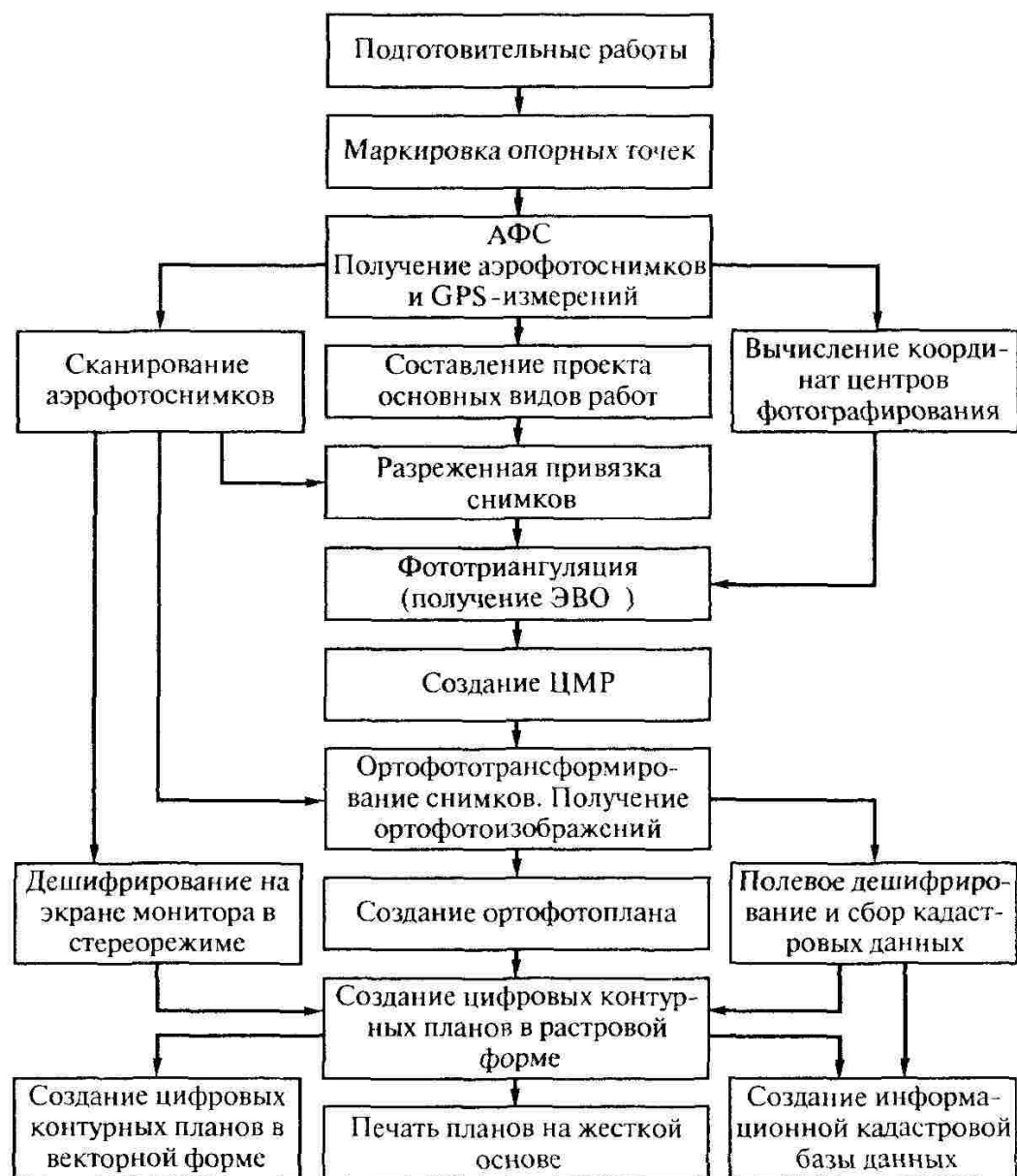


Рис. 17.2. Технологическая схема создания ортофотоплана на основе стереофотограмметрической обработки снимков

При *разреженной привязке* снимков опорные точки располагают в углах и в центре маршрута или блока.

Фотограмметрическая обработка включает: сканирование снимков и создание библиотеки цифровых изображений на магнитных носителях, ввод необходимых данных для обработки снимков, маршрутную или блочную фототриангуляцию, создание цифровой модели местности, ортофототрансформирование, изготовление электронного ортофотоплана. Потребителю ортофотоплан передают в растровой или векторной форме на магнитном или бумажном носителе.

17.4. МЕТОДИКА ОБНОВЛЕНИЯ ПЛАНОВ И КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ НОВОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Метрическая и смысловая информация, содержащаяся на фотопланах, ортофотопланах и графических планах, с течением времени устаревает. Подобное старение происходит в результате естественных или антропогенных изменений объектов земной поверхности, в результате чего содержание планов и карт не соответствует современному состоянию картографируемой территории. Другая причина старения — введение новых нормативных документов (инструкций, условных обозначений и т. п.) или новой системы координат. Для поддержания информации на современном уровне на планы и карты наносят появившиеся изменения. Процесс внесения изменений в содержание планов и карт называют обновлением, или дежурным сопровождением. При обновлении наносят вновь появившиеся объекты и удаляют исчезнувшие элементы ситуации.

Обновление выполняют геодезическим или фотограмметрическим методом.

Геодезический метод заключается в том, что в поле план на бумажной основе сличают с натурой. Положение вновь появившихся объектов определяют путем геодезических измерений (линейных промеров, линейных засечек и т. п.) от имеющихся на местности и плане контурных точек. В дальнейшем на экране монитора курсором по результатам линейных измерений отмечают положение определяемых объектов. При больших изменениях измерения выполняют геодезическими инструментами или наземными GPS. Затем по результатам измерений на электронный план наносят появившиеся объекты. Для этого с помощью клавиатуры компьютера вводят геодезические координаты поворотных точек появившихся на местности объектов. Геодезический метод обеспечивает высокую точность, его используют при малых локальных изменениях ситуации на местности.

Фотограмметрический метод заключается в том, что обновляемый план камерально сличают с материалами новой аэрофотосъемки, на которых определяют изменения, дешифрируют вновь появившиеся объекты и после полевой проверки наносят изменения на план. Данный метод применяют в основном для обновления планов на большие территории.

Конкретный вариант организации работ по обновлению планов зависит от многих факторов: технического обеспечения, экономичности, оперативности выполнения работ и т. п.

Цифровые способы фотограмметрической обработки снимков упрощают работы по обновлению планов. Существующие компьютерные программы позволяют экономично и качественно выполнить ввод изменившейся ситуации на обновляемый план.

Наиболее простой способ представляет собой «врезку» фрагмента снимка с изменившейся ситуацией. Для этого по периметру фрагмента идентифицируют 5...6 точек дешифрованного снимка и плана, используемых в качестве опорных. Площадь фрагмента выбирают так, чтобы местность, изображенная на нем, была плоской. Точность координат идентифицированных (опорных) точек определяется точностью, с которой они занесены в базовый электронный план. Погрешность опознавания на снимке не должна быть более 0,1 мм. При значительных изменениях ситуации, когда невозможно надежно опознать на обновляемом плане опорные точки по периметру фрагмента снимка, применяют методы фото-триангуляции. Используя идентифицированные точки как концы базисов, вычисляют коэффициент масштабирования для данного фрагмента снимка. Изображение фрагмента снимка, приведенное к масштабу обновляемого плана, занимает положение в геодезическом пространстве на электронном плане.

Периодичность аэрофотосъемки, выполняемой для обновления планов и карт, зависит от скорости и степени старения имеющейся в них метрической и смысловой информации.

Скорость старения зависит от интенсивности преобразований, происходящих на картографируемой территории, и характеризует количество изменений за единицу времени.

Степень старения выражает отношение количества изменившихся объектов к общему числу объектов на данной территории. Этот критерий может быть определен по данным регистрации ежегодного изменения земельного фонда в пределах изучаемой территории, а также с помощью методик оценки старения планов и карт. Выявлять происшедшие изменения можно визуально или автоматически с помощью специализированных компьютерных программ. Для этого в компьютер, где хранится обновляемый план, вводят материалы новой аэрофотосъемки. В соответствии с программой сопоставляется старая и новая информация. Оператор контролирует и уточняет результаты.

Обновление можно выполнять периодически и непрерывно.

При периодическом обновлении предусматривают уточнение содержания планов и карт через определенный промежуток времени. Для обжитых районов срок обновления составляет 3 года, для прочих районов — 5 лет и более.

Для непрерывного обновления базовых планов используют материалы геодезических измерений, выполняемых при отводе земель, инвентаризации, купле-продаже или по материалам новых аэрофотосъемок, проводимых различными ведомствами.

Аэрофотосъемку проводят с помощью аэрофотоаппаратов, имеющих объективы с фокусным расстоянием $f = 200...500$ мм. Продольное и поперечное перекрытия снимков при съемке могут быть стандартными. Выбор благоприятного времени выполнения

аэросъемочных работ зависит от вида обновляемой информации. Например, для обновления базовых планов поселений съемку выполняют в безлиственный период (ранняя весна или поздняя осень).

Параметры аэрофотосъемки рассчитывают таким образом, чтобы свести к минимуму влияние угла наклона и рельефа местности.

Контрольные вопросы и задания

1. До аэрофотосъемки выполнено маркирование знаков государственной геодезической и межевой опорной сети. Какой формы маркировочные знаки будут наиболее надежно опознаваться на снимках? 2. Какие минимальные размеры должны иметь маркировочные знаки для гарантированной отображаемости их на снимках в масштабе 1:40 000 при реальной разрешающей способности их 40 мин^{-1} ? 3. Потребуется ли фотографическое увеличение снимков для обнаружения маркировочных знаков невооруженным глазом? Если потребуется, то какой должна быть кратность увеличения?

Часть V

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО-, КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ СЪЕМОК В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ФОРМИРОВАНИИ БАЗЫ КАДАСТРОВЫХ ДАННЫХ И МОНИТОРИНГЕ



При создании базовых карт и планов состояния и использования земель, как видно из частей II, III и IV, в настоящее время используют аэроснимки, полученные с помощью топографических АФА. В перспективе фотографические камеры могут быть заменены цифровыми. Съемку выполняют в видимой области спектра электромагнитных излучений. Почти все подлежащие нанесению на карты и планы объекты местности отображаются при этом на снимках. Отдельные элементы ситуации и поворотные пункты границ участков земель, не отобразившиеся по тем или иным причинам на снимках, доснимают инструментально в поле.

Для решения многих прикладных задач дистанционными методами можно использовать снимки, полученные теми же съемочными системами, например при оценке последствий стихийных бедствий, выявлении мест незаконной вырубki леса и др.

Большинство же прикладных задач требуют квалифицированного подхода к выбору съемочной системы, спектральных зон регистрации излучений, времени суток и сезона съемки, так как необходимая энергетическая информация может оказаться в одной или одновременно нескольких узких зонах видимой области спектра или за ее пределами. Примером таких задач могут служить дистанционное наблюдение за состоянием посевов сельскохозяйственных культур, ранняя диагностика заболеваний растений, выявление посевов наркосодержащих растений и др.

Ранее отмечалось, что при составлении топографических и специальных, инженерного назначения, планов и карт используют только визуальное дешифрирование изображений. При решении некоторых задач, относящихся к сфере дистанционного зондирования, успешно применяют компьютерную интерпретационную обработку снимков. В учебнике изложены принципы и возможности машинно-визуального и автоматизированного дешифрирования.

Глава 18

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ

18.1. ПОНЯТИЕ О МАШИННО-ВИЗУАЛЬНОМ МЕТОДЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Как говорилось выше, в данном методе подлежащие дешифрированию снимки подвергаются предварительно машинной обработке с целью облегчения их визуального анализа. Решение о целесообразности такой обработки и ее виде принимают экспертно при оценке дешифрируемости снимков. Рассмотрим суть способов дешифрирования, перечисленных в разделе 15.2.

Синтезирование изображений выполняют в основном при дешифрировании зональных снимков. Некоторая совокупность таких снимков более информативна, чем один широкозональный снимок.

При многозональных аэро- и космических съемках яркость регистрируют в четырех и более зонах спектра электромагнитных излучений.

О необходимости использования зональных снимков вообще и получении синтезированных изображений в частности решают в случае, если цвет дешифрируемых объектов имеет решающее или хотя бы важное значение в опознавании (разделении) дешифрируемых объектов; в случае, когда дешифровочная задача на одиночных зональных снимках не решается; в случае, если соотношения уровней видеосигналов (оптических плотностей на фотоснимках) дешифрируемых объектов на зональных снимках окажутся различными. Это положение проиллюстрировано на рисунке 18.1. По оптической плотности изображения на снимке *а* (рис. 18.1) культуры, занимающие поля 2, 3 и 4, можно отнести к одному классу. На поле 1 культура явно иная. Если отдельно анализиро-

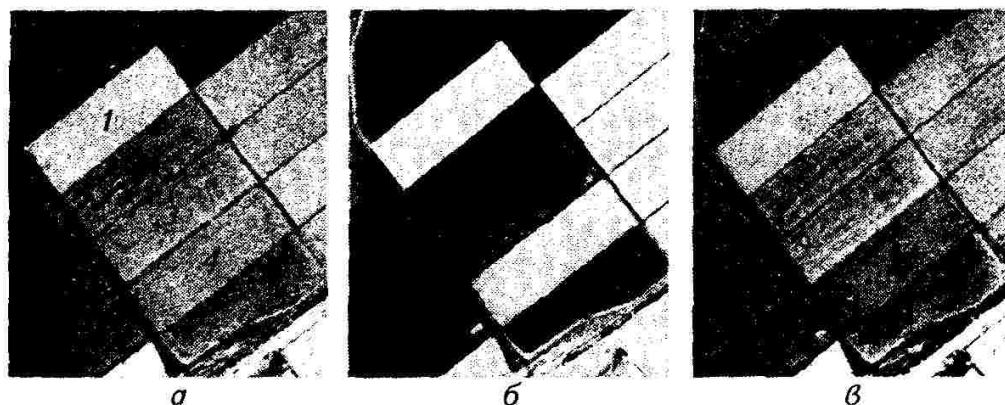


Рис. 18.1. Зональные снимки участков пашни

вать снимок *б* (рис. 18.1), то можно решить, что на полях *1* и *4* одинаковые культуры. Но эта гипотеза отвергается результатами анализа снимка *а*. Значит, на этих полях по крайней мере три вида растений — привлечение к анализу третьего снимка может подтвердить гипотезу неодинаковости культур на полях *1* и *4*.

Приведенный пример показывает, что одновременный визуальный анализ только четырех полей на двух снимках вызывает определенные трудности в запоминании различий в оптических плотностях изображения этих полей. Анализ большего количества объектов на большем числе зональных снимков становится практически невозможным. Выход из положения — получение единого изображения, в котором сохраняется информация, содержащаяся в исходных зональных снимках. Для расширения кодовой шкалы исходные снимки окрашивают в различные цвета. Различным сочетаниям зональных яркостей соответствуют объекты определенных классов. Каждое сочетание на синтезированном изображении имеет свой условный цвет. Переход к условному цветовому кодированию позволяет естественные яркостные контрасты усилить контрастами цветовыми и таким путем повысить возможности и достоверность дешифрирования.

Идею синтезирования изображений используют также для объединения в едином изображении видеоинформации, получаемой в оптическом и радиодиапазонах (синергизм). Та же идея может быть использована и для совмещения разновременной видеоинформации с целью наблюдения развития динамических процессов, например эрозионных, оценки степени старения карт и др. Здесь возникает дополнительный процесс — приведение изображений к единому масштабу.

Для синтезирования использовали специализированные приборы — оптические синтезаторы. Это прецизионные, обычно четырехкамерные, проекторы с регистрацией результатов в масштабе синтезирования (примерно пятикратное увеличение исходных снимков) или с помощью фотокамеры, устанавливаемой на откидной консоли. Синтезирование выполняют с помощью компьютеров.

Квантование уровней видеосигналов — процесс разбиения диапазона уровней видеосигналов на несколько соприкасающихся интервалов $\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_k$ с получением нового изображения, на котором отнесенные к каждому интервалу участки отображаются условным цветом или ахроматическим тоном. Необходимость этой процедуры обусловлена ограниченными возможностями зрительного аппарата человека в восприятии ярких (тоновых) контрастов (см. разд. 15.3). Квантованию подвергают цифровые изображения, полученные с помощью нефотграфических съемочных систем. Фотографические изображения

предварительно подвергают построчной развертке (сканированию).

Квантование может быть равномерным и неравномерным. *Равномерное квантование* легко реализуемо. Обычно его применяют для разделения диапазона уровней видеосигналов на изображениях объектов с плавно изменяющимися яркостными характеристиками на несколько равных ступеней (рис. 18.2, а). Такими объектами могут быть, например, сельскохозяйственные угодья с различной степенью смытости (выветренности) почвенного слоя, водные, подверженные загрязнению, объекты и т. п.

Неравномерное квантование (эвристическое) может быть использовано для выделения по яркости самих объектов, например полей пашни под различными культурами или лесов с разделением их по типам. Разумеется, при этом каждый выделяемый класс или качественно различающиеся части его должны иметь свой не перекрывающийся со смежными интервал уровней видеосигналов (рис. 18.2, б). При этом могут возникнуть межинтервальные слои видеосигналов, не относящиеся к дешифрируемым объектам. Их относят к $k + 1$ классу.

Нужные параметры квантования (интервалы квантования и их уровень) определяет оператор по результатам фотометрирования эталонных (тестовых) изображений, дешифрированных с высокой степенью достоверности.

Частный случай квантования — процедура выделения на изображении изогелл — линий, соединяющих точки с равным уровнем

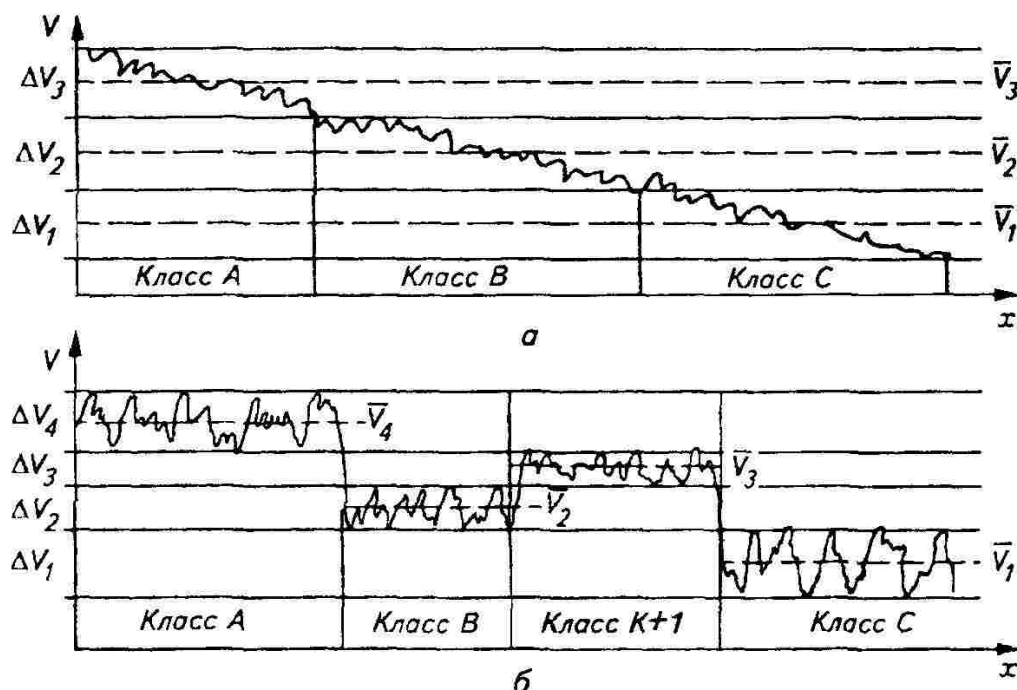


Рис. 18.2. Квантование диапазона видеосигналов:

а — равномерное; б — неравномерное (эвристическое)

видеосигналов. С помощью изогеллы удобно, например ограничить участки с недопустимым уровнем поражения чем-либо, например сброшенными в водоем загрязненными стоками, если это поражение привело к изменению яркости объекта в используемом при съемке спектральном интервале.

Примерные возможности выполнения процедуры квантования с использованием современных устройств ввода изображений. наименьший выделяемый интервал (в единицах оптической плотности) 0,03 на уровне 0,3, 0,07 на уровне 1,2 и 0,15 на уровне 1,8. В программу может быть включена процедура определения площадей выделенных эквиденситами участков изображения с уровнями видеосигналов, отнесенных к определенному кванту.

Квантованные изображения анализируют совместно с исходными, так как при осреднении уровней видеосигналов в интервалах квантования пропадает изображение деталей ландшафта.

Фильтрацию изображения выполняют с целью устранения с изображения избыточной информации, мешающей выполнению поставленной задачи. Например, изображение комьев земли на обнаруженных участках пашни усложняет разграничение различных типов почв по их тону на снимках. В этом случае возникает задача устранения с изображения высокочастотной информации при сохранении интегральных тоновых контрастов дешифрируемых почв. К фильтрационным процедурам можно отнести также устранение шумов, например полосчатости изображений, полученных с помощью сканирующих съемочных систем, уменьшение смаза изображения и др.

Для выполнения фильтрационных процедур изготавливали специализированные электронные устройства, например когерентные оптические процессоры. В настоящее время эти задачи выполняют на компьютере с использованием специализированных программ.

18.2. ПОНЯТИЕ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ МЕТОДЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Попытки создания систем, распознающих образы, ученые мира предпринимали еще в пятидесятые годы прошлого столетия. В последующие годы наука и техника в решении этой проблемы значительно продвинулась. Созданы эффективные быстродействующие автоматы считывания и обработки информации во многих отраслях науки, производства, криминалистики и др. В большинстве случаев в этих системах распознают объекты по детерминированным (не изменяющимся) признакам (форме, размеру, весу) или идентификация объектов и их характеристик по признакам статистическим, например при каллиграфической экспертизе. При дешифрировании аэро- и космических снимков могут также встречаться объекты с детерминированными признаками.

самолеты, транспортные машины, типовые сооружения и т. п. Однако в большинстве случаев объекты, дешифрируемые в целях картографирования территорий, выполнения поисковых работ и различных инженерных изысканий, не обладают неизменными геометрическими и особенно яркостными характеристиками. К тому же во многих случаях при распознавании объектов, ситуаций используют косвенные дешифровочные признаки с решением сложных логических задач. Решение таких задач недоступно современной вычислительной технике, так как формализация косвенных признаков — процедура сложная, а в большинстве случаев пока и невозможная.

Очевидно, что в автоматизированных интерпретационных системах можно использовать только признаки, обладающие достаточно высокой информативностью (специфичностью и инвариантностью в пределах кадра и на других обрабатываемых снимках), а также удобно выражающиеся в цифровой форме. Такими признаками могут быть цвет (тоновая шкала ахроматических снимков недостаточно широка) и текстура изображения. Последний признак может быть использован при дешифрировании только объектов с достаточно стабильной текстурой, например лесов.

Информация о цвете может быть выражена дискретно через яркости в одной или нескольких узких спектральных зонах. Регистрируют зональные яркости с помощью многозональных съемочных систем (см. разд. 5.2).

При неизменной зональной яркости некоторого объекта A по всей его площади одномерный дешифровочный признак его может быть выражен вектором или координатой на оси яркостей. Геометрическая интерпретация признака показана на рисунке 18.3. В другой зоне спектра признак того же объекта, в общем случае, будет иным. Признаки другого объекта B в тех же зонах спек-

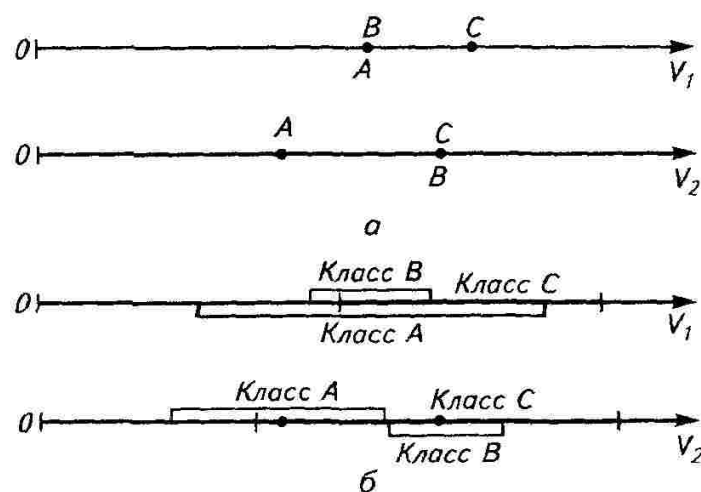


Рис. 18.3. Геометрическая интерпретация одномерных дешифровочных признаков:

a — детерминированных; $б$ — статистических

тра могут отличаться от признаков объекта A , например в зоне 2, но могут оказаться и неотличимыми (в данном примере — в зоне 1). Очевидно, что для разделения этих объектов следует использовать снимок, полученный в спектральной зоне 2. Но если возникнет необходимость в дешифрировании еще и третьего объекта C , признак которого в зоне 2 будет тем же, что и у объекта A (или B), то задача разделения всех объектов при индивидуальном анализе этих снимков становится неразрешимой. Выход из этого положения заключается в совместном анализе обоих снимков. Признаки при этом становятся двухмерными (рис. 18.4). На рисунке видно, что объекты A , B , C надежно разделились.

На практике дешифрируемых объектов может быть больше, чем в данном примере. Более сложной может оказаться и ситуация с яркостными зональными контрастами этих объектов. Поэтому появляется необходимость в увеличении размерности признаков путем привлечения к анализу снимков, полученных в большем количестве спектральных зон. Обозначим число одновременно используемых зональных снимков буквой N . Для геометрического представления трехмерного признака на рисунке 18.4 показана только ось; построения трехмерных признаков опущены. Разумеется, не следует пытаться геометрически выразить более чем трехмерные признаки. В аналитическом варианте решения интерпретационной задачи размерность признаков может быть любой. Но одновременно отметим — экспериментально установлено, что использование более чем трехмерных признаков не дает заметного повышения достоверности результатов автомати-

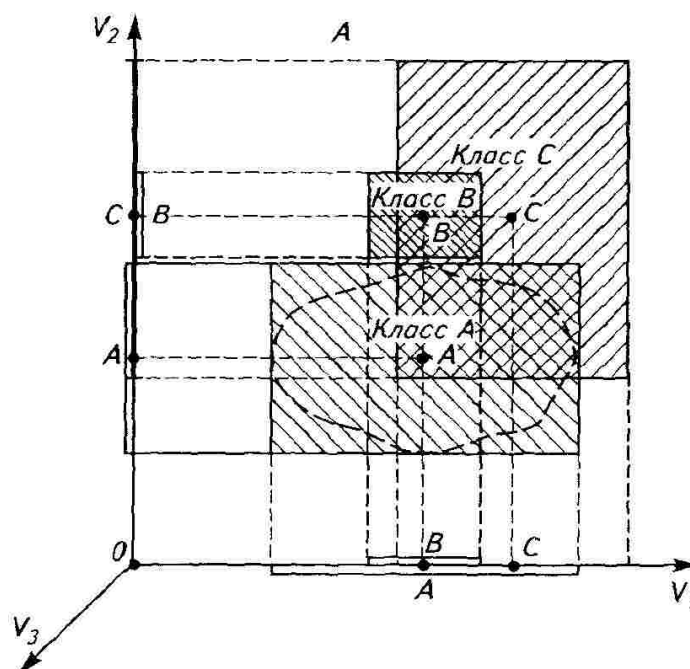


Рис. 18.4. Двухмерные спектральные признаки объектов A , B и C

ированного дешифрирования, если выбор для обработки зональных снимков близок к оптимальному.

Приведенные рассуждения, как было оговорено в начале раздела, относятся к случаю неизменной спектральной яркости объектов по всей площади их простираения. Реальных природных объектов с такими характеристиками не бывает. Интегральная и спектральная яркости объектов изменяются вследствие влияния многих факторов, например за счет локальных изменений влажности земной поверхности, различного состояния культурных растений при неравномерном внесении удобрений, локальной неодинаковости наклона растений или участков, на которых они растут, и др. Кроме того, непостоянство уровней видеосигналов при съемке даже однородных поверхностей обуславливается спецификой регистрации яркостей с помощью съемочных систем (см. разд. 15.5). Поэтому в одномерном пространстве признак некоторого класса объектов геометрически выразится отрезком, представляющим собой интервал варьирования зональной яркости элементарных участков объектов, входящих в этот класс (см. рис. 18.3, б). В двухмерном пространстве признаком будет плоская область варьирования зональных яркостей для определенного класса. На рисунке области предельных значений зональных яркостей элементов классов *A*, *B* и *C* ограничены сторонами заштрихованных прямоугольников. Фактическая область значений может иметь любую форму, вписанную в прямоугольники. На рисунке, в качестве примера, пунктиром ограничена фактическая область варьирования яркостей элементов класса *A*. В трехмерном пространстве признак класса представляется трехмерной областью варьирования зональных яркостей его элементов. Область предельных значений яркостей может быть ограничена гранями параллелепипеда. Перечисленные признаки называют спектральными.

Сформулируем некоторые определения, относящиеся к данному разделу. *Спектральный признак* (образ) элементарного участка некоторого объекта представляет собой точку в *N*-мерном пространстве, компонентами которого являются зональные яркости этого участка. В векторном представлении это же понятие можно выразить так: спектральный признак элементарного участка объекта есть *N*-мерный вектор зональных яркостей этого участка. Спектральным признаком (образом) класса будет область варьирования *N*-мерных зональных яркостей элементарных участков объектов этого класса.

Спектральные признаки классов (эталонные признаки) формируются по тестовым данным в процессе обучения интерпретационной системы. Тестовые данные получают в результате полевого дешифрирования снимков. На них должны быть изображены с достаточной статистической представительностью объекты всех дешифрируемых классов, а также близкие по оптическим характеристикам иные объекты, встречающиеся в районе работ.

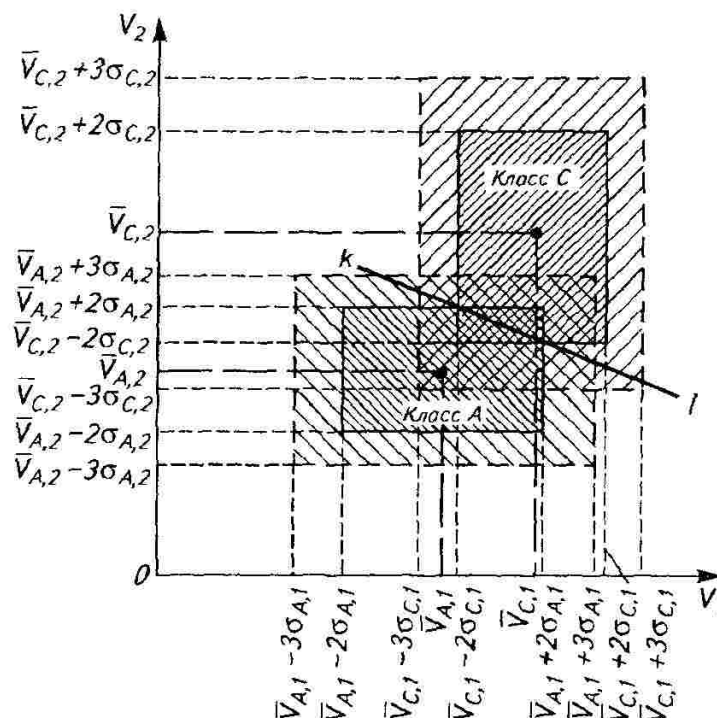


Рис. 18.5. Геометрическая интерпретация двумерных признаков классов А и С с использованием принципа гиперпараллелепипеда

При автоматизированном дешифрировании используют различные алгоритмические варианты. Для получения общего представления о сути автоматизированного дешифрирования рассмотрим один из простейших и геометрически наглядных алгоритмов. Геометрическая интерпретация аналитического процесса на примере дешифрирования объектов классов А и С с использованием двумерных признаков показана на рисунке 18.5.

Для упрощения математического описания областей варьирования спектральных яркостей объектов дешифрируемых классов в данном случае границами служат стороны прямоугольников, о которых было рассказано ранее. Для класса А границами могут быть отрезки $\bar{V}_{A_1} \pm 3\sigma_{A_1}$ и $\bar{V}_{A_2} \pm 3\sigma_{A_2}$. В этих выражениях $\bar{V}_{A_1}$ и $\bar{V}_{A_2}$ — средние значения уровней видеосигналов (при обработке фотоизображения — оптической плотности в принятом цифровом коде) элементарных участков объектов класса А, σ_{A_1} и σ_{A_2} — среднее квадратическое отклонение отдельных реализаций признака от $\bar{V}_{A_i}$. При таком обобщении границ в некоторых местах признака образуются «пустоты» (см. рис. 18.4). Это приведет к тому, что некоторые реализации признака других объектов, оказавшиеся в этих «пустотах», будут отнесены машиной к классу А. Поэтому пространство эталонного признака сокращают, приняв интервалы варьирования одномерных признаков, например, рав-

ными $\bar{V}_{A_1} \pm 2\sigma_{A_1}$ и $\bar{V}_{A_2} \pm 2\sigma_{A_2}$. При этом некоторые элементы объектов класса A окажутся исключенными из этого класса. Если это не приведет к недопустимым погрешностям опознавания, то процесс формирования эталонного признака этого класса закончен.

Аналогично формируются эталонные признаки прочих классов. В некоторых случаях они могут перекрываться. В заключение по тестовым данным контролируется качество обучения системы. При необходимости границы признаков уточняют.

Далее следует процесс непосредственного автоматизированного дешифрирования — последовательно определяется принадлежность каждого элемента изображения к тому или иному классу. Некоторые элементы могут попасть в зону перекрытия эталонных признаков. В простейшем варианте эта зона может быть разделена прямолинейной границей (на рис. 18.5 — kl). Риск принятия неверного решения при идентификации оказавшихся в зоне перекрытия элементов может быть минимизирован использованием функции, включающей в качестве аргументов вероятности появления в обрабатываемом районе объектов классов с перекрывающимися признаками (по статистическим данным), вероятности попадания элементов каждого из этих классов в зону перекрытия (по данным обучения системы) и др. Элементы, оказавшиеся вне пространства эталонных признаков, относят к обобщенному $k + 1$ классу.

Рассмотренный алгоритм относится к группе алгоритмов, работающих в режиме *классификации*. Если пространства дешифровочных признаков классов не перекрываются или перекрытия признаков незначительные, то в автоматизированной обработке снимков можно использовать более простые алгоритмы — *кластеризационные*. Суть их заключается в том, что элементы изображения разбиваются в пространстве признаков на неперекрывающиеся группы по некоторому критерию внутренней близости их признаков. Такие группы называют *кластерами*.

При обработке снимков в режиме кластеризации желательно знать число дешифрируемых классов объектов и примерное различие (ее) признаков. Последнее может быть заимствовано: из опыта выполнения аналогичной интерпретационной обработки снимков, полученных примерно в тех же условиях и тех же спектральных зонах; из элементарных фотометрических наблюдений ограниченного объема тестовых данных; из результатов спектрометрирования, выполненного на объектах тех же классов примерно в то же, что и при съемке, время сезона.

Большинство кластеризационных алгоритмов — итерационные. В упрощенном варианте процесс кластеризации выглядит так. Первый элемент изображения принимают за центр кластера в N -мерном пространстве признаков. Последующие элементы, если

признаки их не отличаются от признака, принятого за центр элемента, на значение, превышающее ее, относят к тому же кластеру. В противном случае первый из отличающихся элементов принимают за центр нового кластера. Аналогично образуются прочие кластеры.

Очевидно, что случайно «назначенные» центры кластеров фактически ими не являются. Поэтому для каждого образованного в первой итерации кластера определяют новое положение центра — среднеарифметическое из значений признаков всех вошедших в этот кластер элементов. Во второй итерации относительно новых центров все элементы изображения перераспределяют и уточняют положение центров кластеров. Итерационный процесс завершают, когда в последнем положении центров не произошло существенных изменений относительно предыдущего положения (рис. 18.6). Выведенные результаты такой обработки образуют карту кластеров. Затем выполняют идентификацию кластеров в поле путем выборочного определения принадлежности кластеров конкретным классам или по ограниченному объему тестовых данных.

Текстура изображения, при использовании ее в качестве дешифровочного признака в автоматизированном дешифрировании, должна быть представлена в цифровой форме. Простейшими количественными критериями ее могут быть: средняя длина фотометрической волны $\bar{\lambda}$; средняя амплитуда волны $\bar{a}$; дисперсия длин волн σ_{λ} ; дисперсия амплитуды волн σ_a и др. Из стилизованных фотометрических регистрограмм, показанных на рис. 18.7, видно, что и в данном случае возникает необходимость в использовании многомерных текстурных признаков — объекты A и C имеют одинаковую среднюю длину волн, но различаются по амплитуде; объекты A и B , наоборот, имеют примерно одинаковые средние значения амплитуд при различных длинах волн; объект D

может оказаться похожим на одни объекты по средней длине волн, на другие — по средней амплитуде, но отличаться от них по дисперсии амплитуды.

При использовании текстурных признаков, очевидно, нет необходимости в применении многозональных съемок. Но съемка должна быть выполнена так, чтобы критерии текстуры сохраняли постоянство в любой части кадра. Достичь этого можно, применив узкоугольные съемочные системы при возможно высоком положении Солнца.

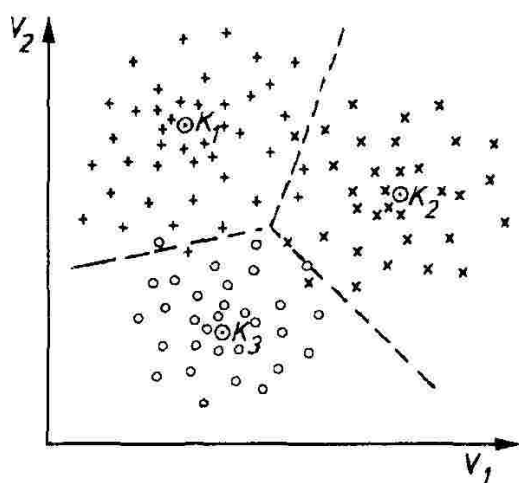


Рис. 18.6. Геометрическая интерпретация принципа кластеризации

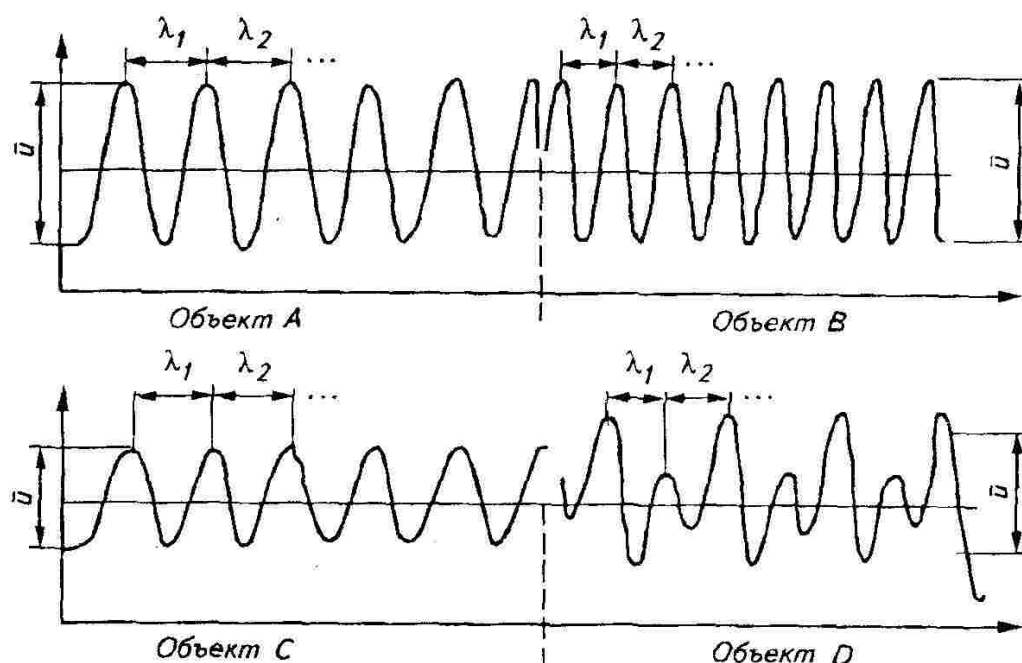


Рис. 18.7. Принцип формализации текстуры фотоизображения

Принципиально технология автоматизированного дешифрирования с использованием спектральных и текстурных дешифровочных признаков останется одинаковой.

Анализ дешифровочных признаков, используемых при картографировании поселений и сельскохозяйственных территорий, выполнении инвентаризационных работ в целях создания земельного кадастра, исключает возможность автоматизации трудоемкого дешифровочного процесса. Очевидно, что автоматизированное дешифрирование по спектральным признакам пока можно применить только при решении задач, в которых эти признаки, как отмечалось ранее, значительны. Такие задачи являются прерогативой дистанционного зондирования — различные виды мониторинга, инвентаризация кормовых угодий, гидрогеологическая разведка и т. п. Текстурные признаки, как уже отмечалось ранее, используют в основном при выполнении лесотаксационных работ.

18.3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ ВЫБОРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗОН СЪЕМКИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Съемку местности в целях ее топографического картографирования и составления специальных карт для решения инженерных задач (инвентаризация земель, землеустроительные изыскания и организация территорий и др.), как уже отмечалось в разделе 16.7, можно успешно выполнять в широком спектральном интервале с использованием панхроматических или изопанхроматических

аэропленок со светофильтром для сокращения шумового влияния атмосферной дымки.

При выполнении некоторых изыскательских работ экологического и земельного мониторинга необходимо обеспечить дифференцированное по оптической плотности или цвету отображение на снимках объектов изучаемых классов, их состояния, подверженности вредным воздействиям и др. Съемка в традиционных спектральных интервалах во многих случаях при этом не дает положительного результата.

Использованные при съемке узкие спектральные каналы «по своему видят» одни и те же объекты (см. разд. 18.1). Поэтому выбор оптимальных условий съемки (календарное и суточное время съемки, а также число и набор каналов регистрации) имеет важнейшее значение в успехе выполнения поставленной задачи.

Наиболее простым и кажущимся очевидным путем решения этой проблемы могло бы быть эмпирическое исследование возможностей различных сочетаний аэропленок и светофильтров. Именно по этому пути в начале шестидесятых годов прошлого столетия пошли сотрудники лаборатории аэрометодов МГУ, сконструировав девятиобъективный аэросъемочный агрегат (матрица камер 3×3). С его помощью в полете одновременно экспонировались три типа аэропленок с тремя различными светофильтрами для каждой аэропленки. Результаты оценивали экспертно. Очевидно, что при этом выбирали лучший вариант из исследованных. Оптимальный вариант может оказаться за пределами испытаний.

Другой путь — использование опыта выполнения аналогичных задач в международной практике. Этот путь также не дает абсолютного решения, так как оптические характеристики могут значительно изменяться в пространстве и времени. К сказанному следует добавить также, что в последнее время нередко возникают не изученные ситуации в экологическом состоянии природной среды.

Оптимальным решением может быть выбор съемочных зон по результатам спектрометрических (радиометрических) исследований поверхности объектов изучаемых классов. Ранее уже отмечалось, что отражательная способность природных образований может варьировать в значительных интервалах — коэффициенты спектральной яркости не являются характеристиками детерминированными. КСЯ сенокосов, например, будет изменяться вследствие неоднородности видового состава растительных сообществ, локального различия увлажненности, неровности поверхности и многого другого. Поэтому спектрометрированию должны быть подвергнуты площадки всего диапазона варьирования состояния элементарных площадок объектов каждого класса.

Эмпирически установлено, что распределение спектральных яркостей пространственных объектов природного и антропогенного

происхождения, при статически достаточной выборке, близко к нормальному. Поэтому при описании отражательной способности таких объектов достаточно корректного использования основных характеристик распределения — математического ожидания ($\bar{r}_\lambda$) и дисперсии (σ^2) КСЯ. Тогда в справочниках отражательная способность элементов ландшафта может быть выражена следующим образом:

$$\bar{r}_\lambda \pm k\sigma,$$

где $\bar{r}_\lambda$ — среднее значение КСЯ; k — коэффициент, зависящий от уровня требуемой достоверности решаемых фотометрических задач (обычно 1, 2, 3 или числа, близкие к ним); σ — среднее квадратическое отклонение КСЯ.

Это позволяет определить возможную разделяемость на получаемых снимках объектов изучаемых классов по среднему значению уровня видеосигнала (на фотоснимках оптической плотности) и вероятность разделения объектов в случае перекрытия их спектральных яркостей, что можно проиллюстрировать графическим примером. Допустим, что КСЯ двух пар объектов классов A и B , а также C и D изобразились на рисунке 18.8, а соответствующими кривыми.

На первый взгляд кажется, что проблема разделения на сним-

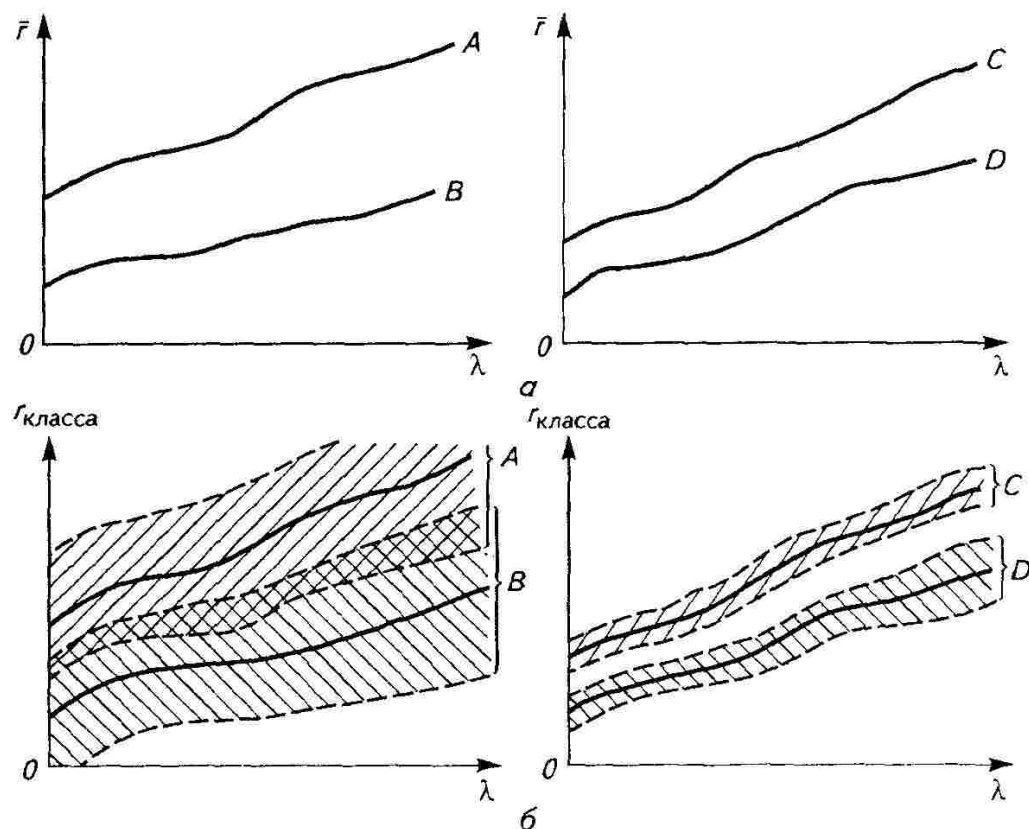


Рис. 18.8. Зависимость разделяемости объектов по яркости от интервала варьирования яркости

ках по уровню видеосигнала первой пары объектов будет меньшей, нежели второй пары. Но после нанесения на графики интервалов варьирования (рис. 18.8, б) становится ясным, что разделение первой пары будет менее достоверным, чем второй пары - зона перекрытия интервалов варьирования КСЯ будет зоной вероятного появления ошибок разделения классов.

Из этого можно сделать вывод, что при выборе спектральных зон для съемки объектов нескольких классов необходимо знать ход по спектру средних значений КСЯ и интервалы их варьирования для каждого класса. Задачу можно считать разрешимой, если среднее значение ожидаемого контраста ($\Delta \bar{D}_{i/j}$) обеспечит визуальное или фотометрическое (машинное) разделение объектов в любых парных комбинациях, а также достоверность разделения объектов в условиях перекрытия их КСЯ будет достаточной.

Задачу оптимизации используемых для съемки спектральных зон решают с помощью компьютера. Принцип решения рассмотрим в графическом варианте. Для определения ожидаемого среднего контраста можно воспользоваться графиком средних значений КСЯ, определенных в отвесном направлении (рис. 18.9). На графике выделяются зоны, в пределах которых кривые $\bar{r}_\lambda$ не пересекаются (на рис. 18.9, г спектральный интервал $\lambda_1 - \lambda_2$). Затем, пользуясь справочными данными о спектральной чувствительности аэропленок, выбирают ту, чувствительность которой заканчивается примерно на уровне λ_2 . Если в коротковолновой части спектра кривые $\bar{r}_\lambda$ пересекаются (на рис. 18.9, е эта часть левее λ_1), то воздействие излучений на аэропленку ограничивается световым фильтром, граница пропускной способности которого примерно совпадает с уровнем λ_1 . Сведения о пропускной способности световых фильтров берут из справочников.

Аналогично выбирают две (реже три) зоны спектра для съемки на спектрально-зональные аэропленки. Наибольший эффект при этом получится, если изучаемые классы объектов отобразятся различным цветом, а не различной насыщенностью одного цвета. Для этого в выбранных зонах должна произойти инверсия (смена знака) яркостного контраста изучаемых объектов.

На этом уровне прогнозирования разделяемости объектов изучаемых классов при съемке в выбранных зонах возможно использование упрощенных формул:

для однозональной съемки

$$\Delta \bar{D}_{i/j} = \lg \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}_{\lambda_i} \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_2}^{\lambda_1} \bar{r}_{\lambda_j} \Delta \lambda}; \quad (18.1)$$

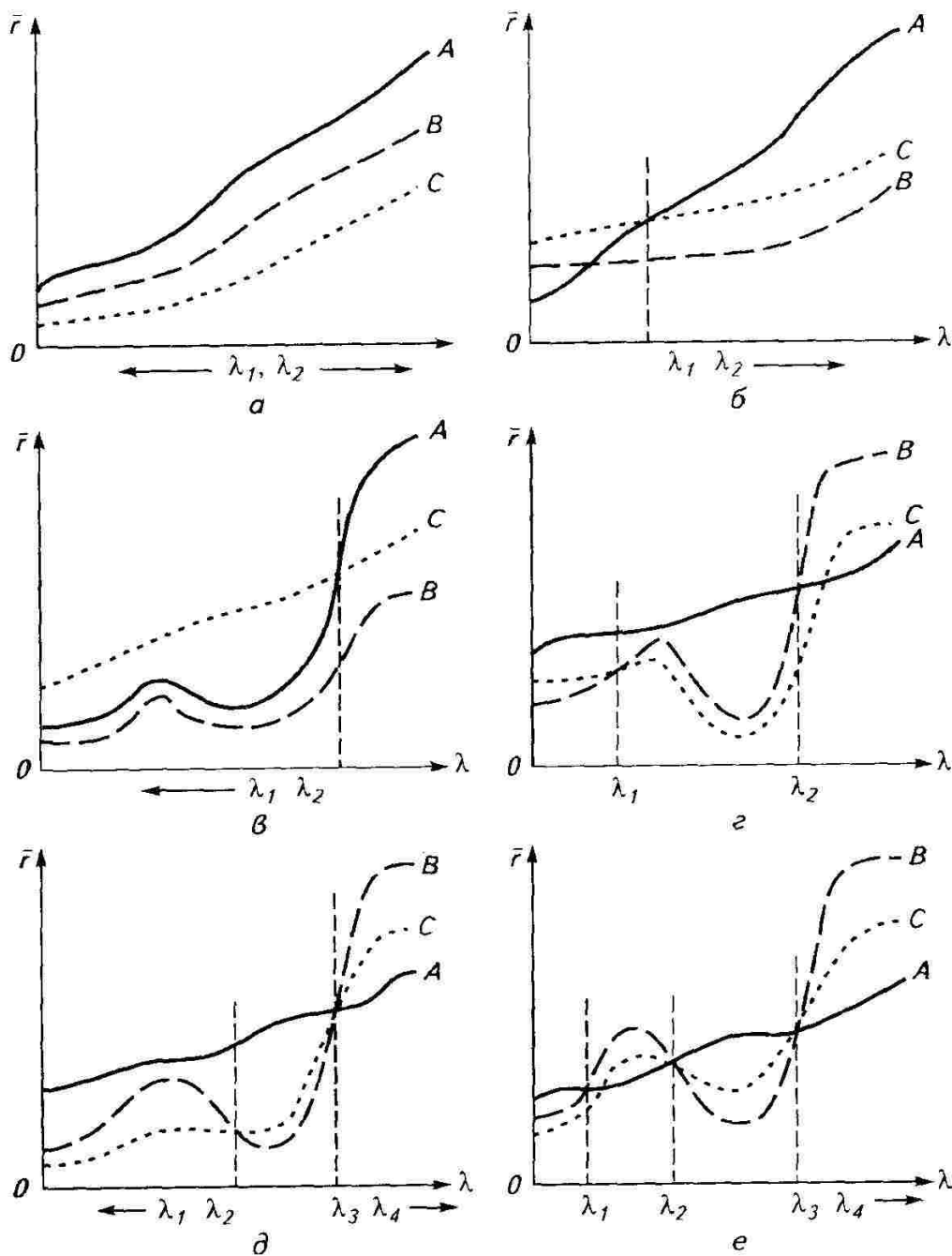


Рис. 18.9. Типовые варианты выбора спектральных зон съемки по графикам хода коэффициентов спектральной яркости

для спектрозональной съемки в двух зонах

$$\Delta D_{i/j\text{хром}} = \lg \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}_{\lambda_i} \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_2}^{\lambda_1} r_{\lambda_j} \Delta \lambda} - \lg \frac{\sum_{\lambda_3}^{\lambda_4} r_{\lambda_i} \Delta \lambda}{\sum_{\lambda_3}^{\lambda_4} r_{\lambda_j} \Delta \lambda}, \quad (18.2)$$

где i и j — классы объектов; $\Delta \lambda$ — ширина спектральной полосы для каждого значения $\bar{r}_{\lambda}$.

Если полосы примерно одинаковы, то аргумент $\Delta \lambda$ в этих формулах выйдет за знак суммирования и при вычислении отношения сумм сократится. Эти формулы дают достаточно правильные результаты при неизменной чувствительности фотопленки в пределах каждой из выбранных зон.

Типовые варианты выбора аэропленки и светофильтра показаны на рисунке 18.9.

Принцип определения вероятности ошибки разделения объектов с перекрывающимися интервалами варьирования КСЯ рассмотрим в графическом варианте. Допустим, что вероятности распределения КСЯ элементарных площадок классов A и B описываются кривыми, показанными на рисунке 18.10. На горизонтальной оси отложены значения КСЯ, на вертикальной — вероятности появления площадок с определенными значениями КСЯ (при ограниченной выборке наблюдений — частоты появления).

Вследствие перекрытия интервалов варьирования кривые распределения вероятностей КСЯ классов A и B пересекутся. Наилучший вариант разделения классов по КСЯ — вертикальная граница, проведенная через точку пересечения кривых, — kl (решающее правило по максимуму правдоподобия).

В горизонтально заштрихованной области окажутся участки класса B , ошибочно отнесенные по КСЯ к классу A . Аналогично участки класса A , оказавшиеся по КСЯ в заштрихованной вертикальной области, будут отнесены, также ошибочно, к классу B . Вероятность общей ошибки разделения классов A и B выразится

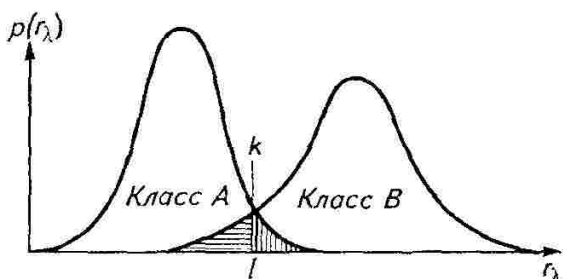


Рис. 18.10. Принцип определения вероятности ошибки разделения объектов по спектральным признакам

суммарной площадью заштрихованных областей. В строгом варианте решения этой задачи должны быть использованы интегральные функции. Аналитически они не берутся. В практике разделяемость классов обычно рассчитывают попарно или только для тех пар классов, отражательная способность которых наименее делима. По

этому проявляется возможность использования при расчетах численных методов с помощью компьютера. Один из наиболее простых выходов из положения — определение соотношения измеренных любым способом площадей области возможных ошибочных разделений (на рис. 18.10 заштрихована) к общей площади, ограниченной кривыми.

Если предполагаемая к использованию съемочная система оптимизирована по углу поля изображения (фотометрическая система), то выполненные расчеты можно считать окончательными. В противном случае аналогичные расчеты должны быть выполнены для наклонных направлений в пределах угла поля изображения данной съемочной системы. Если дешифрирование выполняют в пределах рабочей площади снимка, то угол соответственно сокращается.

КСЯ для наклонных направлений берут из результатов полевого определения индикатрис рассеяния. Последние обязательно определяют при спектрометрировании, если угол поля изображения используемой съемочной системы окажется завышенным. Принцип определения предельного угла поля изображения для конкретного случая в графическом варианте можно представить следующим образом. Из всей совокупности полученных индикатрис рассеяния дешифрируемых объектов используют наиболее асферичную, в сечении ее плоскостью главного вертикала Солнца.

Из узловой точки пучка векторов коэффициентов яркости (А) берут два крайних вектора r_1 и r_2 , образующих угол поля зрения съемочной системы 2β (рис. 18.11). Определяют их разность Δr_{1-2} и выражают ее в процентах по отношению к r_n для надирного вектора. Полученное значение характеризует степень ожидаемого максимального непостоянства уровней видеосигналов, изображения объектов по полю кадра. Если полученный уровень недопустимый, угол 2β сокращают до тех пор, пока максимальный интервал варьирования уровней видеосигналов в угле $2\beta'$ будет приемлемым. Норма допустимости определяется различием средних значений яркостей дешифрируемых объектов и интервалом варьирования яркостей для каждого объекта.

По углу $2\beta'$ и фокусному расстоянию АФА определяют рабочую площадь снимков. Разумеется, что эти площади должны стыковаться без просветов.

Особенно тщательно ожидаемые результаты съемки исследуют в случае, если получаемые снимки предполагается обрабатывать с помощью компьютера, применяя процедуры квантования уровней

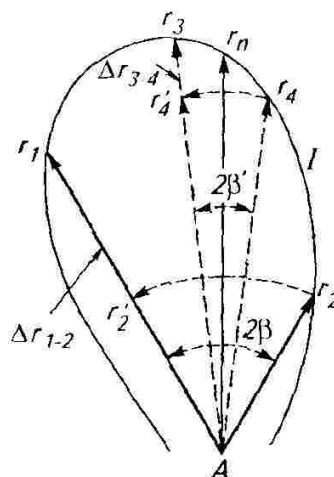


Рис. 18.11. Схема определения предельного угла $2\beta'$ съемочной системы по индикатрисе рассеяния снимаемого объекта

видеосигналов, классификации и кластеризации по спектральным признакам. При визуальном дешифрировании к разделению объектов, кроме оптической плотности (тона) изображения, можно привлекать и другие признаки, в том числе и косвенные.

При получении неприемлемых результатов исследуют оптические свойства объектов нужных классов и иные календарные сроки, если решаемая задача не относится к оперативным.

Контрольные вопросы и задания

1. Можно ли решить конкретную задачу путем автоматизированного дешифрирования? Как именно? 2. Нуждается ли в особых требованиях аэро- или космическая съемка, материалы которой предполагается дешифрировать автоматизированно? В каких именно? 3. Не является ли процедура квантования частным случаем классификации или кластеризации? Ответ обосновать. 4. Какие задачи сельскохозяйственного назначения можно было бы решать с использованием автоматизированного дешифрирования?

Глава 19

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ И СОЗДАНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

19.1. ПОНЯТИЕ О ПОЧВЕННОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

В зависимости от цели почвенное дешифрирование можно разделить на два основных направления:

почвенно-картографическое, заключающееся в определении по снимкам или с их помощью типов почв и границ их простираения в целях составления специальных карт;

почвенно-исследовательское, суть которого в изучении происходящих в почвенном покрове динамических процессов.

Почвенные карты, в зависимости от масштаба, делят на детальные (1:5000 и крупнее), крупномасштабные (1:10 000...1:25 000), среднемасштабные (1:50 000...1:200 000) и мелкомасштабные (1:500 000 и мельче).

В землеустроительной практике в основном используют крупномасштабные почвенные карты. С их помощью определяют возможные для конкретных условий севообороты, обеспечивают почвенную однородность проектируемых полей и др. Для организации территорий в районах интенсивного земледелия (рисосеяния, виноградарства, хлопководства, выращивания чая, цитрусовых и других ценных культур), а также проектирования противоэрозионных мероприятий, оросительных и осушительных сетей выполняют детальное почвенное картографирование.

Детальные и крупномасштабные почвенные карты используют в земельном кадастре, в частности при бонитировке почв и экономической оценке земель.

Среднемасштабное почвенное картографирование выполняют в целях агропочвенного районирования, оптимизации направленности сельскохозяйственного производства районов и др.

Мелкомасштабные почвенные карты областей, краев, республик служат для решения стратегических сельскохозяйственных задач, например для определения специализации регионов.

Динамические процессы, происходящие в почвах, изучают, анализируя материалы периодических съемок, если процессы (эрозия и засоление почв, заболачивание, наступление песков и т. п.) развиваются сравнительно медленно, или материалы оперативных съемок при случайных или быстро протекающих процессах (смыв почвы при наводнении, созревание почвы для посева, изменение ее влажности и температуры и т. п.).

Рассмотрим кратко потенциальные возможности дистанционного изучения почв. Отражательная способность большинства сухих почв характеризуется сравнительно плавным нарастанием яркости с увеличением длины волны в интервале от 0,4 до 1,6...2,0 мкм и постепенным уменьшением при дальнейшем увеличении длины волны до 2,5 мкм. Кривые r_λ влажных почв имеют прогибы в зонах поглощения солнечной радиации водой при максимумах в точках $\lambda = 1,45$ мкм и $\lambda = 1,95$ мкм. Положение кривой r_λ зависит от минеральной основы почвы, содержания гумуса, окислов железа и воды, а также от структуры поверхности.

Зависимость коэффициента интегральной яркости почв от содержания гумуса и окислов железа до 5 % линейная, далее — параболическая. Наибольшая чувствительность яркости почв к содержанию гумуса наблюдается в красной зоне спектра.

Значительное изменение яркости почв обуславливается их влажностью (рис. 19.1). Полное представление о распределении влаги в почве даст совместный анализ изображений в видимой области и ближней инфракрасной зоне спектра.

Яркость почв существенно зависит от макроструктуры поверхности. С укрупнением комьев увеличивается суммарная площадь затемненных участков поверхности, анизотропность отражения, создаются структурные про-

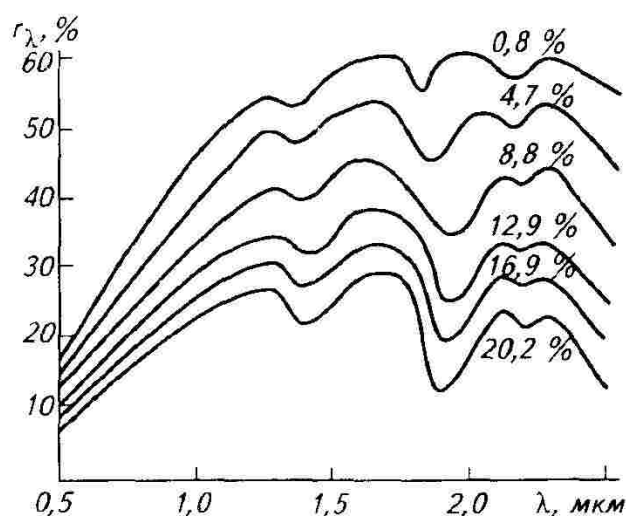


Рис. 19.1. График зависимости отражательной способности почвы от ее влажности

странства, способствующие многократному отражению лучистой энергии и ее поглощению.

Микроструктура почв также влияет на их яркость — с уменьшением размера частиц яркость возрастает экспоненциально. Наиболее заметно увеличивается яркость при диаметре частиц меньше 0,4 мм.

Специфика почвенного дешифрирования обусловлена особенностями объекта изучения. На снимках, полученных в оптическом диапазоне спектра электромагнитных излучений, содержится информация только о верхнем горизонте генетического профиля. Задача осложняется тем, что поверхность почвенного покрова в большинстве случаев непосредственно не изображается на снимках. Даже пахотные земли гумидной зоны, кроме чистых паров, большую часть съемочного периода бывают в той или иной степени закрыты растительностью. Поэтому преобладающим здесь будет косвенное дешифрирование. В аридной зоне на участках с изреженной или высохшей растительностью возможности использования прямых дешифровочных признаков расширяются.

Суждение о генетическом профиле почв в целом может быть составлено только косвенным путем с использованием заранее установленных признаков для конкретного района по результатам полевых исследований на типичных (ключевых) участках. Поэтому по аэро- или космическим фотоснимкам непосредственно устанавливаются принадлежность почв лишь к высшим таксономическим категориям классификации — к типу, иногда подтипу и в некоторых случаях к роду.

В связи со сложностью почвенного дешифрирования, обусловленной необходимостью одновременного анализа всей совокупности дешифровочных признаков и в первую очередь косвенных, преобладающим является визуальный метод дешифрирования.

Рассмотрим возможности изучения по аэрофотоснимкам элементов местности, являющихся индикаторами типов почв, а также роль прямых признаков при почвенном дешифрировании.

Рельеф — один из важнейших почвообразующих факторов. Изменение крутизны ската и его экспозиции, понижения и возвышения на плоских участках влечет за собой определенное изменение характеристик почв. Сведения о рельефе с не меньшей полнотой, чем при натурных обследованиях, могут быть получены по стереоскопической модели местности.

Возможность анализа закономерностей строения макрорельефа зависит от размера участка местности, доступного для одновременного обозрения, т. е. от формата и масштаба аэрофотоснимка. Если по отдельным аэрофотоснимкам не удастся проследить эти закономерности, то результаты стереоскопических наблюдений

переносят на фотосхемы или, что значительно удобнее, при изучении макрорельефа используют стереофотосхемы.

Суждение о мезорельефе с достаточной полнотой может быть составлено по отдельным аэроснимкам или парам аэрофотоснимков сравнительно крупного масштаба (1:10 000...1:30 000), но все же взаимосвязь элементов мезорельефа более полно прослеживается по стереофотосхемам. Элементы микрорельефа хорошо выявляются даже в случае, если их глубина (высота) находится за пределами порога стереовосприятия. Изменение тона изображения неровных обнаженных участков обуславливается изменением спектральной отражательной способности почв в связи с неравномерным распределением влаги, вызывающей оглеение или осолодение почв в микропонижениях; обеднением почв на микроповышениях за счет выветривания, систематических срезов гумусового слоя при обработке земли и др. По тону фотоизображения элементы микрорельефа выделяются и на участках, покрытых естественной и культурной растительностью, так как она, как правило, чутко реагирует на изменение свойств почвы, ее плодородия и влажности.

Растительность — также важный почвообразующий фактор. При почвенном дешифрировании растительность имеет двоякое значение. Она, закрывая земную поверхность, мешает непосредственному изучению почв по фотоизображению и одновременно способствует выполнению этого процесса, будучи тесно связанной с почвами и являясь их индикатором.

Наиболее легко и надежно дешифрируется древесная растительность.

Из травянистой растительности только естественная обладает более или менее устойчивыми индикационными свойствами.

Открытые выходы почвообразующих пород на земную поверхность встречаются очень редко. Поэтому о геологическом строении исследуемой территории обычно судят по косвенным признакам и главным образом по рельефу. Стереоскопическое наблюдение аэроснимков при этом дает, как уже отмечалось ранее, неоспоримые преимущества перед непосредственным изучением рельефа в поле. При этом для установления генеральных закономерностей геологического строения важно обеспечить достаточную пространственную обзорность, т. е. правильно выбрать масштаб наблюдаемых материалов. Стереофотосхемы здесь очень удобны.

Результаты хозяйственной деятельности человека могут иметь вспомогательное значение при почвенном дешифрировании. При этом используют приуроченность сельскохозяйственных угодий к определенным почвенным условиям, наличие оросительных и осушительных систем, противоэрозионных средств и др. Дешифрируемость последних рассмотрена ранее.

При дешифрировании непосредственно отобразившихся на аэрофотоснимках почв на участках, покрытых очень разреженной растительностью или совершенно обнаженных, в дополнение к косвенным используют прямые дешифровочные признаки: тона (цвета) и текстуры фотоизображения, размеры и формы почвенных контуров.

Тон фотоизображения зависит от спектральной зоны, используемой для фотографирования, и от спектральной яркости почв. Последняя определяется многими факторами. Сложность, а иногда и невозможность определения доли участия этих факторов в формировании фотоизображения снижает значение тона как дешифровочного признака. Например, два участка пашни с одинаковыми почвами могут получиться существенно различными по тону на одних и тех же аэрофотоснимках, если влажность и шероховатость (один участок боронован после вспашки, другой нет) этих участков будет различной. Кроме этого, поверхность пашни или другого обнаженного участка не является ортотропной, что может привести к значительному изменению тона фотоизображения однородных участков при различном расположении их относительно центра проекции и Солнца (см. рис. 15.6). Варьирование тона при этом будет возрастать с увеличением угла поля изображения АФА.

Однако относительное изменение почв, их гумусированности, карбонатности в пределах некоторой ограниченной площади при правильном выборе типа аэропленки и светофильтра могут хорошо отобразиться на черно-белых фотоизображениях. Несколько большей информативностью обладает цвет фотоизображения, особенно на снимках с условной цветопередачей (спектрозональных, синтезированных по черно-белым зональным).

Текстура фотоизображения обнаженных участков отражает: следы их обработки (вспашка, боронование и др.); различие свойств небольших по площади, более или менее однородных по форме, компонентов комплексных почв; результаты эрозионных процессов; выход солей; результаты деятельности животных (сурков, кротов и др.).

Текстура как признак самих почв помогает распознаванию их только в исключительных случаях. С помощью текстуры легко опознаются типы ландшафтов, по которым затем определяют сопутствующие им типы почв.

Размеры и форма почвенных контуров зависят в основном от рельефа картографируемой территории и не являются достаточно надежными признаками.

Особенность почвенного дешифрирования косметических фотоснимков определяется их пониженным разрешением и значительным ухудшением условий стереоскопического наблюдения (отрицательные стороны), а также возможностью анализа распре-

деления обобщенных яркостных характеристик элементов ландшафта на территории значительной протяженности в практически одинаковых условиях съемки (положительная сторона).

Снижение линейного разрешения исключает возможность использования важнейших признаков (формы, размера, текстуры) при распознавании одного из основных индикаторов почв — растительности. В формировании интегрального тона фотоизображения участвует много факторов. Выделить полезную для решения данной задачи часть энергетической информации при визуальном анализе однозональных фотоснимков практически невозможно.

Значительное понижение точности стереоскопического восприятия за счет уменьшения отношения базиса к высоте фотографирования и снижения линейного разрешения космических изображений сокращает возможности использования индикационных свойств рельефа, особенно его микроформ.

Перечисленные потери в некоторой степени компенсируются на среднемасштабных и особенно крупномасштабных фотоснимках оптической генерализацией яркостного поля снимаемой территории. Поэтому в используемом при съемке спектральном интервале могут выделяться ареалы почв с различной отражательной способностью. К тому же маскирующий эффект растительности с увеличением высоты фотографирования, т. е. на космических фотоснимках, заметно снижается.

Визуализированные сканерные изображения характеризуются меньшим, в сравнении с фотографическим, линейным разрешением. Поэтому потери пространственной информации здесь еще больше. То же можно сказать и о телевизионных кадровых изображениях. Избирательная способность и точность энергетической информации, полученные с помощью фотометрических сканеров, несколько выше, чем на фотоснимках и тем более на телевизионных кадровых изображениях. За счет этого при правильном выборе для съемки спектральной зоны достоверность фотометрического дешифрирования почв возрастает.

Технология почвенного дешифрирования определяется сложностью картографируемой территории в почвенном отношении, степенью ее специальной изученности, информативностью конкретных материалов фотосъемки, масштабом картографирования и, в известной степени, опытом исполнителей.

Рассмотрим основы наиболее распространенной технологии. Процесс дешифрирования можно разделить на следующие основные этапы:

- подготовительный;
- предварительного камерального дешифрирования;
- полевого обследования;
- камеральной обработки полевых материалов и окончательного камерального дешифрирования;

перенесения результатов дешифрирования на топографическую основу и оформления материалов.

Суть подготовительного этапа принципиально та же, что и при дешифрировании, выполняемом при создании базовых карт земель. Изменяется только состав собираемых и анализируемых материалов.

Дешифрирование выполняют на контактных отпечатках. Дешифрированию подвергают четные и нечетные фотоснимки дешифрирование через снимок. В некоторых случаях, когда необходим более полный анализ природных закономерностей формирования почв на значительных по протяженности территориях или установление типа ландшафта с целью определения свойственных ему почв (ландшафтный подход к распознаванию почв), для дешифрирования удобнее использовать фотосхемы. Если рельеф при таком анализе имеет существенное значение, лучше перейти к дешифрированию стереофотосхем.

В результате изучения имеющихся почвенных карт, архивных дневников с описанием разрезов лабораторного анализа проб почв уточняют и приводят в соответствие с существующей классификацией и диагностикой почв их наименование. На основе сопоставления дешифрируемых фотоматериалов с картами устанавливают закономерности во взаимосвязях и характеристиках почв с почвообразующими факторами, определяют прямые дешифровочные признаки почв, степень их надежности и возможности использования (в частности, пределы экстраполяции признаков). Аналогичную работу можно выполнить путем анализа материалов завершенного дешифрирования смежных, близких по природным условиям районов.

Камеральное дешифрирование начинают с разделения изображения на участки, однородные по тону (цвету) фотоизображения, его текстуре и сочетанию почвообразующих факторов. При анализе изображения районов со сложной мозаикой почвенных разновидностей, а также при недостаточной опытности специалиста можно использовать технологию, разработанную в Учебном центре Дельфта (Голландия), суть которой заключается в дифференцированном выделении участков с различными дешифровочными признаками и почвообразующими факторами. Результаты при этом последовательно фиксируют на двух-трех прозрачных основах различным цветом. Совместив основы, оконтуривают участки с различными комбинациями прямых и косвенных признаков. Процедуру разделения изображения на участки, предположительно различающиеся по характеристикам почв, иногда называют контурным почвенным дешифрированием.

При хорошем знакомстве с почвами района и их пространственным размещением и особенно при наличии достаточно надежной информации о признаках почв сразу же в процессе разделения изображения на однородные участки или по завершении

разделения предварительно определяют тип почв. В противном случае распознают почвы (генетическое дешифрирование) в полевых условиях.

Почвенные контуры, не вызывающие сомнения, вычерчивают сплошными линиями, сомнительные — пунктирными. По результатам камерального дешифрирования проектируют примерную сеть маршрутов, намечают ключевые участки и места заложения разрезов, лугов и прикопок. Маршруты должны проходить по всем сомнительным участкам, а также по участкам, почвы которых могли измениться по каким-либо причинам; разрезы должны быть заложены на каждом вновь выделенном (в сравнении с имеющейся почвенной картой) или иначе охарактеризованном участке. Кроме того, достоверность камеральной диагностики каждого типа почв проверяют по крайней мере трехкратно.

В качестве ключевых выбирают наиболее типичные для данного района участки. На них исследуют все варианты взаимосвязей почв с почвообразующими факторами, определяют прямые признаки и их надежность. Свойства всех типов почв изучают на разрезах. Результаты работы на ключевых участках используют для диагностики почв, если она камерально не была выполнена или оказалась незавершенной на сложных участках, и также для контроля достоверности диагностики дешифрированных участков.

На этапе камеральной обработки полевых материалов анализируют почвенные образцы, завершают и уточняют диагностику почв, уточняют положение контуров, оформляют образцы дешифрирования. Последние используют как эталоны при почвенном дешифрировании в районах с аналогичными природными условиями. К образцам прилагают пояснительную записку с кратким описанием природных условий района, его почвенного покрова, дешифровочных признаков почв; приводят сведения о характеристике съемочной системы и условиях съемки.

Топографической основой почвенной карты могут служить топографические или базовые карты земель. Если необходимо, то масштаб последних приводят к заданному механическим, оптическим или иным путем. Результаты дешифрирования переносят на основу с помощью компьютеров или проекционных приборов.

Если подходящей основы нет, то параллельно с почвенным выполняют топографическое дешифрирование. Объем топографической информации при этом сокращается до уровня, достаточного для пространственной привязки почвенной информации и свободного ориентирования на местности. Топографическую основу в этом случае составляют обычным фотограмметрическим путем, как при изготовлении базовых карт земель.

Изложенную технологию используют при крупномасштабном почвенном картографировании.

Использование при составлении детальных почвенных карт аэрофотоснимков также улучшает их качество и снижает затраты труда, особенно в районах со сложным строением почвенного покрова. Возможность детального анализа рельефа местности по стереоскопической модели с привлечением для анализа элементов микрорельефа и тона фотоизображения существенно повышает точность почвенного оконтуривания. Диагностику почв при детальном картографировании, как правило, выполняют в поле.

Время при работе с аэрофотоснимками экономят не только за счет сокращения числа разрезов, но и за счет значительного упрощения их привязки. Для районов с несложной структурой почвенного покрова, когда одни почвы постепенно переходят в другие, преимущества исчезают.

Средне- и мелкомасштабное картографирование выполняют с помощью аэро- и космических фотоснимков. Масштаб последних может быть несколько крупнее или равен масштабу составляемой карты, а при высоком линейном разрешении даже мельче масштаба карты. Такие фотоснимки предоставляют возможность специалисту более полно выявлять и использовать взаимосвязи почвенных покровов с различными компонентами и комплексами компонентов природной среды, определять типы ландшафтов и с их помощью распознавать присущие им почвы, т. е. применять ландшафтный подход к диагностике почв.

Информация о дешифровочных признаках почв может быть получена в результате анализа дешифрируемых изображений с привлечением имеющихся кондиционных крупномасштабных почвенных карт, а при их отсутствии — с использованием материалов исследований на ключевых участках. Технология визуального камерального дешифрирования принципиально не отличается от технологии, используемой при крупномасштабном картографировании.

С увеличением высоты фотографирования и уменьшением угла поля зрения съемочных систем значение почв в формировании спектрального состава отразившегося от земной поверхности солнечного излучения возрастает. К тому же фотометрические характеристики поля изображения в этом случае становятся более стабильными. Поэтому здесь появляется возможность привлечения к анализу снимков компьютерных технологий интерпретационной обработки. Например, используя приемы квантования диапазона оптических плотностей (уровней видеосигналов), можно выделить участки изображения, соответствующие одинаковым типам почв. Или, синтезируя цветные изображения по черно-белым снимкам зеленой, красной и инфракрасной зон спектра, получить достаточно точную информацию о различных характеристиках почв (гумусированности, карбонатности и т. п.).

19.2. ГЕОБОТАНИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Важнейшее направление сельскохозяйственного производства — культивирование травянистой растительности. В животноводстве большое значение имеет изучение и рациональное использование естественных кормовых угодий. Систематическое наблюдение за состоянием растительности, принятие оперативных мер по улучшению состояния, прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур и естественных трав имеет также большое хозяйственное значение. Наиболее эффективно перечисленные задачи можно решать средствами дистанционного зондирования.

В изучении земельных ресурсов по материалам аэро- и космических съемок и, в частности, в изучении почвенного покрова освоенных и подлежащих освоению земель большое значение также имеет растительность как индикатор почв.

В дистанционном изучении растительности можно выделить следующие основные направления:

- изучение естественных кормовых угодий;
- дешифрирование сельскохозяйственных культур, наблюдение за их развитием, прогнозирование урожайности;
- обнаружение заболеваний и повреждений растений.

Возможности дистанционного изучения (опознавания) растений обуславливаются главным образом различием их оптических свойств. Спектральный состав отразившегося от растения солнечного излучения в интервале длин волн $\lambda = 0,4 \dots 2,5$ мкм зависит в основном от интенсивности поглощения радиации хлорофиллом в видимой области и водой в средней зоне спектра, а также от интенсивности отражения, обусловленного особенностями гистологии листьев, в ближней ИК-зоне спектра $\lambda = 0,75 \dots 1,3$ мкм. Спектральная отражательная способность здоровых зеленых растений варьируется мало (рис. 19.2).

В видимой области спектра ассимиляция лучистой энергии растениями наиболее интенсивна. Максимум поглощения приходится на интервалы $\lambda = 0,40 \dots 0,47$ мкм в синей и $\lambda = 0,59 \dots 0,68$ мкм в красной зонах спектра, а максимум отражения — в зеленой зоне спектра с экстремумом около $\lambda \approx 0,54$ мкм.

В ближайшей ИК-зоне отражательная способность растений максимальна — 40...50 % и более. Зависит она от структуры листьев. Поскольку структурные межвидовые различия бывают существенны, то наибольшие различия коэффициента спектральной яркости (КСЯ) растений наблюдаются именно в этой зоне.

Фенологическая динамика растений, а также изменения, обусловленные дефицитом питательных веществ и воды, избыточной засоленностью почв, приводят к большей или меньшей трансформации исходной кривой КСЯ. По мере развития растений, пока

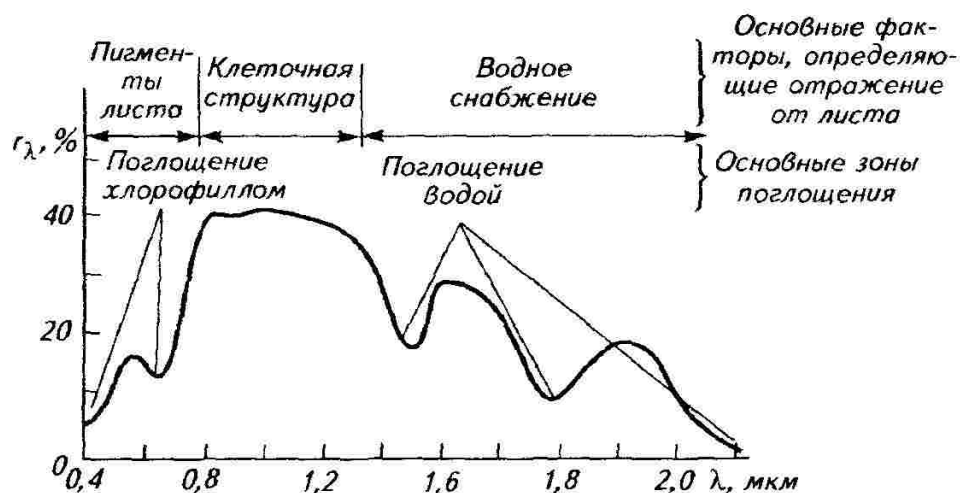


Рис. 19.2. График типичной кривой коэффициента спектральной яркости зеленых растений

окраска их определяется хлорофиллом, наблюдается некоторое снижение интенсивности отражения в видимой области спектра и увеличение в ближней ИК-зоне. В период созревания культур и увядания вследствие неблагоприятных условий произрастания и формирования цветового аспекта растений начинают превалировать желтые и красные пигменты. Интенсивность отражения в видимой области спектра при этом увеличивается, ход кривой КСЯ выравнивается с постепенным повышением по мере увеличения λ и несколько уменьшается в ближней ИК-зоне.

Анализ спектральной отражательной способности растений в интервале $\lambda = 0,4 \dots 2,5$ мкм и ее изменений во времени свидетельствует о том, что при правильном выборе параметров многозональной съемочной системы и сроков съемки можно решить ряд практических задач по определению вида растений и их состояния. Все изложенные закономерности формирования спектрального состава отражений солнечной радиации и его временных трансформаций относятся только к растительности. В реальных условиях почвы растительностью часто полностью не покрыты. Поэтому на радиационную информацию о растительности и ее состоянии будет накладываться информация о почвах.

КСЯ системы почва—растительность определяют по формуле

$$r_{SV} = P_V r_V + P_S r_S, \quad (19.1)$$

где P_V и P_S — части площади, соответственно покрытые и не покрытые растительностью; r_V и r_S — коэффициенты спектральной яркости растений и почвы.

Формула (19.1) приближенная. В ней не учитывается затененность почвы растениями. С увеличением высоты съемки эффект наложения r_λ почв на r_λ растений возрастает — сглаживается кривая КСЯ в интервалах поглощения хлорофилла, повышается зна

чение λ_d в оранжево-красной зоне спектра $\lambda = 0,59...0,72$ мкм. Особенно заметно влияние почв на КСЯ системы при проективном покрытии менее 60 %.

Дистанционное изучение естественных кормовых угодий выполняется с целью получения данных для общего планирования их эксплуатации и оперативного наблюдения за их состоянием и рациональностью использования. Для общей организации территорий пастбищ определяют их тип, культуртехническое состояние (закустаренность, заочкаренность, подверженность эрозии), продуктивность, скорость восстановления после стравливания и другие характеристики путем визуального анализа фотоизображения достаточно крупного масштаба. Конкретное значение масштаба определяется исходя из разрешения съемочной системы и размера элементов местности, подлежащих дешифрированию (кусты, кочки, промоины), если требуется культуртехническая оценка пастбищ.

При геоботаническом обследовании естественных кормовых угодий исходят из того, что отдельные растения на аэрофото-снимках и тем более на изображениях, полученных с помощью нефотографических съемочных систем, обычно не воспроизводятся. Поэтому прямые дешифровочные признаки [тон (цвет) и текстура изображения] создаются здесь совокупностями видовых компонентов, растительными ассоциациями. Тон (цвет) изображения растительных группировок существенно зависит от фазы вегетации и ряда других факторов (положения участка в плоскости кадра, силы и направления ветра в момент съемки и др.). Текстура изображения определяется мозаикой различных растительных группировок и изменением их состава в связи с изменением условий произрастания и, в частности, с изменением типа свойств почв. Неустойчивость и многозначность прямых дешифровочных признаков приводят к необходимости привлечения косвенных признаков к дешифрированию травянистой растительности.

Технологическая последовательность выполнения процессов остается примерно той же, что и при почвенном дешифрировании. Соотношение объемов полевых и камеральных работ существенно зависит от правильного выбора для съемки спектральной юны (зон при многозональной съемке), а также условий съемки (сезона, высоты и азимутного положения Солнца). Для повышения точности определения урожайности трав рекомендуют надирное спектрометрирование.

Для полевых работ рациональны летные средства, особенно вертолеты, позволяющие специалистам высадиться и выполнить наземные исследования на ключевых участках — определить ботанический состав кормов, мощность травостоя. Аэровизуальное дешифрирование выполняют одновременно с двух бортов на одномаршрутных фотосхемах.

В оперативном порядке устанавливают текущее распределение травостоя, степень скормленности и сбитости участков. На основании результатов таких обследований вносят коррективы в план использования пастбищ при отгонном животноводстве.

С понижением разрешения съемочных систем и точности стереоскопических наблюдений кадровых космических снимков, и особенно с практическим исключением возможности стереоскопического анализа сканерной видеоинформации, значительно сужается набор дешифровочных признаков, используемых при визуальном дешифрировании. Интегральный тон изображения, единственный оставшийся прямой признак, несмотря на тесную взаимосвязь с биомассой, можно использовать только при изучении равнинных пастбищ. В горных условиях, где расположена значительная часть пастбищ, основные тоновые вариации обуславливаются различием освещенности скатов. Несколько большими возможностями в этом случае обладают цветные спектрально-цветные или синтезированные снимки. По этой же причине здесь ограничены или вообще исключены возможности дешифрирования по спектральным признакам с помощью автоматизированных систем.

Зеленые вегетирующие растения отличаются от сухих растений и от обнаженных сухих почв по температуре. Растения с устойчивым водоснабжением имеют температуру листьев на $1...3^{\circ}\text{C}$ ниже, чем с недостаточным. Поэтому в равнинных районах геоботанические обследования можно выполнять с помощью ИК- и радиотепловых съемок. В горных районах при формировании тепловых полей важное значение имеют различия освещенности и, следовательно, неодинаковая прогреваемость скатов.

Примерно то же можно сказать и о возможностях использования радарных съемок в горных условиях. Радиосигнал при правильном выборе рабочей частоты чутко реагирует на проективное покрытие и высоту растений, а также на изменение ориентации площадки. Выделение полезной части радиолокационной видеоинформации — в данном случае задача пока сложная.

19.3. ДИСТАНЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

По прямым дешифровочным признакам большинство сельскохозяйственных культур, особенно близкие по структурным характеристикам, даже на крупномасштабных ахроматических аэро-снимках опознаются неуверенно.

По мере уменьшения масштаба фотографирования или снижения разрешения съемочной системы происходит яркостная интеграция полей, остаются за пределами разрешения структурные особенности самих растений, их посадок (посевов). На мелкомасштабных

табных аэро- и космических снимках единственным прямым признаком остается тон (цвет) изображения.

КСЯ сельскохозяйственных культур в период их зеленой окраски в видимой области спектра мало различаются. Поэтому и различия оптической плотности фотоизображения при съемке растений в этот период будут незначительными. Индивидуальные особенности изменения цветового аспекта культур в различных фенологических стадиях и временное несовпадение стадий дифференцируют спектральную отражательную способность различных видов растений. Следовательно, правильный выбор сроков съемки может повысить достоверность опознавания сельскохозяйственных культур.

Анализ результатов многократного определения спектральной отражательной способности культур показывает, что тон широкозональных фотоизображений, даже при оптимальных сроках съемки, не может обеспечить одновременного распознавания всех культур с нужной достоверностью (90...95 %). Дифференциация оптических плотностей для всех культур на данном снимке не обеспечена. Подтверждением этому служат увеличенные фрагменты зональных снимков (см. разд. 16.2). Поэтому от однозональной съемки переходят к многозональной. Спектральные признаки становятся основными. Достоверность опознавания большинства культур с их помощью при правильном выборе съемочной системы и условий съемки доходит до 75...95 %. Однако некоторые культуры вследствие сезонного сближения их спектральных характеристик распознаются ненадежно. Один из путей повышения достоверности распознавания таких культур — использование разновременных съемок. Конкретные сроки съемок определяют по результатам изучения сезонного хода спектральной отражательной способности близких по оптическим характеристикам культур.

Одна из важнейших задач дистанционного изучения сельскохозяйственных культур, особенно зерновых, — прогнозирование их урожайности двумя основными вариантами.

В первом варианте, наиболее простом и быстром, прогнозирование основано на одноразовом дистанционном изучении состояния посевов — определяют высоту и плотность стеблестоя, т. е. объем биомассы. По биомассе судят о вероятном выходе зерна, полагая, что между биомассой и выходом зерна существует определенная взаимосвязь. В некоторых случаях такой вариант дает неплохие результаты. Но бывают и неудачные решения, когда указанная взаимосвязь нарушается вследствие, например, неблагоприятных для формирования колосьев и налива зерна погодных условий в определенные вегетационные периоды. Очевидно, что прогнозирование на основе одноразового непосредственного изучения посевов может быть использовано, когда сама биомасса

является выходным продуктом, например при определении урожайности фуражных культур.

Основа второго варианта — математическое моделирование процесса развития культур. В моделях учитывают все основные факторы, формирующие урожай: почвы и их состояние, динамика погоды в период вегетации, фактическое состояние посевов при прохождении основных вегетационных стадий. Такие модели относятся к динамическим, функционирование их базируется на регулярном поступлении информации с ресурсных и метеорологических спутников о текущем состоянии посевов и погоды. Большое значение в повышении достоверности прогнозов имеют авиационные технические и визуальные наблюдения за состоянием посевов, увлажненностью почвы, температурным режимом. Результаты таких наблюдений позволяют одновременно оперативно принимать меры к улучшению состояния посевов и защите растений. Поэтому прогнозирование в этом варианте будет также динамическим. Прогнозы периодически корректируют с учетом последних данных о текущем состоянии посевов и принятых агротехнических и агрохимических мерах по улучшению состояния. Прогнозируют также сроки вероятного созревания зерновых и определяют оптимальные сроки уборки. Такие прогнозы выдают за три месяца до вероятного поспевания и корректируют через каждый месяц. Последний прогноз — за полмесяца до начала уборки.

Важная характеристика состояния посевов — степень их фенологической однородности, т. е. равномерность развития всех растений в пределах поля. Фенологической неоднородности, как правило, сопутствует изреженность стеблестоя:

$$И = \frac{P_0 - P}{P_0} 100\%, \quad (19.2)$$

где P_0 — оптимальное число растений на единице площади; P — фактическое число растений на той же площади.

При дистанционном изучении посевов возможность подсчета растений практически исключается. Изреженность посевов оценивают косвенно, через изменение интенсивности и спектрального состава отраженного излучения, обусловленного изменением доли участия компонентов системы почва—растительность—тени в формировании этого излучения. Эталонные значения оптической характеристики посевов с различной степенью изреженности могут быть получены аналитически по известным данным о КСЯ растений, почвы, освещенной прямыми солнечными лучами и затененной, по формуле, аналогичной формуле (19.1). В качестве весов при значении r_k компонентов системы почва—

растительность—тени принимают различные соотношения их площадей.

Более достоверные эталонные значения получают при непосредственном спектрометрировании посевов с различной изреженностью на тестовом участке. Заметим, что посевы относятся к сложным геосистемам — полихроматическим. Спектральный состав излучения, отражающегося под разными углами относительно отвесного направления и направления на Солнце, будет меняться. Поэтому более полная информация может быть получена, например, по аэрофотоснимку тестового участка путем фотометрирования изображения.

Аналогично изучают участки с различными поражениями, повреждениями и полеганием растений. Полегание растений существенно преобразует спектральную отражательную способность посевов. Почва практически полностью закрывается растениями. Спектральный состав отражающегося излучения формируется в значительной степени стеблями растений. Существенно изменяется структура поверхности, появляются по-разному бликующие фрагменты участков полегших посевов. На обычных широкозонных аэрофотоснимках такие участки уверенно опознаются по интегральному тону и своеобразной текстуре фотоизображения.

Авиационными средствами наблюдения могут быть следующие виды съемок: фотографическая, телевизионная кадровая, в том числе и телерепортажная, ИК- и радиотепловая, радиолокационная, а также аэровизуальные наблюдения. Спектральный интервал регистрации, особенно при выявлении очагов заболевания растений, выбирают по результатам спектрометрирования изучаемых явлений, а линейное разрешение съемочной системы — по размерам этих явлений.

Аэрофотосъемка при известных достоинствах (документальности результатов регистрации, высоком линейном разрешении, достаточно тонкой передаче изменений яркости снимаемой поверхности) имеет в данном применении ряд недостатков: невысокая оперативность передачи информации, использование (одноразовое) дорогостоящих серебростержащих материалов и др.

Большой оперативностью, что в данном случае очень важно, при достаточной энергетической избирательной способности обладают телевизионные съемочные системы. Телерепортажная аэросъемка отличается своеобразной формой представления информации — динамической. Если необходимо, то отдельные кадры такой съемки можно рассматривать в статическом режиме. Видеозапись может сопровождаться словесным комментарием оператора. Словами же передается информация о положении наблюдаемых объектов, условиях съемки и др. Линейное разрешение видеозаписи порядка 80 см при высоте полета 700 м вполне достаточно для обнаружения любых аномальных явлений на посевах.

Возможность выполнения в реальном масштабе времени процедуры квантования диапазона видеосигналов позволяет выделять и одновременно определять площади аномальных проявлений в посевах.

К оценке изреженности стеблестоя могут быть привлечены ИК- и радиотепловые съемки. Тепловой режим посевов коррелируется со степенью их изреженности. При этом определяют относительное изменение температур на исследуемых и эталонных участках с известными характеристиками травостоя. Радиометрические съемки имеют ряд ограничений: измерения должны выполняться в короткие временные интервалы при скорости ветра на поверхности не более 4 м/с и умеренной влажности почвы.

Возможности радиолокационной съемки, обладающей важным для регулярного контроля состояния посевов преимуществом (всепогодностью), нуждаются в исследовании. Установлено, что интенсивность рассеяния радиосигнала зависит от структуры растений и плотности травостоя. С помощью РЛСБО хорошо дифференцируются пропашные и зерновые культуры, участки с различными биометрическими характеристиками и др.

Развитие озимых зерновых культур контролируют по крайней мере три-четыре раза. В период всходов, до начала кущения, проверяют качество выполнения посевных работ, равномерность внесения удобрений (по однородности развития и цвета растений), засоренности посевов. По результатам обследования в этот период планируют выполнение агрохимических мероприятий (ранневесенние подкормки, обработку гербицидами). Прогнозируют возможность полегания растений (по интенсивности формирования вегетативной массы) и соответственно необходимость обработки посевов ретардантами. Принимают решение о пересеве погибших или сильно изреженных посевов. Аналогично контролируют всходы яровых культур.

Одно-двухразовые наблюдения посевов в середине вегетации позволяют проследить ход развития растений, наличие и степень их поражения болезнями, вредителями, повреждения неблагоприятными погодными условиями, засоренность. На основе собранной информации корректируют план мероприятий по текущей подкормке и защите растений, определяют вероятные сроки созревания хлебов по полям.

В предуборочный период контролируют состояние стеблестоя и равномерность созревания, выявляют участки полеглих посевов, определяют долю таких участков в общем массиве. На любом этапе эффективен один из наиболее оперативных и дешевых способов контроля — аэровизуальный. Оптические различия большинства аномальных явлений в посевах приходятся на видимую область спектра. Поэтому наблюдатель может достаточно точно выявлять такие аномалии и на глаз определять их площадь (ошиб-

ка порядка 6...8 %). Аэровизуальные наблюдения сопровождаются выборочной аэрофотосъемкой наиболее типичных участков посевов. Результаты наблюдения регистрируют на картах, планах, фотосхемах, записывают словесно с помощью диктофона, заносят в специальные бортовые журналы. Аэровизуальные наблюдения эффективны также при контроле хода и качества уборочных работ.

Съемочные средства (фотографические, телевизионные) используют также при контроле качества выполнения агротехнических и других мероприятий, а также при изучении эффективности новых технических средств и технологических вариантов выполнения этих работ. Например, по аэрофотоснимкам или телевизионным изображениям объективно и документально оценивают качество, в частности, равномерность внесения минеральных удобрений, правильность полива.

Важнейший критерий оценки эффективности средств фитопатологического контроля — оперативность получения информации о вспышках заболеваний растений, поражении их вредителями. Только при достаточной оперативности может быть выполнена своевременная диагностика заболеваний (поражения) и приняты меры по сохранению урожая. Запоздавшая по организационным или техническим причинам информация может оказаться также полезной, но уже для оценки возможных потерь при прогнозировании урожайности.

Параметры съемочной системы, частоту и время дистанционных наблюдений выбирают на основании данных о развитии различных заболеваний и их проявлениях через изменение спектральной отражательной способности. Характер изменения выявляют, сопоставляя результаты систематического спектрометрирования больных и здоровых растений. При этом важно установить, на сколько своевременно и какими средствами можно констатировать факт заболевания.

Поражение болезнями зеленых растений приводит к постепенному сглаживанию характерных изгибов кривой r_λ в видимой области спектра. Значения r_λ несколько возрастают в зеленой и более существенно в красной зонах спектра. Яркость увеличивается в средней ИК-зоне и одновременно уменьшается в ближней.

Трансформация спектральной отражательной способности пораженных болезнями растений обуславливается рядом факторов. Во-первых, изменяется спектральная яркость самих растений. В листьях происходят глубокие физиологические изменения — ослабляется тургор, уменьшается или прекращается совсем выработка хлорофилла с последующим разрушением его ткани и др. Изменяется окраска и яркость листьев. С увяданием их увеличивается доля участия черешков листьев в формировании отраженного светового потока. Во-вторых, увядание, а тем более скручивание или

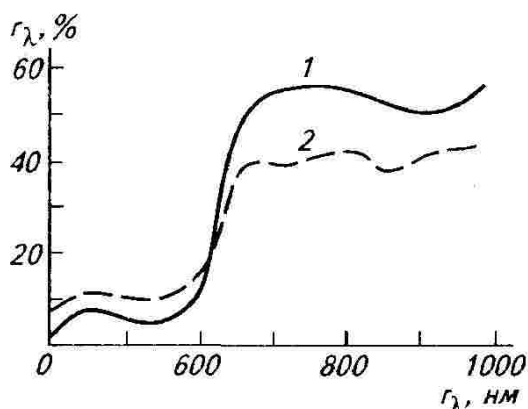


Рис. 19.3. Кривые КСЯ здоровой (а) и пораженной нематодой (б) сахарной свеклы

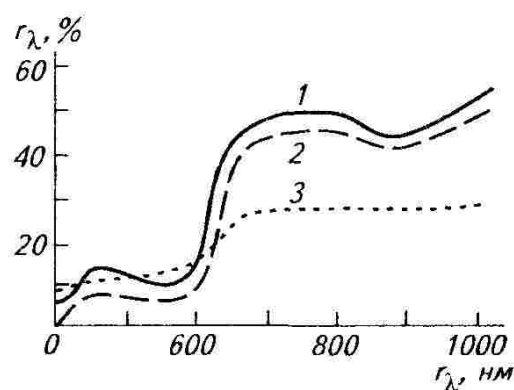


Рис. 19.4. Кривые КСЯ здоровой (а) и пораженной ризоманией (б) сахарной свеклы

опадание, уменьшает проективное покрытие и почва начинает вносить большой вклад в спектральную яркость системы растения—почва.

Известно, что различные заболевания растений по-разному воздействуют на их жизненные функции. Различны и внешние проявления их во времени и форме. В качестве примера на рисунке 19.3 показаны кривые КСЯ сахарной свеклы здоровой (а) и пораженной нематодой (б) (наблюдения в середине июля), а на рисунке 19.4 — кривые КСЯ сахарной свеклы здоровой (а) и пораженной ризоманией (б) (наблюдения в середине июля 2 и в начале сентября 3). Сравнение этих данных свидетельствует о том, что в первом случае заболевание приводит к резкому изменению КСЯ в июле, тогда как во втором случае июльская кривая практически та же, что и у здоровых растений. Только в сентябре различие кривых становится явным. Для изучения фитопатологических проявлений перспективно использование инфракрасного и пассивного радиотеплового видов съемки.

Существенное преимущество фитопатологического контроля с помощью съемочных средств перед традиционным наземным обследованием заключается в том, что здесь специалист может получить самое полное представление о границах распространения болезни. Это упрощает процесс планирования и организацию работ по спасению урожая.

19.4. ДИСТАНЦИОННЫЕ ПОИСКИ ГРУНТОВЫХ ВОД

Поиски пресных и слабоминерализованных грунтовых вод имеют огромное значение в сельскохозяйственном производстве, особенно в водообеспечении скота в южных районах отгонного животноводства.

Гидрогеологическое дешифрирование аэро- и космических снимков выполняют с целью обнаружения грунтовых вод, опреде-

ления глубины их залегания, степени минерализации и территориального расположения. Используют два варианта гидрогеологического дешифрирования: индикационный и ландшафтный. В первом варианте поиск ведут с использованием внешних признаков наличия грунтовых вод — определенных видов растений и их сообществ, типов почв некоторых геоморфологических образований, например суффозных воронок. Этот вариант наиболее распространен. Он прост, доступен, но требует большого объема работ для определения гидрогеологической характеристики территории в целом.

Ландшафтный вариант основан на использовании взаимосвязи гидрогеологических характеристик с определенными типами таксономических единиц ландшафта, например факций и урочищ.

При визуальном дешифрировании индикаторов используют преимущественно прямые признаки. Наибольшее значение имеет тон фотоизображения. Тоновые различия зависят от видового состава и фазы вегетации растительности, проективного покрытия и типа почв.

Мезофильные растительные сообщества — индикаторы залегания пресных грунтовых вод (пырей с солодкой, пырей с верблюжьей колючкой, типчак с житняком), а также растения-мезофиты (тамариск, песчаная полынь, вейник, мятлик и др.) обладают сравнительно невысокой отражательной способностью в видимой области спектра. Растения ксерофиты и галофиты (полынь белая и солончаковая, пырей солевыносливый, солянка однолетняя и др.) характеризуются большей яркостью. Поэтому в зеленый период вегетации на аэрофотоснимках масштабов 1:10 000...1:25 000, полученных в спектральной зоне $\lambda = 0,6...0,7$ мкм, растения-индикаторы по тону изображения разделяются достаточно надежно. По мере выгорания растений на возвышенных участках местности возрастает яркостный контраст понижений с еще зеленой растительностью на линзах пресной воды. Понижения с солеными грунтовыми водами отличаются большей яркостью. Их изображения имеют неровную пятнистую текстуру со светлой каймой выцветов соли.

В период, когда растительность выгорает повсеместно и не различается по яркости, индикационный приоритет переходит к почвам. Почвы западин с минерализованными грунтовыми водами ярче, чем с пресными.

Оптимальным сезоном аэрофотосъемки для гидрогеологических изысканий является весна — начало лета.

Примерная технология работ: изучение индикаторов и их дешифровочных признаков на ключевых участках, предварительное камеральное дешифрирование снимков, полевой контроль и уточнение результатов дешифрирования.

В качестве перспективных способов гидрогеологических изысканий может служить радиолокационное глубинное зондирова-

ние, выполняемое параллельно с обычной аэрофотосъемкой. Материалы аэрофотосъемки, в частности фотосхемы, служат для привязки данных радиозондирования и изготовления гидрогеологической фотокарты.

19.5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ПРИ СОЗДАНИИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В различных областях человеческой деятельности стремительно развиваются информационные технологии. В общем понимании информационная технология включает теорию, методы, средства, системы, направленные на сбор, обработку и использование информации. Существуют специализированные пространственные информационные системы для работы с информацией об объектах, явлениях и процессах, имеющих определенное место в координатном пространстве. Такие системы принадлежат к классу географических информационных систем, обозначаемых сокращенно ГИС. При организации и управлении территорий, ведении кадастра и мониторинга земель применяют геоинформационные системы, которые представляют собой модель пространственного размещения объектов местности с соответствующей смысловой (атрибутивной) информацией о каждом из них. ГИС представляет собой инструмент для принятия практических решений определенной тематической направленности на основе всеобъемлющей информации, хранящейся в ее среде. Геоинформационные технологии — процесс организации, связи, манипулирования, анализа и представления пространственных данных.

ГИСы имеют различную организацию, поэтому круг и сложность решаемых задач также широки и разнообразны. Например, можно ограничиться получением статистической информации о конкретном землевладении и регистрации земельной собственности или выполнить анализ глобальных проблем, связанных с сохранением экологического равновесия в зонах деятельности предприятий. С помощью ГИС можно выполнять мониторинг народонаселения, производства сельскохозяйственной продукции, последствий природных катастроф, оптимизацию маршрутов движения общественного или личного транспорта, расположения площадок под промышленное или жилищное строительство, проложения трубопроводов, линий электропередач, дорог и т. п.

Любая геоинформационная система состоит из пяти основных компонентов:

- аппаратные средства (Hardware);
- программное обеспечение (Software);
- данные (Data);
- исполнители;
- методы.

Аппаратные средства представляют собой различные типы компьютеров. Это могут быть отдельные персональные компьютеры и связанные в единую сеть посредством мощного сервера.

Программное обеспечение ГИС позволяет выполнять различные операции по вводу, хранению, анализу и визуализации пространственной информации. Программы включают отдельные составляющие: модуль ввода картографической информации и действий с ней; систему управления базой данных; программу запроса пространственной информации, ее визуализации и анализа, графический пользовательский интерфейс для оперативного доступа к хранящейся информации. В некоторых ГИС используется дополнительное программное обеспечение для решения специальных задач, например для автоматического проектирования или тематического углубленного статистического анализа.

Данные, хранящиеся в информационной базе, являются наиболее важным компонентом ГИС. Прежде всего, это планово-картографическая основа, получаемая пользователем с помощью программного обеспечения самой ГИС или приобретенная у других производителей данной продукции. Создание планов и карт в рамках самой ГИС можно осуществлять по материалам наземной геодезической съемки или фотограмметрическим методом, по аэро- и космическим снимкам. Смысловую и статистическую информацию получают из соответствующих организаций и подразделений в виде отчетов, таблиц, картограмм и т. п. При работе со снимками основную информацию получают в процессе дешифрирования. В ГИС объединяются данные о пространственном положении объектов с атрибутивной информацией о них, при этом существующие в ее среде системы управления базой данных (СУБД) позволяют систематизировать сведения, управлять информационными потоками и использовать их для решения конкретных задач.

Исполнители, работающие с программными средствами ГИС, разрабатывают стратегию оптимального использования возможностей системы при реализации поставленной задачи. Квалификация исполнителей определяется знаниями компьютерных технологий, аэро- и космической съемки, фотограмметрии и дешифрирования, геодезии, картографии и в направлениях областей исследования, например землеустройстве, кадастре или планировке поселений.

Методы представляют собой сочетание оптимально составленного плана работы, соответствующего специфике конкретной решаемой задачи и возможностям геоинформационной системы. Выбор метода, строгость его организации и исполнения определяют успех и эффективность применения ГИС.

Как уже отмечалось ранее, современные геоинформационные системы, как правило, имеют подсистемы обработки аэро- и кос-

мических фотографических или нефотографических (радиолокационных и тепловых) снимков. Получаемые в результате ортофототрансформирования изображения являются основой для создания базовых топографических планов и карт, которые в свою очередь представляют собой в ГИС базу для пространственного размещения информации. Преобразовывать цифровые изображения можно не только в прямоугольную систему координат, но практически в любую из применяемых в картографии. В процессе создания ортофотоизображений программными средствами улучшается качество изображений: проводится выравнивание по оптической плотности, повышается проработка деталей в тенях, изменяется контрастность изображений, цвет изучаемого класса объектов и т. п. Улучшение качества изображения способствует повышению точности фотограмметрической обработки и интерпретации изображений.

ГИС могут быть специального назначения для решения довольно узкого тематического круга задач или многофункциональные, применяемые для сбора, анализа информации и составления оптимальных проектов широкого спектра человеческой деятельности.

Контрольные вопросы и задания

1. На снимке Подмосковья (см. рис. 15.3), в правой его части, изображена территория, подверженная плоскостной и линейной эрозии. На этой территории выполнено противоэрозионное лесонасаждение (см. снимок на рис. 15.4, полученный через 10 лет). Определить наиболее вероятный вид насажденных деревьев. 2. На двух снимках одна и та же река изобразилась резко различающимся тоном (см. рис. 15.3 и 15.4). Обосновать это явление, полагая, что состояние реки и календарное время получения обоих снимков одинаковы. Какой практический вывод можно сделать по результатам выполненного анализа? 3. На перекрывающихся частях пары смежных снимков тон изображения некоторых элементов ландшафта различен (см. рис. 15.1). Найти такие элементы. Объяснить причину различий. 4. Объяснить причину гибели части виноградника, показанного на рисунке 14.3. Можно ли было прогнозировать возможность гибели до закладки виноградника, имея аэроснимки этой территории? 5. В поселении (см. рис. 15.3 и 15.4) имеется родник, активно используемый населением. С помощью косвенных признаков найти место расположения родника.

Глава 20

МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

20.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДСИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

В систему мониторинга земель входят наземная, авиационная и космическая подсистемы.

Космическую подсистему используют для федерального и регио-

нального мониторинга земель на территориях площадью 1 тыс. км² и более. Состоит она:

- из космических летательных аппаратов;
- бортовой аппаратуры дистанционного зондирования;
- средств передачи информации, получаемой при зондировании;
- средств приема, регистрации и хранения информации на специальных пунктах, расположенных на Земле;
- технических и программных средств отраслевой и межотраслевой обработки получаемой информации.

В космической подсистеме используют КЛА, съемочные и технические средства, разрабатываемые специально для решения задач государственного мониторинга земель и экологического мониторинга территорий. Также можно использовать спутники и бортовую аппаратуру, принадлежащие другим ведомствам. Для обеспечения комплексного многоцелевого мониторинга земель на борту космического аппарата устанавливают несколько съемочных систем, работающих в различных спектральных зонах: фотоаппаратура, многозональные сканеры, радиолокаторы и другие.

Для реализации космического мониторинга земель разрабатывают комплексный план космических съемок, включающий следующие сведения: тип используемого космического летательного аппарата; типы съемочных систем, требуемая периодичность съемок; объекты съемки с указанием географических координат границ. План космических съемок формируется на основе заявок, поступающих от фирм и организаций, осуществляющих мониторинг земель.

Для проведения анализа многолетних изменений категорий земель и экологических систем существуют отечественные и зарубежные архивные фонды материалов космических съемок. В Российских фондах содержатся снимки, полученные с космических аппаратов серии «РЕСУРС-Ф», «ОКЕАН-О», «АЛМАЗ», станции «МИР» и др.

Авиационную подсистему используют для проведения мониторинга на региональном и локальном уровнях.

Съемки проводят с высотных (тяжелых), средневысотных и низколетающих (легких) воздушных аппаратов.

Высотные летательные аппараты: ТУ-134СХ, АН-30, ИЛ-20 и другие средства применяют при съемке достаточно больших площадей. Они оборудованы комплексами автоматического самолетовождения, использующими для навигации данные GPS-аппаратуры. Самолеты подобного класса представляют собой летающие лаборатории с комплексом различной аппаратуры дистанционного зондирования.

Например, с самолета ТУ-134СХ можно выполнять съемку: многозональной сканерной системой, обеспечивающей полу-

чение информации в цифровом виде в нескольких спектральных зонах (в том числе и тепловом интервале);

радиолокационной станцией бокового обзора «Нить-С1СХ» — длина волны радиоизлучения 3 см, полоса обзора земной поверхности с высот съемки 3,5 и 6,5 км соответственно 15 и 37,5 км, масштабы радиолокационных изображений $1:M = 1:10\,0000...500\,000$;

аэрофотоаппаратами типа ТАФА-10, MRB, многозональной аэрофотокамерой МСК-4 и др.

Средневысотные самолеты АН-2, АН-28, ВСХС и другие используют для аэрофотосъемки, аэровизуальных наблюдений, съемок с использованием видеоаппаратуры.

Низколетающие летательные аппараты (ЛА) используют для проведения локального мониторинга земель. Широко применяют мотодельтапланы и беспилотные дистанционно управляемые ЛА. Например, на малом дистанционно управляемом летательном аппарате (МДПЛА) устанавливают съемочные системы для регистрации пассивного излучения в спектральном интервале (0,5...14 мкм), проводят аэрофотографирование в крупных масштабах малыми аэрофотоаппаратами типа АФА-39. Управление полетом и съемкой выполняют на удалении до 50 км при высотном потолке 3000 м и крейсерской скорости ЛА до 100...110 км/ч.

В подсистему наземных работ входят:

обеспечение дистанционного мониторинга земель опорной информацией для организации баз данных, используемой при обучении интерпретационных систем (автоматизированный метод дешифрирования). Оценка дешифрирования материалов аэро- и космических съемок;

калибровка технических средств дистанционного зондирования, учет влияний атмосферы, географическая (геодезическая) привязка материалов аэро- и космических съемок, организация пунктов первичной обработки данных, подготовка экспресс-информации.

Наземные наблюдения проводят на тестовых участках, соответственно локального, регионального и федерального значения. Основным критерий выбора тестового участка (полигона) — представительность (репрезентативность) объектов, гарантирующая достоверность получаемой информации. Тестовые участки выбирают на основании изучения многолетних статистических данных: климатических показателей, категорий земель и состояния земельного фонда, наличия и интенсивности эрозии, заболачивания, засоления, загрязнения почв, размещения транспортных и промышленных предприятий, состояния водных объектов и т.п. Район, располагающий группой представительных тестовых участков, принимают как базовый.

Данные подсистемы наземных наблюдений представляют в виде текстовых описаний, таблиц, гистограмм, картографической продукции и т.п. Наиболее существенная часть анализа результа-

тов наземных наблюдений — прогнозирование проявления форм и динамики развития контролируемых объектов и явлений, определение взаимосвязей между параметрами исследуемых объектов и их изображениями или результатами измерений излучений, характеризующих свойства этих объектов.

20.2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Методика мониторинга земель может быть представлена в виде определенных последовательных действий, отвечающих смыслу понятия «мониторинг», — периодическое, с некоторым временным интервалом, получение информации об изучаемом объекте или явлении, анализ и прогнозирование его развития. Полученные данные учитывают при разработке управленческих и технических мероприятий.

Проведение мониторинга земель включает несколько укрупненных процессов, обеспечивающих получение необходимой информации: разработка общей стратегии исследования; сбор фоновых материалов; выбор программного и технического комплекса; получение периодических материалов дистанционного зондирования; сравнение, анализ и прогнозирование изучаемых объектов и явлений.

Разработка общей стратегии исследования является *подготовительным этапом* мониторинга земель. На район изучения подбирают все фоновые материалы, включая материалы аэро- и космических съемок прошлых лет, планово-картографический материал, результаты различных обследований территории, статистический материал и т.п. На основе анализа фоновых данных выявляют динамику изменений объекта исследования, что позволяет определить оптимальную периодичность проведения съемок. Иерархический уровень мониторинга (федеральный, региональный или локальный) предъявляет требования к точности и генерализации конечной информации. Определяют способ дистанционного зондирования (наземный, авиационный или космический) и тип съемочной аппаратуры.

Задачи, решаемые при мониторинге земель, относятся к разряду создания различных тематических информационных слоев, т. е. к созданию информационной земельно-кадастровой базы данных. Эффективность процедур работы с огромным количеством получаемой информации, доступность к этой информации, возможность ее визуализации, обмена внутри базы и экспорта-импорта в другие информационные системы и т. п. определяет *выбор конкретной, используемой при данном мониторинге геоинформационной системы*.

Производство аэро- или космических съемок — наиболее важный этап мониторинга земель. Съемки проводят в определенные на подготовительном этапе периоды времени. Космические съемки выполняют на основании заявок, в которых помимо дат съемок указывают тип используемой аппаратуры, спектральную зону съемки, формат представляемых результатов и т. п. Наземные и воздушные съемки проводят специализированные фирмы и предприятия, в соответствии с разработанными техническими заданиями в целях мониторинга земель.

Изображения *подвергаются фотограмметрической обработке и дешифрированию*, с целью получения топографических и тематических планов, карт заданных масштабов, а также их электронных аналогов в ГИС в виде соответствующих геоинформационных слоев. Результаты определений характеристик земель, полученных специальной измерительной аппаратурой, наносят на топографическую основу для пространственной привязки. По нанесенным данным выделяют границы распространения изучаемого параметра земель.

Используя фондовые материалы и материалы новых съемок, программными средствами ГИС проводят *сравнение* разновременных данных. В результате их *анализа* выявляют изменения в положении границ, площадей, качественного состава, использования и правового статуса категорий земель. Особо выделяют экологические изменения земель, вызванные техногенными процессами.

Общая схема мониторинга земель по данным аэро- и космических съемок приведена в таблице 20.1.

20.1. Основные операции и их содержание на различных этапах технологической схемы мониторинга

Этапы технологической системы мониторинга	Основные операции	Содержание операций
Подготовительный этап	Разработка основных технологических циклов	Оценка состояния и динамики изменения категории земель. Выбор условий проведения съемок, типа и параметров съемочных систем
Проведение аэро-, космических и наземных съемок	Получение двух-, трехмерных изображений, результатов измерений	Первичная обработка результатов съемок
Наземное обеспечение дистанционного мониторинга	Выбор тестовых участков	Получение количественных характеристик категорий земель
Получение метрической и смысловой информации	Ввод растровых и векторных изображений, фотограмметрическая обработка, дешифрирование изображений	Трансформирование изображений в заданную проекцию, получение семантической информации

Этапы технологической системы мониторинга	Основные операции	Содержание операций
Сопоставление фондовых и новых данных	Сравнение растровых, векторных изображений и данных наземных наблюдений. Количественная оценка связи метрической информации и данных наземных наблюдений	Синтезирование разновременной информации. Выявление изменений метрических и качественных характеристик, правового положения земель. Статистический анализ взаимосвязи наземных и дистанционных данных
Формирование выходных данных и документов	Вывод цифровых моделей местности: электронных ортофотопланов, геоинформационных слоев, текстовых, табличных и графических материалов; формирование базы данных	Хранение разновременной информации, тиражирование электронных и твердых копий

Экстраполяция полученных результатов позволяет прогнозировать динамику изучаемых процессов.

20.3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ*

Экологический мониторинг является комплексной подсистемой мониторинга биосферы. Он включает системы повторных наблюдений, оценку и прогноз природных и антропогенных изменений окружающей среды, что позволяет достаточно надежно контролировать экологические условия среды обитания человека и других биологических объектов, а также функциональное состояние экосистем. Кроме того, создаются предпосылки для соответствующих корректирующих действий, если показатели экологических условий этого требуют.

Основная задача Государственного экологического мониторинга — раннее обнаружение и предупреждение естественных или антропогенных изменений состояния окружающей природной среды.

Экологический мониторинг осуществляют в целях:

наблюдения за состоянием окружающей среды, особенно в районах расположения источников антропогенного воздействия;

оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов;

обеспечения потребностей государства, юридических и физических лиц в достоверной информации о состоянии окружающей среды и ее изменениях, необходимой для предотвращения

*Раздел написан совместно с А. Н. Лимоновым и К. И. Куликовым.

и(или) уменьшения неблагоприятных последствий таких изменений;

обеспечения участия Российской Федерации в международных системах экологического мониторинга.

Виды экологического мониторинга земель. По технологии получения информации все мониторинговые исследования можно разделить на две большие группы: I — *методы наземных обследований*, II — *методы дистанционного зондирования*.

По временному интервалу поступающей информации мониторинг подразделяют на *периодический* и *оперативный*. Периодический мониторинг проводится для получения данных за определенный период (обычно раз в 1, 3, 5...15 лет). Периодичность получения информации обычно обуславливается скоростью протекания тех или иных негативных процессов и их опасностью для окружающей среды и человека.

Оперативный мониторинг проводят для получения данных на текущий момент. Чаще всего необходимость в проведении такого мониторинга появляется при возникновении чрезвычайных ситуаций, интенсивном и широкомасштабном использовании природных ресурсов, быстро изменяющемся состоянии и облик ландшафтов (обустройство и начало разработки месторождений полезных ископаемых, лесные пожары и пр.).

В зависимости от пространственного уровня проведения мониторинг подразделяют: на *биоэкологический* (локальный); *геоэкологический* (региональный) и *биосферный* (глобальный).

Главная задача биоэкологического мониторинга земель — выявление реакции биосферы на антропогенные воздействия. Обычно его проводят на небольших территориях, в наибольшей степени подверженных тем или иным экологическим воздействиям.

Геоэкологический мониторинг позволяет выявлять изменения геосистем на региональном уровне, а также последствия преобразования их в природно-технические системы (агроэкосистемы, среду индустриальных районов, городскую среду и т. д.).

Биосферный мониторинг включает наблюдения за параметрами биосферы в глобальном масштабе и замыкает систему слежения за окружающей средой.

В зависимости от силы воздействия на окружающую среду, мониторинг подразделяют на *фоновый* и *импактный*.

Фоновый мониторинг земель предполагает слежение за состоянием компонентов природной среды (почв, растительности, водных объектов и пр.), не испытывающих непосредственного влияния техногенных факторов, и призван фиксировать относительно слабые сигналы глобального и регионального техногенного воздействия. Фоновый мониторинг чаще всего проводят на охраняемых территориях (заповедниках, заказниках и пр., что позволяет оценивать косвенное влияние вмешательства человека в изменение состояния компонентов окружающей среды.

Импактный мониторинг ставит своей целью выявление, анализ и прогноз воздействия на земли непосредственного влияния различных антропогенных факторов.

При организации и проведении экологического мониторинга земель используют все перечисленные направления исследований.

Важная часть экологического мониторинга земель — этап обоснования и выбора тестовых участков (или ключевых полигонов). На тестовых участках проводят основной объем наблюдений. Обусловлено это тем, что детально изучать большие, особенно однородные, территории, испытывающие однотипные антропогенные (или природные) воздействия, неразумно и невыгодно экономически. Более обоснованным является детальное изучение природных условий, специфики функционирования компонентов ландшафта на небольшой части однородной территории.

По данным, полученным на тестовых участках, проводят экстраполяцию (перенесение) выявленных закономерностей на соседние участки земель, подлежащих наблюдению. Тестовые участки и их число должны в наибольшей степени отражать все важнейшие свойства изучаемой территории. Работа на тестовых участках — обязательный этап, как при наземных, так и при дистанционных исследованиях. Очевидно, что при использовании материалов аэро- и космических съемок число тестовых участков сокращается.

Данные, полученные на тестовых участках, будут удовлетворять по полноте и качеству поставленным задачам, и могут быть без существенных корректировок экстраполированы на другие территории со сходным набором природных и антропогенных признаков. Выбор числа ключевых участков и их площади зависит: от сложности ландшафтных условий, типа и интенсивности воздействия, масштаба картографических работ, используемых методов мониторинга.

В зависимости от благоприятных условий проведения полевого сбора интересующей информации, оптимальных сроков дистанционного зондирования, при которых наилучшим образом выявляются экологические изменения, устанавливают определенные сроки проведения аэро- и космических съемок, полевых обследований и наблюдений.

Например, геоботанические обследования на землях оленьих пастбищ при ведении мониторинговых работ необходимо проводить со следующей периодичностью: I — для фоновых участков, в том числе на землях оленьих пастбищ, — раз в 4...5 лет; II — в случае воздействия аэротехногенных выбросов промышленных предприятий — раз в 2...3 года; III — на территории освоения нефтегазовых месторождений — ежегодно.

Методологические особенности экологического мониторинга земель дистанционными методами. Дистанционные методы получе-

ния информации — основной способ наблюдения за экологическими изменениями состояния земель.

Физическая основа экологического мониторинга дистанционными методами заключается в том, что объекты (или их отдельные части) с изменившимися физическими и химическими свойствами имеют иные отражательные или излучательные способности. Поэтому на материалах аэро- и космических съемок объекты с измененными свойствами могут изображаться в виде ареалов иной оптической плотности или цвета.

Методология проведения экологического дистанционного мониторинга включает несколько этапов:

- определяют время и условия наблюдений, при которых в наибольшей степени различаются отражательные или излучательные характеристики объекта и его аномальных изменений;

- выбирают тип съемочной системы, обеспечивающей наилучшую регистрацию исследуемых объектов;

- выполняют, с помощью выбранной съемочной системы, аэро- или космическую съемку в оптимальные сроки;

- выполняют фотограмметрическую и интерпретационную обработку полученных снимков;

- сравнивают с фоновыми данными, материалами полевых обследований тестовых участков;

- анализируют на основе полученных сведений динамику изучаемого процесса и прогнозируют его на будущее.

Далее данные мониторинга земель используют для разработки управленческих, организационных и технических решений. В случае выявления негативных процессов, устраняют источники, их вызывающие, или минимизируют их проявление.

Индивидуальные особенности некоторых экологических процессов обуславливают специфические требования к проведению аэро- или космических съемок, при которых выявляемые изменения земель интерпретируются наилучшим образом.

Например, при использовании материалов аэро- и космических съемок для выявления механических нарушений ландшафтов или их загрязнений углеводородами, буровыми растворами, другими веществами, контрастно выделяющимися на ландшафте, предпочтительнее использовать весеннюю или осеннюю съемку. Для выявления площадей ландшафтов, загрязнение которых наилучшим образом определяется (индицируется) по состоянию растительности (тяжелые металлы, газовые выбросы, давние последствия углеводородного загрязнения и т. д.), лучше использовать съемку в середине или первой половине лета. При аэротехногенных воздействиях на земли первичные ареалы загрязнения необходимо выявлять по зимним снимкам, сделанным в середине или в конце зимы, в моменты наибольшего загрязнения снега.

Для сопоставления данных мониторинга их необходимо получать при возможно близких условиях наблюдения состояния объекта.

При изучении экологических изменений целесообразно и эффективно построение трехуровневого мониторинга, включающего одновременное использование данных наблюдений, зафиксированных в заданном временном интервале на земле, с воздуха и из космоса.

При проведении экологического мониторинга земель с использованием материалов аэро- и космических съемок необходимо получать и обрабатывать информацию обо всех компонентах природной и антропогенной среды (рис. 20.1). Только в этом случае можно объективно судить о масштабах и причинах изменения состояния земель.

При загрязнении территорий практически всеми веществами: нефтью, после того как она впиталась в почву; тяжелыми металлами; диоксидом серы и т. д. — основным индикационным признаком становится растительность. Экологическая информативность наиболее полно изучена для растений и их реакций на те или иные виды или степени антропогенных воздействий.

Спектральные характеристики растений определяются в основном способностью листовой отражать, поглощать или пропускать солнечную энергию. В интервалах длин волн 0,7...1,3 мкм большая часть потока солнечной энергии отражается лиственным по-

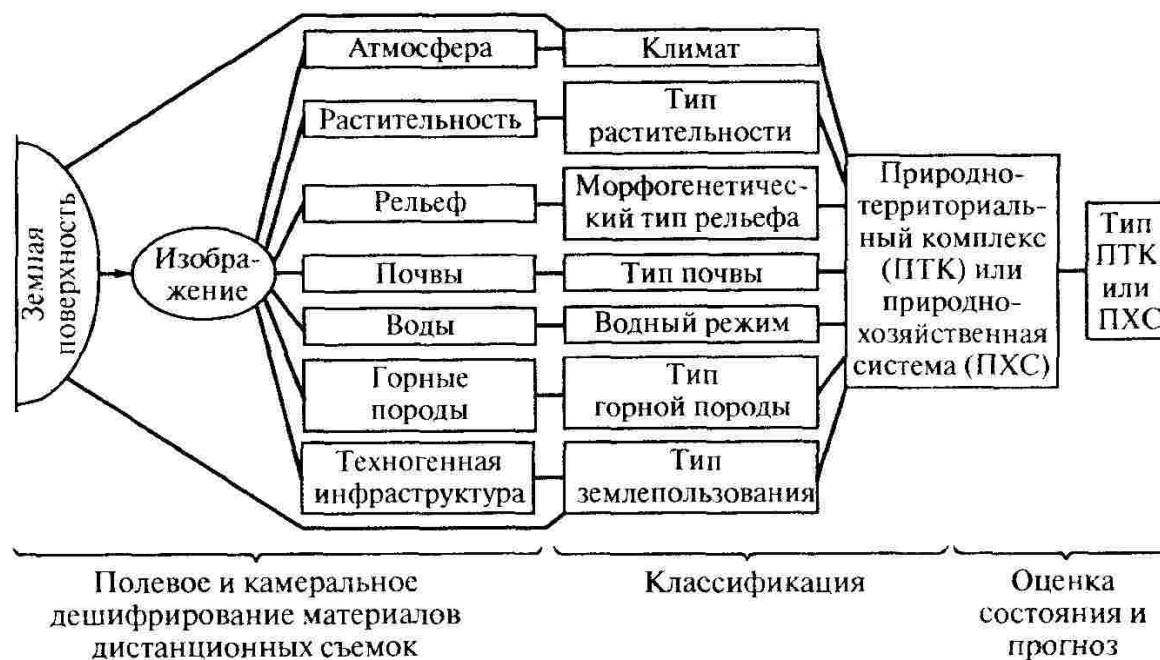


Рис. 20.1. Компоненты природной и антропогенной среды в системе экологического мониторинга земель

кровом. При ухудшении условий среды растения испытывают угнетение, выражающееся в различных формах: пожелтение (хлороз), завядание, т. е. обезвоживание. Как следствие происходит вырождение хлорофилла и заметное снижение поглощения излучения в голубой и красной зонах (0,4...0,5 и 0,6...0,75 мкм). На аэрофотоснимках, полученных в голубой и красной зонах спектра, угнетенная растительность оказывается более светлой, чем здоровые растения того же вида. Также отмечено, что в случае произрастания растительности на почвах, загрязненных тяжелыми металлами, заметно возрастает ее отражательная способность в интервалах 0,63...0,69 и 1,55...1,75 мкм.

Экологические изменения почв и почвенного покрова (ПП) также возможно выявлять по материалам аэро- и космических съемок.

Наиболее резкие и соответственно хорошо отображаемые на материалах съемок нарушения ПП происходят в результате техногенных воздействий на земную поверхность. Они приводят или к полному нарушению отдельных участков почв, или к резкому изменению их свойств. Наиболее широко распространены следующие воздействия, приводящие к нарушению почвенного покрова, изменению его свойств, отображаемые на материалах аэро- и космических съемок:

- открытые разработки полезных ископаемых;
- торфоразработки;
- выбросы нефти из буровых скважин и при прорыве трубопроводов;
- сооружение осушительных и оросительных каналов;
- орошение и осушение почв;
- строительство дорог;
- строительство поселков, городов, промышленных предприятий, ферм;
- рубка леса;
- лесные пожары;
- нарушение агроприемов при обработке и использовании пахотно-пригодных почв и др.

Примером возможностей применения материалов аэро- и космических съемок для экологического мониторинга земель может служить изображение территории Западной Сибири, полученное камерой КФА-200 в районе интенсивной добычи нефти и газа (рис. 20.2).

Содержащаяся на снимках информация позволяет проводить работы, входящие в систему экологического мониторинга:

намечать тестовые участки (показаны на рисунке). При этом в качестве дополнительной вспомогательной информации используют топографические основы близкого масштаба и ряд темати-

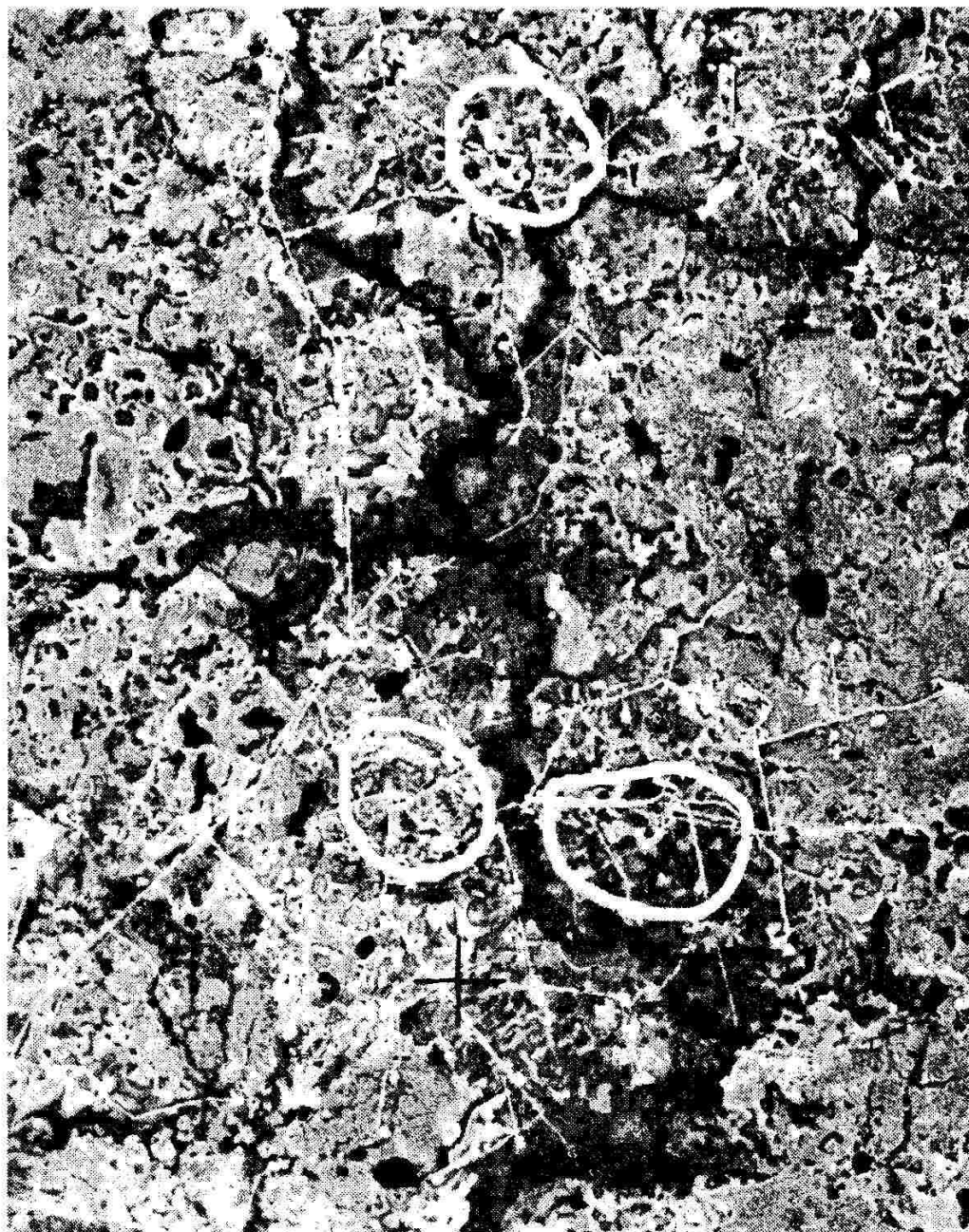


Рис. 20.2. Снимок территории интенсивной добычи нефти и газа (Западная Сибирь).
Окантованы эталонные участки

ческих карт: почвенные, растительности, геоморфологические и пр.;

предварительно оценивать экологическую ситуацию на месте предстоящих работ;

оценивать сложность наземных обследований и планировать виды работ на этом этапе;

использовать как базу для создания ландшафтной и ландшафтно-экологических карт (после этапа наземных обследований);

использовать в качестве фондовой при получении и обработке более поздних материалов.

При дистанционных методах экологического мониторинга, как правило, применяют комплекс аэрогеофизического оборудования для всестороннего изучения территорий. Результаты исследований используют для разработки рекомендаций по охране земель, водного и воздушного бассейнов.

Рассмотрим некоторые примеры использования материалов АКС при экологических исследованиях.

Использование *аэро- и космических снимков* при изучении процессов *засоления почв* — сложный и многофакторный процесс. При выявлении и исследовании динамики засоления, а также разработке методов по предотвращению этого явления требуется анализ происхождения ландшафта, истории его развития, взаимосвязи почв и форм рельефа на больших территориях. Аэро- и космические снимки используют для создания почвенных карт с указанием засоленных участков. Информацию о степени засоления можно получить способом полевого дешифрирования (обследования) или автоматизированным методом.

В первом случае на материалах АКС, используя в качестве основного признака тон изображения, наносят границы участков с различной засоленностью. При полевом обследовании уточняют границы, определенные камерально, и берут пробы почв. После лабораторных исследований почвенных проб на изготовленные фотограмметрическим методом карты наносят в пределах каждого участка условные знаки, указывающие степень их засоления.

При обработке в автоматизированном режиме используют программное обеспечение геоинформационных систем, позволяющее классифицировать цифровые изображения, передаваемые со спутников. Процедура выполняется в режиме классификации с использованием результатов обследования эталонных участков. На этапе обучения из базы данных выбираются репрезентативные участки с однородными спектральными характеристиками. На выбранные участки получают в полевых и лабораторных условиях сведения о степени засоленности. Затем создается классификатор засоленных участков: каждому уровню засоленности соответствует уровень оптической плотности (цвета). Для уменьшения помех при классификации проводится фотометрическая коррекция изображений. Степень засоленности всех иных участков, не входящих в разряд эталонных, выполняется по изображению автоматически, в соответствии с разработанным классификатором. Оценивают точность классификации с помощью специальных матриц ошибок.

Получаемые тем или иным способом карты засоления участков являются базовыми для решения данной задачи. Регулярно пере-

даваемые с космических летательных аппаратов разновременные изображения позволяют отслеживать прирост площадей, скорость и степень засоления. Изменения выявляют путем сопоставления новой информации с базовыми картами. Средствами программного обеспечения ГИС, на основе полученных данных, может осуществляться моделирование процесса засоления. Результаты анализа динамики засоления, экстраполяция этого явления способствуют разработке мероприятий для предотвращения деградации почв и восстановления их плодородия.

Экологический мониторинг промышленных территорий. Для изучения воздействия промышленных предприятий на природную среду используют аэро- и космические снимки. Известно губительное влияние промышленных выбросов производства на растительность, водную и воздушную среду. Зоны разрушения экосистем, так называемые техногенные пустоши, простираются на многие километры от современных гигантов промышленной индустрии — металлургических, химических и других комбинатов. Размеры воздействия вредных веществ таковы, что уничтожаются не только растительные сообщества, но разрушаются и почвенные покровы. По аэро- и космическим снимкам с достаточной точностью можно определить зоны распространения нарушений. Для этого используют многозональные съемочные системы. При компьютерной обработке нескольких зональных снимков техногенные пустоши выявляются с наибольшей вероятностью. Анализ разновременной информации позволяет прогнозировать динамику разрушения экосистем.

Мониторинг районов добычи и транспортировки нефти с помощью регулярной космической съемки. Известно, что в районах интенсивного освоения нефтяных месторождений, а также на трассах нефтепроводов возникают выбросы и утечки нефти. Оперативное выявление и последующий мониторинг подобных нарушений, а также определение последствий их воздействия возможно по материалам, получаемым с КЛА в реальном или близреальном времени. Анализ материалов периодических космических съемок позволяет решать следующие задачи мониторинга районов добычи нефти:

выявление загрязнения нефтепродуктами земель на территориях, окружающих буровые вышки, станции перекачки, а также на участках вокруг мест повреждения продуктопроводов;

выявление изменений болотных массивов, цветения озер, вызванных длительным поступлением в них органических соединений;

определение мест аварий и послеаварийного состояния территорий для оценки ущерба, разработки очистных и восстановительных работ;

проведение зонирования территорий по типам аварийной опасности, обусловленной эксплуатацией трубопроводов на различных участках;

определение динамики изменений русл и пойм рек, отмелей в местах сооружений и эксплуатации инженерных коммуникаций;

определение динамики мерзлотных и гидрофизических свойств грунтов в зоне трасс нефтепроводов; и т. п.

Контрольные вопросы и задания

1. Что понимают под Государственным мониторингом земель? 2. Какие задачи решают с помощью мониторинга земель дистанционными методами? 3. Из каких подсистем состоит система мониторинга земель дистанционными методами? 4. Какие функции выполняет подсистема наземных наблюдений при дистанционном мониторинге? 5. Перечислите основные этапы технологической схемы дистанционного мониторинга. 6. Как используют данные дистанционного мониторинга? 7. Какие задачи решают при дистанционном экологическом мониторинге земель? 8. Какие особенности имеет методология дистанционного экологического мониторинга? 9. Каковы задачи мониторинга земель дистанционными методами?

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматическая идентификация точек 177
Алгоритм классификации 278
— кластеризации 279
Атмосферная дымка 20
Атмосферная рефракция 27
Аэрофотоаппарат:
 нетопографический 43
 панорамный 44
 топографический 33
 щелевой 43
Аэро- и космическая съемка:
 активная 71, 73
 гиростабилизированная 77
 маршрутная 78
 многомаршрутная 79
 однокадровая 78
 пассивная 14
 перспективная 77
 плановая 77
Аэрофотообъектив 35
Аэрофотопленка:
 спектрозональная 63
 цветная 62
 черно-белая 46
Аэрофотоснимок
 гиростабилизированный 77
 контактный 57
 перспективный 77
 плановый 77
 увеличенный 140
 цифровой 69
Аэрофотоустановка 38
— гиростабилизирующая 39

Базис глазной 118
— съемки 112
Базисная плоскость 122
Базовая карта 235
Базовый план 235
Банк данных 109

Ввод изображения 167
Векторизация 167

Взаимное ориентирование снимков 172
Видеоинформация 14
Видеосигнал 272
Визуализация 14
Внешнее ориентирование модели 174
Вуаль 49
Выдержка при печати 60
— съемке 35
Выравнивание фотопленки в аэрофотоаппарате 34
Высота съемки 83

Генерализация при дешифрировании 223, 244
Геоинформационная система 308
Геометрическая модель 9, 151
Геометрические искажения снимка 112
Гиростабилизация фотоаппарата 39
Горизонтальный снимок 123

Денситометр 49
Деформация аэропленки 47
— фотобумаги 60
Дешифрирование снимков:
 автоматизированное 274
 визуальное 3, 211
 индикационное 221
 математическое (отраслевое) 209
 машинно-визуальное 271
 топографическое 209
Дешифрируемость изображения 140
Дешифровочные признаки:
 детерминированные 274
 косвенные 221
 многомерные 226
 одномерные 225
 прямые 216
 спектральные 277
 статистические 274
 текстурные 220
 эталонные 277
Диапазон излучения спектральный 18, 27

- Диафрагма аэрофотоаппарата 36
 Дигитайзер 182
 Дистанционное зондирование 4
 Дисторсия объектива 37
 Досъемка ситуации при дешифрировании 102, 227

 Затвор аэрофотоаппарата 35
 Зона спектральная 18
 Зрение:
 бинокулярное 117
 второго рода 117
 монокулярное 117
 первого рода 117
 стереоскопическое 117
 Зрительный порог:
 абсолютный 213
 дифференциальный 213
 разностный 213

 Измерительные свойства снимков:
 контактных 97...112
 увеличенных 140
 фотосхем 134
 Изображение:
 растровое 179
 фотографическое 45
 цифровое 69
 3D 152, 186
 Изогела 273
 Индикатриса рассеяния:
 интегральная 24
 спектральная 24
 Информативность снимков 140, 275
 Информационные слои ГИС 308
 Иррадиация 117, 256

 Картографическое дежурство 152, 235
 Кассета аэрофотоаппарата 35
 Квантование видеосигналов 272
 Классификация автоматизированная 278
 Кластеризация автоматизированная 279
 Клиновой масштаб 229
 Командный прибор аэрофотоаппарата 39
 Компенсатор смаза изображения 36
 Контактная фотопечать 57
 Контактный снимок 57
 Координатные метки 34
 Корректировка планов и карт 152, 235
 — векторизованного изображения 168
 Корректировочный лист 134
 Космическая съемка 86, 88
 Коэффициент зернистости 54
 — контрастности 51

 Коэффициент яркости:
 интегральный 22
 спектральный 23
 Кратность светофильтра 54
 — увеличения изображения 142

 Ламберта закон 28, 38
 Линейное разрешение:
 зрительного аппарата 113
 съёмочной системы 30

 Маркировка точек местности 236, 263
 Масштаб:
 клиновой 229
 средний снимка 109
 съёмочный 196, 255
 частный 104, 228
 Метод дешифрирования:
 автоматизированный 274
 автоматический 271
 визуальный 214
 машинно-визуальный 271
 Мира 30
 Модель аналитическая:
 вторичная информационная 139
 геометрическая 151
 первичная информационная 95
 рельефа 159
 стереоскопическая 118
 Модель цифровая:
 полурегулярная 159
 регулярная 159
 структурная 160
 Модель цифровая местности:
 рельефа 151
 ситуации 151
 Мониторинг:
 состояния земель 288, 310
 состояния сельскохозяйственных культур 207
 экологический 315
 Монтаж стереофотосхем 129
 — фотосхем 135

 Наземная стереосъемка 200
 Накладной монтаж 81
 Направляющие косинусы 156
 Начальные направления 128
 Негативный процесс 56
 Непрямолинейность съёмочного маршрута 82
 Нормы генерализации 244

 Область излучения спектральная 18
 Обнаружительная способность зрения 211
 Обновление планов и карт 267
 Объединение трансформированных снимков 169

Объектив ортоскопический 37
Окна прозрачности 20
Опорная точка (опознак) 6, 161
Определение высоты съемки 196
Определяемая точка 195
Оптическая плотность 48
Ориентирование снимков взаимное 172
Ортоскопичность объектива 37
Ортофотоплан 152
Освещенность 48
Острота стереозрения:
 второго рода 117
 первого рода 117
Относительное отверстие объектива 36
Оттенитель 38
Оценка качества выполнения съемки 36

Панкратическая оптика 140
Параллакс точки:
 поперечный 124
 продольный 125
Параметры и условия съемки:
 при дешифрировании снимков 225
 при дистанционном зондировании 225
 при фотограмметрической обработке снимков 196
Перекрытие снимков:
 поперечное 79
 продольное 79
ПЗС-сенсоры:
 линейки 69
 матрицы 69
Поверхность ортотропная 25
 — полихроматическая 297
Позитивный процесс 57
Порог зрительного восприятия:
 абсолютный 213
 дифференциальный 213
 разностный 213
Привязка снимков:
 плановая 192
 планово-высотная 192
 разреженная 8, 192
 сплошная 8, 192
Присемники излучения:
 нефотографические 64
 ПЗС-сенсоры 69
 тепловые 67
 фотонные 60
Приемники излучения фотографические 45
Прикладная рамка аэрофотоаппарата 33
Проекционная фотопечать 58
Проекция ортогональная 155
 — центральная 96, 186

Пропускная способность атмосферы 19
Проявление фотоматериалов 56

Рабочая площадь снимка 225
Рабочий центр снимка 132
Радарная интерферометрия 92
Радиофизические съемочные системы 73

Разрешающая способность:
 зрительного аппарата 115, 140
 линейная 116
 объектива аэрофотоаппарата 37
 спектральная 31
 съемочной системы 30
 устройств ввода-вывода изображений 181
 фотоматериалов 55
Рекультивация земель 205

Светораспределение в кадре аэрофотоаппарата 38

Светофильтры 53

Светочувствительность аэрофотопленки:

 общая 51
 спектральная 53
 эффективная 54

Светочувствительность фотобумаги 59

Светочувствительные слои 46

Сводка результатов дешифрирования 227, 249

Связка проектирующих лучей 122, 154

Связующая точка 195

Сенситометр 49

Сенситометрия фотоматериалов 47

Синергизм 272

Синтезирование изображений:

 по зональным снимкам 271
 по разновременным снимкам 271
 по разнотипным снимкам 272

Система координат:

 геодезическая 153
 снимка 123, 153
 условная 153

 фотограмметрическая 153

Систематический разворот снимков маршрута 83

Сканер (съемочная система) 66

Сканер (устройство ввода изображений) 179

Смаз изображения 42

Соединение трансформированных изображений 169

Спектрометрирование:

 лабораторное 26
 полевое бортовое 27
 полевое наземное 26

Спектр электромагнитного излучения 17

Способы дешифрирования снимков 214

- Способы стереонаблюдений снимков 120
- Станция фототеодолитной съемки 200
- Стереомодель 120
- Стереопара 118
- Стереоскоп 121, 128, 225
- Стереофотосхема 129, 135
- Стереозффект 118
- Съемка:
 - идеального случая 122
 - маршрутная 79
 - многомаршрутная 79
 - однокадровая 78
 - перспективная 77
 - плановая 6, 77
- Съемочная система:
 - активная 14
 - воздушная 14
 - кадровая 33
 - космическая 29, 90
 - лазерная 14
 - многозональная 29
 - нефотографическая 64
 - однозональная 29
 - оптического диапазона 29
 - панорамная 44
 - пассивная 14
 - радиодиапазона 29, 73
 - сканирующая 66
 - телевизионная 64
 - тепловизионная 67
 - топографическая 32
 - фотографическая 33
 - цифровая 67, 69
- Точка позищирования 180
- Точка снимка:
 - главная 96
 - набора 96
 - нулевых искажений 96
 - рабочий центр 130
- Точность съемочной системы:
 - фотограмметрическая 32
 - фотометрическая 140
- Трансформирование аналитическое 155
- Увеличение изображения:
 - оптическое 140
 - фотографическое 140
- Угол поля изображения объектива 38
- Уравнения:
 - коллинеарности 156, 201
 - поправок 165
- Условие компланарности 122
- Устройства ввода-вывода изображений 179
- Феномен восприятия 24
- Фиксирование проявляемых изображений 56
- Фильтрация изображения 274
- Фокусное расстояние:
 - аэрофотокамеры 36
 - стереоскопа 120
- Фотобумага 59
- Фотограмметрическая засечка:
 - двойная обратная 175
 - обратная 161
 - прямая 158, 175
- Фотограмметрия 3
 - прикладная 8
- Фотографическая широта 52
- Фотографический эффект 45
- Фотокарта 152
- Фотоплан 152
- Фотосхема 129
- Фотосъемка 33
- Фототеодолит 200
- Фототеодолитная съемка 200
- Фототриангуляция 10, 194
- Характеристическая кривая 49
- Цветная фотография 61
- Цикл работы аэрофотоаппарата 39
- Цифровая карта 151
 - фотограмметрическая рабочая станция 170, 172
- Экспозиция фотографическая 48, 55
- Электромагнитное излучение 17
- Элементы взаимного ориентирования пары снимков 170
- Элементы внешнего ориентирования:
 - снимка 154
 - фотограмметрической модели 174
- Элементы внутреннего ориентирования снимка 154
- Элементы ориентирования:
 - одиночного снимка 154
 - пары снимков 124, 170
- Элементы центральной проекции 96
- Энергетическое разрешение зрительного аппарата 219
- Яркость 48

ЛИТЕРАТУРА

Буров М. И., Краснопевцев Б. В., Михайлов А. П. Практикум по фотограмметрии. — М.: Недра, 1987.

Ильинский Н. Д., Обиралов А. И., Фостиков А. А. Фотограмметрия и дешифрирование снимков. — М.: Недра, 1986.

Инструкция по дешифрированию аэроснимков и фотопланов в масштабах 1:10 000 и 1:25 000 для целей землеустройства, государственного учета земель и земельного кадастра. — М.: ВИСХАГИ, 1978.

Киенко Ю. П. Основы космического природоведения. — М.: Картогеоцентр—Геозедиздат, 1999.

Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Аэрокосмические методы в географических исследованиях. — М.: Издательский центр «Академия», 2004.

Кучко А. С. Фотография и специальные фотографические исследования. — М.: Недра, 1987.

Лобанов А. Н. Фотограмметрия. — М.: Недра, 1987.

Лобанов А. Н., Журкин И. Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. — М.: Недра, 1980.

Маляевский Б. К., Жарновский А. А. Аналитическая обработка фотографической информации в инженерных целях. — М.: Недра, 1990.

Мониторинг состояния земель / П. Р. Попович, П. Е. Басманов и др. — М.: 30 ИПЦ «Буквица», 2002.

Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов. — М.: Недра, 1978.

Практикум по фотограмметрии и дешифрированию снимков / А. И. Обиралов, Я. И. Гебгарт, Н. Д. Ильинский и др. — М.: Недра, 1990.

Родионов Б. Н. Динамическая фотограмметрия. — М.: Недра, 1993.

Условные знаки для топографических планов в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. — М.: Недра, 1989.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть I. АЭРО- И КОСМИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ	13
Глава 1. Физические основы аэро- и космических съемок Земли	13
1.1. Основные понятия, термины и определения	13
1.2. Схема получения видеоинформации при аэро- и космической съемке	15
1.3. Электромагнитное излучение, используемое при аэро- и косми- ческих съемках земной поверхности	17
1.4. Роль атмосферы при проведении аэро- и космических съемок	19
1.5. Объекты земной поверхности как отражатели и излучатели энергии	22
Глава 2. Аэро- и космические съемочные системы	29
2.1. Классификация съемочных систем	29
2.2. Основные критерии съемочных систем	30
Глава 3. Фотографические съемочные системы	33
3.1. Общие сведения	33
3.2. Кадровые топографические аэрофотоаппараты	33
3.3. Деформация изображения в кадровых аэрофотоаппаратах	41
3.4. Нетопографические аэрофотоаппараты	43
Глава 4. Фотографические материалы, применяемые при аэро- и косми- ческих съемках	45
4.1. Понятие о фотографическом процессе	45
4.2. Строение черно-белых фотографических материалов	46
4.3. Сенситометрические характеристики аэрофотоплёнок	47
4.4. Структурометрические характеристики фотоплёнок	54
4.5. Негативный процесс	56
4.6. Позитивный процесс	57
4.7. Понятие о цветной фотографии	61
Глава 5. Нефотографические съемочные системы	64
5.1. Кадровые телевизионные системы	64
5.2. Сканирующие съемочные системы	66
5.3. Тепловые съемочные системы	67
5.4. Оптико-электронные съемочные системы	69

5.5. Лазерные съемочные системы	71
5.6. Радиофизические съемочные системы	73
Глава 6. Производство аэрофотосъемки	76
6.1. Технические показатели аэрофотосъемки	76
6.2. Оценка качества результатов аэрофотосъемки	80
6.3. Особые условия проведения аэрофотосъемки городских территорий	85
Глава 7. Понятие о космической съемке Земли	86
7.1. Условия получения космических снимков	86
7.2. Особенности космической фотосъемки	88
7.3. Космические съемочные системы	90
Часть II. ПЕРВИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ЗЕМЕЛЬНОМ И ГОРОДСКОМ КАДАСТРЕ	95
Глава 8. Одиночный снимок	96
8.1. Основные элементы центральной проекции	96
8.2. Смещение точек снимка вследствие влияния его наклона	97
8.3. Изменение масштаба снимка вследствие его наклона	101
8.4. Искажение площадей на наклонном снимке	104
8.5. Искажение направлений на наклонном снимке	105
8.6. Смещение точек снимка вследствие влияния рельефа местности	106
8.7. Влияние рельефа местности на изменение масштаба изображения отдельных участков местности	107
8.8. Искажение площадей вследствие влияния рельефа местности	109
8.9. Искажение направлений на снимке рельефа местности	110
8.10. Влияние прочих факторов на геометрические свойства снимка	112
8.11. Совместное влияние рельефа местности и угла наклона снимка на его геометрические свойства	112
Глава 9. Пара снимков	115
9.1. Зрительный аппарат человека и его возможности	115
9.2. Стереоскопическая съемка. Стереоскопический эффект	118
9.3. Способы стереоскопического наблюдения снимков	120
9.4. Поперечный и продольный параллакс точек снимка	122
9.5. Определение превышений точек местности по паре снимков	125
9.6. Простейшие измерительные стереоприборы	127
Глава 10. Фотосхемы и стереофотосхемы	129
10.1. Фотосхемы и их назначение	129
10.2. Способы изготовления фотосхем	130
10.3. Масштаб фотосхемы и ее метрические свойства	134
10.4. Стереофотосхемы, их назначение и технология изготовления	135
Часть III. ВТОРИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ЗЕМЕЛЬНОМ И ГОРОДСКОМ КАДАСТРЕ	139
Глава 11. Увеличенные снимки	140
11.1. Информативность и дешифрируемость исходных снимков	140
11.2. Факторы, обуславливающие необходимость увеличения снимков	140

11.3. Оптимизация кратности увеличения снимков	142
11.4. Метрические свойства увеличенных снимков	144
11.5. Метрические свойства отдельно используемых частей увели- ченного снимка	148
Глава 12. Цифровые модели местности, планы, карты	150
12.1. Общие сведения о планово-картографических материалах, применяемых в землеустройстве	150
12.2. Системы координат, применяемые в фотограмметрии	152
12.3. Элементы ориентирования одиночного снимка	154
12.4. Аналитическое трансформирование снимков	155
12.5. Цифровые модели рельефа	159
12.6. Определение элементов ориентирования снимка	161
12.7. Раздельное определение элементов внешнего ориентирования снимка при фотограмметрической обработке его частей	162
12.8. Математический метод решения фотограмметрических задач	164
12.9. Технология цифровой фотограмметрической обработки одиноч- ного снимка	166
12.10. Элементы внешнего ориентирования пары снимков	170
12.11. Элементы взаимного ориентирования пары снимков	170
12.12. Взаимное ориентирование пары снимков	172
12.13. Определение пространственных фотограмметрических коор- динат точек модели местности	173
12.14. Внешнее ориентирование модели местности	174
12.15. Прямая фотограмметрическая засечка по паре снимков	175
12.16. Технология цифровой стереофотограмметрической обработки снимков	177
12.17. Устройства ввода-вывода изображений	179
12.18. Аппаратные средства цифровой обработки снимков	183
12.19. Программное обеспечение	184
12.20. Понятие о 3D-изображении	186
Глава 13. Понятие о процессах, обеспечивающих преобразование снимков в цифровые модели и планы	191
13.1. Планово-высотная привязка аэрофотоснимков	191
13.2. Пространственная аналитическая фототриангуляция	194
13.3. Расчет параметров аэрофотосъемки для фотограмметрической обработки снимков	196
Глава 14. Наземная стереофотограмметрическая съемка	200
14.1. Аналитические методы фотограмметрической обработки наземных снимков	200
14.2. Подготовительные работы при наземной стереофотограмметри- ческой съемке	203
14.3. Полевые работы при наземной стереофотограмметрической съемке	204
14.4. Использование методов наземной фотограмметрии при реше- нии нетопографических задач	205
Часть IV. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО- И КОСМИ- ЧЕСКИХ СЪЕМОК	208
Глава 15. Общие принципы семантического анализа аэро- и космических снимков	208
15.1. Дешифрирование — процесс получения семантической информации со снимков	208

15.2. Классификация дешифрирования	209
15.3. Визуальный метод дешифрирования. Психофизиологические основы метода и способы выполнения	211
15.4. Материалы съемки, используемые при визуальном дешифрировании	214
15.5. Дешифровочные признаки, используемые при визуальном дешифрировании	216
15.6. Генерализация информации при дешифрировании	223
15.7. Технические средства, используемые при визуальном дешифрировании	224
15.8. Общие вопросы технологии визуального дешифрирования	225
15.9. Досъемка не изобразившихся на снимках объектов при дешифрировании	227
15.10. Способы определения положения построек на дешифрируемых снимках при инвентаризации земель	230

Глава 16. Дешифрирование аэрофотоснимков для создания базовых карт (планов) состояния и использования земель

16.1. Задачи и содержание кадастрового дешифрирования снимков	235
16.2. Объекты дешифрирования при создании базовых карт земель масштаба 1:10 000...1:25 000 и их признаки	236
16.3. Требования к качеству рассматриваемого вида дешифрирования. Нормы генерализации	244
16.4. Подготовительные работы при дешифрировании снимков для создания кадастровых карт	245
16.5. Технология дешифрирования и контроль результатов	247
16.6. Дешифрирование снимков поселений для целей кадастра и инвентаризации земель	250
16.7. Выбор съемочной системы и условий съемки для выполнения дешифровочных работ при составлении кадастровых карт и планов	255

Глава 17. Технологические схемы создания цифровых моделей местности

17.1. Технология создания сельских фотопланов на территории сельских поселений	259
17.2. Технология создания базовых планов состояния и использования земель сельских поселений на основе обработки фрагментов увеличенных снимков	260
17.3. Технологическая схема создания ортофотопланов способом цифровой стереофотограмметрической обработки	265
17.4. Методика обновления планов и карт с использованием материалов новой аэрофотосъемки	267

Часть V. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО-, КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ СЪЕМОК В ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ, ФОРМИРОВАНИИ БАЗЫ КАДАСТРОВЫХ ДАННЫХ И МОНИТОРИНГЕ

Глава 18. Общие сведения о технологии компьютерной интерпретационной обработки снимков

18.1. Понятие о машинно-визуальном методе дешифрирования	271
18.2. Понятие об автоматизированном методе дешифрирования	274
18.3. Краткие сведения о технологии выбора спектральных зон съемки при дистанционном зондировании	281

Глава 19. Дистанционное зондирование при обследовании и картографировании почв и растительности и создании геоинформационных систем	288
19.1. Понятие о почвенном картографировании с использованием аэро- и космических снимков	288
19.2. Геоботаническое дешифрирование аэро- и космических снимков	297
19.3. Дистанционные наблюдения за состоянием сельскохозяйственных культур	300
19.4. Дистанционные поиски грунтовых вод	306
19.5. Использование материалов аэро- и космических съемок при создании геоинформационных систем	308
Глава 20. Мониторинг земель дистанционными методами	310
20.1. Характеристика подсистем мониторинга земель дистанционными методами	310
20.2. Общие вопросы технологии мониторинга земель дистанционными методами	313
20.3. Экологический мониторинг земель	315
<i>Предметный указатель</i>	<i>325</i>
<i>Литература</i>	<i>329</i>

Учебное издание

**Обиралов Алексей Иванович,
Лимонов Анатолий Николаевич,
Гаврилова Лариса Анатольевна**

**ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ**

Учебник для вузов

Художественный редактор *В. А. Чуракова*
Компьютерная верстка *Т. Я. Белобородовой*
Корректор *К. А. Коледова*

Сдано в набор 06.10.05. Подписано в печать 11.05.06. Формат 60 × 88 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Ньютон. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,58.
Изд. № 102. Тираж 2000 экз. Заказ № 1092

ООО «Издательство «КолосС», 101000, Москва, ул. Мясницкая, д. 17.
Почтовый адрес: 129090, Москва, Астраханский пер., д. 8.
Тел. (495) 680-99-86, тел./факс (495) 680-14-63, e-mail: koloss@koloss.ru,
наш сайт: www.koloss.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП РМЭ
«Марийский полиграфическо-издательский комбинат»,
424000, г. Йошкар-Ола, ул. Комсомольская, 112

ISBN 5-9532-0359-4



9 785953 203593