

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

И. В. Толкач

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

*Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов учреждений
высшего образования по специальности
1-75 01 01 «Лесное хозяйство»*

Минск 2014

УДК 630*587(075.8)

ББК 43.4я73

Т52

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра лесохозяйственных дисциплин учреждения образования
«Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
(заведующая кафедрой кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент *М. С. Лазарева*;

кандидат биологических наук, доцент *Т. В. Переволоцкая*);

кандидат сельскохозяйственных наук,

начальник отдела дистанционного зондирования

и мониторинга лесов РУП «Белгослес» *М. А. Ильючик*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Толкач, И. В.

Т52

Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве : учеб. пособие для студентов специальности 1-75 01 01 «Лесное хозяйство» / И. В. Толкач. – Минск : БГТУ, 2013. – 344 с., [12] л. цв. ил. ISBN 978-985-530-245-3.

В пособии подробно описаны физические основы дистанционного зондирования, свойства электромагнитного излучения и влияния на него атмосферы, отражательные свойства природных объектов, приборы и оборудование, используемые при дистанционном зондировании с воздушных и космических летательных аппаратов. Большое внимание уделяется основам фотограмметрических измерений, закономерностям строения полога древостоя, дешифровочным признакам главных лесообразующих древесных видов, нелесных и не покрытых лесом земель.

УДК 630*587(075.8)

ББК 43.4я73

ISBN 978-985-530-245-3

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2014
© Толкач И. В., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Устойчивое и эффективное управление отраслью лесного хозяйства Республики Беларусь невозможно без своевременной, достоверной информации о состоянии и динамике лесных ресурсов. Ежегодно в ряде лесохозяйственных учреждений страны проводится комплекс лесоустроительных работ с целью инвентаризации и картографирования лесного фонда, планирования лесохозяйственной и производственной деятельности, осуществляются мероприятия по мониторингу, охране лесов от пожаров, защите от вредителей и болезней, в которых широко применяются материалы аэро- и космической съемки.

Современное лесоустройство в Республике Беларусь на всех стадиях лесоустроительного проектирования и производства планово-картографических материалов использует материалы дистанционного зондирования, компьютерные средства и геоинформационные системы. В 2001–2002 гг. специалистами отдела картографии информационно-вычислительного центра РУП «Белгослес» и РУП «Белгеодезия» разработана новая технология формирования планово-картографических лесоустроительных материалов, основой которой являются специализированные программные продукты Formod, Geographic transformer, Easy Trace и др. Начиная с 2003 г. данная технология интенсивно используется РУП «Белгослес» и на сегодняшний день на все лесхозы республики имеются цифровые картографические материалы. В 2008 г. с целью повышения точности картографических материалов началось внедрение программного комплекса PHOTOMOD.

Еще до недавнего времени при проведении лесоустройства использовались исключительно материалы аэрофотосъемки, но сейчас находят все более широкое применение космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения. За последние годы разрешающая способность космических снимков значительно повысилась, были запущены спутники, позволяющие получать

изображения с пространственным разрешением в 1 м и выше. Начиная с 2009 г. в Беларуси около 5–20% площади устраивается по космическим снимкам.

22 июля 2012 г. вместе с российским космическим аппаратом «Канопус-В», российским МКА-ФКИ («Зонд-ПП»), немецким ТЕТ-1 и канадским ADS-1 был запущен в космос белорусский космический аппарат (БКА), обеспечивающий съемку в панхроматическом режиме с разрешением около 2 м и в мультиспектральном около 10 м. Предполагается, что БКА и «Канопус-В» будут действовать в тандеме, это повысит производительность съемочных работ и позволит обеспечить материалами съемки высокого разрешения специалистов по геодезии и картографии, работников лесного и сельского хозяйств, Министерства природных ресурсов и Министерства по чрезвычайным ситуациям, а также других заинтересованных организаций и ведомств Беларуси.

Еще одним важным направлением является применение аэрокосмических методов для целей мониторинга состояния и изменений лесного фонда, охраны лесов от пожаров, защиты от вредителей, болезней, оценки ущерба от неблагоприятных природных и антропогенных воздействий. В настоящее время авиационная охрана лесов от пожаров осуществляется на всей территории Беларуси, создана сеть территориальных авиаподразделений, налажено систематическое авиапатрулирование в пожароопасный период.

На современном этапе в связи с интенсивным развитием компьютерных технологий, геоинформационных систем (ГИС), цифровой съемки, со значительным повышением качества и доступностью материалов дистанционного зондирования (ДЗ) Земли из космоса инженер лесного хозяйства должен в совершенстве знать методы обработки и дешифрирования снимков, технологии производства лесных планов и карт, разбираться в коммуникационных средствах, аппаратном и программном обеспечении, информационных системах и иметь практические навыки дешифрирования аналоговых и цифровых снимков.

Данное учебное пособие разработано на основе учебников и учебных пособий «Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве» (Г. Г. Самойлович, 1964), «Лесная авиация и аэрофотосъемка»

(И. Д. Дмитриев, Е. С. Мурахтанов, В. И. Сухих, 1989), «Фотограмметрия» (А. Н. Лобанов, 1987), «Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений» (В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин, 2001), «Теория и практика цифровой обработки изображений» (И. К. Лурье, А. Г. Косиков, 2003), «Цифровая обработка изображений» (Р. Гонсалес, 2005) и другой литературы, приведенной в библиографическом списке.

Учебное пособие предназначено для студентов лесохозяйственного факультета, преподавателей, научных работников, а также будет полезно работникам лесоустройства и лесного хозяйства.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

1.1. Определение и общая схема дистанционного зондирования

Дистанционное зондирование (ДЗ) – это совокупность методов получения информации об объектах (или явлениях) путем анализа и интерпретации результатов измерений отражаемого или испускаемого объектами электромагнитного излучения без непосредственного контакта с ними. Излучение регистрируется в некоторой удаленной от объекта точке пространства.

С использованием методов дистанционного зондирования изучают количественные и качественные показатели объектов, их физические и химические свойства, изменение состояния [6, 18, 19, 38]. Общая схема системы дистанционного зондирования и ее основные компоненты представлены на рис. 1.1. Она состоит из источника излучения, регистрирующего устройства, данных дистанционного зондирования (ДДЗ), системы их обработки и анализа, конечных данных.

Основным принципом дистанционного зондирования является измерение энергии отражаемого или испускаемого объектами электромагнитного излучения, которая фиксируется с помощью фотопленки, сенсора или другого устройства. В качестве источника излучения может служить Солнце или излучатель, установленный на борту летательного средства, а также излучение, испускаемое самим объектом.

Регистрирующими устройствами являются фотопленки, различные датчики и сенсоры, позволяющие преобразовать отраженное или испускаемое объектом электромагнитное излучение в фотоснимок или электрический сигнал, на основе которого формируются аналоговые или цифровые изображения объекта.

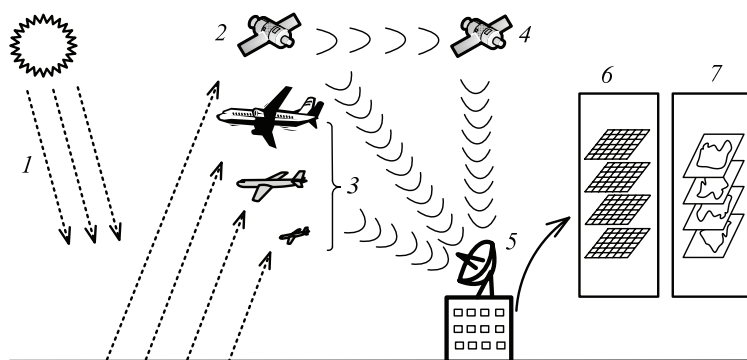


Рис. 1.1. Общая схема дистанционного зондирования Земли:
 1 – солнечное излучение; 2 – космические летательные аппараты;
 3 – воздушные летательные аппараты; 4 – спутники-ретрансляторы;
 5 – наземная станция приема и обработки информации; 6 – данные
 дистанционного зондирования; 7 – векторные тематические карты

Данные дистанционного зондирования представлены в виде фотоснимков или записанной на магнитные, оптические или другие носители информации об объектах съемки. Полученные материалы дистанционного зондирования обрабатываются визуально или с использованием цифровых методов и специального программного обеспечения, в результате чего формируются аналоговые и цифровые (растровые и векторные) тематические карты, пригодные для конечного потребителя.

Информация, полученная в результате интерпретации аналоговых и цифровых аэроснимков, снимков с искусственных спутников Земли, данных сканирования, позволяет минимизировать полевые работы, требующие больших временных и финансовых затрат. Методы дистанционного зондирования поверхности Земли фактически позволяют документировать текущее состояние объекта на определенную дату, а периодическое повторение съемки дает возможность оценивать изменения, происходящие во времени. В зависимости от выбранной высоты съемки могут создаваться изображения, охватывающие небольшую часть территории, но имеющие высокую степень детализации, или обзорные снимки больших регионов: континентов, океанов или Земли.

1.2. Электромагнитный спектр

Любое тело, температура которого выше абсолютного нуля, является источником электромагнитного излучения, поскольку его молекулы находятся в возбужденном состоянии, которое отличается от состояния полного покоя [19]. В частности, такими источниками являются Земля и другие планеты Солнечной системы, однако основным источником электромагнитного излучения является Солнце. Электромагнитное излучение имеет двойственную природу, его

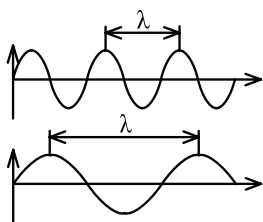


Рис. 1.2. Длина волны электромагнитного излучения

можно представить в виде потока элементарных частиц – фотонов, движущихся по волнообразной траектории и несущих определенную энергию. Электромагнитное излучение распространяется в виде синусоидальных волн со скоростью света, около 300 000 км/с (299 792 458 м/с).

Основными характеристиками излучения являются длина волны (λ – расстояние между двумя последовательными волновыми гребнями, рис. 1.2) и частота (ν – количество колебаний в секунду).

Длина волны измеряется в метрах, миллиметрах, микрометрах, нанометрах ($1 \text{ м} = 10^3 \text{ мм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^9 \text{ нм}$), частота – в герцах, килогерцах, мегагерцах, гигагерцах, терагерцах, петагерцах, эксагерцах ($1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$, $1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$, $1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$, $1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$, $1 \text{ ПГц} = 10^{15} \text{ Гц}$, $1 \text{ ЭГц} = 10^{18} \text{ Гц}$). Один герц – это частота, равная одному циклу колебаний в секунду. Длина волны и частота связаны между собой следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{C}{\nu}, \quad (1.1)$$

где λ – длина волны; C – скорость света; ν – частота.

Поскольку скорость света величина постоянная, длина волны и частота обратно пропорциональны друг другу. Для определения количества измеряемой сенсором энергии удобнее использовать корпускулярную теорию, в которой излучение моделируется потоком фотонов. При заданной длине волны энергия фотона E определяется по формуле

$$E = h\nu = h \frac{C}{\lambda}, \quad (1.2)$$

где h – постоянная Планка ($\approx 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

Из формулы следует, что чем больше длина волны, тем меньше энергия фотона. Наибольшей энергией обладает гамма-излучение, а наименьшей – радиоволны, поэтому коротковолновое излучение легче измерить, чем длинноволновое.

Спектр электромагнитного излучения (солнечного излучения) достаточно широк и представляет собой совокупность электромагнитных волн различной длины и частоты. В зависимости от длины волны, частоты и свойств излучения спектр разделен на несколько спектральных диапазонов (табл. 1.1, рис. 1.3). Видимый диапазон занимает совсем небольшую часть электромагнитного спектра [22]. Часть спектрального диапазона, в котором применимы законы оптики, т. е. наблюдаются такие явления, как отражение и преломление, что можно использовать для фокусировки излучения, называют оптическим. К нему относятся ультрафиолетовая, видимая и инфракрасная зоны электромагнитного излучения.

Таблица 1.1

Спектральные диапазоны солнечного электромагнитного излучения

Название диапазона	Длина волны	Частота
Гамма-излучение	Менее 0,01 нм	Более 30 эГц
Рентгеновское излучение	0,01 нм – 0,01 мкм	30 эГц – 30 пГц
Ультрафиолетовое излучение	0,01–0,38 мкм	30 пГц – 790 тГц
Видимое (оптическое) излучение	0,38–0,76 мкм	790–395 тГц
Инфракрасное излучение	0,76 мкм – 1 мм	395 тГц – 300 гГц
Радиоволны:		
ультракороткие	1 мм – 10 м	300 гГц – 30 мГц
короткие	10–100 м	30–3 мГц
средние	100 м – 1 км	3 мГц – 300 кГц
длинные	1–10 км	300–30 кГц
сверхдлинные	Более 10 км	Менее 30 кГц

Гамма-излучение. Гамма-лучи (γ -лучи) имеют длину волны меньше 0,01 нм и, вследствие этого, ярко выраженные корпускулярные и слабо выраженные волновые свойства. На шкале

электромагнитных волн гамма-излучение граничит с рентгеновским, но четкая граница между гамма- и рентгеновским излучениями не определена.

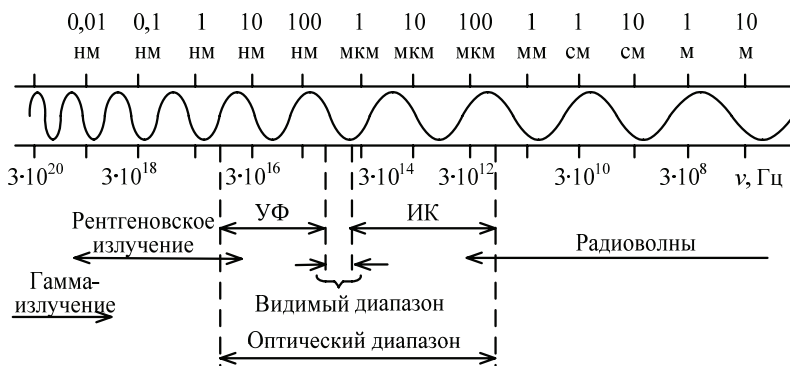


Рис. 1.3. Зоны спектра электромагнитного излучения

Рентгеновское излучение имеет длину волны 0,01 нм – 0,01 мкм. Испускается при торможении быстрых электронов в веществе (тормозной спектр) и при переходах электронов в атоме с внешних электронных оболочек на внутренние (характеристический спектр). Приемниками излучения может служить фотопленка, рентгеновский экран и др. Излучение может проникать через непрозрачные материалы, поэтому широко используется в медицине, дефектоскопии, спектральном и структурном анализе.

Ультрафиолетовое (УФ) излучение. Участок спектра с длиной волн 0,01–0,38 мкм относится к ультрафиолетовой области, которая подразделяется на две части: дальнюю ультрафиолетовую область с длиной волны 0,01–0,30 мкм и ближнюю с длиной волны 0,30–0,38 мкм.

Видимое излучение. Спектральный диапазон 0,38–0,76 мкм занимает область видимого излучения, воспринимаемого человеческим глазом и многими сенсорами. Диапазон видимого излучения делится на несколько поддиапазонов: 0,38–0,45 мкм – фиолетовый; 0,45–0,48 – синий; 0,48–0,51 – голубой; 0,51–0,55 – зеленый; 0,55–0,57 – желто-зеленый; 0,57–0,59 – желтый; 0,59–0,62 – оранжевый; 0,62–0,76 мкм – красный.

Инфракрасное (ИК) излучение занимает область спектра 0,76 мкм – 1 мм и подразделяется на четыре зоны: ближнюю – 0,76–3 мкм, среднюю – 3–6 мкм, дальнюю – 6–14 мкм и очень далекую – 14 мкм – 1 мм. В ближней и средней ИК областях преобладает отраженное (солнечное) излучение, а в дальней и очень далекой, называемых тепловыми, – собственное излучение.

Радиоволновое излучение. Весь оставшийся диапазон с длиной волны 1 мм и более занимают радиоволны, которые в свою очередь делятся на миллиметровые, сантиметровые, дециметровые и метровые. Участок спектра радиоволнового излучения с длиной волны менее 10 м относится к ультракоротким волнам, 10–100 м – коротким, 100 м – 1 км – средним, более 1 км – длинным. Сантиметровые и дециметровые волны часто объединяют в диапазон радиоволн сверхвысоких частот (СВЧ). Иногда миллиметровые и сантиметровые волны относят к одному диапазону, называемому микроволновым [32].

1.3. Влияние атмосферы

Спектр солнечного излучения над атмосферой напоминает спектр, испускаемый идеальным излучателем – абсолютно черным телом, при температуре приблизительно 6000 К. Кривая спектральной плотности солнечного излучения за пределами атмосферы очень пологая, без резких перепадов. Прежде чем солнечное излучение достигнет Земли, оно проходит через атмосферу, при взаимодействии с которой часть излучения поглощается, часть рассеивается, а часть передается и взаимодействует с поверхностью Земли [19].

График спектральной плотности солнечного излучения над атмосферой и на поверхности Земли показан на рис. 1.4. Составляющие атмосферу газы, пары воды, твердые частицы обуславливают сложную форму кривой спектральной плотности солнечного излучения на поверхности Земли.

В зависимости от состава, температуры и плотности земная атмосфера делится на пять основных слоев: тропосфера – высотой от поверхности Земли до 8–10 км в полярных широтах и 16–18 км на экваторе; стратосфера – от 8–18 до 50 км; мезосфера – от 50 до 80 км; термосфера – от 80 до 600–800 км и экзосфера – свыше 600–800 км.

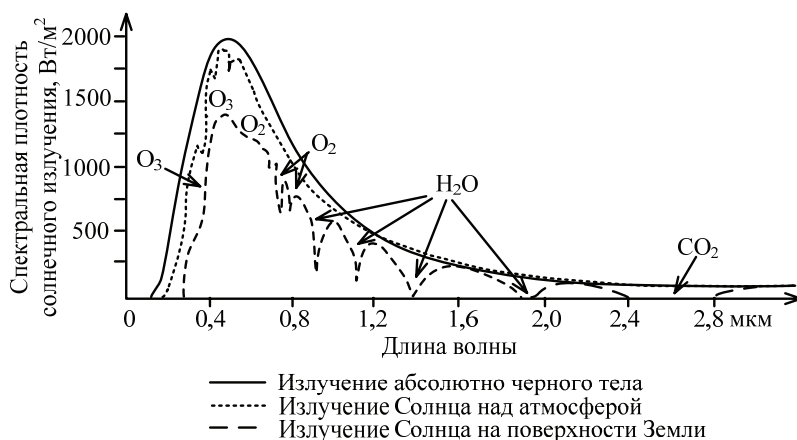


Рис. 1.4. Спектральная плотность электромагнитного излучения над атмосферой и на поверхности Земли

Границы между основными слоями выражены нечетко, поэтому переходные участки атмосферы над соответствующими слоями названы: тропопауза – между тропосферой и стратосферой; стратопауза – между стратосферой и мезосферой; мезопауза – между мезосферой и термосферой; термопауза – между термосферой и экзосферой.

Основная масса атмосферы (99,9%) заключается в нижних слоях – тропосфере и стратосфере, которые оказывают наибольшее влияние на качество изображения при проведении аэро- и космосъемок. Слои атмосферы выше 100 км в соответствии с решением Международной авиационной федерации считаются космическим пространством, так как на этой высоте плотность атмосферы настолько низкая, что для создания подъемной силы необходимо, чтобы летательный аппарат двигался с первой космической скоростью.

К основным составляющим атмосферы относятся: азот N_2 (около 78,1%), кислород O_2 (около 20,9%), аргон Ar (около 0,9%) и углекислый газ CO_2 (около 0,03%). Доля остальных газов ничтожно мала и составляет тысячные доли процента. Наибольшей способностью к поглощению солнечного излучения обладают озон (O_3), пары воды (H_2O) и углекислый газ (CO_2) [78].

1.3.1. Рассеивание излучения атмосферой

Причиной рассеивания является взаимодействие излучения с находящимися в атмосфере молекулами газов, воды, частицами пыли, что вызывает его отклонение от первоначального пути, но длина волны остается при этом неизменной. Величина рассеивания зависит от длины волны электромагнитного излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также толщины слоя атмосферы.

В видимом диапазоне величина рассеянного излучения может составлять от 100% при сплошной облачности до 5% при абсолютно ясном небе. Выделяют три типа рассеивания в атмосфере [85].

Рассеивание Релея наблюдается в случае, когда длина волны электромагнитного излучения значительно превышает размер частиц, с которыми оно взаимодействует; такое рассеивание происходит на молекулярных комплексах и называется также молекулярным. Примерами могут служить частицы пыли, молекулы газов азота (N_2) и кислорода (O_2). Величина рассеивания Релея обратно пропорциональна длине волны, т. е. чем меньше длина волны, тем сильнее рассеивание.

По причине молекулярного рассеивания небо кажется синим, так как излучение с более короткой длиной волны (синий цвет), проходя через атмосферу по направлению к Земле, рассеивается значительно сильнее, чем излучение в красном диапазоне спектра. Красный цвет заката также объясняется законом рассеивания Релея. Когда Солнце приближается к линии горизонта, и его лучи проходят более длинный путь через атмосферу, излучение видимого диапазона с более короткой длиной волны рассеивается и остается только длинноволновое – красное или оранжевое, которое мы и видим. По этой же причине использование излучения синей части спектра при съемке ограничено, а для удаления рассеянного синего излучения, вызванного атмосферной дымкой, применяются специальные фильтры. Рассеивание Релея приводит к снижению контрастности снимков и отрицательно влияет на возможность их дешифрирования [19, 85].

Рассеивание Ми наблюдается в случаях, когда длина волны излучения сравнима с размерами частиц. Большая часть излучения рассеивается в направлении падающего луча, и лишь небольшая

часть в других направлениях, при этом степень рассеивания может зависеть или не зависеть от длины волны. Рассеивание Ми обычно проявляется как общее ухудшение изображения во всем оптическом спектре. Аэрозольные частицы представлены в атмосфере как в жидкой, так и твердой форме. Это частицы самых разных веществ: солей, минеральной пыли, капель воды, растворов и пр.

Рассеивание Ми чаще возникает в нижних слоях атмосферы, где количество крупных частиц больше, а также в условиях сплошной облачности. Рассеивание Ми наблюдается в спектральных диапазонах от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного.

Неселективное рассеивание возникает в случаях, когда длина волны электромагнитного излучения гораздо меньше размера частиц. К таким частицам относятся капли воды и крупные частицы пыли. Рассеивание излучения при взаимодействии с большими частицами происходит по причине отражения от поверхности частицы без проникновения, прохождения сквозь частицу с отражением и преломлением на краю частицы. Неселективное рассеивание не зависит от длины волны и наиболее отчетливо проявляется при наличии облаков, содержащих водные капли. В условиях сплошной облачности излучение в оптическом диапазоне не проникает через атмосферу.

Неселективное рассеивание обычно наблюдается в сильно запыленной атмосфере и приводит к значительному ослаблению полученных данных. Однако сам факт такого рассеивания иногда представляет полезную информацию, так как позволяет выявить наличие больших твердых примесей в атмосфере над исследуемой территорией.

1.3.2. Поглощение излучения в атмосфере

Электромагнитное излучение, проходя через атмосферу, частично поглощается молекулами различных газов. Однако существуют спектральные диапазоны, в которых электромагнитное излучение не поглощается или поглощается незначительно. Такие диапазоны называются *окнами прозрачности атмосферы* (рис. 1.5). Различают *спектральную* и *интегральную* прозрачности атмосферы. Спектральная прозрачность – способность атмосферы пропускать электромагнитное излучение очень узкого участка спектра. Под интегральной прозрачностью подразумевается способность атмосферы

пропускать излучение в широком спектральном диапазоне. В качестве критерия количественной оценки используется коэффициент пропускания – отношение потока электромагнитного излучения, прошедшего через среду, к падающему на нее потоку.

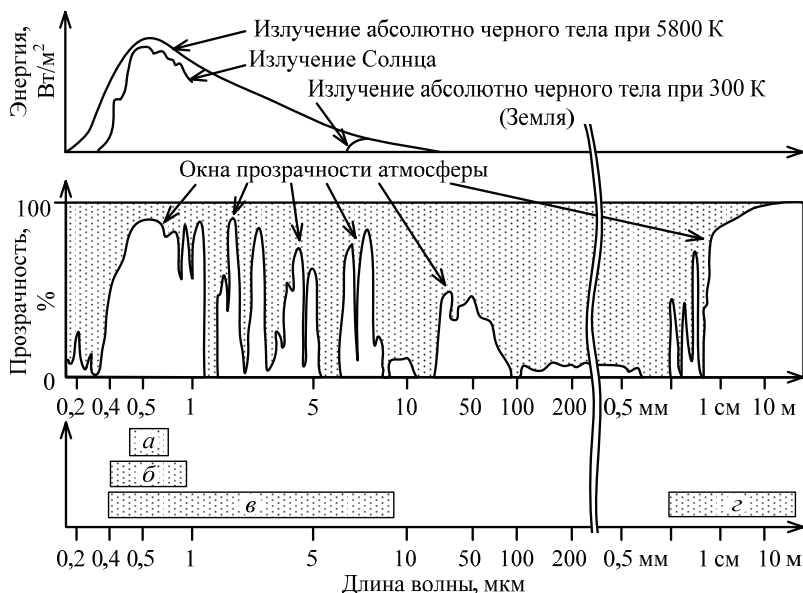


Рис. 1.5. Окна прозрачности атмосферы и диапазоны чувствительности:

a – глаза человека; *б* – фотопленок; *в* – мультиспектрального сканера; *з* – радиолокационной съемки

Степень прозрачности атмосферы в разных спектральных диапазонах различна. В рентгеновской и дальней ультрафиолетовой областях до 0,30 μm атмосфера непрозрачна. В пределах 0,30–0,38 μm (ближняя ультрафиолетовая область) и в видимой части спектра в диапазоне 0,38–0,50 μm прозрачность атмосферы изменяется от слабой до удовлетворительной. В видимой части спектра 0,50–0,76 μm прозрачность атмосферы высокая, хотя имеются отдельные полосы поглощения водяными парами, углекислым газом, озоном. В инфракрасной области окна прозрачности находятся в диапазонах 0,76–1,20, 3–5 и 8–14 μm , но пропускные свойства атмосферы в этих

диапазонах меняются в зависимости от наличия молекул воды, углекислого газа, озона, азота, окиси углерода, метана и аэрозолей. Большая часть энергии солнечного излучения (99,9%) заключена в спектральном диапазоне 0,2–50 мкм, а максимум спектральной кривой приходится на видимое излучение (0,4–0,7 мкм). На этот диапазон приходится 38% энергии солнечного излучения [19, 22].

Земля также является источником электромагнитного излучения, спектральная кривая которого близка к излучению абсолютно черного тела с температурой 200–300 К. Большая часть (около 99,9%) энергии электромагнитного излучения находится в диапазоне 4–40 мкм с максимумом излучения 8–12 мкм, поэтому сенсоры, работающие в данных диапазонах, регистрируют не только отраженное солнечное электромагнитное излучение, но и излучение, испускаемое Землей и ее атмосферой.

Для радиоволн субмиллиметрового диапазона атмосфера непрозрачна. Радиоволны с длиной 1–10 мм заметно поглощаются атмосферой, а 1–15 см – незначительно. Короткие (декаметровые) волны отражаются от ионосферы, поэтому атмосфера Земли для них непрозрачна, хотя они успешно используются для любительской и профессиональной радиосвязи.

Наличие широкого спектрального диапазона в солнечном излучении и отраженном от земной поверхности световом потоке позволяет применять для съемки земной поверхности разные регистрирующие устройства. Наибольшую информацию дистанционными методами о природных ресурсах Земли в настоящее время получают в видимом, ближнем инфракрасном (0,38–1,20 мкм) и радиоволновом диапазонах, в которых проводят визуальные наблюдения, фотографирование, сканерную и телевизионную съемки, спектрометрирование. Диапазоны гамма-, рентгеновского и ультрафиолетового излучений для зондирования лесов практически не используются [75].

1.4. Отражательная способность объектов

Достигнув поверхности Земли, электромагнитное излучение, взаимодействуя с объектами, частично отражается, частично поглощается и частично пропускается. Соотношение, связывающее между

собой отраженное, поглощенное и пропущенное излучения, можно выразить в следующем виде:

$$E_I = E_R + E_A + E_T \quad (1.3)$$

или

$$\frac{E_R}{E_I} + \frac{E_A}{E_I} + \frac{E_T}{E_I} = 1, \quad (1.4)$$

где E_I – энергия падающего излучения; E_R – энергия отраженного излучения; E_A – поглощенная энергия; E_T – энергия пропущенного излучения (прошедшего через вещество) [85].

Количество отраженного, поглощенного и пропущенного излучения для разных объектов поверхности Земли различается, поэтому на снимках объекты выглядят по-разному, что позволяет их идентифицировать. Фотопленки, датчики и сенсоры систем дистанционного зондирования воспринимают, как правило, отраженное излучение, поэтому именно отражательные свойства различных объектов играют определяющую роль при их идентификации.

Одной из важнейших характеристик отражательной способности объектов является *альбе́до* (A) – показатель, характеризующий отношение излучения, отраженного данной поверхностью во всех направлениях, к излучению, падающему на данную поверхность:

$$A = \frac{E_R}{E_I}. \quad (1.5)$$

В зависимости от того, оценивается пространственное отражение лучей отдельного спектрального диапазона или определенной длины волны, выделяют интегральное и спектральное альбе́до.

На количество отраженного излучения большое влияние оказывает структура поверхности объектов, а отражательную способность в различных пространственных направлениях характеризует *индикатриса отражения (рассеивания)*, которая представляет собой плавную линию, огибающую концы пучка векторов отражения (рис. 1.6). Индикатриса может быть интегральной (ахроматической) или спектральной в зависимости от того, оценивается пространственное отражение лучей отдельного спектрального диапазона или определенной длины волны [85].

В идеальном случае выделяют два основных типа отражения. Если длина волны значительно превышает размеры неровностей, падающее излучение отражается в противоположную сторону, при этом наблюдается *зеркальное* отражение, когда угол отражения равен углу падения (рис. 1.6, а). Если же размеры неровностей поверхности больше длины волны приходящего излучения, происходит *диффузное* (ортотропное или Ламбертово) отражение, при котором падающее излучение отражается равномерно во всех направлениях (рис. 1.6, б). В природе идеальные случаи практически не встречаются, и у подавляющего большинства природных объектов отражение носит *смешанный* характер (рис. 1.6, в, г, д).

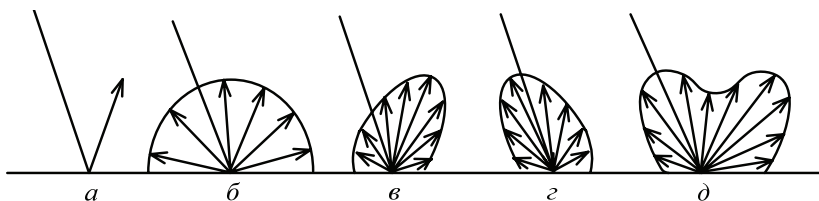


Рис. 1.6. Индикатрисы при различных типах отражения:
а – зеркальном; б – диффузном; в, г – направленном; д – смешанном

Следует отметить, что одна и та же поверхность по-разному отражает излучения различных спектральных диапазонов. Характер отражения зависит от размеров неровностей отражающей поверхности и длины волны падающего излучения. Так, например, отражение от песчаного пляжа в видимом диапазоне является диффузным, а в более длинноволновой части электромагнитного спектра – близко к зеркальному. Соотношение между поглощенным, отраженным и пропущенным излучением также зависит от длины волны, а два объекта, неразличимых в одном спектральном диапазоне, могут быть хорошо различимыми в другом. В видимой части спектра эти различия воспринимаются как изменения цвета. Объекты кажутся синими, если они отражают излучение в синей части спектра, и зелеными, если максимум их отражательной способности приходится на зеленый спектральный диапазон. То же относится и к любому другому цвету.

Энергия падающего излучения характеризует освещенность объекта, а энергия отраженного излучения – его яркость. Каждый

объект обладает собственной кривой спектральной отражательной способности, которая определяется как отношение энергий отраженного и падающего излучений при различной длине волны. Важнейшим показателем, характеризующим отражательные свойства объектов земной поверхности, является *коэффициент яркости*, который определяется как отношение яркости светового потока, отраженного поверхностью в каком-либо направлении, к яркости потока, отраженного в данном направлении от идеально рассеивающей поверхности (1.6):

$$R = \frac{B_R}{B_O} 100\%, \quad (1.6)$$

где R – коэффициент яркости; B_R – яркость отраженного поверхностью светового потока; B_O – яркость потока, отраженного идеальной рассеивающей поверхностью [11, 22].

За идеально рассеивающую (абсолютно белую) поверхность принимают поверхности, имеющие очень высокие значения альбедо, например гипсовую пластину, покрытую окисью магния, или белую бумагу, покрытую серноокислым барием, яркость которых условно считают равной единице (100%). Так как яркости природных объектов, как правило, ниже, коэффициент яркости изменяется от 0 до 1, или от 0 до 100%. Коэффициент яркости, характеризующий суммарную отражательную способность в определенном спектральном диапазоне, называют интегральным, для определенной длины волны – спектральным:

$$R_\lambda = \frac{B_{\lambda R}}{B_{\lambda O}} 100\%, \quad (1.7)$$

где R_λ – коэффициент спектральной яркости; $B_{\lambda R}$ – яркость отраженного излучения с длиной волны λ ; $B_{\lambda O}$ – яркость излучения с длиной волны λ , отраженного идеальной рассеивающей поверхностью.

Объекты оптически нейтральные имеют одинаковый коэффициент спектральной яркости для всех видимых и ближних инфракрасных лучей спектра. Для объектов с тоновыми или цветовыми различиями коэффициент спектральной яркости неодинаков в разных участках спектра.

Еще одним показателем, характеризующим различия в спектральной яркости объектов, является *яркостный контраст*. Он определяется

как отношение разности яркостей (коэффициентов яркостей) двух объектов к большей из них. Яркостный контраст вычисляется по следующей формуле:

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_1}, \quad (1.8)$$

где K – яркостный контраст; B_1 – яркость отраженного светового потока поверхностью первого (более яркого) объекта; B_2 – яркость отраженного светового потока поверхностью второго объекта.

Интервал яркости (U) является относительной величиной и показывает соотношение между максимальной и минимальной яркостями объектов на снимке

$$U = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} = \frac{R_{\max}}{R_{\min}}.$$

График зависимости коэффициента спектральной яркости от длины волны электромагнитного излучения называется *кривой спектральной яркости* или *кривой спектральной отражательной способности*. Вид кривой позволяет оценить спектральные характеристики объекта и выбрать спектральный диапазон для съемки. Отражательную способность объектов можно измерить с помощью спектрометра в лабораторных либо полевых условиях.

1.5. Спектральные отражательные свойства природных объектов

Изучение спектральных отражательных свойств природных объектов дает теоретическую основу для их дешифрирования. Спектральные яркости или коэффициенты спектральной яркости, по которым строятся кривые спектральных яркостей объектов, получают на основе абсолютных или относительных измерений, выполняемых с помощью спектрометров, спектрорадиометров, видеоспектрометров и т. п. (рис. 1.7).

Измерения основаны на сравнении спектральных яркостей исследуемых объектов и идеальной (эталонной) рассеивающей поверхности. Все приборы, применяемые для определения коэффициентов спектральных яркостей, обеспечивают разложение света в спектр с выделением узкого интервала [19].

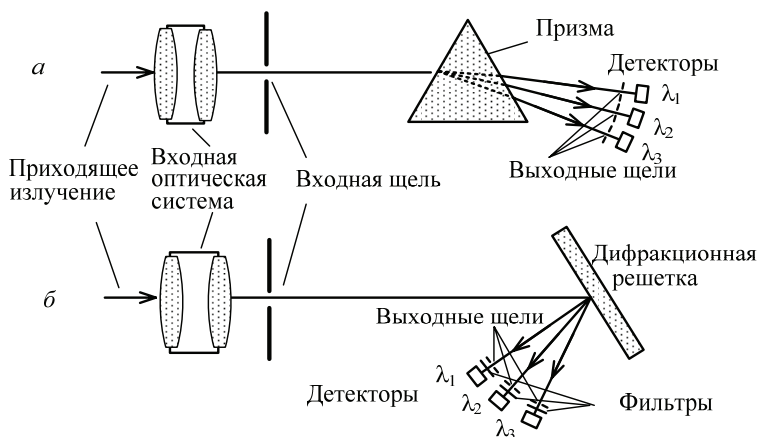


Рис. 1.7. Схемы спектрометров
с различными диспергирующими системами:
а – призма; б – дифракционная решетка

Исследуемый поток через объектив поступает во входную щель, диспергирующую систему и через выходную щель попадает на приемник, в качестве которого могут использоваться фотопленки или электрические сенсоры. В качестве диспергирующей системы используют призмы, дифракционные решетки или интерференционные светофильтры.

Полученные кривые спектральных яркостей природных объектов позволили установить закономерности и выполнить их классификацию, определить оптимальные спектральные диапазоны и сроки проведения съемки, разработать спектрозональные пленки с высокими дешифровочными свойствами.

В этой области классическими являются исследования Е. Л. Кринова, разработавшего спектрометрическую классификацию природных образований в видимой и инфракрасной областях спектра. Все многообразие объектов в ландшафте он разделил на четыре класса, каждый из которых отличается своеобразной кривой спектральной яркости [36]:

– I класс – горные породы и почвы; характеризуется увеличением спектральных яркостей по мере приближения к красной зоне спектра;

– II класс – растительный покров; отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой, минимумом в красной и резким увеличением отражения в ближней инфракрасной зонах. В зеленой и красной зонах такое поведение связано соответственно с отражением и поглощением лучей хлорофиллом, а большие значения в ИК зоне объясняются пропусканием ИК лучей хлорофиллом и отражением их внутренними тканями листьев, т. е. на интенсивность отражения влияет структура листового покрова;

– III класс – водные поверхности; характеризуется монотонным уменьшением отражательной способности от сине-фиолетовой к красной зоне спектра, поскольку с увеличением длины электромагнитного излучения оно сильнее поглощается водой;

– IV класс – снежные поверхности и близкие к ним облака; обладает наиболее высокими значениями спектральной яркости с небольшим их понижением в ближней ИК зоне. Понижение резко увеличивается при насыщении снега водой.

Изучением спектральных отражательных свойств объектов занимались А. К. Пронин, С. В. Белов, Н. Г. Харин, Е. С. Арцыбашев, П. А. Кропов, Ю. С. Толчельников и др. (по И. Д. Дмитриеву [22]). В результате их исследований было выявлено, что отдельные категории природных образований, таких как растительный покров, почвы, водные поверхности, имеют общие закономерности и близкие спектральные отражательные характеристики.

1.5.1. Растительный покров

Спектральная отражательная способность зеленой растительности с увеличением длины волны сильно изменяется, однако общая форма кривой характерна практически для всех видов (рис. 1.8). В видимом диапазоне на спектральные характеристики растений влияет пигментация листьев, особенно хлорофилл.

Низкая отражательная способность в синей и красной зонах видимого диапазона соответствует двум полосам поглощения хлорофилла – 0,45 и 0,65 мкм. Максимум отражательной способности листьев находится в зоне с длиной волн приблизительно 0,54 мкм, поэтому мы видим листья зелеными.

У усыхающих растений содержание хлорофилла уменьшается, что вызывает уменьшение поглощения энергии растениями в поло-

сах поглощения хлорофилла. Такие растения обладают гораздо более высокой отражательной способностью в красной части спектра, и поэтому кажутся красноватыми или желтыми [87].

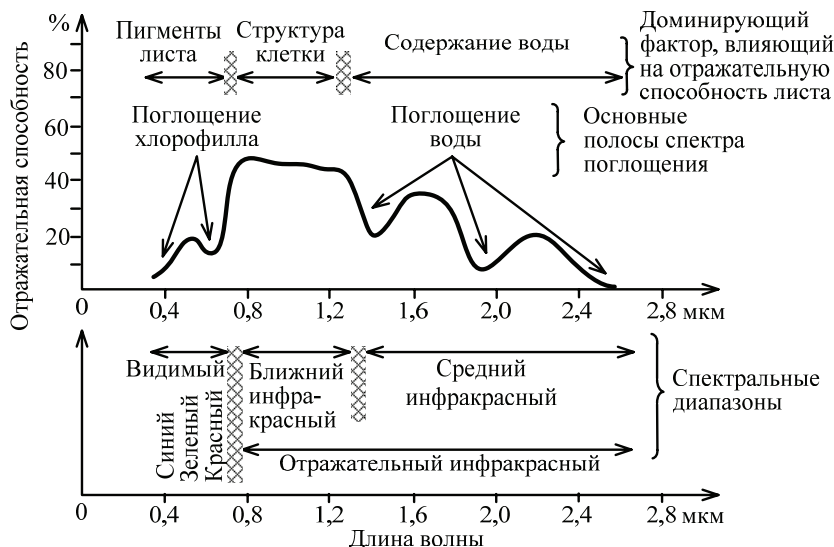


Рис. 1.8. Кривая спектральной яркости растительного покрова

Важную роль играют и другие пигменты, в частности каротин, ксантофил (желтый пигмент) и антоциан (красный пигмент). Каротин и ксантофил часто встречаются в листьях, однако их окна поглощения находятся в синем диапазоне (0,45 мкм), где доминирующим является влияние хлорофилла, поэтому воздействие этих пигментов проявляется только в его отсутствие.

Осенью хлорофилл исчезает, и тогда в листьях преобладают каротины и ксантофиллы, что приводит к желтой окраске листвы деревьев. Некоторые виды деревьев осенью вырабатывают большое количество антоцианина, что придает листьям ярко-красную окраску [85, 19, 11].

Влияние пигментов на отражательную способность растительного покрова сказывается только в видимом диапазоне спектра 0,5–0,7 мкм, где наблюдаются значительные различия яркостей в зависимости от количества и вида пигментов (рис. 1.9).

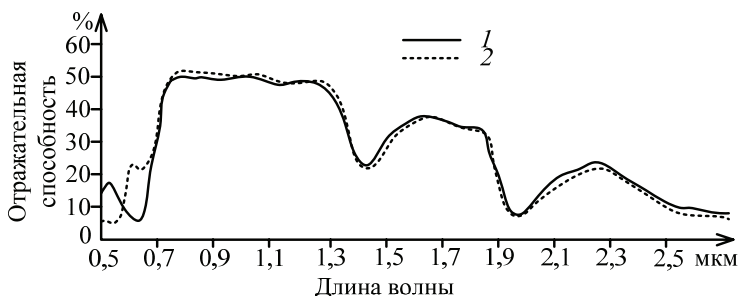


Рис. 1.9. Влияние содержания пигментов на отражательную способность листьев:
1 — весна, лето; 2 — осень

В ближнем и среднем инфракрасном диапазонах влияние пигментного состава листьев практически отсутствует. Наблюдается существенное увеличение отражательной способности при переходе через пороговое значение 0,7 мкм из видимой в инфракрасную часть спектра. В этом диапазоне зеленый растительный покров характеризуется высокой отражательной способностью, высокой прозрачностью и низким поглощением. Значения коэффициентов отражения и прозрачности достигают величины порядка 45–50%, а доля поглощенного излучения составляет всего около 5%.

Важную роль играет также структура растительного полога. Разница в отражательной способности одноярусной и многоярусной древесной растительности может достигать 85%. Причина этого кроется в том, что излучение, прошедшее через первый ярус растительности, отражается от второго, а затем частично еще раз проходит через первый ярус (рис. 1.10).

В среднем инфракрасном диапазоне заметно существенное снижение отражения в зонах поглощения воды, центры которых соответствуют длинам волн 1,4, 1,9 и 2,7 мкм. Существует также два окна поглощения воды вблизи 0,9 и 1,1 мкм, но эти окна очень узкие и практически не влияют на кривую спектральной отражательной способности. Пики спектральной отражательной способности в среднем инфракрасном диапазоне приходятся на 1,6 и 2,2 мкм [11, 19, 36].

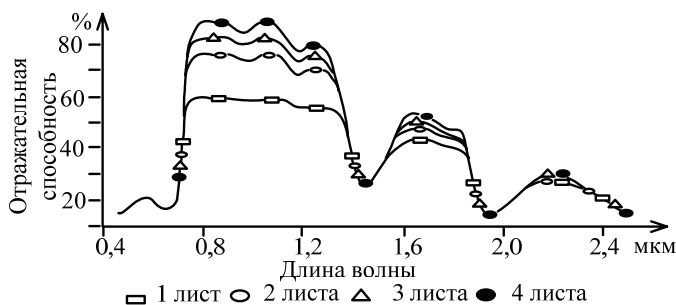


Рис. 1.10. Влияние количества слоев листьев на отражательную способность

Степень поглощения растительностью излучения в среднем инфракрасном диапазоне зависит от количества воды, имеющейся в листе, и толщины листа. При уменьшении содержания влаги в листьях их отражательная способность в среднем инфракрасном диапазоне длин волн заметно увеличивается. Однако при очень низком проценте содержания влаги отражательная способность значительно увеличивается во всем диапазоне спектра (рис. 1.11).

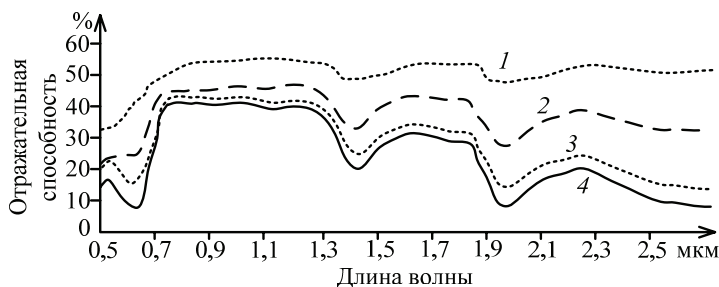


Рис. 1.11. Влияние содержания влаги на отражательную способность листьев:
1 — менее 40%; 2 — 40–54%; 3 — 55–66%; 4 — более 66%

На основании вышеописанного можно выделить основные закономерности влияния различных факторов на отражательную способность растительности:

- отражательная способность растительности наибольшая в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах;
- пигментация листьев оказывает влияние преимущественно в видимой части спектра;
- на отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне существенное влияние оказывает структура полого растительного покрова;
- спектральная яркость растительного покрова в среднем инфракрасном диапазоне сильно зависит от содержания в листьях воды.

Подобные закономерности наблюдаются и у основных лесообразующих древесных пород. Кривая спектральной яркости основных древесных видов летом характеризуется максимумом поглощения в синей и оранжево-красной зонах видимого спектра. Ближние инфракрасные лучи почти без отклонений проходят через эпидермис и столбчатую паренхиму листа и только в губчатой паренхиме с множеством наполненных воздухом межклеточных пространств рассеиваются и в основной своей массе отражаются снова наружу. У большинства лиственных пород в ближнем инфракрасном диапазоне (0,7–0,9 мкм) коэффициент отражения больше в 5 раз, а у хвойных – примерно в 4 раза, чем в видимой части спектра.

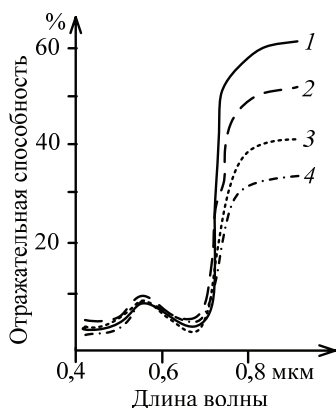


Рис. 1.12. Кривые спектральной яркости:
1 – осины; 2 – березы;
3 – сосны; 4 – ели

В видимой области спектра кроны разных древесных пород характеризуются близкой яркостью, только в зоне зеленых лучей (0,54–0,58 мкм) наблюдаются некоторый общий подъем кривых и небольшая их дифференциация по породам (рис. 1.12), в результате чего на летних панхроматических аэрофотоснимках изображения разных древесных пород имеют незначительные тоновые различия. Молодые хвоя и листья характеризуются большей отражательной способностью, поэтому имеют более светлый тон.

В ближней инфракрасной зоне различия в спектральных яркостях крон основных древесных пород наиболее выражены. При этом можно выделить две группы пород: повышенной спектральной яркости (лиственница, осина, береза, ольха) и с меньшей величиной яркости (сосна, ель, пихта). Это позволяет надежно отделять на снимках хвойные породы от лиственных. В инфракрасной зоне спектра коэффициенты спектральной яркости здоровых деревьев существенно ниже, чем у поврежденных вредителями, пожарами и сухостойных, что позволяет дешифрировать санитарное состояние насаждений.

Анализ кривых спектральной яркости крон деревьев основных лесобразующих пород позволил С. В. Белову выявить следующие закономерности [11].

1. Отражательная способность крон деревьев в целом меньше, чем для отдельных ветвей деревьев, что объясняется наличием собственных и падающих теней крон. Различия в яркости могут достигать от 40 до 70%.

2. В летний период кроны различных древесных пород обладают очень близкой спектральной яркостью в видимом диапазоне. Некоторые различия наблюдаются лишь в зеленой зоне, причем наименьшей яркостью характеризуются ель и пихта. Различия в яркости отдельных пород уменьшаются в период с конца июня до августа, поэтому данный период является наименее благоприятным для съемки в видимом диапазоне по причине снижения дешифровочных качеств снимков.

3. В инфракрасной области спектра в летний период наблюдается значительная и устойчивая дифференциация в коэффициентах яркости между лиственными и хвойными породами, за исключением лиственницы. Близкие коэффициенты спектральной яркости имеют сосна с кедром, а также ель с пихтой. Очень мала разница в коэффициентах между березой, осиной и черной ольхой.

4. Кривая спектральной яркости кроны лиственницы близка к кривой березы, поэтому их изображения схожи как на черно-белых, так и на спектрально-аэрофотоснимках.

1.5.2. Почвы

Кривые спектральной отражательной способности большинства почв обычно значительно проще, чем кривые отражательной

способности растительности. В целом наблюдается некоторое увеличение отражательной способности почв с увеличением длины волны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Однако почва представляет собой сложную смесь минеральных и органических веществ, обладающих различными физическими и химическими свойствами. Поэтому, хотя кривые отражательной способности похожи по форме, содержание влаги, органических веществ, окиси железа, глины, пыли и песка сильно влияет на спектральную отражательную способность почв.

Важной характеристикой почвы является ее гранулометрический состав, определяющийся по размерам составляющих почву частиц. С уменьшением размера частиц поверхность почвы становится более гладкой, и доля отраженного излучения возрастает (так, при увеличении размера составляющих почву частиц с 0,22 до 2,66 мм коэффициент поглощения увеличивается на 14%) [87, 19, 36, 85]. Гранулометрический состав почв оказывает большое влияние на способность почв удерживать влагу, которая, в свою очередь, влияет на отражательные свойства почв. Кривая спектральной отражательной способности сухих почв остается почти постоянной, в то время как кривые спектральной отражательной способности влажных почв имеют заметные провалы при длинах волн 1,4, 1,9 и 2,3 мкм, соответствующие зонам поглощения воды (рис. 1.13).

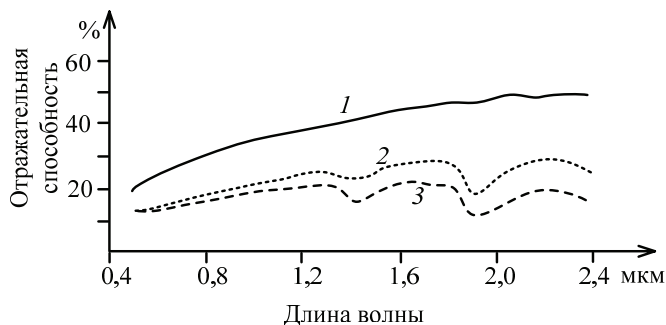


Рис. 1.13. Влияние содержания влаги на отражательную способность песчаных почв:
1 — 0–4%; 2 — 5–12%; 3 — 22–32%

В видимой части спектра также наблюдается заметное снижение отражательной способности влажных почв по сравнению с сухими. Таким образом, спектральная яркость почв во многом зависит от их состава, определяющего как размер слагающих почву частиц, так и возможный уровень содержания влаги.

Еще одним важным свойством почвы, влияющим на ее отражательную способность, является содержание органических веществ, которое характеризует количество азота в почве. При 5%-м содержании органических веществ почва обычно имеет темно-коричневый или черный цвет, а при меньшем содержании – светло-коричневый или светло-серый.

Спектральная отражательная способность почвы в значительной степени зависит от присутствия в ней оксида железа, который может вызвать существенное снижение отражательной способности в видимом диапазоне. Удаление из почвы этого элемента приводит к заметному увеличению отражательной способности в диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм, но мало влияет на отражательную способность при длине волны более 1,1 мкм. Такой же эффект в тех же спектральных диапазонах наблюдается и при удалении из почвы органических веществ.

Из приведенного обсуждения можно сделать выводы о спектральных характеристиках почв:

- увеличение влажности почвы ведет к снижению ее отражательной способности во всем спектральном диапазоне излучения;
- отражательная способность почвы увеличивается с уменьшением размера слагающих ее частиц и неровности поверхности;
- отражательная способность почвы уменьшается с увеличением содержания в ней органических веществ и оксида железа.

1.5.3. Водные поверхности

Спектральные характеристики воды, так же как и спектральные характеристики растительности и почвы, изменяются с длиной волны, хотя по сравнению с растительными покровами и почвами отражательная способность водных поверхностей относительно низка. Если растительный покров может отражать до 50% падающего излучения, а почвы – до 30–40%, то доля излучения, отраженного водной поверхностью, не превышает 10%.

В ближнем и среднем инфракрасном диапазоне вода имеет несколько отчетливых полос поглощения. Вследствие сильного поглощения энергии водой в этих диапазонах ее отражательная способность гораздо ниже, чем отражательная способность растительности или почвы. Поэтому на черно-белых инфракрасных аэрофотоснимках или мультиспектральных сканерных вода изображается черным или почти черным цветом и хорошо отличается от окружающих ее объектов.

Вода отражает электромагнитное излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. При длинах волн больше 1200 мкм все падающее излучение поглощается. Более высокой отражательной способностью обладает мутная водная поверхность, что позволяет дешифровать загрязнение и санитарное состояние водоемов.

1.6. Спектральные диапазоны, сроки и метеорологические условия съемки

Оптимальные условия при проведении съемок с воздушных и космических летательных аппаратов имеют решающее значение для обеспечения высокого качества и хороших дешифровочных свойств снимков, которое, прежде всего, зависит от яркостного и цветового контраста между объектами. Наиболее значимое влияние на качество снимков, получаемых в оптическом диапазоне, оказывают спектральная отражательная способность объектов, освещенность поверхности земли, угол солнцестояния, облачность, степень прозрачности атмосферы, определяющие выбор сезона, времени дня, съемочной камеры, светофильтров, фотопленок и фотобумаг. Наилучшие дешифровочные показатели имеют снимки, полученные в период, когда в зонах спектра, в которых выполняется съемка, наблюдаются максимальные различия в яркости дешифрируемых объектов [11, 29, 22, 55].

Спектральная отражательная способность и диапазоны. Как указывалось ранее, для почв характерно постепенное увеличение спектральной яркости с увеличением длины волны, максимальные различия наблюдаются в красной и инфракрасной зонах спектра. Вода и сооружения обладают сравнительным постоянством отражения в разных спектральных диапазонах.

Спектральная отражательная способность лесной растительности значительно изменяется в зависимости от ее фенологического состояния. Максимумы отражения в период вегетации находятся в зеленой и ближней инфракрасной зонах. Наибольший контраст изображения между насаждениями различных древесных видов наблюдается весной в диапазоне волн 0,50–0,65 мкм, летом – 0,70–1,0 мкм, осенью – 0,67–0,70 мкм, поэтому проведение съемок с использованием пленок или сенсоров, чувствительных в данных зонах спектра, позволяет получить максимальную дифференциацию изображения по цвету и тону.

Для съемок в весенний период можно использовать ортохроматическую пленку, летом – спектрозональную, чувствительную в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, осенью – панхроматическую или цветную, чувствительную в видимом диапазоне.

Время года. Выбор сезона проведения съемки определяется условиями, при которых цветовые и тоновые различия в изображении дешифрируемых объектов, а следовательно, и дешифровочное качество снимков максимальные. При правильном выборе сезона съемки на снимках отображаются признаки объектов, которые в другое время нельзя было бы распознать, или их дешифрирование потребовало бы проведения дополнительных полевых работ.

Время проведения съемки лесных насаждений определяется их фенологическим состоянием. Обычно съемку проводят в весенний, летний и осенний периоды, после полного распускания и до начала массового опадания листвы у березы, при этом съемка проводится, как правило, в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра.

Прозрачность атмосферы. Прозрачность атмосферы зависит от наличия в ее составе газов, водяных паров, дыма, мельчайших частиц пыли. Они вызывают рассеивание света и свечение самой атмосферы, чем снижают контрастность изображения. Свечение или мутность атмосферы за счет рассеивания света от взвешенных в воздухе частиц называют дымкой. В зависимости от частиц, вызывающих рассеивание, различают дымку первого и второго рода.

Дымка первого рода вызывается рассеиванием света молекулами газов и водяных паров, присутствующих в атмосфере. Молекулы вследствие своих малых размеров рассеивают преимущественно лучи с короткой длиной волны – фиолетовые и синие, что и определяет

голубой или синий цвет дымки первого рода. Дымка второго рода возникает в результате загрязнения мелкими частицами пыли и дыма. Эти частицы значительно крупнее молекул водяного пара и газов и в одинаковой степени рассеивают лучи разных длин волн, поэтому дымка второго рода имеет белесый или серый цвет. На освещенность поверхности дымка существенно не влияет, но из-за возникающей световой «вуали» значительно снижает контрастность изображения и ухудшает дешифровочные свойства снимков.

Для исключения влияния атмосферной дымки первого рода, а также небольшой дымки второго рода применяются желтые светофильтры ЖС-12 и ЖС-18, поглощающие фиолетовые и синие лучи. При плотной пылевой дымке производить съемку крайне нежелательно, так как, несмотря на применение светофильтров, приемлемое качество изображения получить невозможно. При обработке цифровых снимков для устранения влияния атмосферной дымки используются различные алгоритмы и модели атмосферной коррекции, которые будут рассмотрены в разд. 7.

Высота солнцестояния и время съемки. Съемку лесов в видимом диапазоне целесообразно выполнять при высоте солнцестояния $15\text{--}20^\circ$, когда освещенность поверхности Земли уже приемлема для ее проведения. Обычно съемку начинают через 2 ч после восхода солнца и заканчивают за 3 ч до захода.

Высота солнцестояния оказывает сильное влияние на качество дешифрирования полого насаждений. При небольших углах солнцестояния сильно удлиняются падающие тени крон деревьев, в результате чего происходит уменьшение видимой на снимке части кроны и затенение нижестоящих деревьев, кроны которых на снимках не просматриваются. Это приводит к значительным ошибкам в дешифрировании густоты состава и среднего диаметра крон деревьев. При максимальной высоте стояния Солнца длина падающих теней минимальна, хорошо дешифрируются горизонтальная и вертикальная форма крон, количество скрытых в тени деревьев уменьшается, точность оценки таксационно-дешифровочных показателей древостоев повышается. Съемку земной поверхности в инфракрасном тепловом диапазоне можно осуществлять в любое время суток, а в радиодиапазоне – в любую погоду.

Облачность. Аэросъемка обычно производится в солнечные, безоблачные дни, однако наличие высокой сплошной облачности в некоторых случаях не только допустимо, но и целесообразно. Высокая сплошная облачность позволяет получать снимки с хорошими дешифровочными качествами изображения, так как снижается его контрастность и улучшается просматриваемость полога леса в глубину, что дает возможность дешифровать объекты, затененные в солнечную погоду. Такую съемку иногда называют бестеневой. Кроме того, проведение съемки в условиях сплошной облачности позволяет значительно повысить точность лесотаксационного дешифрирования древостоев и увеличить общее время съемки в течение дня.

Части снимков, закрытые кучевыми облаками, находящимися ниже съемочной камеры, изображаются белыми пятнами произвольной формы, а их тени – очень темными, почти черными пятнами и непригодны для дешифрирования.

2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

2.1. Виды съемки, классификация съемочных систем

В связи с широким диапазоном применения и востребованностью данных дистанционного зондирования во многих хозяйственных отраслях съемка выполняется с различных съемочных платформ, высот, с использованием оборудования, работающего в различных спектральных диапазонах.

Съемка может проводиться с воздушных (*аэросъемка*) и космических (*космическая съемка*) летательных аппаратов, летно-технические характеристики которых определяют высоту и в конечном счете масштаб съемки (табл. 2.1) [87].

Таблица 2.1
Съемочные платформы, высота и масштаб съемки

Платформа	Высота съемки	Масштаб
Наземная съемка с башен, возвышенных участков и гор	До 300 м	1:100–1:500
Съемка с воздушных шаров, беспилотных самолетов	До 1000 м	1:500–1:20 000
Съемка с самолетов и вертолетов	До 10 000 м	1:500–1:20 000
Съемка с космических аппаратов	100–37 000 км	До 1:1 000 000

По углу наклона главной оптической оси камеры (аэрофотоаппарата) съемка подразделяется на горизонтальную, плановую и перспективную [22, 53, 32].

Горизонтальной называется съемка, при которой оптическая ось объектива камеры строго вертикальна, а плоскость проецирования –

горизонтальна (рис. 2.1, *а*). Горизонтальная съемка – это идеальный случай, реализовать который практически невозможно, так как самолет и камера в полете постоянно меняют свое местоположение в пространстве и главная оптическая ось отклоняется.

Если отклонение главной оптической оси камеры от вертикальной линии не превышает 3° , то такая съемка называется *плановой* (рис. 2.1, *б*). Для стабилизации съемочной камеры в пространстве применяется гироскопическая платформа, обеспечивающая отклонение оптической оси не более $15'-20'$.

При отклонении главной оптической оси от отвесной линии более 3° съемку называют *перспективной* или *наклонной* (рис. 2.1, *в*).

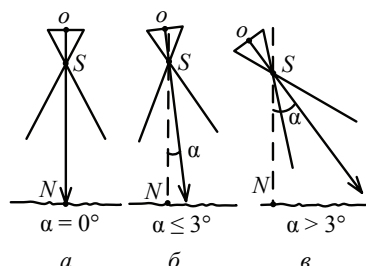


Рис. 2.1. Виды съемки в зависимости от угла наклона оптической оси:
а – горизонтальная; б – плановая;
в – перспективная

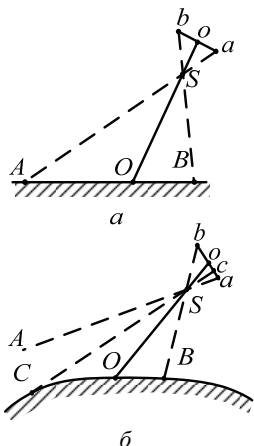


Рис. 2.2. Схема перспективной съемки:
а – без видимого горизонта;
б – с видимым горизонтом

При перспективной аэрофотосъемке оптическая ось объектива значительно (на $45-60^\circ$) отклоняется от вертикального положения и на снимке может отображаться линия горизонта. Такой вид аэрофотосъемки носит название съемки *с видимым горизонтом*. Если на перспективном аэроснимке изображается только земная поверхность, то аэросъемка называется съемкой *без видимого горизонта* (рис. 2.2) [68].

В практике иногда применяют одновременно и плановую и перспективную аэросъемки, которые производятся двумя камерами.

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

Одинарная съемка – это съемка отдельных небольших участков местности, уместающихся на один или несколько снимков. Такую аэросъемку применяют для оценки ущерба от пожаров и вредителей, научных целей и при решении локальных лесохозяйственных задач.

Маршрутная (полосная) съемка проводится в виде узкой длинной полосы с перекрытием снимков в маршруте вдоль линейных объектов (рис. 2.3). Маршрутная аэрофотосъемка широко применяется при изысканиях и проектировании дорог, линий электропередач, нефтегазопроводов, при гидрологических обследованиях рек и т. п.

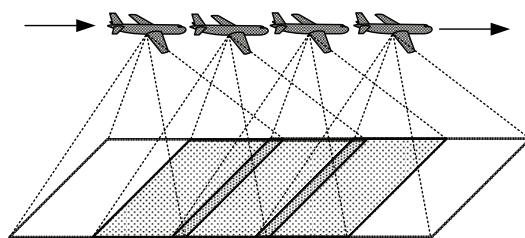


Рис. 2.3. Схема маршрутной съемки

Площадная, или многомаршрутная, аэросъемка применяется в тех случаях, когда объект съемки занимает значительную площадь. Производится она путем движения самолета челночным ходом по прямолинейным и параллельным между собой маршрутам с обеспечением взаимных перекрытий снимков как в маршруте, так и между маршрутами (рис. 2.4).

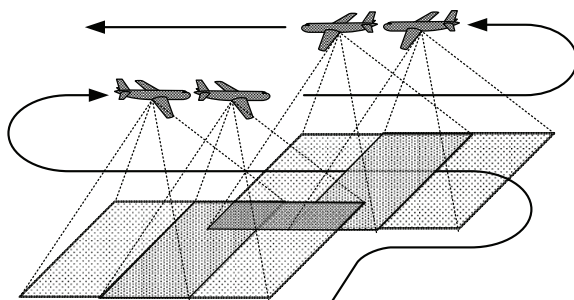


Рис. 2.4. Схема площадной аэросъемки

Величина продольных перекрытий – между снимками вдоль маршрута – составляет в среднем 60% (не ниже 56%), а поперечных – между снимками смежных маршрутов – 30–35% (не ниже 20%). Площадную аэросъемку осуществляют в пределах трапеций международной разграфки или границ объектов, съемку которых планируют выполнить (лесхоз, лесничество и др.).

В зависимости от масштаба получаемых снимков аэросъемку условно подразделяют на сверхкрупно- (крупнее 1:2000), крупно- (от 1:2000 до 1:10 000), средне- (от 1:10 000 до 1:30 000), мелко- (от 1:30 000 до 1:100 000) и сверхмелкомасштабную (мельче 1:100 000).

В зависимости от используемых для регистрации изображения светочувствительных материалов и сенсоров, зон спектра электромагнитного излучения, в которых проводится съемка, конструктивных особенностей съемочных камер все съемочное оборудование можно разделить на различные категории.

Съемочные системы, регистрирующие собственное излучение объектов или отраженное солнечное излучение, называют *пассивными*, а системы, регистрирующие отраженное излучение, генерируемое устройством, установленным на борту летательного аппарата, – *активными* [22].

По способу регистрации изображения все съемочные камеры подразделяются на *фотографические* и *электрические*. В фотографических съемочных камерах (аэрофотоаппаратах) для регистрации изображения используются фотопленки, в электрических – специальные устройства (сенсоры, датчики, антенны и т. д.), способные генерировать или изменять величину электрического напряжения под воздействием электромагнитного излучения. В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах в качестве сенсоров чаще всего используются фотодиоды.

Все электронные съемочные системы, в свою очередь, подразделяются на *аналоговые* и *цифровые*, нашедшие в последние годы наиболее широкое применение. В аналоговых системах изображение представлено в виде непрерывного электрического сигнала, записанного на магнитную ленту (телевизионные камеры), в цифровых системах сигнал преобразуется в двоичный код и хранится в файлах специального формата. Основное преимущество цифровых снимков – доступность для компьютерной обработки, простота

хранения и возможность передачи в режиме реального времени, что существенно повышает оперативность сбора данных.

По способу формирования изображения съемочные системы подразделяются на *кадровые*, когда формируется изображение отдельного участка квадратной или прямоугольной формы, и *сканирующие*, которые, подобно сканеру, формируют изображение, состоящее из множества узких полос. При этом сканирование территории может выполняться как вдоль, так и поперек маршрута движения летательного аппарата. В кадровых системах весь кадр, как правило, является центральной проекцией участка местности, в сканирующих центральной проекцией являются только отдельные полосы изображения.

В зависимости от количества спектральных диапазонов съемочные камеры подразделяются на *моноспектральные*, или однозональные, съемка которыми выполняется в одном иногда достаточно широком спектральном диапазоне, *мультиспектральные*, или многозональные, когда съемка выполняется в нескольких узких спектральных диапазонах, и *гиперспектральные*, когда съемка проводится в очень узких спектральных диапазонах, число которых может быть более 200.

2.2. Методы регистрации излучения

В съемочных системах для регистрации излучения применяют различные способы, основанные на его химическом, тепловом и электрическом действии. При этом используются различные приемники (детекторы) излучения, такие как фотографические материалы, фотоэлектрические и термоэлектрические элементы, антенны [32].

До недавнего времени наиболее распространенным способом получения изображений снимаемой местности был *фотографический (химический)*, а приемником излучения – фотопленка и фотобумага. Конечная продукция фотосъемки представлялась в виде фотоснимков.

Однако уже в начале 1990-х гг. за рубежом и с 2003 г. в Беларуси обработка материалов аэрофотосъемки и технология производства планово-картографических материалов претерпела значительные

изменения. Фотонегативы, полученные в результате съемки, оцифровывались с помощью сканера, и дальнейшая обработка выполнялась на компьютерах. Такая технология и сегодня остается наиболее распространенной.

Вместе с тем оцифровка фотонегативов приводила к дополнительным затратам и потере качества изображения, поэтому в середине 1990-х гг. за рубежом появились опытные образцы цифровых аэросъемочных комплексов, основанные на электрических приемниках излучения. С их помощью можно регистрировать весь спектр электромагнитных волн, используемых при дистанционном зондировании.

При регистрации излучения в оптическом диапазоне электрический сигнал возникает или вследствие непосредственного воздействия излучения на чувствительный элемент приемника (фотоэлектрический эффект) или вследствие его нагревания (термоэлектрический эффект), а приемники подразделяются на *фото-* и *термоэлектрические*.

Регистрация излучения в радиоволновом диапазоне основана на возникновении переменного электрического тока в антенне при воздействии на нее радиоизлучения.

При съемке в видимом и ближнем ИК диапазонах (0,4–3,0 мкм) применяют фотоэлектрические, в среднем и дальнем ИК диапазонах (3–12 мкм) – термоэлектрические приемники излучения.

Фотоэлектрические приемники. Действие фотоэлектрических приемников (фотоэлементов) основано на внешнем (вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители) или внутреннем (фоторезисторы, фотодиоды и др.) фотоэффекте.

У вакуумного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) чувствительный элемент делают из металла, который под действием поглощенного излучения испускает электроны. Их достоинство – высокие фотометрические свойства. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом наиболее чувствительны в ультрафиолетовой и видимой зонах спектра, а их спектральная чувствительность зависит от материала, из которого изготовлен фотокатод.

В фоторезисторах чувствительный элемент изготовлен из полупроводника, который под действием излучения изменяет электрическое сопротивление. Различные полупроводники (селен, кремний, теллур, германий и др.) позволяют изготавливать фотоэлементы,

чувствительные в разных зонах видимого и инфракрасного излучения. Однако их измерительные свойства хуже, чем у электровакуумных фотоэлементов [19].

Наилучшие показатели при регистрации электромагнитного излучения в оптическом диапазоне имеют фотодиоды. В них под действием излучения наблюдается образование собственной электродвижущей силы (фотогальванический эффект), что позволяет создавать небольшие по размерам датчики, отличающиеся высокой чувствительностью во всех спектральных диапазонах и большим сроком службы.

Наиболее распространены два типа фотодиодных датчиков: ПЗС (прибор с зарядовой связью, английский вариант названия – CCD – Charge-Coupled Device) и КМОП (комплиментарный металл-оксидный полупроводниковый прибор, английский вариант – CMOS – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor). Оба типа имеют свои преимущества и недостатки, однако принцип их работы схож – формирование напряжения в зависимости от количества света, регистрируемого сенсором.

Избирательность сенсора обеспечивает фильтр, установленный перед чувствительным элементом. Для увеличения количества попадающего на светочувствительный элемент света перед ним может устанавливаться фокусирующая линза. Общая схема одиночного сенсора показана на рис. 2.5, *а* [17].

Размер отдельного чувствительного элемента приемника очень мал (меньше 0,6–0,7 мкм), что позволяет изготавливать линейные и матричные светочувствительные датчики, содержащие десятки миллионов отдельных сенсоров (рис. 2.5, *б*, *в*).

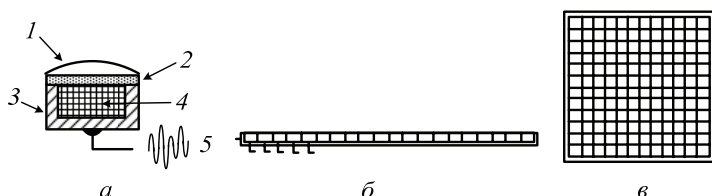


Рис. 2.5. Сенсоры:

а – одиночный сенсор: 1 – фокусирующая линза; 2 – фильтр;
3 – корпус; 4 – светочувствительный элемент; 5 – выходной сигнал;
б – линейка сенсоров; *в* – матрица сенсоров

Общая чувствительность фотодиодов в несколько раз выше, чем фотопленок, что позволяет вести съемку при коротких выдержках и низкой освещенности, а спектральный диапазон более широкий. Применение многоэлементных фотоэлектрических приемников ПЗС для регистрации излучения открыло широкие перспективы в создании геометрически и радиометрически точных многозональных съемочных систем высокого пространственного разрешения, успешно применяющихся при проведении аэро- и космической съемок.

Термоэлектрические приемники. Для регистрации теплового инфракрасного излучения применяются приемники, которые реагируют на поглощенное излучение нагреванием чувствительного элемента. Работа термоэлектрического приемника болометра основана на изменении электрического сопротивления нагреваемого чувствительного элемента.

Преимущество тепловых детекторов в том, что их отклик не зависит от длины волны падающего излучения, они реагируют на излучение всех длин волн. Недостаток в том, что тепловой детектор не способен на быстрый отклик в зависимости от изменяющегося входного излучения и, как правило, менее чувствителен, чем фотонный детектор.

Антенны. Устройством регистрации излучения в радиодиапазоне является антенна. Частотный диапазон, чувствительность и направленность антенны зависят от ее конструкции. Для получения узконаправленного излучения существенно большей мощности антенна помещается в параболический металлический рефлектор. Применение рефлектора для приемной антенны позволяет значительно повысить ее чувствительность.

2.3. Съемка с воздушных летательных аппаратов

Аэросъемка традиционно считается одним из основных методов создания и обновления крупномасштабных карт. Хотя в настоящее время все шире используются данные дистанционного зондирования высокого и сверхвысокого разрешения с космических летательных аппаратов, их использование пока ограничено высокой стоимостью

и не всегда удовлетворительным качеством вследствие большой облачности и других причин, поэтому аэросъемка остается основным поставщиком данных для составления лесоустроительных планово-картографических материалов.

2.3.1. Носители аппаратуры

В качестве носителей съемочной аппаратуры (платформ) применяются воздушные шары, беспилотные радиоуправляемые модели самолетов и вертолетов, самолеты и вертолеты. Выбор тех или иных летательных средств определяется техническими характеристиками съемочной системы, целями съемки и требованиями, предъявляемыми к качеству материалов.

Для съемки лесов наиболее часто используются транспортные самолеты и вертолеты, оснащенные съемочным оборудованием: Ан-2, Ан-30, Ил-14, Ил-18, Ми-2, Ми-8, Ка-26 и др. [75, 29]. Основные летно-технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 2.2.

По информации, приведенной на сайте <http://www.aviaport.ru> [69], в России проводятся испытания по использованию для аэросъемки многоцелевого самолета М-101Т. Восемиместный одномоторный многоцелевой самолет М-101Т оснащен одним двигателем чешского производства М-601F-32 мощностью 760 л. с. Максимальная взлетная масса до 3270 кг; максимальная масса коммерческой нагрузки 750 кг. Дальность полета (8 человек) составляет 1100 км при крейсерской скорости 430 км/час.

Один самолет уже переоборудован и в настоящее время ведется работа по подготовке второго самолета, купленного ФГУП «Государственный проектно-изыскательский институт земельно-кадастровых съемок».

В Беларуси съемка обычно производится с самолета Ан-2, который по своим техническим параметрам пригоден для этой цели. Он обладает хорошей курсовой устойчивостью, небольшой скоростью полета, может использоваться для средне- и крупномасштабной аэросъемки. На борту установлен аэрофотосъемочный комплекс, в который входит гиростабилизирующая платформа PAV-30, аэрофотосъемочный аппарат RC-30, навигационный визир и система управления полетом ASCOT (Aerial Survey Control Tool) [9].

Таблица 2.2

Основные летно-технические характеристики воздушных судов

Характеристика	Самолеты			Вертолеты	
	Ан-30	Ил-14ФК	Ан-2	Ми-8	Ка-26
Максимальная взлетная масса, кг	22 200	17 500	5 250	12 000	3 250
Масса пустого самолета (вертолета), кг	15 550	12 420–12 890	3 400–3 690	7 261	1 975
Вид топлива	Керосин	Бензин	Бензин	Керосин	Бензин
Практический потолок, м	8 000	6 500	4 500	6 000	3 100
Практическая дальность полета, км	2 360	2 600	1 200	1 160	400
Максимальная продолжительность полета, ч	5,5	9	6	В зависимости от установленных топливных баков	3,5
Диапазон крейсерских скоростей, км/ч	350–400	290–320	155–190	205–220	140
Наличие фотолюков	2 люка для плановой, 2 для перспективной съемок	3 люка для плановой съемки	1 люк штатный, возможно оборудование двух дополнительных	1 люк для плановой съемки	1 люк для плановой съемки

В последние годы с появлением систем спутниковой навигации, цифровой аппаратуры радиуправления, цифровых камер и сканеров, имеющих небольшой вес и размеры, для съемки стали применяться малые летательные аппараты: радиоуправляемые модели самолетов, дельтапланы и парaplаны. Съёмка обычно производится с высот от 200 до 700 м. Однако данные летательные средства не обладают необходимыми летно-техническими характеристиками, их устойчивость в полете недостаточна для обеспечения плановой съемки. Поэтому сфера использования таких аппаратов ограничена оперативной оценкой текущих изменений лесного фонда – небольших участков, поврежденных пожарами, вредителями и в результате воздействия неблагоприятных факторов природной среды [75].

Для обеспечения геометрической точности снимков, полученных с малых летательных аппаратов, и нанесения результатов съемки на планы и карты необходимо выполнять тщательную фотограмметрическую обработку [26].

2.3.2. Аэросъемочное оборудование

В настоящее время в связи с появлением портативных компьютеров и глобальных навигационных систем ситуация на рынке аэросъемочного оборудования кардинально изменилась. Ведущие фирмы-производители аэросъемочного оборудования, такие как Zeiss/Intergraph Imaging (Германия/США), Leica Geosystems (Швейцария/США), Microsoft/Vexcel Imaging GmbH (Австрия/США), предлагают не просто фото- и цифровые камеры, а целые аэросъемочные аппаратно-программные комплексы (рис. 2.6), позволяющие со всей полнотой воспользоваться преимуществами глобальных навигационных систем, цифровой техники и значительно сократить затраты на проведение аэросъемки и обработку материалов [88, 1, 27, 39, 54, 56, 76].

Современный аэросъемочный аппаратно-программный комплекс состоит из нескольких составных частей:

- аэрофотоаппарата (цифровой камеры, лидара и пр.);
- модулей памяти;
- гиросtabilизирующей платформы;
- системы управления полетом и съемкой;
- системы прямого геопозиционирования;
- программного обеспечения.

Большинство производителей съемочной аппаратуры, камер, сканеров обеспечивают возможность подключения и использования своего оборудования с оборудованием других фирм, что расширяет сферу его применения.

Рассмотрим более подробно используемый в нашей республике аэрофотосъемочный комплекс от фирмы Leica Geosystems на базе аэрофотоаппарата RC-30 (рис. 2.7). Основными составляющими комплекса являются аэрофотокамера RC-30; объективы 15/4 UAG-S или 30/4 NAT-S; гиросtabilизирующая платформа PAV-30; система управления съемкой и ее контроля ASCOT (включает модуль управления ACU30, терминал оператора AOT30C; дисплей пилота APV30, GPS-антенну); наземная опорная GPS-станция; программное обеспечение постобработки данных Flykin Suite+ [89].



a



б

Рис. 2.6. Аэросъемочные аппаратно-программные комплексы:
a – фирмы Microsoft/Vexcel Imaging GmbH (Австрия/США);
б – Zeiss/Intergraph Imaging (Германия/США);
1 – цифровая камера; 2 – терминал оператора;
3 – управляющий модуль; 4 – модуль памяти;
5 – гиросtabilизирующая платформа; 6 – программное обеспечение

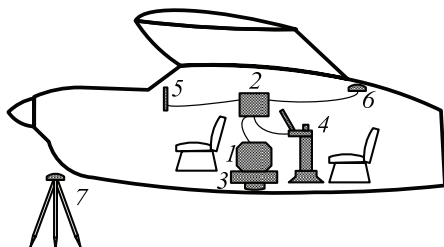


Рис. 2.7. Схема аэрофотосъемочного комплекса фирмы Leica Geosystems:

- 1 – аэрофотокамера RC-30; 2 – модуль управления ACU30;
- 3 – гиросtabilизирующая платформа PAV-30;
- 4 – терминал оператора AOT30C; 5 – дисплей пилота APV30;
- 6 – GPS-антенна; 7 – наземная GPS-станция

Камера RC-30 является модульной, устройства перемотки пленки и компенсации сдвига изображения входят в центральный управляющий блок. Сменными модулями служат объективы и кассеты для пленки. Режимы работы камеры управляет микропроцессор. Установка нужной экспозиции выполняется автоматически для каждого кадра с помощью специального измерителя PEM-F, оптимизированного для аэрофотосъемки над любой местностью, на разных высотах носителя и с любым типом пленки. Камера соединена с бортовой навигационной системой, что позволяет автоматически аннотировать кадры в процессе съемки и проводить их коррекцию.

На полях каждого снимка имеется возможность отображать дополнительную информацию, такую как номер снимка, масштаб, координаты центра проекции, дату, время, тип пленки и другую размером до 200 символов (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Дополнительная информация на полях аэрофотоснимка камеры RC-30

Сменные объективы 15/4 UAG-S (фокусное расстояние 153 мм) и 30/4 NAT-S (фокусное расстояние 303 мм) изготавливаются с высочайшим качеством, обеспечивающим дисторсию объектива 2 мкм по всему полю зрения и разрешающую способность 110–115 лин./мм.

Гиростабилизирующая платформа PAV-30 предназначена для компенсации угловых колебаний самолета и улучшения качества аэрофотосъемки. Ее использование позволяет вести аэрофотосъемку в условиях турбулентности, не нарушая нормативные требования, предъявляемые к качеству материалов съемки. В комбинации с блоком компенсации сдвига изображения FMC, входящим в состав управляющего устройства камеры, применение платформы PAV-30 позволяет удлинять время выдержки при съемке в условиях низкой освещенности.

Система управления процессом съемки ASCOT представляет собой аппаратно-программный навигационный комплекс, обеспечивающий в интерактивном режиме планирование съемки, а также управление процессом съемки и полетом. Данная система синхронизирована с камерой, GPS-приемником и гироплатформой для сбора во время съемки навигационных данных и аннотирования кадров. В систему входят: бортовой компьютер промышленного исполнения (модуль управления), дисплей пилота и терминал оператора, что позволяет пилоту обеспечить полет в соответствии с планом съемки, а оператору – контролировать в реальном времени процесс съемки.

В качестве наземной опорной станции используются одноканальные (SR510) или двухчастотные (SR520) GPS-приемники фирмы Leica Geosystems, которые обеспечивают необходимую точность определения координат центров проекций снимков.

Программное обеспечение постобработки данных Flykin Suite+ предназначено для конвертации GPS-данных; восстановления траектории полета и ее графического отображения, уравнивания данных и подготовки выходного файла с параметрами каждого снимка для дальнейшей обработки в программном комплексе ORIMA.

2.3.3. Аэрофотоаппараты

В современных фотоаппаратах, применяемых для аэро- и космической съемок, реализованы три способа экспонирования и формирования изображения: кадровый, щелевой и панорамный.

В *кадровых фотоаппаратах* (рис. 2.9, а) участок земной поверхности проецируется через объектив на участок пленки (кадр), расположенный в задней фокальной плоскости объектива. Экспонирование осуществляется на всю площадь кадра с помощью открывающегося на определенное время затворного механизма [22, 32, 50].

При *целевом* способе (рис. 2.9, б) экспонирование производится через узкую щель, расположенную перпендикулярно направлению полета, на пленку, движущуюся в направлении полета с постоянной скоростью, синхронизированной, с учетом масштаба съемки, со скоростью летательного аппарата. Объектив и экспонирующая щель неподвижны относительно летательного средства.

В *панорамных фотоаппаратах* (рис. 2.9, в) экспонирующая щель расположена параллельно направлению полета, а изображение формируется за счет кругового или возвратно-поступательного вращения объектива (зеркала или призмы). В результате панорамного фотографирования получают изображения полос земной поверхности, расположенных перпендикулярно направлению полета. Щелевые и панорамные фотоаппараты относятся к оптико-механическим сканирующим системам.

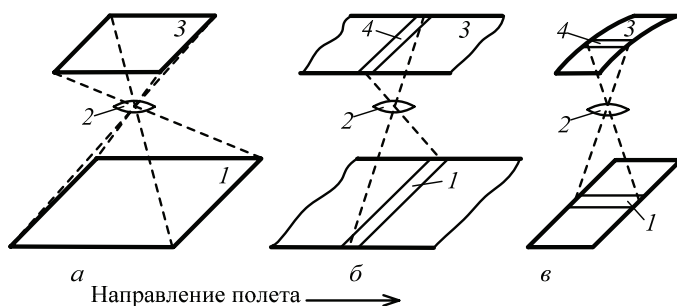


Рис. 2.9. Схемы экспонирования и построения фотоизображения в кадровом (а), щелевом (б) и панорамном (в) аэрофотоаппаратах:
1 – снимаемый участок местности; 2 – объектив; 3 – фотопленка;
4 – экспонирующая щель

Наиболее широкое применение для аэрофотосъемки нашли кадровые аэрофотоаппараты, которые по назначению делятся на топографические и нетопографические. Нетопографические аэрофотоаппараты

используются для различных целей: проведения научных и изыскательских работ, мониторинга, оценки текущих изменений состояния экосистем, разведки и т. д.; топографические предназначены для получения аэроснимков, пригодных для выполнения точных стереоскопических измерений.

Более высокие измерительные качества аэроснимков, получаемых топографическими аппаратами, обеспечиваются меньшей дисторсией и повышенной разрешающей способностью объективов, более строгим выравниванием пленки в момент экспонирования, строго фиксированным расположением координатных меток и точно определенными элементами внутреннего ориентирования. В обозначениях отечественных топографических фотоаппаратов присутствует, как правило, буква Т.

Для проведения аэрофотосъемки применяют топографические аэрофотоаппараты с форматом кадра 230×230 мм (RC-30, LMK, MRB, ТК с фокусными расстояниями объективов 90, 150, 200, 300 мм) и 180×180 мм (MRB-110, ТАФА-10, АФА-41, АФА-ТЭ с фокусными расстояниями объективов 75, 100, 140, 200, 350 мм); нетопографические с форматом кадра 300×300 мм (АФА-42 с фокусными расстояниями объективов 200 и 1000 мм) и др. Однако наиболее широкое применение в странах СНГ нашел аэрофотоаппарат RC-30 от Leica Geosystems (рис. 2.10).

Несмотря на разнообразие конструкций, большинство кадровых аэрофотоаппаратов имеют одинаковую схему (рис. 2.11).

Основной частью аппарата является *корпус*, к которому крепятся остальные узлы и механизмы: кассета с механизмом перемотки пленки, объектив с механизмом диафрагмы, затворный механизм, прикладная рамка, фильтры.

Кассета служит для установки и перематывания пленки в процессе аэрофотосъемки с одной



Рис. 2.10. Внешний вид аэрофотоаппарата RC-30 (Leica Geosystems), установленного на гиросtabilизирующую платформу

катушки на другую. Во время экспонирования пленка прижимается к прикладной рамке с помощью специального механического или вакуумного прижимного устройства. С целью удобства эксплуатации кассета легко отделяется от корпуса аэрофотоаппарата, снабжена указателями перемотки и счетчиком кадров.

Для выравнивания пленки используется *прикладная рамка*. Размеры светового окна в прикладной рамке определяют формат кадра аэрофотоснимка, который для топографических аэрофотоаппаратов обычно равен 180×180 мм, нетопографических – 300×300 мм. У аппаратов зарубежного производства размер кадра составляет, как правило, 230×230 мм.

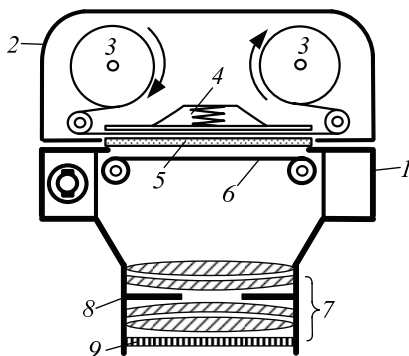


Рис. 2.11. Схема аэрофотоаппарата:

- 1 – корпус; 2 – кассета; 3 – катушки;
4 – прижимное устройство; 5 – прикладная рамка;
6 – затворный механизм; 7 – объектив;
8 – диафрагма; 9 – фильтр

Современные аппараты имеют в плоскости прикладной рамки 4–8 координатных меток, размещенных по периметру кадра, или равномерно расположенную сетку крестов, которые изображаются на снимке и образуют его координатную систему.

Затворный механизм аппарата предназначен для обеспечения доступа света к пленке и регулировки времени экспонирования кадра. Затвор аппарата периодически открывается на определенный промежуток времени, зависящий от освещенности, величины

диафрагмы и чувствительности пленки. Чаще всего в аэрофотоаппаратах применяются затворы типа жалюзи, лепестковые или шторные, которые имеют свои преимущества и недостатки. Время открытия диафрагмы регулируется специальным электронным экспонометром, встроенным в камеру, в автоматическом режиме.

2.3.4. Объектив

Объектив представляет собой сложную многолинзовую систему (рис. 2.12) и обеспечивает фокусировку изображения на светочувствительном слое пленки.

Основными характеристиками объектива являются: фокусное расстояние, угол поля изображения, относительное отверстие, светосила, глубина резкости, разрешающая способность, искажения.

Фокусным расстоянием называют величину отрезка между центром линзы и точкой фокуса (рис. 2.13). Объектив имеет переднее и заднее фокусные расстояния. Величина заднего фокусного расстояния является основным параметром, которым принято характеризовать объектив, так как именно она определяет масштаб снимка.

В зависимости от величины фокусного расстояния объективы подразделяются на коротко- (55–100 мм), средне- (140–200 мм), длинно- (250–300 мм) и сверхдлиннофокусные (более 300 мм) [22, 50]. Используется и несколько иная классификация в зависимости от соотношения значения фокусного расстояния и диагонали кадра: нормальные объективы – фокусное расстояние примерно равно диагонали кадра, короткофокусные – фокусное расстояние меньше диагонали кадра, длиннофокусные – фокусное расстояние больше диагонали кадра).

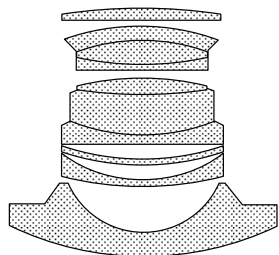


Рис. 2.12. Система линз объектива аэрофотоаппарата

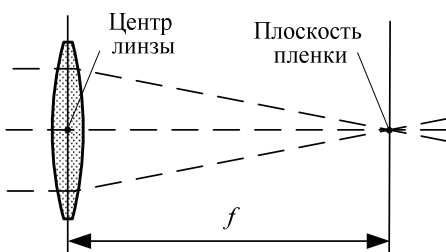


Рис. 2.13. Фокусное расстояние

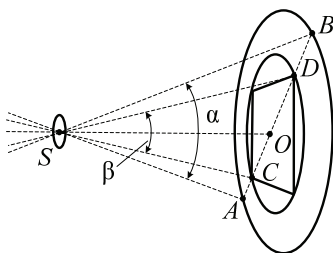


Рис. 2.14. Поле зрения и поле изображения объектива

С фокусным расстоянием тесно связан угол поля зрения объектива – угол ASB между лучами к диаметрально противоположным точкам поля зрения (рис. 2.14). Поле зрения объектива определяется величиной светового пятна диаметром AB , создаваемого объективом на экране.

Полеом изображения называется часть поля зрения, в пределах которой формируется равномерно освещенное изображение достаточной резкости и яркости диаметром CD ,

а соответствующий угол CSD – углом поля изображения. Вписанный в это поле квадрат определяет *формат кадра*. В зависимости от величины угла поля изображения объективы подразделяются на четыре группы: узко- (менее 50°), нормально- (50 – 90°), широко- (90 – 110°) и сверхширокоугольные (более 110°). Чем больше угол изображения, тем больше оно будет искажено.

Относительное отверстие объектива характеризует количество проходящего через него света и определяется как отношение диаметра действующего отверстия к фокусному расстоянию объектива. Оптимальными для аэрофотосъемки считаются объективы с относительным отверстием $1/4$ – $1/11$ [50].

Глубина резкости характеризует способность объектива строить резкие изображения объектов, расположенных на различных расстояниях от него.

Разрешающая способность объектива определяется числом раздельно различаемых линий (штрихов), приходящихся на 1 мм изображения, и характеризует его способность воспроизводить раздельно мелкие детали изображения. Разрешающая способность объектива определяется путем фотографирования специального тестового изображения – миры и для современных камер составляет 100 – 150 лин./мм.

Качество получаемого с помощью объектива изображения зависит от качества и сочетания составляющих его линз. Изображение, формируемое любым объективом, имеет ошибки и погрешности, называемые *абберациями*.

Хроматические aberrации вызываются неодинаковым преломлением лучей с различной длиной волны. Наиболее преломляемыми лучами являются синие (их фокус ближе), а наименее – красные. Хроматическая aberrация устраняется подбором линз с различными коэффициентами преломления.

Сферическая aberrация вызывается несовпадением коэффициентов преломления линзы в точках, различно удаленных от главной оптической оси. Устраняется она комбинацией выпуклых и вогнутых линз и отсечением крайних лучей с помощью диафрагмы.

Астигматизм возникает из-за несоответствия точек фокуса для различных лучей и устраняется подбором линз по кривизне, толщине и коэффициенту преломления. Кривизна поля изображения проявляется в том, что изображение строится не в фокальной плоскости, а на некоторой искривленной поверхности, степень кривизны которой определяется конструктивными особенностями объектива.

Дисторсия объектива является следствием нарушения подобия (ортоскопии) построенного объективом изображения объекта, расположенного в плоскости, перпендикулярной к главной оптической оси. Эти нарушения приводят к смещению точек изображения как в радиальном направлении (радиальная дисторсия), так и перпендикулярном к нему (тангенциальная дисторсия). Лучшие современные объективы имеют дисторсию порядка 2 мкм.

2.3.5. Светофильтры

Светофильтр предназначен для улучшения дешифровочных свойств аэрофотоснимков и представляет собой плоскопараллельное окрашенное стекло, частично или полностью поглощающее электромагнитное излучение в определенных зонах спектра. Свойства светофильтра определяются цветом и плотностью окраски. От цвета окраски зависит спектральный диапазон светофильтра, а от густоты – интенсивность поглощения. Еще одним показателем является кратность, которая показывает, во сколько раз должна быть увеличена выдержка по сравнению с выдержкой при фотографировании без светофильтра.

По избирательной способности поглощать или пропускать лучи разных зон спектра светофильтры подразделяются на *монокроматические* – пропускающие лучи одного какого-либо цвета,

селективные – пропускающие лучи нескольких цветов спектра, и *компенсационные* – частично поглощающие лучи одной зоны спектра и полностью пропускающие остальные. Монохроматические и селективные светофильтры используются при многозональной съемке для получения изображений объекта в разных зонах спектра, компенсационные – для ослабления лучей сине-фиолетовой и голубой частей спектра, устранения дымки, в результате чего повышаются дешифровочные свойства аэрофотоснимков. Выбор светофильтра определяется свойствами фотопленки, характером объектов съемки и атмосферно-оптическими условиями фотографирования. Для исключения вредного влияния атмосферной дымки чаще применяют желтые светофильтры ЖС-18 и компенсационные, поглощающие коротковолновую часть спектра (до 450–500 нм) – фиолетовые и синие лучи. При фотографировании на высоте более 3000 м рекомендуется применять оранжевый светофильтр с зоной поглощения до 580 нм [63].

2.3.6. Гиростабилизирующая платформа

Аэрофотоаппарат крепится на гиростабилизирующей платформе, которая обеспечивает его стабильное положение в пространстве независимо от колебаний корпуса самолета. Современная гиростабилизирующая платформа состоит из нескольких (3–4) гироскопов, акселерометров (1–2 на каждой оси) и электронной системы обработки сигналов с управляющим компьютером.

Простейший механический гироскоп представляет собой вращающийся с высокой скоростью электродвигатель с установленным на нем маховиком, акселерометры служат для измерения угловых ускорений. Современные гиropлатформы оснащены волоконно-оптическими гироскопами, отличающимися высокой точностью и надежностью, а также высокоточными акселерометрами.

Применение современных гиростабилизирующих платформ GSM-3000, PAV-30, PAV-80, Z/I T-AS (рис. 2.15) позволяет добиться относительно неподвижного положения съемочной камеры или лидара и углов наклона снимка, не превышающих 10–20', а также выполнять автоматическую корректировку положения аэрофотоаппарата на угол сноса с точностью 45'. Основные технические характеристики некоторых гиropлатформ приведены в табл. 2.3.

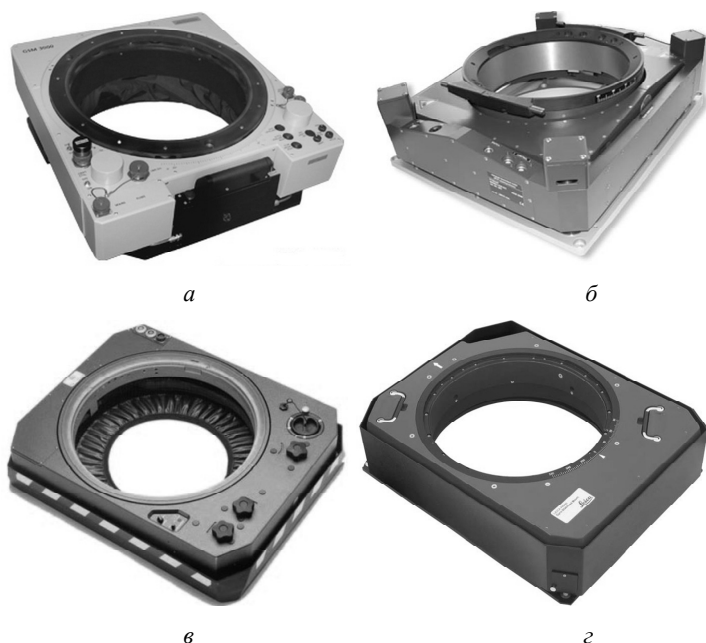


Рис. 2.15. Гиросtabilизирующие платформы:
а – GSM-3000 (IGI mbH);
б – Z/I T-AS (Zeiss/Intergraph Imaging);
в – PAV-30; *г* – PAV-80 (Leica Geosystems)

Таблица 2.3
Основные технические характеристики гиросtabilизирующих платформ

Гироплатформа	PAV-30	PAV-80	Z/I TA-S	GSM-3000
Стабилизация по крену, град	± 5	± 7	± 5	$\pm 6,2$
Стабилизация по тангажу, град	± 5	$-8...+6$	$-7...+5$	$\pm 8,4$
Стабилизация по курсу, град	± 30	± 30	± 30	± 25

На белорусском оптико-механическом объединении изготавливается гиросtabilизирующая установка ГУТ-3, которая может использоваться для стабилизации оптических осей аэрофотоаппаратов ТАФА-10М, ТАФА-20, АФА-41, АФА-42 относительно геодезической вертикали [82].

2.3.7. Система управления полетом и съемкой

Все современные фото- и цифровые аэрокамеры работают полностью в автоматическом режиме под руководством компьютерной системы управления полетом, которая получает информацию от бортовых систем самолета о курсе, скорости, высоте полета, угле сноса, освещенности и т. п. На основе этих сведений выполняется выбор оптимальных режимов работы аэрофотоаппарата и корректировка его пространственного положения. Такие системы выпускают, как правило, все фирмы-производители аэросъемочного оборудования.

Система управления полетом и съемкой включает следующие компоненты: терминал оператора, интерфейс пилота, управляющий модуль, систему непрерывного геопозиционирования, программное обеспечение. Интерфейсы оператора и пилота выполнены в виде дисплеев, на которых отображается текущая информация о положении летательного средства и другая информация о взаимодействии всех компонентов системы.

Управляющий модуль представляет собой компьютер со специализированным программным обеспечением, который объединяет все компоненты системы, устанавливает обратную связь между ними, позволяет выполнять планирование съемки и навигацию во время полета. В его функции входят управление работой аэрокамеры, сканера или лидара, гиросtabilизирующей платформы с целью обеспечения необходимого перекрытия снимков, компенсации угла сноса и смаза изображения, регистрации координат местоположения аэрофотоаппарата и элементов внешнего ориентирования.

В настоящее время задача геопозиционирования данных съемки с воздушных летательных аппаратов в нашей стране решается с использованием традиционных фотограмметрических методов (А. Н. Лобанов, 1987). Однако в развитых западных странах для этой цели сегодня широко применяются системы непрерывного геопозиционирования (рис. 2.16).

Система непрерывного геопозиционирования, или GPS/IMU-система, является одним из последних усовершенствований аэросъемочного оборудования [43, 44]. Она основана на взаимодействии двух фактически полностью автономных составляющих – системы глобального позиционирования (GPS) и инерциальной

системы (IMU – Inertial Measurement Unit). Различные камеры, сканеры, лидары и гиролатформы имеют интерфейсы для подключения различных типов GPS/IMU-систем, выпускаемых компаниями Applanix (POS AV), Leica Geosystems (IPAS), IGI mbH (AEROcontrol) и другими, что обеспечивает возможность их совместного использования.

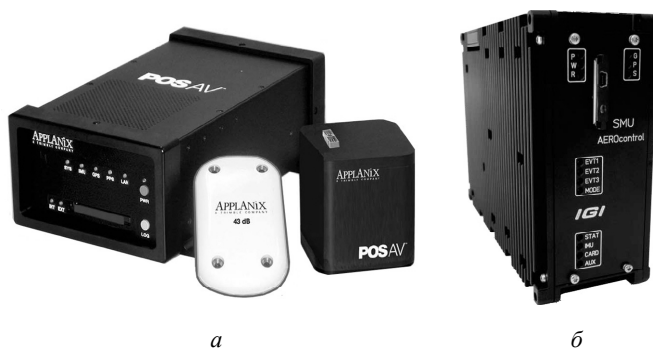


Рис. 2.16. GPS/IMU-системы непрерывного геопозиционирования:
а – POS AV (Applanix); б – AEROcontrol (IGI mbH)

Система глобального позиционирования включает GPS-приемник с антенной и обеспечивает точное определение пространственных координат местоположения съемочной камеры (центра проекции) для каждого снимка.

Инерциальная система содержит блок гироскопов и блок акселерометров, позволяющих измерять с точной временной привязкой угловые скорости, ускорения и вычислять приращения координат, что, в конечном счете, позволяет определить углы наклона оптической оси съемочной камеры. Регистрация в полете элементов внешнего ориентирования каждого снимка значительно снижает затраты, упрощает фотограмметрические работы, позволяя избежать трудоемких полевых измерений координат опорных точек. В процессе съемки GPS- и IMU-устройства работают полностью автономно, а синхронизация между ними осуществляется по времени. Основные технические характеристики некоторых GPS/IMU-комплексов представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Основные технические характеристики GPS/IMU-комплексов

Показатели	AEROcontrol (IGI mbH)			POS AV 610 (Applanix)			
	I	II	III	C/A GPS	DGPS	RTK	PP
Положение, м	0,05	0,05	0,05	4,0–6,0	0,5–2,0	0,1–0,3	0,05–0,3
Скорость, м/с	0,005	0,005	0,005	0,030	0,020	0,010	0,005
Крен/тангаж, град	0,008	0,004	0,003	0,005	0,005	0,005	0,0025
Курс, град	0,015	0,010	0,007	0,030	0,030	0,020	0,005

В настоящее время в инерциальных системах применяются кольцевые лазерные и волоконно-оптические гироскопы, которые отличаются от механических высокой точностью и надежностью за счет отсутствия движущихся частей. Такие гироскопы, например, применяются в авиационных интегральных навигационных комплексах POS AV производства канадской компании Applanix и системах AEROcontrol германской компании IGI mbH. Использование современных GPS/IMU-комплексов позволяет обеспечить точность геопозиционирования цифровых аэроснимков на уровне одного пикселя для камер самого высокого разрешения, таких как UltraCam, DMC, ADS40. Неотъемлемым компонентом GPS/IMU-комплексов является программное обеспечение для постобработки данных, полученных от различных компонентов системы во время полета и ректификации снимков.

2.3.8. Фотоматериалы. Сенситометрические характеристики фотоматериалов

Для проведения аэрофотосъемки и получения аэрофотоснимков используются фотопленка и фотобумага. Применяются три типа фотопленок: черно-белые, цветные спектрзональные для цветовоспроизведения в условных (ложных) цветах и цветные для натурального воспроизведения цветов, при этом могут использоваться как негативные, так и позитивные фотопленки (диапозитивы).

Фотопленка состоит из прозрачной основы (подложки), выполненной из малодеформирующегося материала (триацетатных или лавсановых пленок), на которую нанесен один или несколько слоев эмульсии. Эмульсионные слои представляют собой взвесь чувствительных к свету кристаллов – зерен солей бромистого, хлористого или йодистого серебра в желатине. Серебро под воздействием света

высвобождается, что приводит к потемнению эмульсионного слоя, степень которого зависит от интенсивности и времени воздействия света.

Аэрофотопленки имеют ширину 19, 24 или 32 см, а длину от 9 до 150 м для нормальной толщины и до 210 м для очень тонких пленок [87]. Пленки различаются количеством и спектральной чувствительностью эмульсионных слоев. У черно-белых пленок, как правило, один светочувствительный слой. Цветные негативные пленки с натуральной цветопередачей состоят из трех светочувствительных слоев: верхнего – несенсибилизированного, чувствительного в синей зоне спектра; среднего – ортохроматического, чувствительного в зеленой зоне; нижнего – панхроматического, чувствительного в красной. Между первым и вторым слоями размещен желтый фильтрующий слой для исключения влияния фиолетовых, синих и голубых лучей на нижележащие слои. С обратной стороны подложки нанесен противоореольный зеленый слой. После проявления слои приобретают окраску: верхний – желтую, средний – пурпурную, нижний – голубую. Натуральные цвета формируются при позитивной печати с негатива на цветную фотобумагу или диапозитивную пленку.

Цветные аэрофотопленки с натуральным воспроизведением цветов применяются осенью или ранней весной, когда естественная окраска крон хвойных и лиственных древесных видов имеет максимальные различия. В летний период информативность снимков на цветных пленках низкая.

Спектрзональные пленки могут быть двухслойные и трехслойные. Для съемки лесов обычно используются пленки, имеющие два светочувствительных слоя: инфрахроматический – чувствительный к синим и инфракрасным лучам, с зоной светочувствительности 670–800 нм и панхроматический – с зоной спектральной светочувствительности 510–670 нм. Отраженные объектами ИК лучи воздействуют на инфрахроматический слой и дают на пленке сине-зеленый цвет (после печати пурпурный или оранжевый), отраженные лучи видимой зоны воздействуют на панхроматический слой, в результате чего формируется пурпурное или оранжевое изображение (после печати зеленое или сине-зеленое). Хотя на спектрзональных снимках цветопередача искажена и объекты изображаются в условных

(ложных) цветах, они позволяют значительно усилить цветовой контраст между объектами, так как различия в спектральной яркости объектов в инфракрасной зоне значительно выше.

Для изготовления аэрофотоснимков (отпечатков) применяют фотобумагу, отличающуюся от фотопленок тем, что светочувствительные и фильтрующие слои наносятся на бумажную основу. Поверхность фотобумаги может быть глянцевая, полуматовая и матовая. Фотобумага, как и фотопленка, имеет различную чувствительность, контрастность, зернистость, разрешающую способность и т. д.

В последние годы для аэрофотосъемки широко применяются аэрофотопленка и фотобумага фирмы Kodak, для которых процессы обработки практически полностью автоматизированы. Используются панхроматические с расширенным красным диапазоном (Double-X Aerographic 2405, Aerocon 3409), цветные (Aerocolor III 2444, Kodak Aerochrome III MS 2427) и спектрзональные (Aerochrome III Infrared 1443) негативные фотопленки. Отснятые аэрофотопленки проявляются в автоматизированных фотолабораториях в специальных проявочных машинах (например, Kodak Versamat Film Processor).

Сенситометрические характеристики определяют способность фотоэмульсионного слоя фотоматериалов реагировать на световой поток (электромагнитное излучение). Рассмотрим некоторые понятия, которые будут использоваться далее:

– *освещенность* (E) – отношение светового потока к площади, измеряется в люксах;

– *выдержка* (t) – время, в течение которого фотоэмульсионный слой подвергается воздействию света, измеряется в секундах;

– *экспозиция* ($H = Et$) – количество световой энергии, поступающей на светочувствительный слой, определяется как произведение освещенности на время экспозиции;

– *оптическая плотность* (D) – мера фотографического почернения светочувствительного слоя.

Основными характеристиками фотоматериалов являются светочувствительность, спектральная светочувствительность (цветочувствительность), зернистость, разрешающая способность, контрастность, фотографическая широта, вуаль и др. Они определяются по данным сенситометрических испытаний, сущность которых заключается

в том, что фотоматериал, помещенный в сенситометр, освещается (экспонируется) через ступенчатый оптический клин, имеющий различную оптическую плотность [63]. После фотолабораторной обработки экспонированный таким образом фотоматериал, имеющий участки различной оптической плотности, помещается в денситометр, где измеряется оптическая плотность каждого участка. Результаты измерений наносят на график в виде линии, называемой характеристической кривой, отражающей зависимость $D = f(\lg H)$, по которой определяется общая и спектральная светочувствительность, коэффициент контрастности, фотографическая ширина и величина вуали фотоматериала.

Светочувствительностью фотоматериала (S) называют способность фотографического слоя создавать большую или меньшую оптическую плотность при одинаковой экспозиции. Численно светочувствительность выражается величиной, обратно пропорциональной экспозиции H , создающей на фотографическом материале после химической обработки заданную оптическую плотность D . Для аэрофотопленок светочувствительность определяется по экспозиции, которая создает почернение, превышающее плотность вуали на величину, равную 0,85.

Спектральная светочувствительность, или цветочувствительность, определяет способность фотоэмульсионного слоя реагировать на электромагнитное излучение того или иного спектрального диапазона и способность передавать цвета различной степени почернения. Галоидные соли серебра обладают максимальной чувствительностью к лучам фиолетовой части спектра, в синей части она снижается и полностью исчезает в зеленой части спектра. Глаз человека обладает повышенной чувствительностью к лучам желто-зеленой части спектра, поэтому фотоизображение многоцветного объекта на обыкновенной (несенсибилизированной) фотоэмульсии будет значительно отличаться от привычного для восприятия человека.

Для расширения и корректировки спектральной чувствительности эмульсионных слоев в них или промежуточные слои-фильтры вводятся красители (сенсибилизаторы). По спектральной чувствительности эмульсионные слои (как и черно-белые пленки) бывают [22, 63]:

несенсибилизированные – чувствительные к фиолетовым, синим и голубым лучам в диапазоне 390–505 нм;

ортохроматические – чувствительные к зеленым и желтым лучам (<585 нм) с некоторым понижением чувствительности в диапазоне голубых и зеленых лучей (500–525 нм);

изоортохроматические – чувствительные к зеленым и желтым лучам, без понижения чувствительности в зоне голубых и зеленых лучей;

панхроматические – чувствительные во всем видимом диапазоне области спектра (400–730 нм) с понижением чувствительности в зоне зеленых лучей (500–550 нм);

изопанхроматические – схожи с панхроматическими, но без понижения чувствительности в зоне зеленых лучей;

инфрахроматические – чувствительные в зоне синих лучей видимого и инфракрасном диапазонах (>750 нм);

панинфрахроматические – чувствительные в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах.

Зернистость фотоматериалов определяется размером светочувствительных кристаллов галоидного серебра. Фотографическое изображение, кажущееся непрерывным, на самом деле состоит из множества отдельных точек – зерен, число которых на 1 мм поверхности колеблется от 0,5 до 5 млн и более, а размер – от 0,1 до 8 мкм, иногда достигая 35 мкм.

Разрешающая способность зависит от зернистости фотографической эмульсии и определяется количеством раздельно изображенных линий на один миллиметр снимка с помощью специального тестового изображения – миры. Штриховая мира состоит из нескольких секторов с различным числом штрихов белого и черного цветов, приходящихся на один миллиметр. Суммарная разрешающая способность (R) изображения связана с разрешающей способностью объектива ($R_{об}$) и фотоэмульсии (R_3) зависимостью $1/R = 1/R_{об} + 1/R_3$. Пленки, применяемые для аэрофотосъемки лесов, имеют разрешающую способность 60–250 лин./мм.

Контрастность – способность эмульсии передавать различия в яркости отдельных объектов или их частей. Численно она определяется коэффициентом контрастности, который находится как тангенс угла наклона между прямолинейным участком характеристической

кривой и осью абсцисс. По степени контрастности материалы подразделяются на мягкие с контрастом 1,0 и ниже, нормальные – от 1,1 до 1,4, контрастные – от 1,5 до 1,9, особо контрастные – выше 2,0.

Фотографическая широта фотоэмульсии характеризует ее способность воспроизводить различную яркость фотографируемых объектов или их частей и определяется диапазоном экспозиций, при которых еще различимы изменения яркости объектов. Чем больше фотографическая широта фотоэмульсии, тем меньше ошибки экспозиции влияют на качество фотоизображения.

Вуаль – это показатель оптической плотности неэкспонированного фотоматериала. Она минимальна у новых материалов и увеличивается при длительном хранении. Для фотопленок величина вуали должна находиться в пределах 0,2–0,3.

2.3.9. Цифровые камеры для аэрофотосъемки

Сегодня цифровые аэросъемочные системы находят все более широкое применение, так как позволяют практически в автоматизированном режиме выполнять основной комплекс фотограмметрических работ – от получения одиночного снимка до создания ортопланов и автоматического дешифрирования. Конструктивно цифровая камера несколько напоминает аэрофотоаппарат, в котором в качестве регистрирующего излучение элемента используется не фотопленка, а матричный или линейный сенсор. Основными преимуществами использования цифровых аэрокамер являются оперативность выполнения работ за счет исключения процесса проявления и сканирования пленки, высокое радиометрическое разрешение, снижение затрат на расходные материалы, возможность съемки не только в видимом, но и в ближнем инфракрасном диапазоне, цифровые методы улучшения качества снимков и т. д.

Впервые полноформатные цифровые камеры для аэросъемки были представлены на XIX Международном фотограмметрическом конгрессе в Амстердаме в 2000 г. Сейчас существует множество различных съемочных систем, выпускаемых разными фирмами, ведущими из которых являются Zeiss/Intergraph Imaging (Германия/США), Leica Geosystems (Швейцария/США), Microsoft/Vexcel Imaging GmbH (Австрия/США), IGI mbH (Германия), VisionMap Ltd.

(Израиль), Jena-Optronik GmbH (Германия) и др. Существующие системы различаются по конструкции съемочных камер, методам формирования изображения, точности, уровню автоматизации производственных процессов и программному обеспечению [88, 1, 27, 47, 54, 56, 57, 49].

В настоящее время при производстве крупномасштабных карт наиболее распространена комбинированная технология, при которой съемка проводится на фото пленку с последующим сканированием и обработкой цифровых снимков, поэтому проанализируем в качестве «эталона» снимок, сделанный широко применяемой в Беларуси аналоговой аэрофотокамерой Leica RC-30 с размером кадра 230×230 мм, поскольку старые советские камеры формата 180×180 мм морально устарели и уже не используются. При сканировании негатива с разрешением в 16 мкм получается цифровое изображение размером $14\,375 \times 14\,375$ пикселей, что составляет более 200 мегапикселей.

В зависимости от размера цифровой матрицы аэрокамеры по существующей классификации подразделяются на *среднеформатные*, с размером матрицы 60–100 мегапикселей, и *крупноформатные*, с размером матрицы более 200 мегапикселей. Как правило, среднеформатные камеры выполнены на базе одной матрицы, крупноформатные – нескольких матриц или линейного сенсора.

Конструктивно, по принципу формирования изображения, цифровые камеры разделяются на *кадровые* и *сканирующие*. Крупноформатные камеры DMC фирмы Z/I Imaging и UltraCam фирмы Vexcel Imaging являются кадровыми и построены на матричных светочувствительных датчиках. Точность, получаемая этими камерами, практически одинакова и составляет порядка 2 мкм.

Прототип первой цифровой камеры DMC был представлен в 2000 г., хотя серийное производство началось лишь в 2003 г. В ней панхроматическое изображение кадра размером $13\,824 \times 7\,680$ пикселей формировалось на четырех монохромных матрицах 7000×4000 пикселей, наклоненных таким образом, чтобы обеспечить перекрытие снимаемых участков (рис. 2.17).

Дополнительно съемка участка выполнялась четырьмя матрицами более низкого разрешения (3000×2000 пикселей), оснащенных светофильтрами: синим, зеленым, красным и инфракрасным, в результате

чего получалось цветное (мульти-спектральное) изображение. При совмещении цветного изображения низкого разрешения и монохромного высокого формировалось синтезированное цветное изображение размером $13\,824 \times 7\,680$ пикселей.

Значительный прорыв в области производства цифровых аэро-съемочных камер произошел после разработки в 2006 г. канадской фирмой DALSA Semiconductor сверх-больших матриц размером более 100 мегапикселей. На их основе в 2009 г. фирма Z/I Imaging начала производство новой спектрозональной камеры RMK D с размером результирующего кадра $11\,200 \times 12\,096$ пикселей, в которой панхроматическое изображение формировалось на одной матрице, а в 2010–2011 гг. были выпущены мультиспектральные цифровые камеры DMC II 140 с размером CCD-матрицы панхроматического канала 88×82 мм, $12\,096 \times 11\,200$ (135 мегапикселей), DMC II 230 с размером матрицы 88×80 мм, $15\,552 \times 14\,144$ (220 мегапикселей) и DMC II 250 (рис. 2.18) с CCD-матрицей 96×82 мм, $14\,656 \times 17\,216$ (250 мегапикселей) [88].

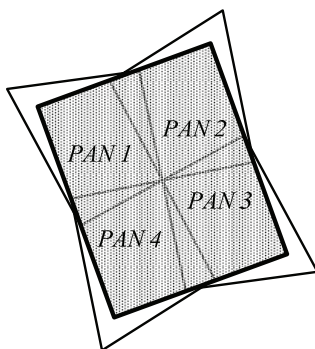


Рис. 2.17. Структура составного кадра цифровой камеры DMC

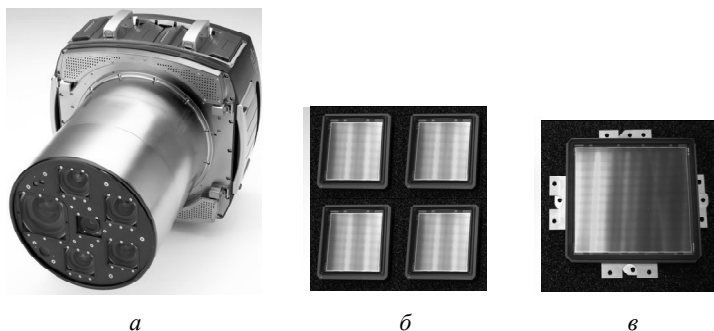


Рис. 2.18. Цифровая камера DMC II 250 (а), CCD-матрицы, используемые для получения мультиспектрального (б) и панхроматического (в) изображений

Физический размер одного пикселя камеры DMC II 140 составил 7,2 мкм, а камер DMC II 230 и DMC II 250 – 5,6 мкм. Для получения цветного изображения данные камеры, как и их предшественницы, оснащены четырьмя монохроматическими CCD-матрицами с фильтрами размером 44×44 мм, 6096×6846 пикселей (42 мегапикселя), с физическим размером 7,2 мкм. Применение новых сверхкрупноформатных матриц позволило достичь разрешения снимка, соизмеримого с пленочным 70 и 90 лин./мм, соответственно, упростить конструкцию камер, процесс калибровки и значительно повысить фотограмметрическое качество снимков.

Цифровая камера UltraCamX фирмы Microsoft/Vexcel Imaging GmbH оснащена восемью объективами, а панхроматический снимок высокого разрешения «сшивается» из изображений девяти матриц (рис. 2.19).

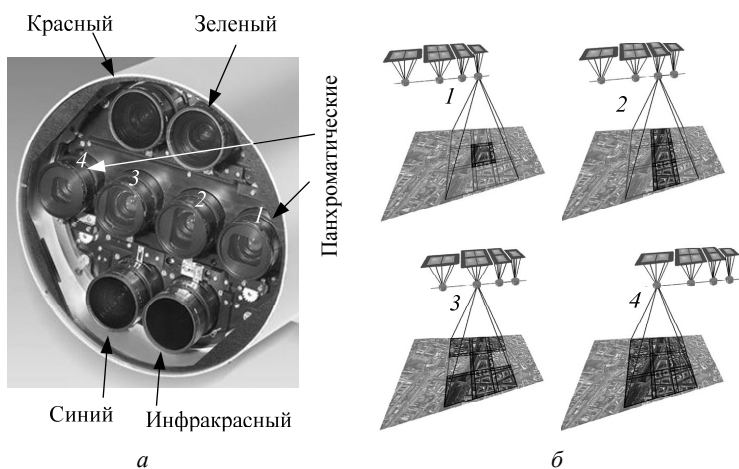


Рис. 2.19. Система объективов камеры UltraCamX (а) и последовательность формирования составного панхроматического кадра (б) в цифровой камере UltraCamX

Изображения, из которых собирается снимок, получены разными объективами, расположенными вдоль одной линии, а съемка синхронизируется таким образом, что центры проекций этих изображений (положение объективов во время съемки) совпадают.

Цветное изображение низкого разрешения, как и в ДМС, получается при помощи четырех дополнительных матриц со светофильтрами. В итоге формируется цветной кадр размером $11\,310 \times 17\,310$ (196 мегапикселей).

Цифровые камеры ADS40, ADS80 фирмы Leica Geosystems, 3-DAS (НПП «Геосистема», Украина и Wehrli and Associates, США) относятся к сканирующим. В них для получения изображения применяется светочувствительный линейный

сенсор, дающий изображение узкой полосы местности поперек направления полета, который, перемещаясь вместе с самолетом, формирует непрерывное изображение произвольной длины. Для создания стереоскопического изображения в ADS40 и ADS80 используются три независимых линейных сенсора с объективами (рис. 2.20).

Один из них наклонен вперед, сканируя местность спереди по ходу движения самолета, другой установлен вертикально и производит сканирование под самолетом, третий наклонен назад и сканирует местность сзади. Таким образом, каждая точка местности в процессе движения оказывается снятой три раза.

Фирма VisionMap при создании камеры АЗ использовала несколько иной принцип формирования кадра крупного формата. Аэрокамера АЗ состоит из станины, двух спаренных метрических длиннофокусных объективов (300 мм), каждый из которых оснащен CCD-матрицей 4006×2666 пикселей, оси вращения и мотора для управления угловым движением объективов (рис. 2.21).

Камера АЗ устанавливается на самолете таким образом, чтобы ось поворота объективов была параллельна оси фюзеляжа. Объективы синхронно поворачиваются поперек линии полета. Максимальный угол отклонения оптических осей объективов от линии надира составляет 52° . Тем самым суммарный угол поля зрения аэрокамеры достигает 104° в направлении, перпендикулярном линии полета.

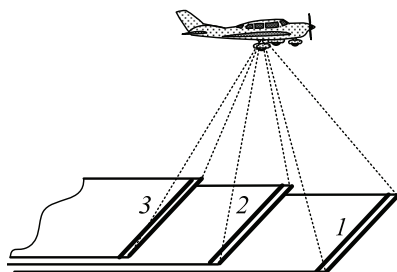


Рис. 2.20. Схема съемки сканирующей цифровой камеры ADS80 (Leica Geosystems):

- 1 – сканирование вперед;
- 2 – сканирование вертикально;
- 3 – сканирование назад

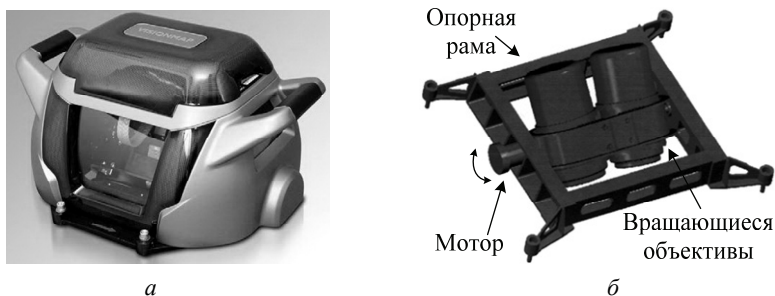


Рис. 2.21. Внешний вид (а) и конструкция вращающихся объективов (б) камеры АЗ

Суммарный угол поля зрения двух объективов вдоль линии полета равен 13° . Во время одного углового поворота каждый объектив в общем случае снимает 27 кадров. Таким образом, за один угловой поворот двух объективов получается 54 снимка (рис. 2.22) [56, 57].

Фотографирование происходит в автоматическом режиме без остановки объективов. Для учета и компенсации углового сдвига изображения используется зеркальная оптическая система. После окончания полного углового поворота система объективов возвращается в исходное состояние для фотографирования следующего ряда снимков.

Между кадровыми и сканирующими камерами существует ряд принципиальных отличий, которые практически не зависят от конкретной модели и производителя. Снимок, сделанный кадровой камерой, имеет центральную проекцию и не отличается от оциф-



Рис. 2.22. Схема формирования изображения камерой АЗ

рованного аналогового снимка, поэтому для его обработки можно применять практически любое существующее программное обеспечение, поддерживающее нужный графический формат. Некоторыми особенностями снимков, полученных кадровыми цифровыми камерами, являются отсутствие этапа внутреннего ориентирования и прямоугольный кадр.

Сканирующие камеры дают на выходе изображение, которое является центральной проекцией только поперек направления полета. Вдоль линии полета изображение имеет плановую проекцию, поэтому для фотограмметрической обработки требуется специальное программное обеспечение. В то же время процесс триангуляции значительно упрощается, так как маршрут записывается в виде единого снимка и с учетом плановой проекции вдоль направления полета.

Для кадровых камер стереоскопическое покрытие вдоль маршрута образуется за счет продольного перекрытия снимков, таким образом, при продольном перекрытии 60% получается сплошное двойное и частичное тройное перекрытие. Сканирующие камеры обеспечивают сплошное тройное перекрытие снимков, которое позволяет повысить степень автоматизации и точности при создании цифровых моделей рельефа (ЦМР). Кадровые системы формируют цветной снимок, синтезируя мультиспектральные изображения низкого разрешения с монохромным изображением высокого разрешения (технология pan-sharpening), в то время как сканирующие создают цветное изображение с максимальным разрешением.

Геометрическая точность изображений, получаемых кадровыми и сканирующими камерами, гарантируется технологическим процессом производства матричных и линейных CCD-сенсоров, обеспечивающим микронную точность их изготовления и тем самым жесткую геометрическую связь между элементами изображения. Технологии изготовления объективов с малой дисторсией и развитый математический аппарат учета поправок за дисторсию позволяют достигнуть внутренней точности изображения кадровой камеры не хуже ± 2 мкм.

Достижение необходимой точности в сканирующих камерах является значительно более сложной задачей. Геометрия снимков, полученных сканированием, достаточно своеобразна, так как, в отличие от спутников, имеющих стабильную траекторию полета, наклон корпуса самолета в полете непредсказуем и углы наклона оптической оси у каждой линии сканирования разные (рис. 2.23), поэтому чтобы сформировать единый снимок, необходимо знать элементы внешнего ориентирования для каждой линии сканирования.

Если в кадровых камерах проблема определения элементов внешнего ориентирования блока снимков, количество которых может исчисляться 1–2 тысячами, решается методом фототриангуляции,

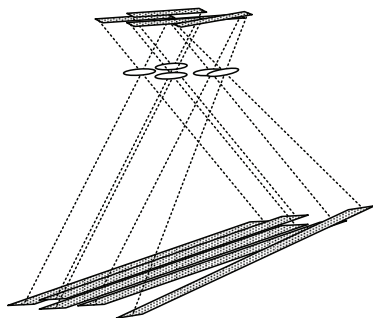


Рис. 2.23. Расположение линий сканирования в процессе съемки

то определить подобным образом элементы ориентирования для каждой из миллионов строк сканерного изображения не представляется возможным. Поэтому обязательным компонентом при их использовании для метрических целей является интегрированная система, включающая систему определения пространственных координат в режиме реального времени (GPS) и инерциальную систему (IMU). Синхронизация

снимков сканирующей камеры с данными GPS/IMU-системы и их последующая совместная обработка позволяют воссоздать точную траекторию полета самолета (координаты центров проекций), а также определить абсолютные углы наклона оптической оси объектива в любой момент времени и тем самым получить готовые элементы внешнего ориентирования для каждой снятой строки изображения. Эти данные затем используются для *ректификации* – коррекции исходных изображений путем внесения поправок на элементы внешнего ориентирования для создания геометрически точного изображения (рис. 1), выполняющейся с помощью специализированного программного обеспечения, поставляемого со съемочной камерой [76].

Сравнительный анализ кадровых и сканирующих камер показывает, что для создания крупномасштабных ортофотопланов масштаба 1:1000–1:500, когда необходима точность определения координат 0,1 м и выше, целесообразно использовать кадровые камеры, которые при соответствующем масштабе съемки могут обеспечить точность до 0,05 м. В сканирующей камере подобная точность недостижима из-за невозможности применения системы компенсации сдвига.

Камеры со сканирующей системой получения изображения наиболее эффективны, когда требуется точность 0,15–0,60 м. Эти камеры можно использовать для создания ортофотопланов масштаба менее 1:2000 и в качестве более дешевой альтернативы по сравнению с данными космической съемки. Основные характеристики некоторых камер, применяемых при аэросъемке, приведены в табл. 2.5, 2.6.

Таблица 2.5
Основные технические характеристики некоторых моделей крупноформатных цифровых аэрокамер

Название модели (тип камеры)	DMC II 250 (кадровая)	UltraCamXp; UltraCamXp Wide Angle (кадровая)	A3, A3-CIR (покадрово- сканирующая)	ADS80 (сканер)	Jena Airborne Scanner (JAS 150s) (сканер)
Фирма-производитель	Z/I Imaging (Германия)	Microsoft / Vexcel Imaging GmbH (США)	VisionMap Ltd. (Израиль)	Leica Geosystems AG (Швейцария)	Jena-Optronik GmbH (Германия)
Начало производства, г.	2010	2008, 2009	2007, 2010	2008	2007
Число объективов (спек- тральные диапазоны)	5	8	2	1	1
Фокусное расстояние, мм	(PAN, R, G, B, NIR) PAN – 112, MS – 45	(PAN, R, G, B, NIR) PAN – 100 (70 w/a), MS – 33 (23 w/a)	(PAN, R, G, B, NIR) 300	(PAN, R, G, B, NIR) 62,5	(PAN, R, G, B, NIR) 150
Число CCD-сенсоров	5	13	2	8–12	9
Число фрагментов кадра	1	9	До 33	Непрерывная съемка	
Размер пикселя, мкм	PAN – 5,6, R, G, B, NIR – 7,2	6	9	6,5	6,5
Число пикселей резуль- тирующего кадра	14 656×17 216	11 310×17 310 – PAN	7 850×94 500 (макс.)	12 000×количество линий в маршруте	
Радиометрическое раз- решение, бит/пиксель	14	12	12	14	12
Геометрия результиру- ющего изображения	Центральная проекция	Центральная проекция	Центральная проекция отдельных частей	Центральная проекция каждой линии изображения	
Емкость накопителя, Тб	1,5	4,2	1	0,8	1,1 или 2,3
Пространственное раз- решение (GSD), см	2,5	1,8 (4,3 w/a)	1	3	15 на высоте 3000 м
Формат изображения	TIFF, JPEG2000	CIR, JPEG, TIFF	JPEG2000, TIFF	TIFF	TIFF
Сайт компании	www.intergraph.com	www.ultracamx.com	www.visionmap.com	www.leica- geosystems.com	www.jenoptik.com

Таблица 2.6
Основные технические характеристики некоторых моделей среднеформатных цифровых аэрокамер

Название модели (тип камеры)	DigiCAM-H60 (кадровая)	RMK-DX (кадровая)	RCD30 (кадровая)	UltraCamLp (кадровая)	DiMAC ULTRALIGHT+
Фирма-производитель	IGI mbH (Германия)	Intergraph/Z/I Imaging (США)	Leica Geosystems AG (Швейцария)	Microsoft/Vexcel Imaging GmbH (США)	DiMAC (Бельгия)
Начало производства, г.	2009	2010	2010	2009	2009
Число объективов (спектральные диапазоны)	1 (R, G, B, NIR)	5 (PAN, R, G, B, NIR)	1 (R, G, B, NIR)	4 (PAN, R, G, B, NIR)	1 (R, G, B NIR)
Число CCD-сенсоров	1	PAN – 1, MS – 4	1	PAN – 2, RGB – 1, NIR – 1	1
Число фрагментов кадра	1	1	1	2	1
Размер пикселя, мкм	6	7,2	6	6	6
Число пикселей результирующего кадра	8 956×6 708	PAN – 11 200×12 096, MS – 6 800×6 096	8 956×6 708	7 920×11 704	8 984×6 732
Фокусное расстояние, мм	28, 35, 50, 80, 100, 150, 210, 300	PAN – 92; MS – 45	50, 80	70	70, 120, 210
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	16	14	14	12	8 или 16
Компенсация сдвига	Нет	Есть			
Геометрия снимка	Центральная проекция				
Емкость накопителя, Тб	0,25	1,5	0,5 или 1	1	0,5
Формат изображения	TIFF, JPEG, DNG	TIFF, JPEG	TIFF, JPEG	TIFF, JPEG	TIFF, JPEG
Сайт компании	www.igi-systems.com	www.inter-graph.com	www.leica-geosystems.com	www.ultracamx.com	www.dimac-systems.com

2.3.10. Микроволновая и радиолокационная съемки

Микроволновое, или сверхвысокочастотное (СВЧ), излучение в той или иной степени испускают все объекты, поэтому съемка в микроволновом диапазоне может проводиться в пассивной и активной формах. Это излучение называют радиояркой температурой, что сближает технологию радиометрической съемки с тепловой, а пассивную съемку – *микроволновой* или *радиометрической* (радиотепловой).

Пассивная микроволновая съемка осуществляется с помощью микроволновых радиометров и основана на регистрации интенсивности микроволнового излучения, испускаемого различными объектами. Основными параметрами радиометра являются температурная чувствительность, пространственное разрешение и ширина полосы обзора. Так как объекты обладают различной способностью излучать микроволны (например, излучение металлов минимально, излучение растительности и сухой почвы определяется коэффициентом 0,9, воды – 0,3 и т. д.), на радиометрическом снимке они изображаются по-разному. Это свойство позволяет разделять объекты с различной излучающей способностью (почвы в зависимости от влажности, воды – от концентрации солей), выявлять объекты с неодинаковой кристаллической структурой, фиксировать разную степень промерзания грунтов. Механизм получения радиометрических снимков основан на отображении радиотеплового излучения в видимом диапазоне.

Микроволновый датчик (антенна) обнаруживает естественно испускаемое микроволновое излучение в пределах его поля зрения, а так как энергия излучения очень мала, чтобы выполнить его регистрацию, поле зрения приемной антенны должно быть достаточно большим. По этой причине пассивная микроволновая съемка имеет очень низкое пространственное разрешение и используется достаточно редко.

В настоящее время все более широкое применение находят данные активной *радиолокационной* (РЛС), или *радарной* (от англ. Radio Detection and Ranging), съемки, которая используется для решения самых различных задач – от классификации изображений до построения точных цифровых моделей рельефа (ЦМР). Это объясняется рядом тенденций развития технологий в области РЛС:

- улучшение пространственного разрешения и, как следствие, точности радиолокационных данных;
- уменьшение временного периода между повторными съемками;
- возможность интерферометрической и многополяризационной съемок;
- использование данных, полученных в различных радиодиапазонах разнообразными радиолокационными системами;
- запуск тандемных систем для проведения единовременной интерферометрической съемки [87, 2, 49, 51, 52].

Особенностью и значительным преимуществом радарной съемки является тот факт, что радиосигнал способен проникать через облачность, дождевые капли, пыль, дым. Эта способность определяется длиной волны и размерами находящихся в воздухе частиц. Так как РЛС не нуждается во внешних источниках излучения, она может проводиться независимо от времени суток и года, погодных условий.

Общая схема активной радиолокации состоит в следующем [2]. На носителе, самолете или спутнике, устанавливается радиолокатор (приемник-передатчик с антенной), испускающий узкий луч электромагнитных импульсов на объект (около 1500 импульсов в секунду). Радиолокатор перемещается вместе с носителем, а сканирование поверхности выполняется поперек движения самолета или спутника, поэтому такого рода устройства называют радиолокационными станциями бокового обзора (РЛСБО). Часть импульсов отражается от объекта. В паузах между импульсами производится прием отраженных сигналов. Когда импульс отражается от объекта, расположенного на расстоянии L от носителя, то отраженный сигнал вернется назад через интервал времени $T = 2L / C$, где C – скорость света. Измеряя время прохождения излучения, можно найти расстояние до объекта. Таким образом, средствами радиолокации осуществляется сканирование местности и определение расстояния до объектов, так как отраженные от разных объектов сигналы приходят в разное время. Интенсивность и поляризация принятых сигналов зависит от дальности, размеров и физических свойств объектов.

Высокое разрешение радиолокационных снимков удалось получить путем искусственного увеличения апертуры бортовой антенны, основной принцип которого заключается в когерентном накоплении отраженных радиолокационных сигналов. Такая технология называется

радиолокацией с синтезированной апертурой (РСА), или англ. Synthetic-aperture radar (SAR). Радиолокатор с синтезированной апертурой фиксирует амплитуду и фазу отраженного сигнала.

В настоящее время существуют три основных режима съемки земной поверхности (рис. 2.24): *сканирующий* или *обзорный* (ScanSAR), *полосный* (StripMap) и *детальный* (SpotLight).

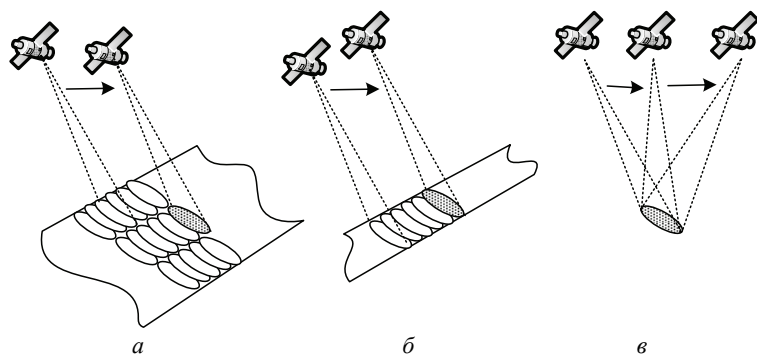


Рис. 2.24. Режимы радиолокационной съемки:
а – сканирующий; б – полосный; в – детальный

В сканирующем режиме съемка ведется на всей площади обзора полосами, равными ширине полосы захвата радара. Данный режим используется только в РЛС космического базирования.

В полосном режиме съемка земной поверхности осуществляется непрерывно в полосе захвата, при этом выделяют боковой и переднебоковой режим (в зависимости от ориентации главного лепестка диаграммы направленности антенны).

При съемке в детальном режиме накопление сигнала осуществляется на увеличенном по сравнению с обзорным и полосным режимами интервале, что позволяет достичь более высокого пространственного разрешения. Увеличение интервала осуществляется за счет синхронного с движением носителя РЛС перемещения главного лепестка диаграммы направленности антенны таким образом, чтобы облучаемый участок постоянно находился в зоне съемки. Накопление сигнала осуществляется в течение времени, равного расчетному интервалу синтеза апертуры антенны для данных

условий полета носителя РЛС. Современные системы позволяют получать снимки земной поверхности и расположенных на ней объектов с разрешениями порядка 16 м для сканирующего, 3 м для полосного и 1 м для детального режимов.

Радиолокационное зондирование Земли проводится в ультракоротковолновом (микроволновом) радиодиапазоне при длинах волн от 1 мм до 1 м, на частотах от 300 до 0,3 ГГц соответственно (табл. 2.7), поэтому радиолокационную съемку иногда называют микроволновой.

Таблица 2.7

Диапазоны, используемые при радиолокационной съемке

Диапазон	Длина волны, см	Частота, ГГц
<i>Ka</i>	0,8–1,1	40,0–26,5
<i>K</i>	1,1–1,7	26,5–18,0
<i>Ku</i>	1,7–2,4	18,0–12,5
<i>X</i>	2,4–3,8	12,5–8,0
<i>C</i>	3,8–7,5	8,0–4,0
<i>S</i>	7,5–15,0	4,0–2,0
<i>L</i>	15,0–30,0	2,0–1,0
<i>P</i>	30,0–100,0	1,0–0,3

Диапазоны *Ka*, *K* и *Ku* применялись на более ранних этапах развития для воздушных радиолокационных систем. Диапазоны *X*, *C* и *L* используются для радиолокации как с воздушных летательных аппаратов, так и из космоса, а *S* и *P* – для зондирования с космических аппаратов (КА).

Длина волны существенно влияет на амплитуду отраженного радиолокационного сигнала, а также на тип рассеивания подстилающей поверхностью. Радиолокация в диапазонах *P* (30–100 см) и *L* (15–30 см) обеспечивает сильные отраженные сигналы от более крупных объектов земной поверхности, а также частичное проникновение радиоволн сквозь снежный и растительный покровы и, при определенных условиях, через песок и почву (рис. 2.25). Использование более коротких волн в диапазонах *C* (3,8–7,5 см) и *X* (2,4–3,8 см) позволяет дешифровать небольшие объекты, растительность, снежный покров, почвы [51, 52].

В целом, если объекты земной поверхности имеют размеры меньше половины длины волны, то такая поверхность для радиоволн является отражающей, а их изображения на радиолокационных снимках имеют очень темный тон. При размере объектов или неровностей поверхности больше полудлины волны происходит диффузное отражение, зависящее от размеров неровностей, их формы и ориентирования по отношению к радиолучу. Такие объекты изображаются серым тоном разной плотности.

Как и при многозональной съемке в оптическом диапазоне при радиолокационной съемке существует возможность выбора зоны излучения или диапазона радиоволн. Это создает возможность, используя повторяемость съемки, получать на одну территорию набор радиолокационных снимков разных частот. При этом в отличие от снимков в видимом диапазоне, фиксирующих объекты на поверхности земли, радиолокация позволяет получать информацию об объектах, расположенных на некоторой глубине. Такой вид радиолокации называют *подповерхностным зондированием*.

Важным физическим параметром радиолокационной съемки является поляризация – свойство электромагнитных волн распространяться в определенной плоскости (рис. 2.26).

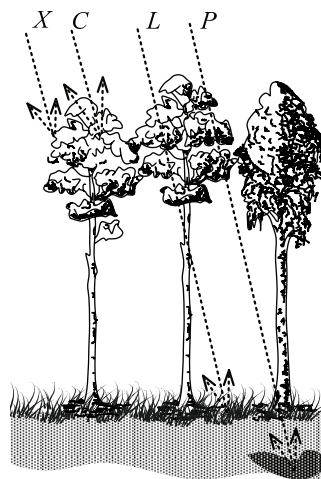


Рис. 2.25. Отражение радиоволн различных диапазонов от объектов земной поверхности

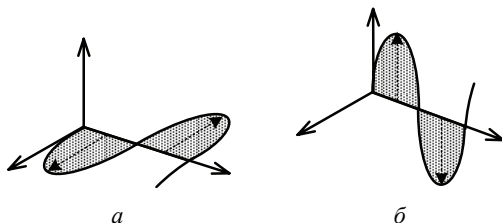


Рис. 2.26. Поляризация радиоволн:
а – горизонтальная (H); б – вертикальная (V)

При отражении от различных объектов поляризация меняется, и тем самым можно получать дополнительную информацию об объектах. Для радиолокационной съемки используется, как правило, горизонтальная (H) или вертикальная (V) поляризация. Всего можно выделить два варианта сочетаний поляризации испускаемого и принимаемого сигнала – параллельную и кроссполяризацию. Параллельная поляризация заключается в том, что излучаемый и принимаемый сигналы имеют одинаковую (HH или VV) поляризацию, кроссполяризация – если излучение происходит в одной, а прием – в другой поляризации (HV или VH). Синтез изображений, полученных при различных комбинациях поляризации, позволяет получить композитные снимки, обладающие новыми свойствами (рис. II).

Для получения цифровой модели рельефа используются данные интерферометрической съемки, позволяющей благодаря высокой частоте излучения выполнять измерения вертикального и горизонтального смещения земной поверхности с точностью в несколько миллиметров. Самый простой способ оценки смещений и временных изменений состоит в использовании пары снимков, сделанных с некоторым интервалом времени.

В результате наложения двух снимков одного и того же участка местности получается интерферограмма, представляющая собой множество цветных полос, ширина которых соответствует разности фаз электромагнитного излучения и позволяющая регистрировать изменения, произошедшие на поверхности Земли. Все данные съемок представляются в цифровом виде, что обеспечивает объективность и однозначность интерпретации.

Для получения достоверных результатов необходимо выполнение некоторых условий, таких как выведение спутника для повторной экспозиции в область космического пространства, близкую к первому снимку, соблюдение сезона съемки. Эти проблемы в большей мере решаются с помощью специальной программы «Тандем» на базе двух спутников, которые работают по одним и тем же орбитам с временным интервалом пролета в 24 ч [2].

Радиолокационная съемка относится к перспективным видам дистанционного зондирования. Возможности интерпретации данных радиолокационной съемки для целей лесного хозяйства пока изучены недостаточно. Известны примеры дешифрирования по радиолокаци-

онным снимкам категорий земель преобладающего древесного вида, высоты древостоев. Синтезированные изображения, полученные на основе данных РЛС в разных диапазонах и при разной поляризации, позволяют выявить особенности лесного полога (зарастающие места рубок, насаждения разной густоты, состава пород и др.).

2.3.1. Лазерно-локационная съемка

В последние годы все большему числу потребителей материалов аэро- и космической съемки, которыми являются прежде всего различные предприятия, учреждения и фирмы, занимающиеся геодезическими изысканиями, землеустройством, лесоустройством, производством планово-картографических материалов, разработкой ГИС и т. п., требуется пространственная информация для формирования цифровых моделей местности (ЦММ). Для этой цели, наряду с фотограмметрическими методами и радиолокационной съемкой из космоса, за рубежом и в России применяется лазерная локация с воздушных летательных аппаратов [45, 46]. Лазерная локация – сравнительно новое направление в области дистанционного зондирования. Предпосылкой к его возникновению и развитию стало появление безотражательных лазерных дальномеров, а также создание систем непрерывного геопозиционирования (GPS/INS-систем) [43, 44].

Авиационный лазерный локатор, или лидар (LiDAR – Light Detection and Ranging), представляет собой активное средство дистанционного зондирования, используемое для получения трехмерных изображений земной поверхности. Общая схема лазерной локации изображена на рис. 2.27.

Основными структурными компонентами системы лазерной локации являются: блок сканирования, бортовой навигационный комплекс, включающий GPS-приемник и инерционную систему, модуль регистрации данных, базовые GPS-станции (рис. 2.28).



Рис. 2.27. Общая схема лазерной локации

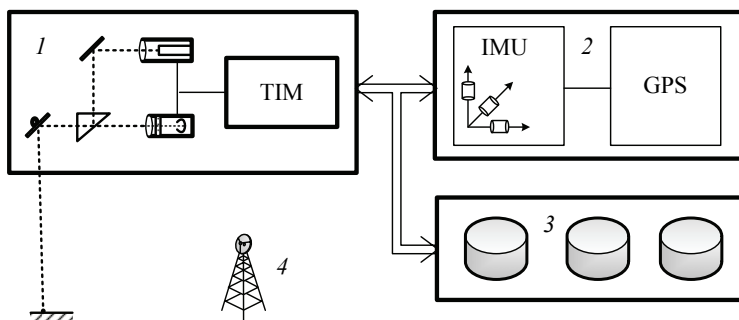


Рис. 2.28. Основные компоненты системы лазерной локации:
 1 – сканирующий блок; 2 – бортовой навигационный комплекс;
 3 – модуль регистрации данных; 4 – базовая GPS-станция

Сканирующий блок представляет собой приемопередатчик лазерного излучения и включает следующие компоненты: излучатель, приемник, блок развертки, оптическую систему зеркал и призм, таймер, электронные составляющие (рис. 2.29). В его функции входят: генерация лазерных импульсов, прием отраженного сигнала, регистрация времени прохождения сигнала и определение

наклонной дальности до точки отражения, управление разверткой лазерного луча. Активным элементом сканирующего блока является полупроводниковый лазер, работающий в импульсном режиме с рабочей длиной волны в ближнем инфракрасном диапазоне спектра.

Рабочая длина волны лазерного излучения составляет 1064 нм. Лазер излучает короткие импульсы, которые от излучателя 1 через зеркало 2 и призму 3 попадают в блок развертки 4, действие которого основано на механическом вращении зеркала или призмы.

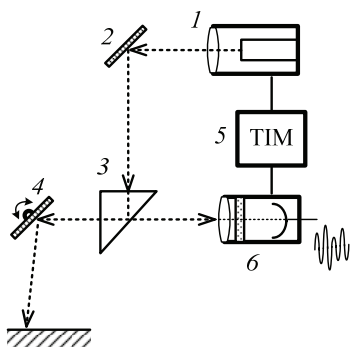


Рис. 2.29. Упрощенная схема сканирующего блока:
 1 – источник излучения; 2 – зеркало;
 3 – призма; 4 – блок развертки (качающееся зеркало);
 5 – таймер (TIM); 6 – приемник

Оптические схемы развертки и характерные рисунки рассеивания лазерных точек, используемые в современных лидарах, представлены на рис. 2.30.

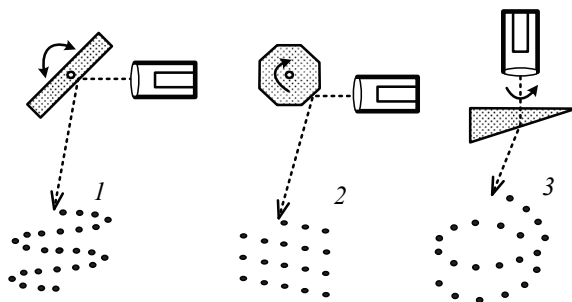


Рис. 2.30. Схемы блоков развертки и рассеивания лазерных точек по поверхности:

- 1 – качающееся зеркало; 2 – вращающаяся отражающая призма;
3 – вращающаяся преломляющая (оптический клин) призма

В качестве оптического элемента развертки применяются качающееся зеркало (рис. 2.30, 1), вращающиеся отражающая (рис. 2.30, 2) или преломляющая (рис. 2.30, 3) призмы. Блок развертки обеспечивает рассеивание лазерных точек в поперечном направлении, перпендикулярном направлению полета. Продольная развертка обеспечивается за счет движения самого носителя.

Зондирующие импульсы распространяются по прямолинейной траектории от источника к поверхности объектов, при взаимодействии с которой часть электромагнитного излучения отражается, а так как отражение чаще всего является диффузным, оно регистрируется приемником (рис. 2.29, 6). Для исключения влияния посторонних излучений перед приемником установлен светофильтр, пропускающий излучение в узком диапазоне с длиной волны 1064 нм. Мгновенное поле зрения (МПЗ) приемника юстировано в направлении распространения луча.

Специальный таймер (Time Interval Meter – TIM), установленный в блоке сканирования, регистрирует с высокой точностью время испускания лазерного импульса и приема отраженного сигнала, что позволяет определить временной интервал прохождения лазерного

импульса от источника излучения до объекта и обратно к приемнику. Так как скорость распространения электромагнитного излучения в атмосфере известна, то расстояние до поверхности объекта (наклонная дальность) определяется по следующей простой формуле $L = TC / 2$, где T – время прохождения импульса; C – скорость света.

Кроме того, для каждого излученного импульса регистрируется текущее значение угла поворота сканирующего элемента (зеркала, призмы, оптического клина), величина которого позволяет определить в системе координат сканирующего блока направление луча зондирующего импульса.

Пространственные координаты траектории движения летательного средства и сканирующего блока определяются дискретно бортовым GPS-приемником с программируемой частотой. Точное определение координат сканирующего блока (центра его системы координат) осуществляется в процессе наземной постобработки (если не используется режим реального времени RTK). Угловая ориентация сканирующего блока определяется также дискретно с помощью инерционной системы (IMU), обычно с частотой 50–200 Гц, в результате работы которой измеряются три угла, соответствующие углам ориентации носителя – крену, тангажу и рысканию (курсу). GPS-приемник и инерционная система (IMU), работа которых основана на взаимодействии в реальном времени, обеспечивает каждый импульс лазера элементами внешнего ориентирования, позволяющими, используя измеренное значение наклонной дальности, определить геодезические координаты точки, в которой произошло отражение зондирующего луча.

Таким образом, для каждого измерения, выполняемого лазерным локатором, определяются: пространственные координаты положения сканирующего блока X_S, Y_S, Z_S , углы ориентации сканирующего блока α, ω, χ , угол отклонения лазерного луча φ в локальной системе координат сканирующего блока $Sxyz$, наклонная дальность L , что позволяет в конечном счете определить пространственные координаты X_A, Y_A, Z_A точки отражения A (рис. 2.31). В результате в трехмерном координатном пространстве регистрируется множество лазерных точек, формирующих пространственный образ объекта съемки, который принято называть лазерно-локационным изображением в дальномерной форме.

Наряду с пространственными координатами точки, вызвавшей отражение лазерного импульса, современные лидары способны регистрировать интенсивность отраженного импульса, которая зависит от многих факторов: спектральной отражательной способности объекта, наклонной дальности, состояния атмосферы и пр. Так как спектральная отражательная способность объектов различается, то формируется лазерно-локационное изображение, по своим информационным свойствам схожее с монохромными снимками в видимом диапазоне, что позволяет использовать их для визуального дешифрирования.

Если на пути распространения лазерного луча встречается неполное препятствие, то часть энергии импульса отражается, а другая распространяется дальше (рис. 2.32). Таким образом, один лазерный импульс может вызвать множественные отклики: первые отклики могут быть получены за счет отражений от листьев деревьев, проводов и опор ЛЭП, кромок зданий, а последний отклик, как правило, соответствует поверхности земли или другой сплошной поверхности. В зависимости от типа современные лидары

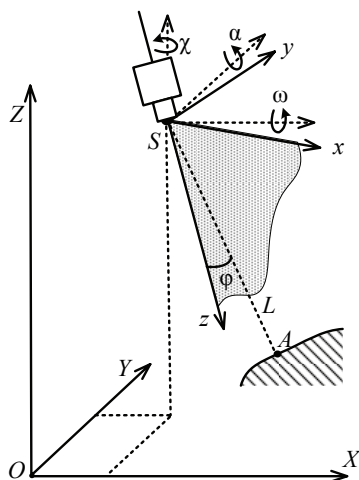


Рис. 2.31. Пространственное положение систем координат и элементы внешнего ориентирования точки сканирования

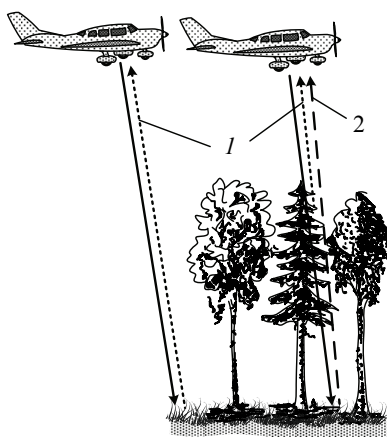


Рис. 2.32. Множественное отражение лазерного импульса:
1 – первый отклик; 2 – второй отклик

позволяют фиксировать несколько отраженных сигналов, что способствует получению более информативных лазерно-локационных данных.

В связи с тем что при лазерной локации регистрируются данные от нескольких источников, необходимо, чтобы все они были синхронизированы между собой. Ранее выполнялась аппаратная синхронизация всех источников информации, работавших как единое целое. В современных лидарах все компоненты работают автономно, а регистрируемые данные снабжаются временной меткой, полученной от системы GPS, в результате чего любая порция данных, записываемая на регистратор, оказывается полностью определена во временном отношении, а синхронизация потоков данных выполняется при камеральной обработке.

Одним из лидеров в области разработки и изготовления современных лазерных локационных систем является компания Optech, которая разработала первую коммерчески доступную систему лазерной аэросъемки поверхности земли, известную во всем мире как ALTM.

В настоящее время компания Optech предлагает широкий спектр бортовых лидарных комплексов для различных целей с разными техническими характеристиками (табл. 2.8), к которым относятся ALTM Gemini, Orion, Pegasus, SHOALS (рис. 2.33).

ALTM Gemini является универсальным лидаром и предназначен для картографирования больших территорий как с больших, так и с малых высот. Система ALTM Gemini включает полностью автоматизированную технологию Continuous Multipulse (CMP), позволяющую преодолеть потерю данных, связанную ограничениями по высоте. В большинстве систем сенсоры лидара ожидают отклика от каждого импульса, прежде чем отправить новый импульс, поэтому частота импульсов лазера ограничивается высотой проведения съемки. Технология CMP позволяет излучать и отслеживать два или более импульсов, значительно увеличивая скорость и разрешение съемки.

В ALTM Pegasus реализуется новый подход в технологии лазерного сканирования: в нем установлены несколько лазеров, использование которых позволяет системе Pegasus работать с больших высот и с большей плотностью точек, чем любая другая современная лидарная система, обеспечивая широкое поле зрения и различные углы сканирования.

Таблица 2.8

Основные технические характеристики лазерных локоаторов

Технические характеристики	Gemini	Orion		Pegasus
		М 200	С 200	
Рабочий диапазон, м	150–4000	200–2500	50–1000	300–2500
Длина волны лазера, нм	1064	1064	1541	1064
Горизонтальная точность	1/5,500 от высоты	1/5,500 от высоты	1/3,000 от высоты	1/5,500 от высоты
Точность по высоте, см	<5–35	<5–15	<5–10	<5–15
Частота импульсов лазера, кГц	Программируется, 33–167	50–200	100–200	Программируется, 100–500
Система определения координат и ориентации	POS AV 510 (OEM)		POS AV 410 (OEM)	POS AV AP 510 (OEM)
Ширина сканирования, град	0–50	Программируется, максимум 50		Программируется, 0–65
Частота сканирования, Гц	От 0 до 70	Программируется, максимум 70		Программируется, 0–140
Компенсация крена, град	±5 при полном поле зрения	Программируется, минимальная 10		±32 при полном поле зрения
Регистрация дальностей	До 4-х измерений дальностей, включая последнее			
Регистрация интенсивностей	До 4-х измерений интенсивностей на каждый импульс лазера			
Расхождение луча, мрад	0,25 (1/е), 0,8 мрад (1/е), номинал	0,25 (1/е)		0,2 (1/е)
Измерение интенсивности	12-битный динамический диапазон измерения	12-битный в каждом из двух динамических диапазонов		12-битный динамический диапазон измерения
Фотосъемка	60-мегапиксельная, среднеформатная камера (опция)			

ALTM Orion является самой компактной и наиболее функциональной системой лидарного картографирования. Серия Orion-M предназначена для точного картографирования со средних высот, требующегося для решения инженерных задач, серия Orion-C представляет собой систему, оптимизированную для съемки линейных объектов.



Рис. 2.33. Лазерные локаторы фирмы Optech:
а – Pegasus; *б* – Gemini; *в* – Orion; *г* – SHOALS

Бортовой лидарный басиметр SHOALS применяется для картографирования береговых зон. Лазерная басиметрия основана на измерении разности во времени между сигналами, отраженными от поверхности воды и от объектов, находящихся под водой. Эта разность позволяет определить глубину водного бассейна и рельеф дна.

Лазерное зондирование как средство получения пространственных данных сегодня интенсивно развивается во многих странах и находит все более широкое применение в самых разных отраслях, в том числе используется для решения задач лесного хозяйства. Оно выполняется как самостоятельно, так и в комплексе с цифровой воздушной и космической съемкой и позволяет получать более информативные данные о лесном фонде.

Принципиальным отличием лазерной локации от аэро- и космической съемки является то, что лазерный луч отражается не только от крон деревьев, а способен проникать до самой земли, позволяя получать трехмерный образ полога древостоя с высокой точностью

(рис. 2.34). Это дает возможность для анализа строения и пространственной структуры насаждения без использования классических методов фотограмметрической обработки снимков.

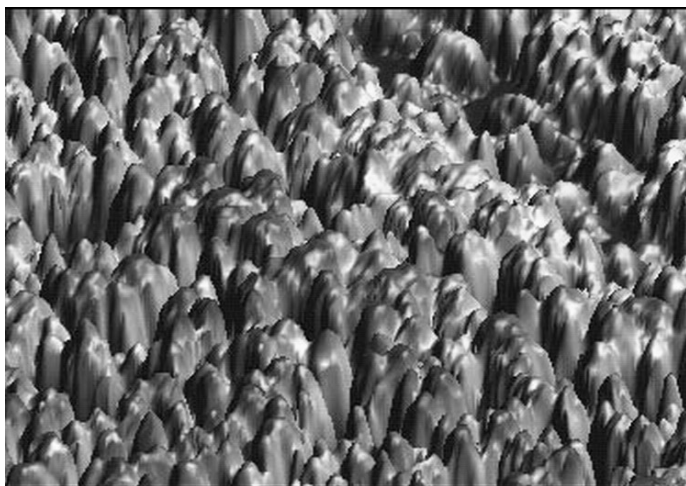


Рис. 2.34. Трехмерная модель поверхности полога древостоя

За рубежом лазерная съемка с космических и авиационных носителей уже достаточно широко применяется при инвентаризации лесов. Ведущими по исследованиям в данном направлении являются ученые из западных стран: Канады, США и Европы, где выполняются широкомасштабные проекты по изучению возможностей применения лазерных технологий для мониторинга лесов, а также в других направлениях [86].

В Беларуси лидарные съемки лесов пока не проводились в связи с отсутствием необходимого оборудования. В России исследования в области применения методов лазерного зондирования для оценки и мониторинга лесов фактически только начинаются. За последнее десятилетие можно отметить работы И. М. Данилина, Е. М. Медведева, И. И. Красикова и др. [45, 46].

Их работы, а также исследования, проведенные учеными за рубежом, показали, что на основе данных лазерно-локационной съемки с использованием регрессионных моделей связи таксационных

показателей с морфометрическими и отражательными свойствами полога древостоя возможно выполнить оценку запаса и фитомассы древостоя. При этом точность оценки составляет около $\pm 10\%$.

2.4. Съёмка с космических летательных аппаратов

В настоящее время съёмку Земли из космоса ведут более 50 оптико-электронных и радарных космических систем ДЗ, в том числе спутники новейшего поколения. В последние годы спрос на данные космической съёмки значительно вырос, в связи с чем происходит совершенствование систем ДЗ, улучшение их пространственного и спектрального разрешения, повышение точности геодезической привязки снимков [73].

В целом все космические системы ДЗ Земли содержат два сегмента: орбитальный и наземный. Орбитальный сегмент включает платформу-носитель, целевую съёмочную и приемо-передающую аппаратуру для связи с наземными станциями. Наземный сегмент состоит из станций управления, обеспечивающих управление полетом, режимами работы оборудования, съёмочной аппаратуры и станций приема ДДЗ, в основные функции которых входят прием информации, ее хранение и первичная обработка [15, 38].

Передача данных происходит в период, когда спутники находятся в зоне прямой видимости станции приема. Однако это возможно не всегда, например в случае прохождения спутника над океаном. Поэтому используются иные способы – временное хранение данных на борту с последующей их передачей на Землю, когда приемная станция попадает в зону прямой видимости, или передача информации через спутники-ретрансляторы, находящиеся на геостационарных орбитах и позволяющие расширить зону приема наземных станций. Расположение приемных станций выбирается таким образом, чтобы обеспечить оперативное получение ДДЗ, что позволяет снизить нагрузку на бортовые запоминающие устройства. Региональные станции приема, как правило, находятся в ведении национальных или международных космических служб, локальные могут принадлежать организациям или даже частным лицам.

На территории России ведущее место на рынке наземных станций приема ДДЗ занимает инженерно-технологический центр «СКАНЭКС» (ИТЦ «СКАНЭКС») [71]. Разработанные и выпускаемые ИТЦ «СКАНЭКС» наземные станции УниСкан позволяют принимать как оптические данные с разрешением от 1 км до 0,7 м (данные спутников Terra, Aqua, SPOT, Landsat, Formosat, IRS, Cartosat, Resourcesat, EROS, THEOS), так и радиолокационные изображения с разрешением от 100 м до 1 м (данные спутников RADARSAT-1, RADARSAT-2, ENVISAT-1, TerraSAR-X и COSMO-SkyMed). Со станцией поставляется комплект программного обеспечения для управления станцией приема и обработки данных.

Являясь оператором коммерческой сети станций УниСкан, центр предоставляет пользователям в оперативном режиме изображения со спутников Terra, Aqua, SPOT-4, SPOT-5, EROS A, EROS B, RADARSAT-1, ENVISAT-1 и из собственных архивов (SPOT-2/4, SPOT-5, IRS-P5, IRS-P6, EROS A, EROS B, RADARSAT-1, ENVISAT-1). На основании дистрибьюторских и партнерских соглашений с мировыми операторами космических программ «СКАНЭКС» распространяет данные высокого и сверхвысокого разрешения со спутников Ikonos, GeoEye-1, QuickBird, WorldView-1/2, Kompsat-2, Formosat-2, RADARSAT-2, TerraSAR-X, ALOS и др.

2.4.1 Орбиты искусственных спутников Земли

Траектория движения искусственного спутника (ИСЗ) вокруг Земли называется орбитой. Его движение очень стабильно и происходит под воздействием гравитационных сил и инерции, причем главной силой является притяжение Земли. Периодичность съемки и основные характеристики получаемых снимков, такие как полоса обзора и пространственное разрешение, зависят от множества факторов, важнейшими из которых являются характеристики установленной на борту аппаратуры и параметры орбиты спутника.

Орбиты ИСЗ можно разделить по форме, наклонению, высоте, от которых зависит период обращения спутника [79, 85]. Форма орбиты (рис. 2.35) определяется эксцентриситетом и может быть круговой, эллиптической, параболической и гиперболической, кроме того, орбиты бывают замкнутыми и незамкнутыми. Незамкнутые

параболические и гиперболические орбиты используются для вывода космических аппаратов к другим планетам или на более высокие орбиты. Для целей ДЗ используются, как правило, замкнутые круговые орбиты, обеспечивающие одинаковую высоту съемки, охват и разрешение снимков.

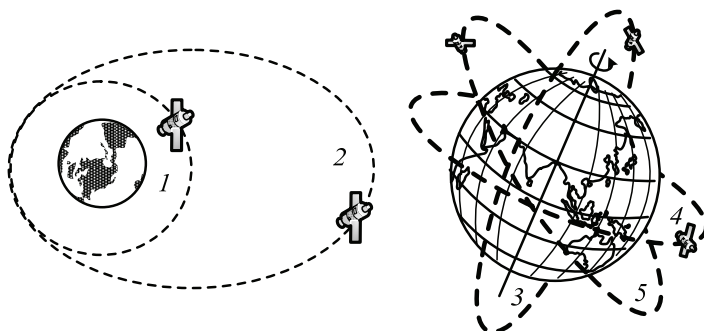


Рис. 2.35. Виды орбит спутников ДЗ Земли:
1 – круговая; 2 – эллиптическая; 3 – околополярная;
4 – околоэкваториальная; 5 – наклонная

Наклонение орбиты измеряется углом i между плоскостью орбиты и плоскостью экватора ($0^\circ \leq i \leq 180^\circ$), определяет предельные широты, ограничивающие область земного шара, доступную для наблюдения со спутника. По наклонению выделяют экваториальные ($i = 0^\circ$), полярные ($i = 90^\circ$) и наклонные орбиты. В реальных условиях из-за особенностей гравитационного поля Земли полярных и экваториальных орбит не существует, и под ними понимают околополярные и околоэкваториальные орбиты. Максимальный обзор обеспечивают полярные орбиты, позволяющие наблюдать практически всю поверхность Земли.

Орбита называется прогрессивной при $i < 90^\circ$, когда направление движения ИСЗ совпадает с направлением вращения Земли, и ретроградной в противном случае. В процессе вращения спутника вокруг Земли наклонение орбиты остается постоянным. На околоэкваториальной орбите ($i = 0^\circ$) спутник будет постоянно вращаться вдоль линии экватора по направлению вращения Земли, а при $i = 180^\circ$ – в противоположном направлении. Высота круговой орбиты

постоянна, эллиптической – изменяется от $r_{\min}$ в перигее (минимально удаленная от центра Земли точка на орбите) до $r_{\max}$ в апогее (максимально удаленная от центра Земли точка на орбите).

Низкоорбитальными (LEO – от англ. Low Earth Orbit) обычно считаются спутники с высотами орбит от 160 до 2000 км над поверхностью Земли. В этом пространстве находятся практически все спутники для мониторинга Земли и их орбиты подвержены максимальным воздействиям со стороны гравитационного поля и верхней атмосферы.

Среднеорбитальными (MEO – от англ. Medium Earth Orbit) считаются спутники с высотами от 2000 км до высоты геостационарной орбиты – 35 786 км над поверхностью Земли. Такие орбиты имеют спутники глобальных навигационных систем: GPS (20 200 км) ГЛОНАСС (19 100 км) и спутники связи.

Геосинхронные орбиты (GSO – от англ. Geosynchronous Orbit) имеют спутники с периодом обращения, равным периоду вращения Земли. Если синхронная орбита круговая, а ее плоскость совпадает с плоскостью земного экватора (наклонение орбиты нулевое), то такую орбиту называют геостационарной. Высота орбит геостационарных спутников составляет 35 786 км над поверхностью Земли. С точки зрения наблюдателя на поверхности Земли, спутник на геостационарной орбите кажется неподвижным, поэтому его используют в системах космической связи и метеорологии.

Многие спутники ДЗ Земли имеют солнечно-синхронные орбиты, обеспечивающие их прохождение над любой точкой земной поверхности при приблизительно одинаковой высоте солнцестояния, что обеспечивает одинаковые условия съемки.

2.4.2. Основные характеристики съемочной аппаратуры и цифровых снимков

Важнейшими характеристиками съемочной аппаратуры и получаемых космических снимков являются: ширина полос обзора и съемки, пространственное разрешение, радиометрическое разрешение, спектральное разрешение, временное разрешение [87, 15, 32, 37, 42, 31].

Ширина полосы обзора зависит от высоты спутника и максимального отклонения луча зрения камеры от направления в надир.

Ширина полосы съемки определяется фокусным расстоянием оптической системы камеры. Как правило, чем шире полоса съемки, тем ниже пространственное разрешение.

Пространственное разрешение. Пространственная разрешающая способность характеризует способность сенсора различать мелкие детали или объекты в пространстве данных. Факторами, которые влияют на пространственное разрешение, являются высота расположения платформы, размер элементов сенсора и фокусное расстояние оптической системы. Таким образом, разрешающая способность сенсора определяется размерами площадки на поверхности Земли, соответствующей одной элементарной ячейке матрицы сенсора. Снимок имеет низкое разрешение, если на нем видны только крупные объекты, высокое – если можно различить мелкие детали объектов. Чем выше пространственное разрешение, тем меньше его числовое значение.

Четкой классификации систем ДЗ по пространственному разрешению нет, разные авторы приводят различные пределы классификации [87, 13, 18, 22, 37, 85]. По нашему мнению, на современном этапе наиболее приемлема следующая классификация систем ДЗ по пространственной разрешающей способности:

- сверхнизкого разрешения (более 1 км);
- низкого разрешения (100–1000 м);
- среднего разрешения (10–100 м);
- высокого разрешения (1–10 м);
- сверхвысокого разрешения (менее 1 м).

Низкое пространственное разрешение характеризуется широкой полосой обзора, непрерывностью сбора информации, низкой стоимостью, поэтому их использование может быть более предпочтительным при мониторинге больших территорий. Снимки высокого и сверхвысокого разрешения используются для получения детальной информации об объектах и в последнее время часто приходят на смену аэроснимков.

Спектральное разрешение. Спектральное разрешение характеризует способность системы дистанционного зондирования регистрировать излучение, отражаемое объектами, и определяется двумя характеристиками: количеством диапазонов (каналов) и шириной каждого из них (рис. 2.36). Более высокое спектральное разрешение

обеспечивается за счет увеличения количества диапазонов и уменьшения их ширины. На практике важно, чтобы спектральное разрешение снимков соответствовало отражающим свойствам объектов.

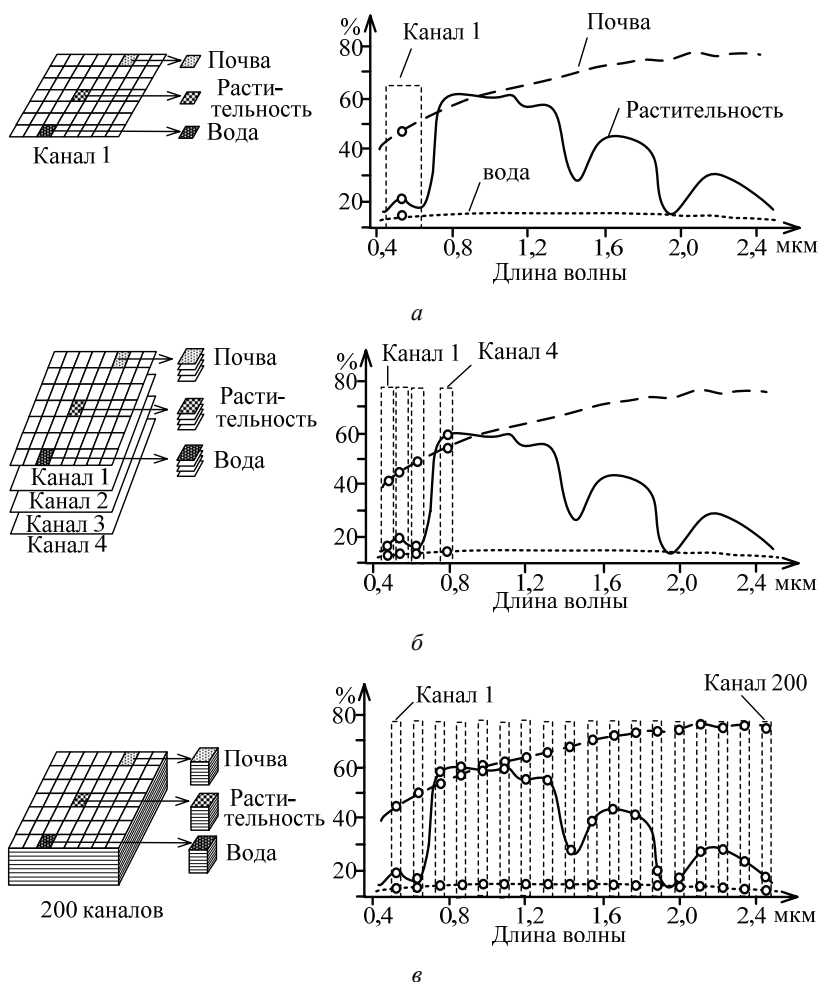


Рис. 2.36. Спектральное разрешение снимков:
 а – моноспектральные (панхроматические); б – мультиспектральные;
 в – гиперспектральные

В зависимости от количества спектральных диапазонов, в которых регистрируется излучение, съемочная аппаратура и получаемые с ее использованием снимки делятся: на однозональные, или моноспектральные (монокроматические); многозональные, или мультиспектральные (от 2 до 10 диапазонов); гиперспектральные (могут иметь 200 и более диапазонов).

Однозональные снимки, например панхроматические, являются монокроматическими, используют только одну, но достаточно широкую зону спектра, охватывающую весь видимый диапазон (поэтому их называют интегральными), и имеют более высокое пространственное разрешение.

Многозональные снимки представляют собой несколько монокроматических снимков, сделанных одновременно в разных узких зонах спектра (каналах). Требуемое количество диапазонов обеспечивается применением фильтров, призм, дифракционных решеток. Гиперспектральные используют множество очень узких зон спектра.

Мультиспектральные и гиперспектральные снимки представляют больше возможностей по выявлению различий в отражательных свойствах объектов и, соответственно, их идентификации, так как уникальные особенности природных объектов наиболее четко проявляются в разных спектральных диапазонах.

В различных системах ДЗ применяются различные наборы зон и в их пределах – разные значения длин волн электромагнитного излучения с учетом назначения съемок. Обычно при формировании цветных изображений по мультиспектральным снимкам используют три комбинации зон:

- красная, зеленая и синяя зоны видимого диапазона;
- ближняя ИК, красная и зеленая зоны;
- средняя ИК, ближняя ИК и зеленая зоны.

Первая комбинация позволяет формировать изображения в истинном цвете, так как они воспринимаются невооруженным глазом, вторая и третья дают ложные или псевдоцвета, позволяющие подчеркнуть различия и дешифровочные признаки объектов, что особенно важно при проведении визуального дешифрирования.

Радиометрическое разрешение. Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью сенсора к изменению интенсивности электромагнитного излучения (т. е. минимальным различием

в уровне энергии излучения, которое можно зарегистрировать с помощью данной аппаратуры) и количеством бит, предназначенных для хранения данных на один сенсор и соответствующих переходу от яркости абсолютно черного к абсолютно белому цвету.

Радиометрическое разрешение фактически определяет объем полезной информации, содержащейся в изображении. Эта характеристика применима как к аналоговым, так и к цифровым снимкам. Для аналоговых снимков (фотоснимков) радиометрическое разрешение определяется возможностью определения минимальных различий оттенков серого цвета, а для цифровых – количеством уровней квантования сигнала.

Временное разрешение. Временное разрешение определяется периодом, через который проводится повторный сбор данных. Абсолютное временное разрешение системы дистанционного зондирования определяется периодом ее вращения вокруг Земли, через который возможна повторная съемка участка земной поверхности под тем же углом обзора.

Однако некоторые системы ДЗ позволяют выполнять перспективную съемку под углом, что дает возможность сократить периодичность съемки и расширить полосу обзора. Сравнительный анализ разновременных снимков, полученных с определенной периодичностью, является одним из основных методов оценки текущих изменений, происходящих на изучаемой территории, и в зависимости от их интенсивности может составлять дни, недели, месяцы, годы.

2.4.3. Системы дистанционного зондирования Земли, датчики и сенсоры

Несмотря на множество различных систем для наблюдения за поверхностью Земли, съемка выполняется лишь в окнах прозрачности атмосферы в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах.

В видимом и ближнем ИК диапазонах регистрируют отраженное солнечное излучение, в ИК тепловом диапазоне – собственное излучение поверхности Земли. В микроволновом диапазоне регистрируется радиотепловое излучение планеты (пассивная съемка) либо отраженное излучение радиолокатора, установленного на борту ИСЗ.

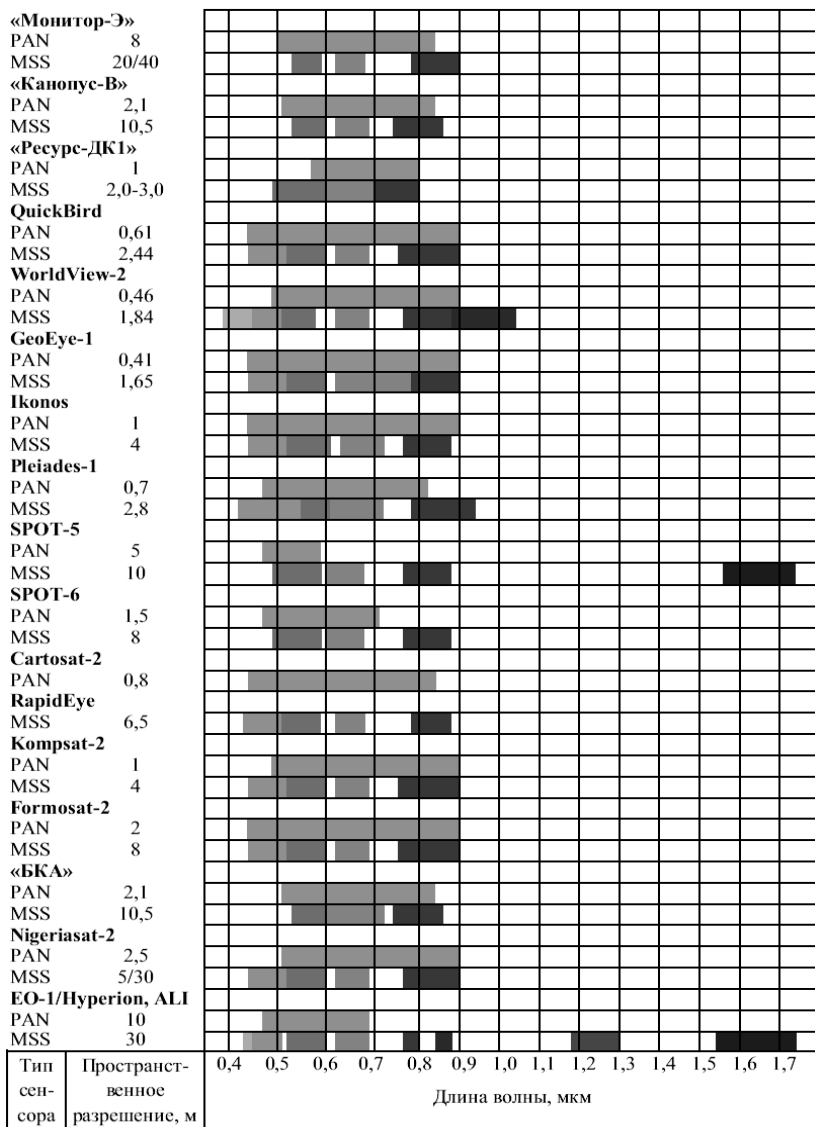


Рис. 2.37. Пространственное разрешение и спектральные диапазоны некоторых спутников ДЗ

Для съемки в оптическом диапазоне (видимом и ближнем ИК) в настоящее время используются сканирующие и кадровые оптико-электронные системы, появившиеся в середине 70-х и к концу 80-х гг., почти полностью вытеснившие фотографические и телевизионные камеры. В качестве регистрирующих устройств используются линейные и матричные ПЗС-датчики.

Съемочные камеры и сканеры, установленные на спутниках, имеют различные принципы формирования изображения, конструктивные отличия, но спектральные диапазоны, в которых выполняется съемка, практически одинаковые (рис. 2.37). Мультиспектральный построчный сканер формирует изображение последовательно с помощью оптико-механической системы (рис. 2.38). Излучение проходит через собирающую оптическую систему, создающую мгновенное поле зрения – небольшой участок территории. Общее поле зрения формируется вращательным движением сканирующего зеркала.

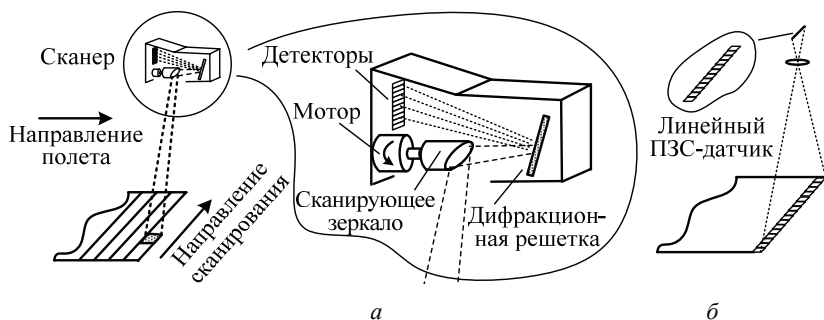


Рис. 2.38. Упрощенная схема:
а – построчного сканера; б – линейного сканера

С помощью диспергирующих призм, дифракционных решеток или фильтров излучение разлагается на спектральные составляющие, которые направляются на детекторы, чувствительные каждый в соответствующем диапазоне.

Линейный сканер имеет ПЗС-датчик, расположенный перпендикулярно движению носителя, а съемка выполняется за счет движения спутника. Принципы работы радиолокационных и лидарных систем были описаны ранее (п. 2.3.10 и 2.3.11).

В целом все космические системы ДЗ можно разделить на две группы – метеорологические и ресурсные. Метеорологические спутники предназначены для получения метеоданных о Земле с целью прогнозирования погоды и имеют среднее или низкое пространственное разрешение, но большую ширину полос обзора и съемки. Это позволяет выполнять съемку больших территорий континентов, океанов и морей, движения воздушных масс, выполнять мониторинг динамики температур и т. д. [15].

Первая попытка запуска метеоспутника была предпринята в 1960 г. США, создавшими семейство метеорологических спутников TIROS, оснащенных телевизионным и инфракрасным оборудованием. Всего за период 1960–1965 гг. были успешно запущены девять спутников данной серии. Первая советская метеорологическая спутниковая система «Метеор» начала функционировать в 1967 г. с запуска спутников «Космос-144» и «Космос-156», и с тех пор космические наблюдения за метеоусловиями Земли ведутся непрерывно.

Данные метеонаблюдений широко востребованы, и в настоящее время на орбитах находится более десятка метеоспутников разных стран. Лидирующее место по-прежнему занимают США, имеющие более девяти метеорологических спутников. Важным событием 2011 г. стал запуск экспериментального метеорологического космического аппарата NPP (NPOESS Preparatory Project), предназначенного для испытаний новых метеодатчиков. Основной сканер VIIRS создан на базе радиометра MODIS и обеспечивает съемку в 22 спектральных каналах с разрешением 400 м в полосе съемки шириной 3000 км. Спутник NPP будет передавать информацию в режиме широкого вещания в X-диапазоне частот (Direct Broadcast, DB), продолжая политику свободного доступа к космической информации, реализованную в программе EOS (космические аппараты Terra и Aqua). На орбитах находятся также два российских спутника: метеоспутник «Метеор-М» и «Электро-Л».

Ресурсные спутники предназначены, в первую очередь, для исследования природных ресурсов Земли, картографии, экологического мониторинга, контроля последствий стихийных бедствий, пожаров, чрезвычайных ситуаций, хозяйственной деятельности и имеют среднее и высокое пространственное разрешение. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Основные технические характеристики некоторых спутников ДЗ и их орбит

Космическая система ДЗ	Год запуска	Тип орбиты	Высота, км	Наклонение, град	Срок использования, лет	Ширина полосы съемки, км	Отклонение от надир, град	Точность геопривязки, м	Стереосъемка	Радиометрическое разрешение, бит
Ikonos (США)	1999	СС	670	98,1	7	11	45	23	Да	11
Landsat-7 (США)	1999	СС	705	98,2	7	185	—	—	—	8
EO-1/Hyperion, ALI (NASA)	2000	ПСС	705	98,21	1	7,7	—	—	—	—
QuickBird (США)	2001	СС	450	98	7	16,5	45	—	—	11
OrbView-3* (США)	2003	СС	470	97	—	8	50	—	Да	11
Formosat-2 (Франция, США)	2004	СС	891	99,1	5	24	45	—	—	8
«Монитор-Э» (Россия)	2005	СС	550	97,5	5	—	30	—	—	—
Cartosat-1 (IRS-P5) (Индия)	2005	СС	618	97,1	5	30, 27	—	—	Да	10
«Ресурс-ДК1» (Россия)	2006	Эл	360–604	64,8–70,4	3	4,7–28,3	30	—	Да	10
Kompsat-2 (Южная Корея, Франция)	2006	СС	685	98	—	15	—	—	Да, нет	8
ALOS*/PRISM, AVNIR-2 (Япония)	2006	СС	691,65	98,16	5	35, 70	—	—	Да	11
WorldView-1 (США)	2007	СС	496	97,2	7	17,6	40	5	—	11
Cartosat-2 (Индия)	2007	СС	630	97,91	5	9,6	45	—	—	10
GeoEye-1 (США)	2008	ПСС	681	98,1	7	15,2	60	2–3	Да	11
THEOS (Тайланд, Франция)	2008	СС	825	98,8	5–7	—	45	—	—	8
RapidEye (Канада, Германия)	2008	СС	630	97,8	7	77	77	30–90	—	12
WorldView-2 (США)	2009	СС	770	97,2	7	16,4	40	5	Да	11
Cartosat-2B (Индия)	2010	СС	630	97,91	5	9,6	26	—	Да	—
«Сич-2» (Украина)	2011	СС	700	98,2	5	—	—	—	—	—
Pleiades-1 (Франция, Европа)	2011	—	—	—	5	20	50	20	—	—
«Канопус-В» (Россия)	2012	СС	510–540	98	5	—	—	—	—	—
«БКА» (Беларусь)	2012	СС	510–540	98	5	—	—	—	—	—
SPOT-6 (Франция)	2012	СС	655	98,2	9	60	—	10	Да	—

Примечание: * – закончили работу, материалы ДЗ доступны из архивов; СС – солнечно-синхронная; ПСС – полярная солнечно-синхронная; Эл – эллиптическая.

Широкое использование ДДЗ для мониторинга и оценки ресурсов началось с запуском в 1972 г. спутника Landsat-1 – первого гражданского космического аппарата, который обеспечивал оперативную передачу изображений среднего пространственного разрешения по радиоканалу. Landsat-7 – последний из спутников ДЗ Земли, запущенный в рамках программы Landsat, снабженный аппаратурой ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus – усовершенствованный тематический картограф), которая обеспечивает съемку земной поверхности в четырех режимах: VNIR (Visible and Near Infrared – мультиспектральный видимый и ближний инфракрасный диапазон), SWIR (Shortwave Infrared – средний инфракрасный диапазон), PAN (Panchromatic – панхроматический диапазон), TIR (Thermal Infrared – тепловой инфракрасный диапазон). С 2009 г. все космические снимки программы Landsat находятся в открытом бесплатном онлайн доступе.

Начиная с 1972 г. для наблюдения за земными ресурсами были выведены на орбиты французская космическая система SPOT, индийская IRS, японская ALOS, российская «Ресурс», радиолокационные системы: европейские ERS, ENVISAT, японские JERS, ALOS, российская «Алмаз», канадская RADARSAT и др.

22 июля 2012 г. вместе с российским космическим аппаратом «Канопус-В», российским МКА-ФКИ («Зонд-ПП»), немецким TET-1 и канадским ADS-1 был запущен в космос белорусский космический аппарат (БКА), обеспечивающий съемку в панхроматическом режиме с разрешением около 2 м, а в мультиспектральном (синий, зеленый, красный, ближний инфракрасный) – около 10 м. Предполагается, что БКА и «Канопус-В» будут работать в тандеме, что в целом повысит производительность съемочных работ и откроет новые возможности съемки, которые нельзя реализовать при использовании одного аппарата. Целевая аппаратура на спутнике белорусского производства изготовлена на ОАО «Пеленг».

Спутник предназначен для обеспечения материалами съемки высокого разрешения прежде всего специалистов по геодезии и картографии, работников лесного и сельского хозяйств, Министерства природных ресурсов и Министерства по чрезвычайным ситуациям, а также других заинтересованных организаций и ведомств. В настоящее время проходят испытания программные комплексы для оценки

снежного покрова и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, оценки динамики земель лесного фонда. Ожидается, что себестоимость снимков, полученных с БКА, будет ниже зарубежных аналогов, а значит, космические снимки станут доступнее для различных пользователей.

В состав наземного сегмента белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли входят два комплекса: комплекс управления (объединяющий центр управления полетом спутника (ЦУП) и командно-измерительный комплекс) и комплекс приема, обработки и распространения космической информации. Данные со спутников можно будет получать как на белорусских, так и на российских станциях приема.

Основной тенденцией последних лет в ДЗ является развитие концепции оперативной и глобальной съемки Земли с метровым разрешением с помощью многоспутниковых группировок. Начиная с 1999 г. выведено на орбиты более 10 гражданских КА с оптико-электронной аппаратурой, обеспечивающих получение снимков с разрешением 0,4–1,0 м, которые по своим характеристикам приблизились к аэроснимкам и нашли широкое применение в самых различных отраслях [49].

Разработчиками первых КА сверхвысокого разрешения были американские компании, но с 2006 г. запуски подобных аппаратов осуществили Израиль (EROS-B), Россия («Ресурс-ДК»), Южная Корея (Kompsat-2) и Индия (Cartosat-2). Лидерство в данных технологиях по-прежнему занимают США, осуществившие вывод на орбиту КА GeoEye-1, WorldView-1 и WorldView-2 с разрешением 0,4–0,5 м и обладающие на сегодняшний день лучшими характеристиками.

Важной особенностью данных КА последнего поколения является высокая точность координатной привязки изображений, достигнутая благодаря повышенной точности определения пространственного положения и ориентации спутника и составляющая около 2–3 м, что позволяет на их основе формировать карты и планы масштаба 1:10 000 (без использования наземных опорных точек).

В последние годы наблюдается также рост числа запусков КА для радиолокационной съемки, которая может проводиться независимо от метеоусловий и освещенности, за счет чего сокращаются сроки получения снимков [51, 52]. Радиолокационные изображения

позволяют создавать цифровые модели рельефа, а интерферометрическая съемка – определять его изменения. Современные радиолокационные космические системы, в отличие от ранее существовавших, обеспечивают радарную съемку с разрешением 1 м, соизмеримым со снимками в оптическом диапазоне.

На сегодняшний день данные дистанционного зондирования, полученные радиолокатором спутника TerraSAR-X, обеспечивают наивысшее пространственное разрешение для радарных систем (до 1 м), возможность круглосуточного всепогодного наблюдения за любыми объектами земной поверхности, получение высокоточных ЦМР и мониторинг с помощью интерферометрических методов незначительных (до 1 мм) изменений рельефа. Такая высокая точность радиолокационных снимков открывает новые возможности их использования для самых различных целей от плановой картографии до пространственного моделирования поверхности Земли.

3. ОСНОВЫ ФОТОГРАММЕТРИИ

Фотограмметрия – научная дисциплина, изучающая способы определения формы, размеров и пространственного положения объектов в заданной координатной системе по их фотографическим и иным изображениям [50, 84]. Фактически фотограмметрия является технологией выполнения измерений объекта без контакта с самим объектом. Подробное описание истории развития фотограмметрии как науки, математическое обоснование методов фотограмметрических измерений, приборов и оборудования приводится в специальной литературе [10, 34, 41, 50, 53, 70, 62]. В данном учебном пособии рассмотрены лишь основы, необходимые для понимания студентами фотограмметрических измерений, выполняемых при лесном дешифрировании аэро- и космических снимков, а также производстве лесоустроительных планово-картографических материалов.

История возникновения и развития фотограмметрии тесно связана с развитием и технологическими прорывами в химии, физике, оптике, механике, электронике, воздухоплавании, самолето- и ракетостроении. Наиболее широкое применение фотограмметрия получила в геодезии и топографии, хотя ее методы успешно используются во многих отраслях народного хозяйства: сельском и лесном хозяйствах, архитектуре, строительстве, биологических исследованиях, метеорологии и т. д.

Снимки могут быть получены различными методами: фотографическими, радио- и звуковой локацией, рентгеноскопии, голографии, телевидения и т. д. Эти методы имеют свою геометрию построения изображения, а при использовании их в измерительных целях и дешифрировании снимков – свои особенности. При этом общие принципы решения измерительных задач по различным снимкам схожи и сводятся к установлению математической зависимости между координатами точек на изображении (снимках) и координатами объекта в пространстве [70].

Благодаря возможности бесконтактного (дистанционного) получения информации о состоянии объектов в короткие сроки и последующей ее обработки в камеральных условиях, точности измерений и высокой производительности труда, возможности изучения движущихся объектов и процессов, применению сравнительно дешевых цифровых фотограмметрических станций и автоматизированных систем интерпретации изображений сфера применения фотограмметрических методов постоянно расширяется. В последние годы фотограмметрические методы все больше используются в отрасли лесного хозяйства. Так, в 2007–2011 гг. в РУП «Белгослес» были приобретены и установлены цифровые фотограмметрические станции, которые в настоящее время эффективно используются при составлении лесоустроительных планово-картографических материалов.

3.1. Свойства одиночного снимка

3.1.1. Основные понятия о проекциях

Любую точку объекта можно изобразить на плоскости путем проецирования прямолинейным лучом. Изображение точки называют проекцией, а плоскость, на которой оно получено, – плоскостью проекции. Если все проецирующие лучи параллельны между собой, то полученное изображение будет называться *параллельной* проекцией. Изображение будет зависеть от угла, под которым проецирующие лучи пересекаются с плоскостью проекции. Если лучи перпендикулярны плоскости, такая проекция называется *ортогональной* (рис. 3.1, а).

Примером уменьшенной ортогональной проекции является топографический план местности. В данном случае плоскость проекции располагается параллельно плоскости местности (при небольшой площади участка местности кривизной Земли можно пренебречь).

Если все проецирующие лучи проходят через одну точку пространства, то такую проекцию называют *центральной*, точку пересечения лучей – *центром проекции*, а полученное изображение – *перспективной* (рис. 3.1, б).

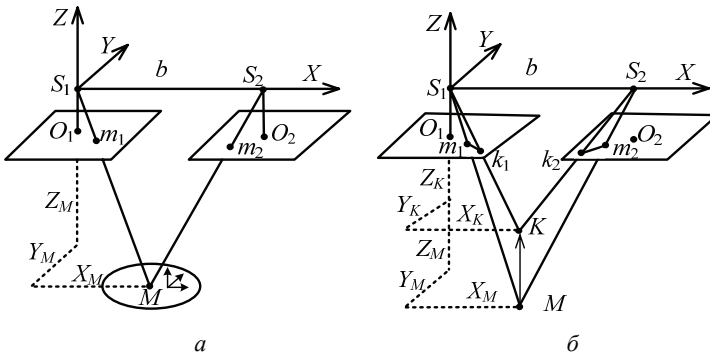


Рис. 3.1. Ортогональная (а) и центральная (б) проекции

Перспектива может быть прямой и обратной. Если плоскость проекции расположена ниже центра проекции, то такая перспектива называется прямой или позитивной, если выше центра проекции – то обратной или негативной (рис. 3.2). С геометрической точки зрения негативное и позитивное изображения полностью совпадают и их можно совместить, повернув одно из изображений на 180° , поэтому использование прямой или обратной перспективы определяется только удобством чтения чертежа.

В случае когда центр проекции по отношению к объекту находится в бесконечности, проецирующие лучи проекции становятся параллельными друг другу и центральная проекция преобразуется в параллельную. Если при этом плоскость проекции перпендикулярно проецирующим лучам, то центральная проекция преобразуется в ортогональную. Поэтому можно считать, что параллельная и ортогональная проекции – частные случаи центральной проекции, у которой центр находится в бесконечности.

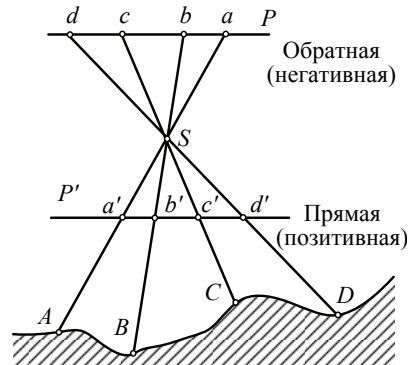


Рис. 3.2. Прямая и обратная перспективы

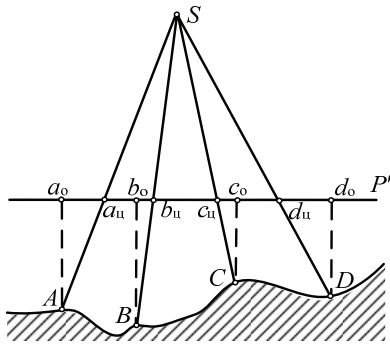


Рис. 3.3. Различия между центральной и ортогональной проекциями: изображения точек местности $a_{ц}, b_{ц}, c_{ц}, d_{ц}$ – в центральной проекции; $a_{о}, b_{о}, c_{о}, d_{о}$ – в ортогональной проекции

Отличие между ортогональной (горизонтальной) и центральной проекциями наглядно видно на рис. 3.3. Точки местности A, B, C и D изображаются на плоскости P' в центральной проекции в точках $a_{ц}, b_{ц}, c_{ц}, d_{ц}$, а в ортогональной проекции – в точках $a_{о}, b_{о}, c_{о}, d_{о}$. Поэтому для составления плана участка местности по его изображению на снимке перспективное изображение необходимо преобразовать в ортогональное. Изучение свойств

проекций и взаимосвязей между объектом и его проекцией является предметом начертательной геометрии и подробно рассматривается в специальной литературе.

3.1.2. Снимок как центральная проекция

Если принять, что на снимке нет искажений, вызванных деформацией фотоматериала, дисторсией объектива фотокамеры, атмосферной рефракцией и другими источниками ошибок, его можно рассматривать как центральную проекцию местности на плоскость.

Изображение в фото- или цифровой камерах строится при помощи объектива. Ход проецирующих лучей через объектив достаточно сложен, так как у современной съемочной камеры он представляет собой комбинированную систему, состоящую из электронно-механических блоков, собирающих и рассеивающих линз, установленных вдоль прямой, проходящей через центры линз и называемой *главной оптической осью* или *главным оптическим лучом* [41].

На главной оптической оси расположены *передняя* S_1 и *задняя* S_2 *узловые точки* (рис. 3.4). Плоскости H_1 и H_2 , проходящие через узловые точки перпендикулярно к главной оптической оси, на которых и происходит преломление лучей, называются *главными плоскостями объектива*.

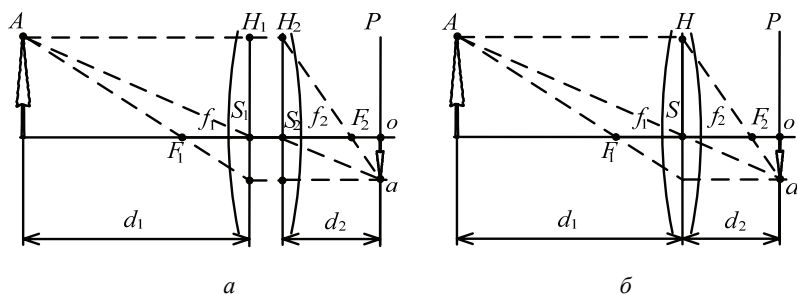


Рис. 3.4. Ход проецирующих лучей в объективе камеры:
 а – через переднюю и заднюю узловые точки объектива;
 б – при совмещении передней и задней узловых точек

Лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления пересекаются в точке, называемой *главным фокусом*. Таких точек две: *передний фокус* F_1 в пространстве предмета и *задний фокус* F_2 в пространстве изображения. Плоскости, проходящие через главные фокусы F_1 и F_2 перпендикулярно к главной оптической оси, называются *главными фокальными плоскостями*.

Расстояние между соответствующими передними и задними узловыми точками и точками фокуса называется *передним* f_1 и *задним* f_2 *фокусными расстояниями*. Плоскость, в которой получается резкое изображение фотографируемого объекта (P), называется *плоскостью изображения* или *фокальной плоскостью*. Пересечение главной оптической оси объектива с плоскостью изображения образует *главную точку снимка* (o).

Положение фокальной плоскости меняется в некоторых пределах в зависимости от расстояния между объективом и объектом, и при значительном удалении объекта от камеры фокальная плоскость проходит через задний фокус объектива. Расстояние от задней узловой точки объектива S_2 до плоскости изображения P называется *фокусным расстоянием объектива* и обозначается буквой f . С задней фокальной плоскостью объектива совмещается светочувствительный слой фотопластинки, фотопленки или цифровой матрицы.

Фактически проецирующие лучи входят в переднюю узловую точку S_1 , а выходят из задней узловой точки S_2 объектива, при этом входящий и выходящий лучи параллельны друг другу. Так как

расстояние между узловыми точками S_1 и S_2 объектива не влияет на ход проецирующих лучей, с геометрической точки зрения переднюю и заднюю узловые точки можно совместить в одну и считать ее центром проекции. В этом случае входящий и выходящий лучи будут представлять собой прямую линию. Совокупность лучей, при помощи которых получен снимок, называется *связкой*.

Основные элементы центральной проекции представлены на рис. 3.5 [41].

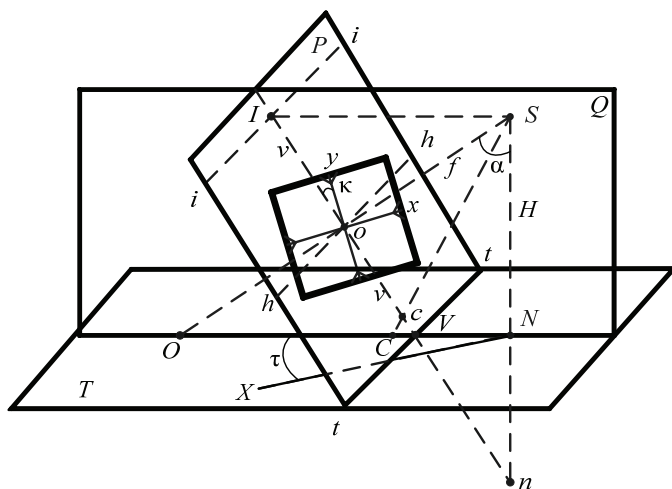


Рис. 3.5. Основные элементы центральной проекции

T – горизонтальная плоскость, проходящая через какую-либо точку объекта и называемая плоскостью основания или предметной плоскостью;

P – картинная плоскость, или плоскость снимка, т. е. плоскость, в которой получено изображение объекта;

S – центр проекции, или точка фотографирования, в которой находится передняя узловая точка объекта фотокамеры;

Q – плоскость главного вертикала – вертикальная плоскость, проходящая через главный луч;

SO – главный луч, или прямая, проходящая через центр проекции перпендикулярно к плоскости снимка;

o – главная точка снимка, или пересечение главного луча со снимком;

$So(f)$ – фокусное расстояние фотокамеры, т. е. расстояние от центра проекции до снимка;

$SN(H)$ – высота съемки, т. е. высота центра проекции относительно плоскости основания;

α – угол наклона снимка – это угол между главным лучом и отвесной линией, проходящей через центр проекции;

tt – линия основания, т. е. линия пересечения плоскости снимка с плоскостью основания;

n – точка надира – пересечение отвесной линии, проходящей через центр проекции, с плоскостью снимка;

N – точка в плоскости основания, соответствующая точке надира;

NO – линия направления съемки – пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью основания;

vv – главная вертикаль – пересечение плоскости главного вертикала с плоскостью снимка;

V – точка пересечения линии основания с главной вертикалью;

hh – главная горизонталь – прямая на снимке, проходящая через главную точку снимка перпендикулярно к главной вертикали (кроме главной на снимке имеются другие горизонталы, перпендикулярные главной вертикали h_1, h_2 и т. д.);

iSi – плоскость действительного горизонта – горизонтальная плоскость, проходящая через центр проекции;

ii – линия действительного горизонта – пересечение плоскости действительного горизонта с плоскостью снимка;

I – главная точка схода – пересечение линии действительного горизонта с главной вертикалью;

c – точка нулевых искажений – пересечение биссектрисы угла наклона снимка с плоскостью снимка;

C – точка в плоскости основания, соответствующая точке нулевых искажений.

Расстояния между важнейшими элементами центральной проекции можно определить по формулам:

$$on = -f \operatorname{tg} \alpha; \quad (3.1)$$

$$oc = -f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad (3.2)$$

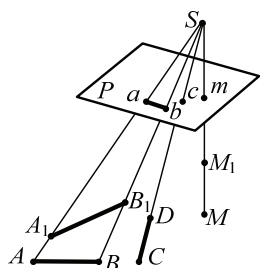


Рис. 3.6. Изображение на снимке точек и линий

$$oI = f \operatorname{ctg} \alpha; \quad (3.3)$$

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha}. \quad (3.4)$$

Основные элементы центральной проекции имеют уникальные свойства, определяющие закономерности построения изображений на снимке [41, 70, 53]. Так, любая точка местности M на снимке изображается точкой m (рис. 3.6). Любому точке снимка, например m , соответствует бесчисленное множество точек местности: M, M_1 и т. д.

Перспективным изображением любой прямой на местности, например AB , не проходящей через центр проекции, является прямая ab и притом единственная. В частном случае, когда продолжение прямой линии на местности проходит через центр проекции, например линия CD , изображение ее на снимке получается в виде точки c . Любому отрезку на снимке, например ab , соответствует бесчисленное число отрезков местности AB, A_1B_1 и т. д., поэтому описать пространственное положение точки с помощью одного снимка невозможно.

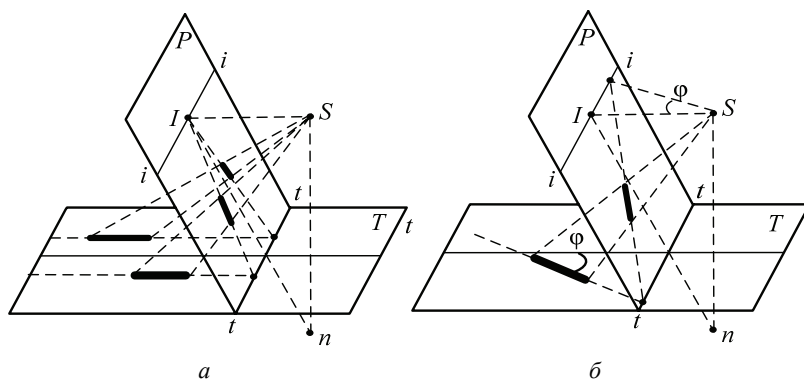


Рис. 3.7. Изображение на снимке горизонтальных линий:

a – параллельных направлению съемки;

$б$ – под углом к направлению съемки

Изображения двух взаимно параллельных прямых на местности сходятся на снимке в одной точке I , которая называется точкой схода. Любая система прямых линий, параллельных плоскости снимка, имеет точку схода в бесконечности. Все прямые, параллельные направлению съемки, соединяются в главной точке схода I (рис. 3.7). Если параллельные линии находятся в горизонтальной плоскости, то точка схода их изображений лежит на линии действительного горизонта.

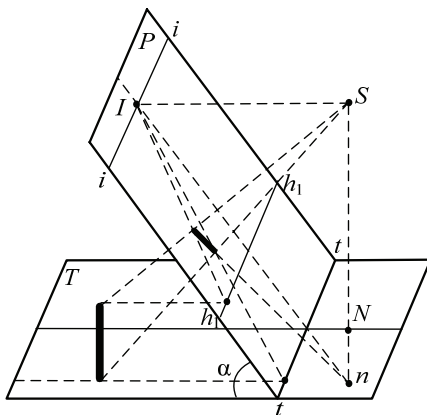


Рис. 3.8. Изображение на снимке вертикальных линий

Точка схода изображений горизонтальных прямых, перпендикулярных к направлению съемки, находится в бесконечности, так как луч, проходящий через центр проекции параллельно этим прямым, параллелен и снимку.

Точкой схода изображений вертикальных прямых служит точка надира n (рис. 3.8). Свойства главной точки схода и точки надира используются для построения перспективных изображений графическим путем.

Направления, проведенные из точки нулевых искажений к краям аэроснимка плоской местности, не искажаются, а значит и углы, вершины которых находятся в точке нулевых искажений, равны соответствующим углам на местности. Это свойство является основой формирования сети триангуляции.

3.1.3. Системы координат местности и снимка

При решении фотограмметрических задач используются различные пространственные и плоские системы координат: геоцентрическая правая, геодезическая левая и фотограмметрическая правая пространственные системы координат, а также плоская прямоугольная система координат снимка (рис. 3.9) [41].

Геоцентрическая система координат $O'_Г X'_Г Y'_Г Z'_Г$ применяется, как правило, если картографируемый участок имеет большую площадь и охватывает больше, чем одну шестиградусную зону. В ней за начало координат принят центр земного эллипсоида $O'_Г$, а плоскостью $X'_Г Y'_Г$ является плоскость экватора. Ось $X'_Г$ находится в плоскости начального меридиана, а ось $Z'_Г$ совмещена с полярной осью. Система координат правая, за фигуру Земли принимается эллипсоид вращения. Геодезические координаты любой точки можно найти по геоцентрическим координатам (и наоборот) с помощью формул сфероидической геодезии.

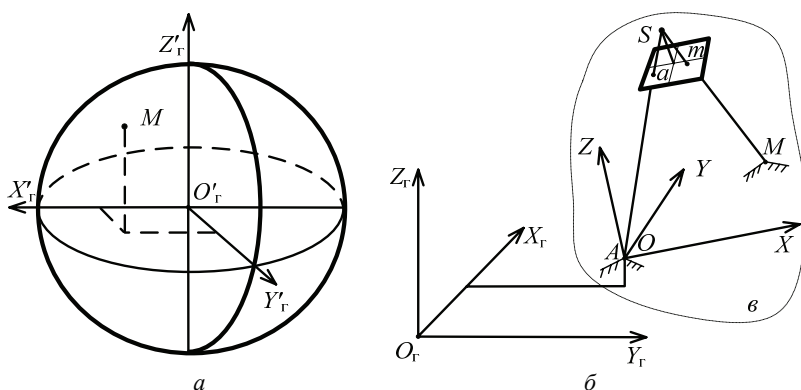


Рис. 3.9. Геоцентрическая (а), геодезическая (б) и фотограмметрическая (в) системы координат

При решении задач на сравнительно небольшом участке положение точки местности определяется в левой системе прямоугольных координат Гаусса $O_Г X_Г Y_Г Z_Г$, принятой в геодезии. Координаты точек местности, полученные по результатам измерения снимков, определяются, как правило, в правой фотограмметрической пространственной системе координат $OXYZ$ (рис. 3.9, в). Ее начало и направление координатных осей выбираются так, чтобы наиболее просто осуществлялся переход от координат точек снимка к координатам точек местности. Обычно начало координат O совмещается с точкой фотографирования S или с какой-либо точкой местности (например, с точкой A), плоскость XOY расположена горизонтально, а ось OX параллельно направлению съемки. Поскольку системы координат XYZ и $X_Г Y_Г Z_Г$

не совпадают, то при переходе от фотограмметрических координат к геодезическим необходимо выполнять преобразование координат.

На каждом снимке по углам (рис. 3.10, *а*) или на серединах сторон (рис. 3.10, *б*) имеется ряд меток, которые определяют плоскую прямоугольную систему координат снимка oxy .

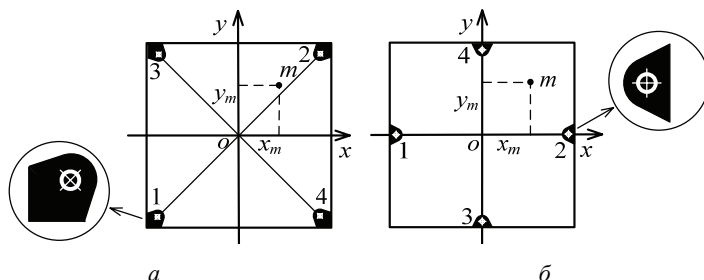


Рис. 3.10. Система координат снимка:
а – расположение меток по углам;
б – расположение меток по серединам сторон

Начало системы координат находится в точке o пересечения линий $1-2$ и $3-4$, а координатные оси x и y либо совпадают с линиями $1-2$ и $3-4$ (рис. 3.10, *б*), либо параллельны линиям $1-3$, $1-4$ (рис. 3.10, *а*). Положение точки m на снимке определяется координатами x_m и y_m . Связи между плоскими координатами точек снимка и пространственными координатами местности устанавливаются через элементы ориентирования снимка.

3.1.4. Элементы ориентирования аэроснимка

Элементами ориентирования снимка называются показатели, определяющие положение снимка (системы координат снимка) в момент съемки относительно выбранной пространственной прямоугольной системы координат местности. Различают элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка.

Элементы внутреннего ориентирования (рис. 3.11) позволяют найти положение центра проекции относительно системы координат снимка. К ним относятся координаты x_0 и y_0 главной точки и фокусное расстояние фотокамеры $f = So$. Зная элементы внутреннего ориентирования, можно восстановить связку проецирующих лучей

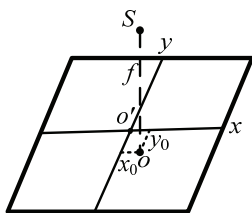


Рис. 3.11. Элементы внутреннего ориентирования

относительно снимка. В плоскости прикладной рамки имеются координатные метки, которые изображаются на каждом снимке и определяют его систему координат.

Прямые, соединяющие противоположные координатные метки, должны быть взаимно перпендикулярны, а точка их пересечения должна совпадать с главной точкой o снимка. Однако это условие выполняется не строго, поэтому для каждой камеры определяется смещение главной

точки o относительно начала системы координат снимка.

Элементы внешнего ориентирования (рис. 3.12) определяют положение связки проецирующих лучей и плоской прямоугольной системы координат снимка относительно пространственной прямоугольной системы координат местности. На практике для аэроснимков используют две системы элементов внешнего ориентирования.

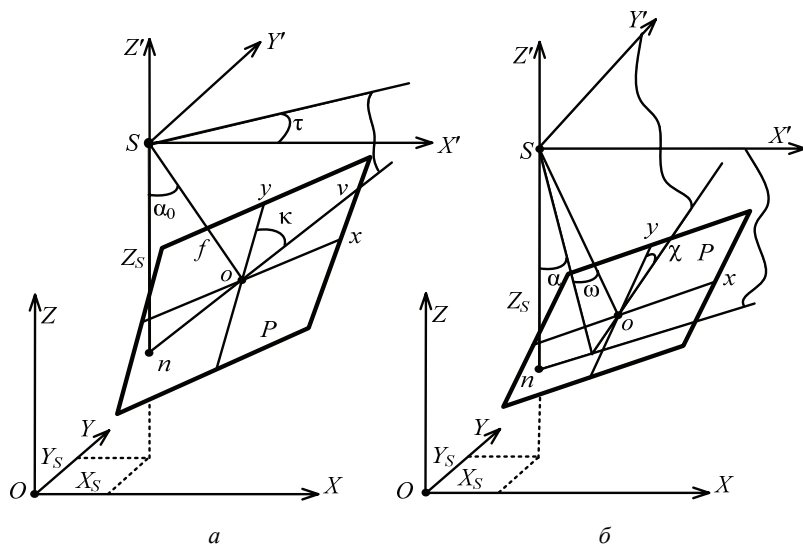


Рис. 3.12. Системы элементов внешнего ориентирования снимков:
а – первая; б – вторая

Первая система (рис. 3.12, *a*) содержит: X_S, Y_S, Z_S – координаты центра проекции S ; α_0 – угол наклона снимка или угол отклонения оптической оси фотокамеры от отвесной линии; τ – дирекционный угол оптической оси фотокамеры (угол между осью SX' и проекцией главного луча на плоскость $X'SY'$; κ – угол поворота снимка (угол между главной вертикалью v и осью ou). Оси X', Y' и Z' параллельны соответствующим осям системы координат $OXYZ$.

Вторая система элементов внешнего ориентирования (рис. 3.12, *б*) включает: X_S, Y_S, Z_S – координаты центра проекции S ; α – продольный угол наклона снимка (угол на снимке между осью SZ' и проекцией главного луча на плоскость $X'SZ'$); ω – поперечный угол наклона снимка (угол между главным лучом и плоскостью $X'SZ'$); χ – угол поворота снимка (угол на снимке между осью ou и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось SY').

Таким образом, положение снимка в пространстве однозначно определяется девятью элементами ориентирования – тремя внутренними (f, x_0, y_0) и шестью внешними (X_S, Y_S, Z_S , а также α, ω, χ или α_0, τ, κ).

3.1.5. Искажение изображения на снимке

Вследствие влияния различных факторов точки местности, изображенные на снимках, смещаются, и изображение искажается. Для выполнения фотограмметрических измерений, составления точных планово-картографических материалов необходимо знать причины и величину возникающих искажений. В целом все искажения можно условно разделить на две категории: искажения, возникающие из-за физических факторов (деформация фотоматериалов, неплотность прилегания пленки к прикладной рамке, дисторсия объектива, кривизна поверхности Земли, рефракция атмосферы, смаз изображения), и искажения, вызванные наклоном снимка и рельефом местности.

Деформацию фотоматериалов необходимо учитывать в тех случаях, когда ее влияние выходит за пределы допустимых ошибок измерения. Различают три вида деформации фотоматериала: равномерную, неравномерную, случайную [41, 50].

При равномерной деформации изображение изменяет свой масштаб по обеим координатным осям таким образом, что величины

углов не изменяются (изменяется только размер). Влияние равномерной деформации полностью устраняется с помощью преобразований координат точек по следующим формулам:

$$x' = a_0 + ax - by; \quad y' = b_0 + bx + ay, \quad (3.5)$$

где x' , y' – исправленные координаты точки снимка; a_0 , b_0 , a , b – коэффициенты.

Коэффициенты уравнений вычисляются на основе измеренных координат точки снимка (x , y) и координат меток или перекрестий контрольной сетки (x' , y'), в данном случае необходимо выполнить измерения как минимум двух точек.

Неравномерной называют деформацию, при которой возникают искажения положения точек, линий и величин углов между ними (квадрат может принять форму прямоугольника, ромба, параллелограмма). Для фотопленок характерна, главным образом, неравномерная деформация, характеризующаяся различием величин в продольном и поперечном направлениях.

Для учета неравномерной деформации фотоматериала применяются формулы:

$$x' = c_0 + c_1x + c_2y; \quad y' = d_0 + d_1x + d_2y \quad (3.6)$$

или

$$x' = k_0 + k_1x + k_2y + k_3xy; \quad y' = l_0 + l_1x + l_2y + l_3xy, \quad (3.7)$$

где c_0 , c_1 , c_2 , d_0 , d_1 , d_2 , k_0 , k_1 , k_2 , k_3 , l_0 , l_1 , l_2 , l_3 – коэффициенты уравнений.

В этом случае для вычисления коэффициентов необходимо измерить не менее трех точек с известными координатами. При наличии избыточного количества точек с известными координатами задача определения коэффициентов решается по способу наименьших квадратов.

Случайная деформация не подчиняется определенным законам, ее основной причиной является неоднородность строения материалов, поэтому ее учет очень сложен и на практике проще использовать материалы с минимальными величинами деформации, значения которых находятся в установленных допусках и не оказывают существенного влияния на измерения. Практически единственным способом косвенного учета случайной деформации является определение ее значений в фиксированных точках сетки крестов и линейная

интерполяция поправок. Такой способ нашел применение в современных цифровых фотограмметрических станциях.

Влияние ошибки выравнивания фотопленки в плоскости прикладной рамки фотокамеры показано на рис. 3.13, на котором a и a' – изображения точки объекта на поверхности эмульсионного слоя и плоскости прикладной рамки P ; b – основание перпендикуляра, опущенного из точки a на плоскость P прикладной рамки. Обозначив $oa' = r$, $ba' = \Delta r$, $ab = \Delta f$, можно определить величину искажения (радиус вектора точки снимка), обусловленное отклонением Δf поверхности пленки от плоскости прикладной рамки:

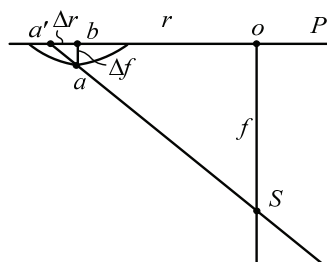


Рис. 3.13. Смещение точки снимка из-за неплотности прилегания пленки к плоскости прикладной рамки

$$\Delta r = \frac{r \Delta f}{f}. \quad (3.8)$$

Выравнивание фотопленки должно выполняться с высокой точностью, так как несложно подсчитать, что при $r = f = 100$ мм и $\Delta f = 10$ мкм искажение будет $\Delta r = 10$ мкм.

Влияние дисторсии объектива съемочной камеры проявляется в искривлении проецирующего луча и смещении точек изображения. До сих пор мы считали, что объектив дает идеальное, строго подобное (ортоскопическое) изображение объекта, расположенного в плоскости, перпендикулярной к оптической оси. В реальном объективе ортоскопия может быть нарушена, и такое нарушение называется дисторсией объектива (рис. 3.14). Лучшие современные объективы дают дисторсию порядка 2 мкм [50].

Различают дисторсию центрированного объектива и не центрированного. Дисторсия центрированного объектива вызывает смещение точек в радиальном направлении, проходящем через главную точку снимка. Дисторсия, возникающая вследствие погрешностей центровки объектива, состоит из радиальной дисторсии и тангенциальной, направленной перпендикулярно

радиальной. Под влиянием дисторсии построенное объективом изображение отличается от центральной проекции, поэтому дисторсия должна обязательно учитываться. Устранение ее выполняется, как правило, с использованием полиномов различных степеней. Для этого строится специальная контрольная сетка квадратов с известными размерами. Сетка фотографируется, затем вычисляются координаты точек и определяются их смещения, по которым рассчитываются параметры уравнений. Дисторсия каждого объектива, используемого для проведения топографической аэросъемки, определяется его производителем и указывается в технических параметрах.

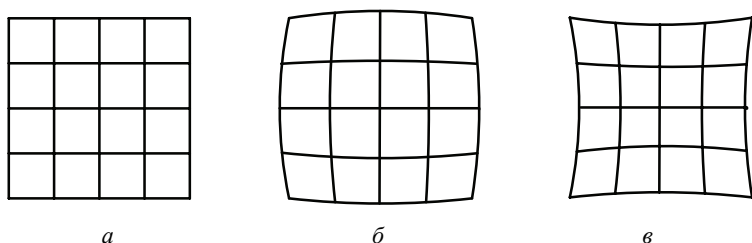


Рис. 3.14. Контрольная сетка для определения дисторсии объектива (а); искажение изображения при бочкообразной (б) и подушкообразной (в) дисторсии объектива

Влияние кривизны Земли связано с тем, что земная поверхность не является плоскостью. При решении некоторых фотограмметрических задач, например при проведении крупномасштабных съемок с воздушных летательных аппаратов со сравнительно небольших высот, влияние кривизны Земли незначительно и его можно не учитывать. Однако при использовании материалов космической съемки, особенно выполненной широкоугольными объективами, искажения, вызванные кривизной Земли, достаточно велики (рис. 3.15).

Смещение точки на снимке из-за кривизны Земли можно определить по формуле

$$\Delta r = \frac{Hr^3}{2Rf^2}. \quad (3.9)$$

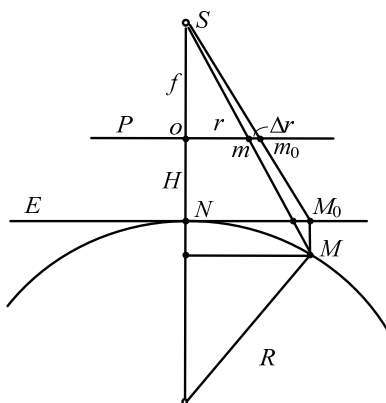


Рис. 3.15. Смещение точки снимка, вызванное кривизной Земли

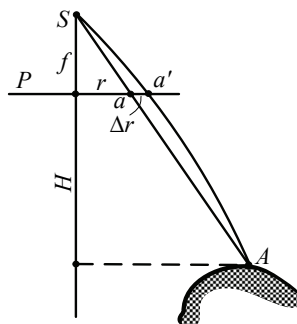


Рис. 3.16. Смещение точки снимка, вызванное рефракцией атмосферы

Смещение точки снимка, вызванное кривизной Земли, направлено к центру снимка и приводит к уменьшению радиуса-вектора r .

Влияние атмосферной рефракции связано с изменением плотности воздуха и, следовательно, показателя преломления. По этой причине световой луч, идущий от точки A к центру проекции S (рис. 3.16), искривляется, что приводит к смещению изображения точки a в радиальном направлении от центра проекции, т. е. увеличению радиуса-вектора.

Сравнивая два последних вида искажений, можно отметить, что рефракция частично компенсирует смещение точек, вызванное кривизной Земли.

Линейные и угловые перемещения камеры при открытом затворе вызывают искажения, называемые сдвигом или смазом. Пусть точка A местности (рис. 3.17) в начале открытия затвора изобразилась в точке a снимка P . За время t при открытом затворе самолет пролетел расстояние L и в конце выдержки точка A изобразилась в точке a'

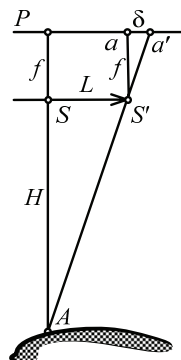


Рис. 3.17. Смещение точек снимка, вызванное перемещением камеры при открытом затворе

того же снимка. Следовательно, точка A местности отобразилась на снимке отрезком $aa' = \delta$, называемого сдвигом изображения, который можно определить по формуле

$$\delta = \frac{fL}{H} = \frac{twf}{H}, \quad (3.10)$$

где δ – сдвиг (смаз) изображения; t – время выдержки; w – путевая скорость самолета.

Сдвиг и колебания камеры оказывают большое влияние на резкость изображения, поэтому применяют камеры с большой скоростью затвора и самолеты с малой путевой скоростью, а сами камеры устанавливаются на гироскопической платформе.

3.1.6. Масштаб снимка

Масштаб горизонтального снимка плоской местности постоянен по всей площади снимка и определяется по формуле

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}. \quad (3.11)$$

Поэтому горизонтальный снимок можно считать ортогонально уменьшенной проекцией (планом) плоской местности. У наклонного снимка в разных частях масштаб различается, поэтому изображение наклонного снимка искажено.

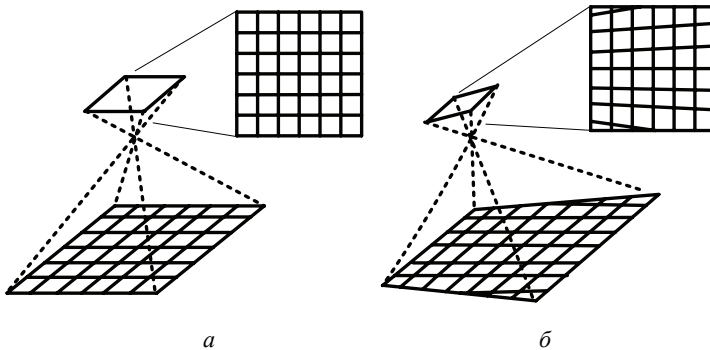


Рис. 3.18. Изображение сетки квадратов горизонтального (a) и наклонного (b) снимков

Масштаб наклонного снимка имеет различные значения не только в разных точках снимка, но и при изменении направления из одной и той же точки. Поэтому для определения масштаба снимка в какой-либо точке (рис. 3.19), например в точке m , по направлению φ следует взять отношение бесконечно малого отрезка, исходящего из этой точки в данном направлении, к соответствующему отрезку на местности:

$$\frac{1}{m} = \frac{dl}{dL} = \frac{dx}{\cos \varphi \sqrt{dX^2 + dY^2}}. \quad (3.12)$$

Формула для определения масштаба в произвольной точке снимка по произвольному направлению имеет следующий вид:

$$\frac{1}{m} = \frac{fk^2}{H \sqrt{\sin^2 \varphi + (k \cos \varphi + p \sin \varphi)^2}}, \quad (3.13)$$

где φ – угол, отсчитываемый от главной горизонтали снимка; $k = \cos \alpha_0 - \frac{y}{f} \sin \alpha_0$, $p = \frac{x}{f} \sin \alpha_0$; α_0 – угол наклона снимка (рис. 3.12); x, y – координаты точки снимка, когда оси x и y системы координат совмещены с главной горизонталью и главной вертикалью снимка [41].

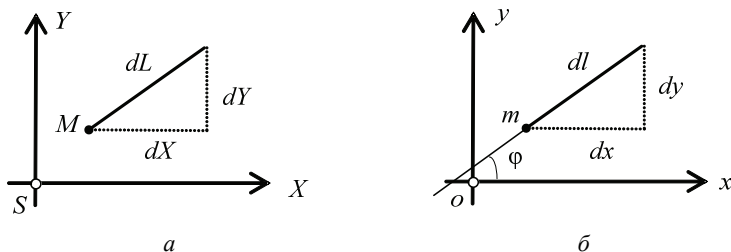


Рис. 3.19. Определение масштаба в любой точке по заданному направлению:
а – линия на местности; б – линия на снимке

Данное равенство показывает, что масштаб снимка зависит от фокусного расстояния объектива, высоты фотографирования, угла наклона снимка, положения точки на снимке (координаты x и y), где

взят элемент dl , и от направления φ этого элемента относительно линии главного вертикала. Масштаб на горизонтали, проходящей через точку нулевых искажений, равен масштабу горизонтального снимка, поэтому ее называют линией неискаженных масштабов.

Угол наклона планового снимка небольшой и не превышает 3° . Если определить масштаб на двух симметричных относительно центра снимка горизонталях, то среднеарифметическое значение можно считать средним масштабом снимка. Однако при выполнении измерений по снимкам с использованием среднего масштаба необходимо соблюдать осторожность, так как это может привести к значительным ошибкам.

3.17. Смещения точек, вызванные наклоном снимка и рельефом местности

Как уже отмечалось выше, на наклонных снимках имеются искажения, проявляющиеся в смещении точек относительно их положения на горизонтальном снимке, вызванные разномасштабностью наклонного снимка. Все искажения можно разделить на линейные и угловые.

Если наклонный снимок P повернуть вокруг линии неискаженных масштабов, на которой находится точка нулевых искажений s , и совместить с горизонтальным снимком P' (рис. 3.20), то точки m и m_0 окажутся лежащими на одной линии, проведенной из точки s , но на различном расстоянии от нее (рис. 3.21). Такие смещения называются линейными. Величина линейного смещения определяется по формуле

$$\delta r = -\frac{r^2 \sin \varphi \sin \alpha_0}{f - r \sin \varphi \sin \alpha_0}, \quad (3.14)$$

где $\delta r = mm_0$ – смещение точки; $r = sm$ – расстояние от точки нулевых искажений до произвольной точки на снимке; φ – угол между линией неискаженных масштабов и направлением на точку; α_0 – угол наклона снимка [41].

Формула является строгой и применима для любых снимков. Для плановых снимков она может быть несколько упрощена:

$$\delta r \approx -\frac{r^2 \sin \varphi}{f} \alpha_0. \quad (3.15)$$

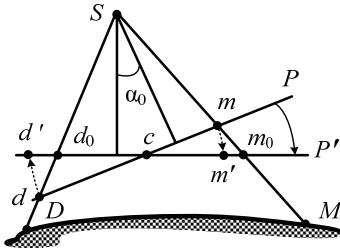


Рис. 3.20. Схема смещения точки снимка, вызванного его наклоном

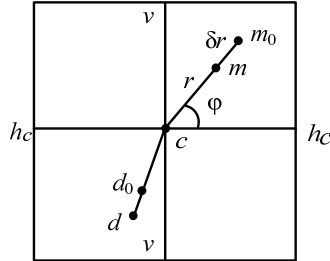


Рис. 3.21. Линейное смещение точки снимка, вызванное его наклоном

Линейные смещения точек вызывают в свою очередь угловые искажения. На рис. 3.21 видно, что если вершиной горизонтальных углов будет точка нулевых искажений, то они не искажаются.

Предположим, что на линии неискаженных масштабов находится точка d . Так как точки на линии неискаженных масштабов не смещаются, то очевидно (рис. 3.22), что направление на точку m не совпадает с направлением на точку m_0 на угол $\delta\psi = \psi - \psi_0$, где ψ — угол на наклонном снимке, а ψ_0 — на горизонтальном.

Этот угол и называют искажением горизонтального направления на наклонном снимке.

Так как горизонтальный снимок плоской местности является ее ортогональной проекцией, то горизонтальные углы на них совпадают. Связь между горизонтальным углом местности и наклонного снимка отражается в общем случае формулой

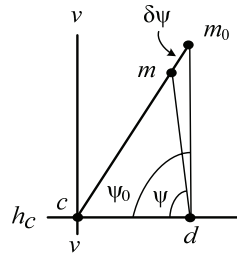


Рис. 3.22. Угловое смещение точки снимка

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = - \frac{f \operatorname{tg} \varphi}{f \cos \alpha_0 + (x \operatorname{tg} \varphi - y) \sin \alpha_0}. \quad (3.16)$$

Полученная формула является строгой, пригодной для установления связи между углами в пространстве объекта (φ_0) и аэроснимка (φ),

при любых углах наклона (α_0), когда координаты их вершин (x, y) заданы в системе координат oxu . Начало этой системы совмещено с главной точкой снимка, ось абсцисс ox – с главной горизонталью, а ось ординат ou – с главной вертикалью. Формула (3.16) подтверждает, что на горизонтальном снимке равнинной местности ($\alpha_0 = 0$) угловых искажений нет ($\text{tg } \varphi_0 = \text{tg } \varphi$). Направления не искажаются, если вершина угла находится в точке нулевых искажений, также не искажены и направления по горизонтали ($\varphi = 0^\circ$) и вертикали ($\varphi = 90^\circ$). Направления, проходящие под углом 45° , имеют максимальные искажения.

Рельеф местности также вызывает смещение точек снимка по направлениям, проходящим через точку надира n , в которой сходятся изображения отвесных прямых. Пусть на местности находится вертикальный объект, точка A_0 находится у его основания, а точка A – у вершины (рис. 3.23).

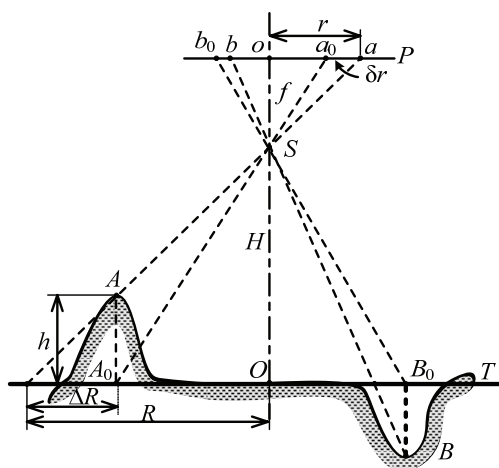


Рис. 3.23. Смещения точек, вызванные рельефом местности

Проекции точек A и A_0 на снимке (соответственно точки a и a_0) будут смещены друг относительно друга на расстояние $aa_0 = \delta r$. При этом проекции точек, находящихся на местности выше, всегда смещаются в радиальном направлении от точки надира.

Предположим, что снимок является горизонтальным. В этом случае из подобия треугольников можно записать

$$\frac{h}{H} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\delta r}{r},$$

отсюда

$$\delta r = \frac{hr}{H}. \quad (3.17)$$

Анализ формулы показывает, что чем дальше находится проекция точки от точки надира и чем больше разность высот между точками на местности, тем больше величина смещения между их проекциями.

На основании вышеизложенного можно заключить, что наклон снимка и рельеф местности вызывают линейные и угловые смещения на снимке, что приводит к ошибкам измерений на одиночном снимке. Искажения проекции равнинной местности на плановых снимках незначительные, и в некоторых случаях ими можно пренебречь.

3.1.8. Преобразование плоских координат точки снимка в пространственные

Для решения фотограмметрических задач необходимо найти зависимости между плоскими и пространственными координатами точки снимка. Эти взаимосвязи можно установить, если известны элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка [41].

Так как преобразования между различными системами координат выполняются достаточно просто, для нахождения зависимости между плоскими и пространственными координатами точки снимка введем промежуточную систему координат $Sxyz$, ось z которой совпадает с главным оптическим лучом, а оси x и y – параллельны соответствующим осям системы координат снимка (рис. 3.24).

В этом случае координаты x и y любой точки снимка в пространственной системе имеют те же значения, что и в плоской, а координата z для всех точек постоянна и равна фокусному расстоянию снимка ($z = -f$). Пространственная $SX'Y'Z'$ и вспомогательная $Sxyz$ системы координат (рис. 3.25) имеют

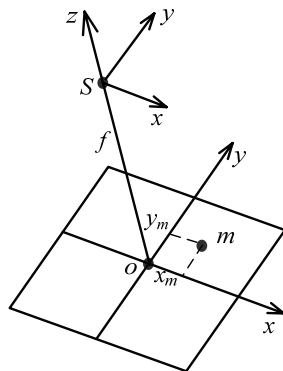


Рис. 3.24. Промежуточная система координат

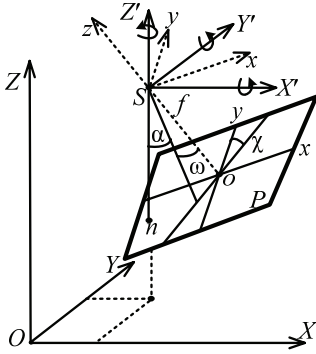


Рис. 3.25. Преобразование между пространственной и промежуточной системами координат

общее начало и для преобразования координат из одной системы в другую необходимо выполнить их повороты вокруг осей X' , Y' , Z' .

Используя известные в аналитической геометрии формулы, получим систему уравнений преобразования координат:

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1x + a_2y - a_3f, \\ Y' &= b_1x + b_2y - b_3f, \\ Z' &= c_1x + c_2y - c_3f, \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

где a_1, a_2, a_3 – косинусы углов поворота вспомогательной системы координат $Sxyz$ вокруг оси X' ; b_1, b_2, b_3 – косинусы углов поворота вспомогательной системы координат $Sxyz$ вокруг оси Y' ; c_1, c_2, c_3 – косинусы углов поворота вспомогательной системы координат $Sxyz$ вокруг оси Z' ; $f = So$ – фокусное расстояние.

Косинусы углов поворота, входящие в формулы преобразования координат, называются направляющими косинусами. Они связаны между собой шестью независимыми уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1, & a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 &= 0, \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1, & b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 &= 0, \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1, & c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Из девяти косинусов независимы только три, т. е. девять косинусов зависят от трех параметров. Если координаты главной точки снимка не равны нулю (рис. 3.11), то формулы (3.18) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} X' &= a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f, \\ Y' &= b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f, \\ Z' &= c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f, \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

где x_0 и y_0 – координаты главной точки снимка.

Таким образом, можно перейти от плоских координат точки снимка к пространственным. Формулы для обратного преобразования имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= a_1 X' + b_1 Y' + c_1 Z', \\ y - y_0 &= a_2 X' + b_2 Y' + c_2 Z', \\ z &= a_3 X' + b_3 Y' + c_3 Z'. \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Для получения формул, выражающих девять направляющих косинусов, необходимо выполнить повороты вспомогательной системы координат S_{xyz} вокруг осей X' , Y' и Z' на углы α , ω и χ таким образом, чтобы оси обеих систем координат совместились.

Преобразования координат (3.20) определяет квадратная матрица, составленная из направляющих косинусов соответствующих углов поворотов вокруг осей и называемая матрицей преобразования координат:

$$A = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{vmatrix}. \quad (3.22)$$

В результате замены элементов матрицы соответствующими углами получатся три матрицы поворотов:

$$A_\alpha = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{vmatrix}; \quad (3.23)$$

$$A_\omega = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{vmatrix}; \quad (3.24)$$

$$A_\chi = \begin{vmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (3.25)$$

Выполнив последовательное перемножение составленных выше матриц, т. е. умножив матрицу A_α на матрицу A_ω , а затем полученную матрицу $A_\alpha A_\omega$ на матрицу A_χ , находим итоговую, элементами которой являются управляющие косинусы:

$$A = \begin{vmatrix} (\cos \alpha \cos \chi - & (-\cos \alpha \sin \chi - & -\sin \alpha \cos \omega \\ -\sin \alpha \sin \omega \sin \chi) & -\sin \alpha \sin \omega \cos \chi) & \\ \cos \omega \sin \chi & \cos \omega \cos \chi & -\sin \omega \\ (\sin \alpha \cos \chi + & (-\sin \alpha \sin \chi + & \cos \alpha \cos \omega \\ +\cos \alpha \sin \omega \sin \chi) & +\cos \alpha \sin \omega \cos \chi) & \end{vmatrix}. \quad (3.26)$$

Сопоставив полученную матрицу A с уравнением (3.22) и подставив в него соответствующие значения, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \omega \sin \chi, \\ a_2 &= -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi, \\ a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega, \\ b_1 &= \cos \omega \sin \chi, \\ b_2 &= \cos \omega \cos \chi, \\ b_3 &= -\sin \omega, \\ c_1 &= \sin \alpha \cos \chi + \cos \alpha \sin \omega \sin \chi, \\ c_2 &= -\sin \alpha \sin \chi + \cos \alpha \sin \omega \cos \chi, \\ c_3 &= \cos \alpha \cos \omega. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Таким образом, направляющие косинусы зависят от трех угловых элементов внешнего ориентирования снимка (α , ω , χ) и являются координатами единичных векторов, определяющих взаимное положение систем координат: $Sxyz$ и $SX'Y'Z'$.

Подставив управляющие косинусы в формулы (3.20), получим уравнения зависимости пространственных координат точки снимка от плоских, подставив их в уравнение (3.21), получим обратную зависимость.

Аналогичным способом можно получить управляющие косинусы для угловых элементов внешнего ориентирования α_0 , τ , κ :

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \tau \cos \alpha_0 \cos \kappa - \sin \tau \sin \kappa, \\ a_2 &= -\cos \tau \cos \alpha_0 \sin \kappa - \sin \tau \cos \kappa, \\ a_3 &= -\cos \tau \sin \alpha_0, \\ b_1 &= \sin \tau \cos \alpha_0 \cos \kappa + \cos \tau \sin \kappa, \\ b_2 &= -\sin \tau \cos \alpha_0 \sin \kappa + \cos \tau \cos \kappa, \\ b_3 &= -\sin \tau \sin \alpha_0, \\ c_1 &= \sin \alpha_0 \cos \kappa, \\ c_2 &= -\sin \alpha_0 \sin \kappa, \\ c_3 &= \cos \alpha_0. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Приведенные выше формулы являются строгими и их можно применять при любых величинах угловых элементов внешнего ориентирования. Однако угловые элементы внешнего ориентирования плановых снимков величины малые, так как при проведении плановой съемки главная оптическая ось камеры находится приблизительно в положении, близком к вертикальному, а угол поворота снимка вокруг оси Z' не превышает 5° . Поэтому для планового снимка можно применять более простые формулы направляющих косинусов:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 1 - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}\chi^2, & b_1 &= \chi, & c_1 &= \alpha + \omega\chi, \\ a_2 &= -\chi - \alpha\omega, & b_2 &= 1 - \frac{1}{2}\omega^2 - \frac{1}{2}\chi^2, & c_2 &= \omega - \alpha\chi, \\ a_3 &= -\alpha, & b_3 &= -\omega, & c_3 &= 1 - \frac{1}{2}\alpha^2 - \frac{1}{2}\omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

3.1.9. Преобразование координат соответствующих точек местности и снимка

Пусть точка S является центром проекции для снимка P (рис. 3.26), на котором изображена точка m , соответствующая точке M местности. Необходимо установить зависимость между координатами данных точек.

Положение центра проекции S относительно центра O пространственной системы координат $OXYZ$ определяют координаты

X_S, Y_S, Z_S или вектор $\bar{R}_S$, положение любой точки местности M относительно центра O – координаты X, Y, Z или вектор $\bar{R}$. Положение соответствующей точки снимка m относительно центра S системы координат $SX'Y'Z'$ определяют координаты X', Y', Z' или вектор $\bar{R}'$, а точки местности M относительно центра S – вектор $\bar{R}_M$.

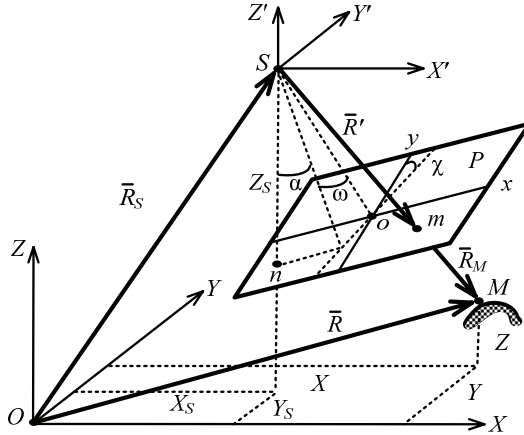


Рис. 3.26. Взаимосвязь между соответствующими точками местности и наклонного снимка

Векторы $\bar{R}'$ и $\bar{R}_M$ коллинеарны, поэтому можно записать:

$$\bar{R}' = C\bar{R}_M = C(\bar{R} - \bar{R}_S). \quad (3.30)$$

Вместо векторного равенства запишем координатные:

$$\left. \begin{aligned} X' &= C(X - X_S), \\ Y' &= C(Y - Y_S), \\ Z' &= C(Z - Z_S). \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

Откуда

$$\left. \begin{aligned} X - X_S &= (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'}, \\ Y - Y_S &= (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'}. \end{aligned} \right\} \quad (3.32)$$

Подставив в эти выражения формулы (3.20), получим уравнения связи пространственных координат местности и плоских координат снимка:

$$\left. \begin{aligned} X - X_S &= (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'} = (Z - Z_S) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ Y - Y_S &= (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'} = (Z - Z_S) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

Данные равенства показывают, что для каждой точки снимка можно составить два уравнения с тремя неизвестными координатами точки местности. Отсюда следует, что данных одного снимка недостаточно для определения координат точки местности. По одиночному снимку их можно найти лишь в частном случае, когда известна высота фотографирования $H = Z_S - Z$. Анализируя выражения (3.33), можно заключить, что координаты точки местности зависят от координат ее изображения на снимке и от элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимка [41]. Формулы обратных преобразований имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

Приведенные формулы являются строгими, их можно применять при любых величинах угловых элементов внешнего ориентирования. В частных случаях формулы упрощаются, так, например, для горизонтального снимка (при $X_S = Y_S = Z_S = x_0 = y_0 = 0$, $\alpha = \omega = \chi = 0$) они приобретут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= H \frac{x}{f}, & Y &= H \frac{y}{f}, \\ x &= f \frac{X}{H}, & y &= f \frac{Y}{H}, \\ H &= -Z, \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

3.1.10. Преобразования между координатами соответствующих точек наклонного и горизонтального снимков

Как было показано выше, фотограмметрические задачи наиболее просто решаются по горизонтальным снимкам. При современном оборудовании получить такой снимок невозможно, но можно от координат точек, измеренных на наклонном снимке, легко перейти к координатам соответствующих точек горизонтального снимка (рис. 3.27).

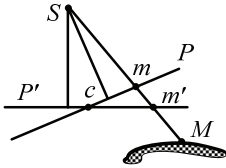


Рис. 3.27. Преобразование координат соответствующих точек наклонного и горизонтального снимков

В фотограмметрии этот процесс называется трансформированием координат. Пусть x' и y' – координаты точки m' – изображения точки местности M на горизонтальном снимке P' , а x и y – координаты точки m – изображения той же точки местности на наклонном снимке P . Используя уравнения (3.33), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} X - X_s &= -(Z - Z_s) \frac{x'}{f} = (Z - Z_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ Y - Y_s &= -(Z - Z_s) \frac{y'}{f} = (Z - Z_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}. \end{aligned} \right\} \quad (3.36)$$

Выразив координаты x' y' , получим

$$\left. \begin{aligned} x' &= -f \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \\ y' &= -f \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}. \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

Эти формулы пригодны при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования наклонного снимка.

3.1.11. Определение элементов ориентирования снимка

Для решения фотограмметрических задач часто используется метод прямой фотограмметрической засечки, который подразумевает определение координат точек местности по элементам

ориентирования снимка. Элементы внутреннего ориентирования измеряются с высокой точностью при калибровке и приводятся в техническом паспорте съемочной камеры.

Элементы внешнего ориентирования снимка определяются различными способами, которые можно разделить на две группы.

К первой группе относятся способы определения элементов внешнего ориентирования снимков в полете с помощью GPS/IMU-систем. Координаты центров проекций определяют с помощью GPS-приемника, установленного на борту летательного аппарата, а угловые элементы внешнего ориентирования – с помощью инерционных систем навигации.

Если оборудование для непосредственного геопозиционирования в воздухе отсутствует, используются способы второй группы, позволяющие определять элементы внешнего ориентирования снимков по опорным точкам. *Опорными точками* (опознаками) называют точки с известными геодезическими координатами, которые могут быть: плановыми – если известны только плановые координаты (X , Y); высотными – с известной высотной координатой (Z); планово-высотными – с тремя известными координатами (X , Y , Z).

Определение элементов внешнего ориентирования по опорным точкам является одним из наиболее распространенных способов. Такая задача называется обратной пространственной фотограмметрической засечкой и решается аналитическими методами в камеральных условиях. Для ее решения требуется наличие на каждый снимок четырех точек, расположенных по углам рабочей площади. Пятая точка располагается в центре снимка и используется для контроля. Опорные или трансформационные точки определяют в ходе полевых геодезических работ или в камеральных условиях в процессе построения фототриангуляционных сетей. В отдельных случаях их координаты могут быть определены по топографическим картам.

Способы определения элементов внешнего ориентирования снимков по опорным точкам можно разделить на две подгруппы. К первой подгруппе относятся способы, позволяющие в результате решения уравнений непосредственно получить неизвестные элементы. Ко второй подгруппе – способы, в которых предполагается, что приближенные значения элементов внешнего ориентирования известны, а находят поправки к этим значениям в результате решения

уравнений. Способы второй подгруппы легко допускают применение метода наименьших квадратов, что имеет существенное значение, особенно для оценки точности определения элементов, поэтому нашли более широкое распространение.

3.2. Геометрические свойства пары аэроснимков

Как было установлено ранее, для определения пространственного положения точек данных измерений одного снимка недостаточно. Для равнинной местности можно определить плановые координаты точек при заданной высоте фотографирования, при выраженном рельефе плановые координаты также искажаются. Точное определение пространственного положения точек возможно только по результатам измерений пары снимков.

Раздел фотограмметрии, изучающий методы измерений пространственных положения, размеров и формы объектов по фотографическим изображениям пары снимков, называется стереофотограмметрией. Ее методы находят применение для решения широкого круга самых разнообразных задач, в том числе оценки таксационно-дешифровочных показателей древостоев.

3.2.1. Стереоскопическое зрение, стереоскопический эффект

Глаз человека является сложным оптическим устройством, позволяющим нам воспринимать большую часть информации об окружающем мире. Форма глаза близка к сфере диаметром около 22–24 мм.

Периферийная часть глаза состоит из трех оболочек (рис. 3.28). Наружная оболочка, переходящая в передней части в тонкую прозрачную роговицу, называется склерой. Под ней находится сосудистая оболочка, переходящая в непрозрачную радужную оболочку, имеющую красящие вещества, определяющие цвет глаз. Внутри радужной оболочки находится зрачок – отверстие с изменяющимся диаметром, который регулирует количество поступающих в глаз световых лучей.

Внутренняя оболочка называется сетчаткой и состоит из большого числа светочувствительных элементов – колбочек и палочек.

Колбочки чувствительны к дневному, яркому свету и способны воспринимать цвет, а палочки – к слабому, сумеречному освещению. Внутренняя часть глаза заполнена водянистым веществом, называемым стекловидным телом.

В месте присоединения зрительного нерва светочувствительные клетки отсутствуют, поэтому оно носит название слепого пятна. В середине сетчатки напротив зрачка находится желтое пятно, центральное углубление которого состоит из одних колбочек и является наиболее чувствительной частью сетчатки. Луч, проходящий через центр впадины желтого пятна и заднюю узловую точку оптической системы глаза, называется зрительной осью глаза [11, 22, 53, 70].

За зрачком расположен хрусталик, представляющий собой двояковыпуклую линзу и фокусирующий изображение на сетчатке путем изменения своей кривизны за счет сокращения глазных мышц, которое происходит рефлекторно и называется *аккомодацией*.

Зрение одним глазом, при котором окружающие предметы выглядят плоскими, называется *монокулярным*. Поле зрения неподвижного глаза составляет около 150° по горизонтали и 120° по вертикали. В разных частях изображение воспринимается с различной четкостью, лучше видны предметы, проецирующиеся на центральную ямку сетчатки, поэтому наблюдатель подсознательно устанавливает глаз так, чтобы изображение рассматриваемого объекта находилось на ней. Угол отчетливого зрения человека составляет лишь около $1,5^\circ$. Пересечение зрительной оси с рассматриваемым объектом называется точкой фиксации монокулярного зрения.

Минимальный угол, под которым глаз видит раздельно две точки, определяет остроту монокулярного зрения первого рода. Для большинства людей этот угол равен $45''$. Минимальный угол, под которым еще видны раздельно две параллельные линии, определяет

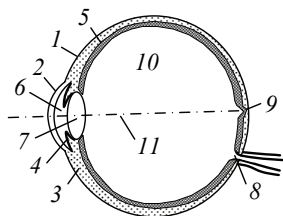


Рис. 3.28. Строение глаза человека:

- 1 – склера; 2 – роговица;
- 3 – сосудистая оболочка;
- 4 – радужная оболочка;
- 5 – сетчатка; 6 – зрачок;
- 7 – хрусталик; 8 – слепое пятно; 9 – желтое пятно;
- 10 – стекловидное тело;
- 11 – зрительная ось глаза

остроту монокулярного зрения второго рода. Острота зрения выше при наблюдении линий, так как изображение формируется на группе клеток сетчатки и угол составляет около $20''$. Острота зрения во многом зависит от освещенности, формы объектов, контрастности, особенностей зрения наблюдателя и других факторов, поэтому ее величина варьирует в больших пределах [41].

Воспринимать расстояние до наблюдаемых предметов при монокулярном зрении можно лишь по косвенным признакам, например, если один предмет частично закрывает другой, по размерам объектов и т. д. Однако косвенные признаки иногда дают неверное представление о расстоянии и могут привести к значительным ошибкам.

Зрение двумя глазами называется *бинокулярным*. При наблюдении двумя глазами можно ощущать пространственное положение и объем. Точка пересечения зрительных осей глаз F называется точкой фиксации бинокулярного взора, при этом оба глаза наблюдателя расположены так, что изображение точки фиксации находятся в центральных ямках (рис. 3.29).

Расстояние между центрами зрачков глаз называется глазным базисом, который у большинства людей составляет в среднем около 65 мм. Изображения одной и той же точки предмета, полученные на сетчатках обоих глаз, называются соответственными точкам, а лучи, строящие эти изображения – соответственными лучами. Любая пара соответственных лучей находится в одной плоскости, которая проходит через глазной базис и называется зрительной плоскостью. Плоскость, в которой лежат зрительные оси обоих глаз, называется главной зрительной плоскостью.

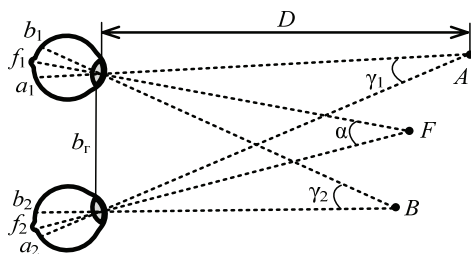


Рис. 3.29. Бинокулярное зрение:

F – точка фиксации бинокулярного взора; α – угол конвергенции;
 γ_1, γ_2 – параллактические углы; b_r – глазной базис

Угол между зрительными осями глаз называется углом конвергенции, а угол между парой соответственных лучей – параллактическим углом. Эти углы для нормального зрения малы, особенно при наблюдении удаленных объектов. Если точка находится на расстоянии наилучшего зрения (25 см), то угол конвергенции будет приблизительно равен 15° .

Конвергенция зрительных осей физиологически связана с аккомодацией: определенное состояние аккомодации стремится вызвать соответствующий угол сведения зрительных осей и, наоборот, тому или иному углу конвергенции соответствует определенная степень аккомодации. Однако связь между конвергенцией и аккомодацией при определенных тренировках можно преодолеть, что позволяет получить стереоскопический эффект по снимкам без специальных приспособлений.

Острота бинокулярного зрения первого рода определяется разностью параллактических углов, при которой наблюдатель видит две отдельные точки, и составляет для большинства людей $\Delta\gamma > 30''$. Острота бинокулярного зрения второго рода, когда наблюдатель еще видит две отдельные линии, составляет $\Delta\gamma > 10''$ [41, 50].

Объемный эффект, возникающий при наблюдении объектов двумя глазами, называют естественным стереоэффектом, а бинокулярное зрение, при котором ощущается стереоэффект, называют стереоскопическим. Стереоскопический эффект возникает вследствие того, что глаза находятся на некотором расстоянии друг от друга, и каждый глаз видит изображение объекта по-разному.

Основным фактором оценки глубины является *физиологический параллакс*, представляющий собой разность дуг, определяющих положение пары соответственных точек на сетчатке $\eta_A = f_1 a_1 - f_2 a_2$ (рис. 3.30).

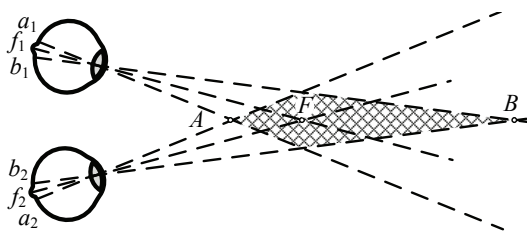


Рис. 3.30. Область отчетливого стереоскопического зрения

Физиологический параллакс точки фиксации всегда равен нулю, поскольку ее изображение строится в центральной ямке. Наблюдаемая точка находится дальше точки фиксации при $\eta < 0$, и ближе – при $\eta > 0$. Эти различия и позволяют судить о различном пространственном положении отдельных частей наблюдаемого объекта.

Таким образом, оценка расстояний выполняется на основе ощущения смещения одной части изображения относительно другой. Способность ощущения разности физиологического параллакса у человека чрезвычайно развита и позволяет фиксировать ничтожные смещения одной части изображения относительно другой.

При фиксации взора на какой-либо точке мы видим отчетливо не все пространство перед и за точкой фиксации, а лишь какую-то его часть. Как показали исследования, точки рассматриваемого объекта сливаются и образуют единое пространственное изображение, если их параллактические углы не превышают угла конвергенции более чем на $70'$, т. е. соответственные точки попадают в углубление желтого пятна. В пределах зоны четкой видимости возникает стереоскопическое зрение наибольшей отчетливости (рис. 3.30).

При удалении точки фиксации от наблюдателя угол конвергенции уменьшается, а когда его величина становится равной остроте бинокулярного зрения первого рода, восприятие глубины пространства теряется. Радиус R , при котором угол конвергенции равен остроте бинокулярного зрения первого рода, называется *радиусом невооруженного стереоскопического зрения*. Для точечных объектов радиус невооруженного стереоскопического зрения приблизительно равен 400 м, а для линейных – 1200 м. Так как окружающие нас предметы состоят из точечных и линейных элементов, то радиус стереоскопического зрения можно принять примерно равным 700–800 м. Однако для разных людей это расстояние может сильно изменяться, что объясняется особенностями зрительного аппарата, опытом и другими факторами. Например, геодезисты, имеющие опыт полевых измерений, гораздо точнее оценивают расстояния до объектов, чем люди, не имеющие такого профессионального опыта. Радиус стереоскопического зрения можно увеличить с помощью оптических приборов, например бинокля, который позволяет искусственно увеличить глазной базис.

3.2.2. Условия и методы получения стереоскопического эффекта

Если перед глазами наблюдателя установить два снимка одного и того же предмета, выполненные из разных точек, наблюдатель может увидеть объемное изображение сфотографированного объекта. Такие снимки называются *стереопарой*. Для наблюдения стереоскопического эффекта должны быть выполнены следующие условия:

- снимки должны быть получены из разных точек пространства;
- разность масштабов снимков не должна превышать 15%;
- угол конвергенции главных оптических осей фотокамер не должен превышать 15° ;
- каждым глазом следует наблюдать только один снимок;
- снимки необходимо ориентировать так, чтобы базис фотографирования (линия, соединяющая главные точки снимков) на одном и на втором снимках находились на одной линии и были параллельны главному базису.

Стереоскопический эффект можно получить невооруженным глазом. Для этого снимки устанавливают так, чтобы расстояние между соответственными точками изображений было близким к величине глазного базиса, а линия, соединяющая эти точки, была параллельна ему. Снимки наблюдают, стараясь направить зрительные оси глаз параллельно друг другу, т. е. смотреть вдаль, что требует некоторого напряжения зрения, так как возникает непривычная для человека ситуация, когда зрительные оси устанавливаются почти параллельно, а глаза аккомодируются на расстояние около 25 см. В результате вместо двух плоских изображений наблюдатель увидит одно объемное. Обычно это достигается после некоторой тренировки. Для облегчения получения стереоскопического эффекта используются различные способы (рис. 3.31): анаглифический, поляризационный, растровый, затворный (стробоскопический), оптический.

Анаглифический способ основан на том, что снимки проецируются на экран через цветные светофильтры, левый через красный, а правый через сине-зеленый (возможно также использование других цветов, например синего или зеленого). Наблюдатель рассматривает изображение в очках с аналогичными светофильтрами. В результате каждый глаз будет видеть отдельное изображение, спроецированное через светофильтр с той же окраской, и наблюдатель увидит стереоскопическое изображение.

При наблюдении изображения, проецируемого через красный светофильтр, частично будет видно изображение, проецируемое через сине-зеленый, и наоборот. Это изображение называется мешающим изображением. Отношение между яркостью мешающего и основного изображений называется мешающим фактором, который для хорошо подобранных светофильтров составляет менее 10%. Недостатками анаглифического способа являются необходимость в мощных источниках света для компенсации потерь света и неправильная цветопередача изображения.

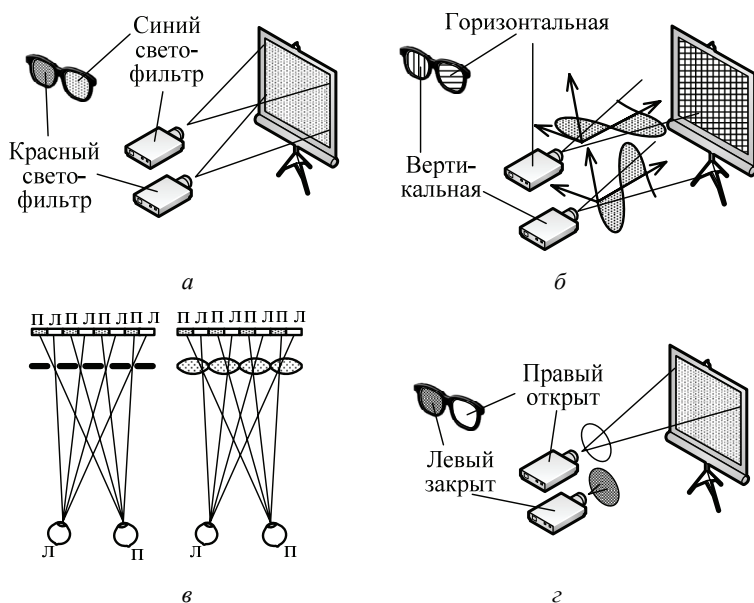


Рис. 3.31. Способы получения стереоскопического эффекта:

a – анаглифический; *б* – поляризационный;

в – растровый; *г* – затворный

Поляризационный способ заключается в том, что разделение двух изображений производится путем поляризации света. Проецирование изображений и наблюдение осуществляется с помощью поляроидных светофильтров с углом поляризации между ними 90° .

Данный способ позволяет рассматривать цветное изображение и является простым в реализации, поэтому он нашел применение в стереокино. Недостатки способа: нужны мощные осветители, так как потеря света в поляроидах составляет 50%; при отражении от экрана происходит деполяризация и видно слабое мешающее изображение. В последнее время поляризационный метод нашел применение в трехмерных телевидении и компьютерной графике.

При *растровом способе* изображения подготавливаются специальным образом в виде чередующихся узких полос и наблюдаются через щелевой экран или экран из цилиндрических линз или призм. Способ нашел применение при производстве объемных и «мигающих» открыток, изображение которых изменяется в зависимости от угла наблюдения, 3D-мониторов и телевизоров. Основным недостатком способа является необходимость наблюдения изображения из определенного положения.

Затворный (поочередного проецирования или стробоскопический) способ заключается в поочередном проецировании с высокой частотой на экран двух изображений, например с помощью вращающихся перед объективами проекторов бленд. Такие же бленды устанавливаются перед глазами наблюдателя. Частота вращения обеих бленд синхронизирована, поэтому в определенный момент времени каждый глаз видит «свое» изображение. В настоящее время вместо бленд используются жидкокристаллические очки, поочередно закрывающие левый и правый глаз наблюдателя, а изображения выводятся на мониторе компьютера. В связи с интенсивным развитием компьютерной техники способ нашел широкое применение в проецировании трехмерной графики, компьютерном стереокино, стереоиграх, цифровых фотограмметрических станциях.

Оптический способ основан на применении систем зеркал и линз, с помощью которых зрительные лучи преломляются и разделяются, в результате чего каждый глаз видит

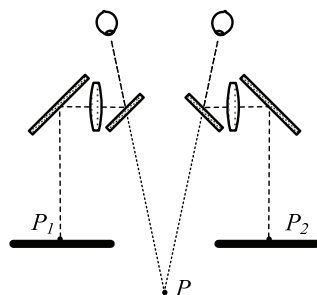


Рис. 3.32. Оптический метод получения стереоэффекта

отдельное изображение (рис. 3.32). Этот способ являлся основным в аналоговых фотограмметрических станциях. Простейшим оптическим прибором, позволяющим получить стереоизображение, является зеркально-линзовый стереоскоп. Каждая оптическая ветвь стереоскопа состоит из двух зеркал и увеличивающей линзы.

В зависимости от расположения снимков стереопары можно наблюдать прямой, обратный и нулевой стереоэффект (рис. 3.33).

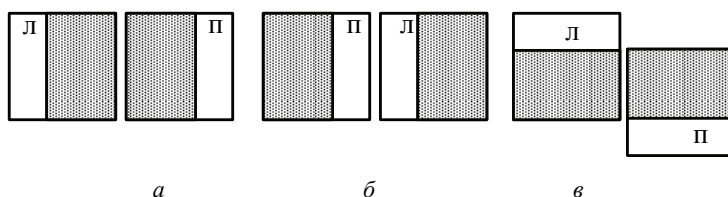


Рис. 3.33. Виды стереоэффекта:
а – прямой; б – обратный; в – нулевой

Прямой стереоэффект наблюдается при рассматривании левого снимка левым глазом, а правого снимка – правым. Если снимки поменять местами, то левый глаз будет видеть правый снимок, а правый глаз – левый снимок, в результате будет наблюдаться обратный стереоэффект, т. е. возвышенности будут восприниматься как углубления и наоборот. Если оба снимка повернуть на 90° и сместить вверх-вниз, то будет наблюдаться нулевой стереоэффект, т. е. два изображения сольются в одно плоское. В фотограмметрии обработку снимков ведут при прямом стереоэффекте.

3.2.3. Координаты и параллаксы соответственных точек стереопары

Так как снимки перекрываются, то на обоих снимках стереопары есть изображение одного и того же участка местности. Изображения одной точки местности на паре аэроснимков называются соответственными, или одноименными, точками. Их положение на стереопаре определяется в прямоугольных плоских системах координат $o_{\text{л}}x_{\text{л}}y_{\text{л}}$ и $o_{\text{п}}x_{\text{п}}y_{\text{п}}$ (рис. 3.34).

Начала координат $o_{\text{л}}$ и $o_{\text{п}}$ находятся на пересечении прямых, соединяющих координатные метки 1, 2 и 3, 4, ось x совмещают

с метками 1 и 2. Обозначим координаты соответственных точек m_1 и m_2 на стереопаре через x_1, y_1 и x_2, y_2 .

Разность абсцисс соответственных точек стереопары называется *продольным параллаксом*, а разность ординат этих точек – *поперечным параллаксом*:

$$p = x_1 - x_2; \quad q = y_1 - y_2. \quad (3.38)$$

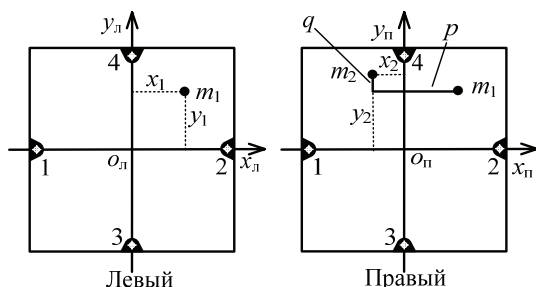


Рис. 3.34. Продольный и поперечный параллакс соответственных точек

Если левый снимок стереопары наложить на правый так, чтобы системы координат обоих снимков совпали, то продольный параллакс представляет собой проекцию расстояния между соответственными точками на ось x , а поперечный – проекцию этого расстояния на ось y .

3.2.4. Элементы ориентирования стереопары

Стереопара, как и отдельный снимок, имеет элементы внутреннего и внешнего ориентирования. Элементы внутреннего ориентирования – фокусное расстояние камеры f и координаты главной точки снимка x_0 и y_0 определяют положение центра проекции относительно снимка. Так как левый и правый снимки стереопары получают обычно одним фотоаппаратом, элементы внутреннего ориентирования снимков одинаковы. Они позволяют восстановить левую и правую связки проецирующих лучей, существовавшие во время фотографирования.

Элементы внешнего ориентирования пары аэроснимков определяют положение связок лучей в момент аэросъемки (рис. 3.35).

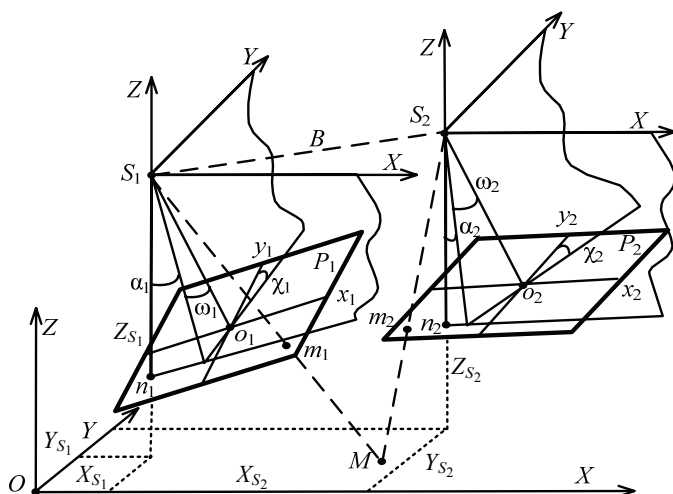


Рис. 3.35. Элементы ориентирования стереопары

К ним относятся: X_{S_1} , Y_{S_1} , Z_{S_1} и X_{S_2} , Y_{S_2} , Z_{S_2} – координаты центров проекции S_1 и S_2 ; α_1 , α_2 – продольные углы наклона снимков (угол на снимке между осью SZ и проекцией главного луча на плоскость SXZ); ω_1 и ω_2 – поперечные углы наклона снимков (угол между главным лучом и плоскостью SXZ); χ_1 и χ_2 – углы поворота снимков (угол на снимке между осью ou и следом плоскости, проходящей через главный луч и ось SY). Таким образом, положение снимков в пространстве однозначно определяется пятнадцатью элементами ориентирования – тремя внутреннего (f , x_0 , y_0) и двенадцатью внешнего (X_{S_1} , Y_{S_1} , Z_{S_1} , α_1 , ω_1 , χ_1 , X_{S_2} , Y_{S_2} , Z_{S_2} , α_2 , ω_2 , χ_2).

Если снимки занимают то пространственное положение, которое было в момент фотографирования, любая пара соответственных лучей пересекается, в результате чего образуется совокупность точек поверхности, которую называют *стереомоделью* или *фотограмметрической моделью* местности, масштаб которой 1:1 (рис. 3.36).

Если одна из связок (например, правая) поступательно перемещается вдоль базиса из положения S_2 в S'_2 , то в результате происходит изменение масштаба модели.

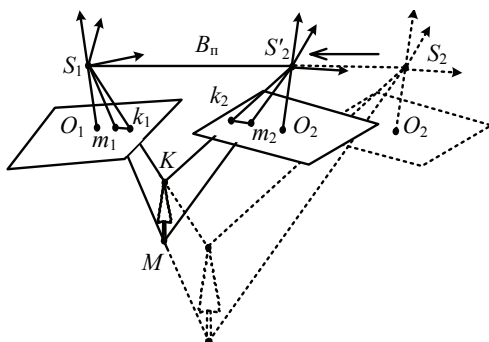


Рис. 3.36. Изменение масштаба модели

Расстояние B между центрами проекций снимков называется базисом фотографирования, а между центрами проекций двух снимков, по которым построена модель (B_n), – базисом проектирования, и ее масштаб вычисляется по формуле

$$\frac{1}{t} = \frac{B_n}{B}, \quad (3.39)$$

где t – коэффициент масштабирования модели.

3.2.5. Связь координат точек местности с координатами точек на стереопаре

Если известны элементы ориентирования обоих снимков стереопары, то по результатам измерений координат соответственных точек на стереопаре можно определить координаты точки местности.

Для получения уравнений связи координат точки местности с координатами точек на паре снимков в качестве исходной используем систему координат S_1XYZ с началом в центре проекции левого снимка (рис. 3.37). В этой системе вектор $\bar{R}_0$ определяет положение центра проекции S_2 правого снимка, а векторы $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$ – положение точки местности A и ее изображения a_1 на левом снимке соответственно [41]. В системе координат S_2XYZ (параллельной S_1XYZ) точки a_2 правого снимка и A местности определяют векторы $\bar{R}_2$ и $\bar{r}_2$. Векторы $\bar{R}_0$, $\bar{r}_1$ и $\bar{r}_2$ известны, необходимо определить вектор $\bar{R}_1$.

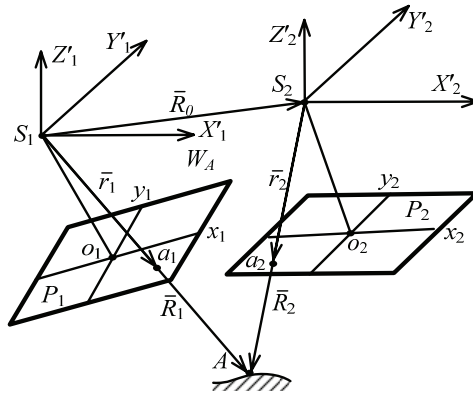


Рис. 3.37. Схема связей между координатами точки местности и снимков

Векторы $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$, $\bar{R}_2$ и $\bar{r}_2$ коллинеарны, поэтому можно записать:

$$\bar{R}_1 = N \bar{r}_1, \quad (3.40)$$

$$\bar{R}_2 \bar{r}_2 = 0, \quad (3.41)$$

где N – скалярный множитель.

В соответствии с рис. 3.37 $\bar{R}_2 = \bar{R}_1 - \bar{R}_0$ и с учетом уравнения коллинеарности (3.40) получаем $\bar{R}_2 = N \bar{r}_1 - \bar{R}_0$, поэтому можно записать:

$$(N \bar{r}_1 - \bar{R}_0) \bar{r}_2 = 0. \quad (3.42)$$

Выразив N , получим

$$N = \frac{\bar{R}_0 \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \bar{r}_2}, \quad (3.43)$$

а с учетом уравнения (3.40)

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}_0 \bar{r}_2}{\bar{r}_1 \bar{r}_2} \bar{r}_1. \quad (3.44)$$

Полученное уравнение (3.44) – векторное, и его необходимо преобразовать в координатную форму. Произведения векторов

$\bar{R}_0 \bar{r}_2$, $\bar{r}_1 \bar{r}_2$ можно представить в виде определителей третьего порядка [38]:

$$\bar{R}_0 \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ B_X & B_Y & B_Z \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix}; \quad \bar{r}_1 \bar{r}_2 = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X'_1 & Y'_1 & Z'_1 \\ X'_2 & Y'_2 & Z'_2 \end{vmatrix}, \quad (3.45)$$

где $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы координатных осей X, Y, Z ; B_X, B_Y, B_Z – координаты вектора $\bar{R}_0$, определяющие положение центра проекции S_2 в системе координат S_1XYZ ; X'_1, Y'_1, Z'_1 и X'_2, Y'_2, Z'_2 – пространственные координаты соответственных точек a_1 (вектора $\bar{r}_1$) и a_2 (вектора $\bar{r}_2$) на первом и втором снимках.

Разложив определители по элементам первых строк, получим:

$$\begin{aligned} \bar{R}_0 \bar{r}_2 &= \bar{R}' = (B_Y Z'_2 - B_Z Y'_2) \bar{i} + (B_Z X'_2 - B_X Z'_2) \bar{j} + (B_X Y'_2 - B_Y X'_2) \bar{k}; \\ \bar{r}_1 \bar{r}_2 &= \bar{r}' = (Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1) \bar{i} + (X'_2 Z'_1 - X'_1 Z'_2) \bar{j} + (X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1) \bar{k}. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Произведения векторов $\bar{r}_1 \bar{r}_2$, $\bar{R}_0 \bar{r}_2$ есть вектора $\bar{r}'$ и $\bar{R}'$, которые коллинеарны, так как направлены перпендикулярно к базисной плоскости W_A , поэтому формулу (3.43) можно записать в следующем виде:

$$N = \frac{B_Y Z'_2 - B_Z Y'_2}{Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1} = \frac{B_Z X'_2 - B_X Z'_2}{X'_2 Z'_1 - X'_1 Z'_2} = \frac{B_X Y'_2 - B_Y X'_2}{X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1}. \quad (3.47)$$

Входящие в уравнения пространственные координаты точек снимков $X'_1, Y'_1, Z'_1, X'_2, Y'_2, Z'_2$ вычисляются по формулам (3.20, 3.21), а направляющие косинусы по формулам (3.27, 3.28). Составляющие базисы фотографирования определяются через линейные элементы ориентирования пары снимков:

$$\begin{aligned} B_X &= X_{S_2} - X_{S_1}; \\ B_Y &= Y_{S_2} - Y_{S_1}; \\ B_Z &= Z_{S_2} - Z_{S_1}. \end{aligned} \quad (3.48)$$

Если спроектировать векторы $\bar{R}_1$ и $\bar{r}_1$ на координатные оси X, Y, Z , тогда в соответствии с равенством (3.40) получим:

$$\begin{pmatrix} Y \\ X \\ Z \end{pmatrix} = N \begin{pmatrix} Y'_1 \\ X'_1 \\ Z'_1 \end{pmatrix}. \quad (3.49)$$

Задача определения пространственных координат точки местности по ее изображению на снимках стереопары называется прямой пространственной фотограмметрической засечкой. Ее решение значительно проще при горизонтальной съемке (идеальный случай, показан индексом 0), если снимки получены с одной и той же высоты фотографирования, а их углы $\alpha = \omega = \chi = 0$ (рис. 3.38).

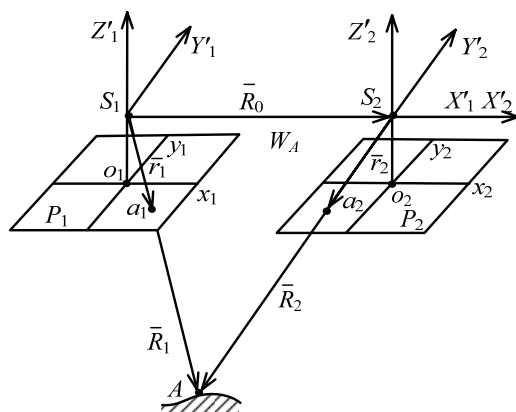


Рис. 3.38. Схема связей между координатами точки местности и снимка (идеальный случай горизонтальной съемки)

При указанных условиях ось X совпадает с направлением базиса фотографирования, ось Y параллельна плоскости снимков и справедливы следующие равенства:

$$\begin{aligned} X'_1 &= x_1^0; & Y'_1 &= y_1^0; \\ X'_2 &= x_2^0; & Y'_2 &= y_2^0; \\ Z'_1 &= Z'_2 = -f; \\ B_Z &= B_Y = 0; & B_X &= B. \end{aligned} \quad (3.50)$$

На основе третьего отношения равенства (3.47) получим

$$N = \frac{B}{x_1^0 - x_1^0}. \quad (3.51)$$

Разность абсцисс $x_1 - x_2$ соответственных точек, измеренных на паре снимков, называется продольным параллаксом, приняв это во внимание, можно записать:

$$p^0 = x_1^0 - x_2^0; \quad (3.52)$$

$$N = \frac{B}{p^0}. \quad (3.53)$$

Подставив выражение N из (3.53) в (3.49), с учетом равенств (3.50) получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{B}{p^0} x_1^0 = -\frac{Z}{f} x_1^0; \\ Y &= \frac{B}{p^0} y_1^0 = -\frac{Z}{f} y_1^0 \end{aligned} \right\} \quad (3.54)$$

и

$$Z = -\frac{B}{p^0} f. \quad (3.55)$$

В соотношениях (3.54) и (3.55) $Z = -H$ (высоте фотографирования над точкой местности), поэтому, согласно уравнению (3.55), параллакс p^0 можно определить из соотношения

$$p^0 = b = B \frac{f}{H}. \quad (3.56)$$

Оно показывает, что продольный параллакс соответственных точек идеальной пары снимков равен базису фотографирования в масштабе снимков (b).

По паре горизонтальных снимков сравнительно просто решается задача определения превышений точек местности. Примем, что высота точки A местности известна. Тогда превышение точки M над точкой A можно вычислить следующим образом:

$$h = -(Z_M - Z_A) = -\left(\frac{B}{p_m^0} f - \frac{B}{p_a^0} f \right) = \frac{B f (p_m^0 - p_a^0)}{p_a^0 p_m^0}. \quad (3.57)$$

Разность продольных параллаксов $p_m^0 - p_a^0$ обычно обозначают через Δp^0 , поэтому, опуская индексы, можно записать

$$h = \frac{H \Delta p}{p + \Delta p} = \frac{H \Delta p}{b + \Delta p}, \quad (3.58)$$

где b – базис фотографирования в масштабе снимка.

Иногда удовлетворительный результат получается при использовании приближенной формулы:

$$h = \frac{H \Delta p}{b}. \quad (3.59)$$

Так как небольшие углы наклона снимков, не превышающие 3° , незначительно влияют на точность определения превышений между близко расположенными точками, данную формулу широко применяют для определения высот отдельных объектов, деревьев, домов, заводских труб, глубин оврагов и т. д.

3.2.6. Взаимное ориентирование пары снимков

Найдем разности элементов ориентирования левого и правого снимков: $B_X = X_{S_2} - X_{S_1}$; $B_Y = Y_{S_2} - Y_{S_1}$; $B_Z = Z_{S_2} - Z_{S_1}$; $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$; $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$; $\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$. В данном случае из 12 элементов внешнего ориентирования стереопары с координатной системой местности связаны только семь – это элементы внешнего ориентирования левого снимка стереопары и базис фотографирования, который определяет масштаб фотограмметрической модели местности [50]. Из рис. 3.40 можно записать: $\text{tg} \tau = B_Y / B_X$; $\sin v = B_Z / B$. Эти формулы позволяют определить горизонтальный и вертикальный углы наклона линии базиса съемки, таким образом, величины $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\chi$, τ , v описывают положение одного снимка (правого) относительно другого (левого), и поэтому направления базиса фотографирования называются *элементами взаимного ориентирования*. При изменении величины базиса проектирования и масштаба модели они остаются неизменными.

Взаимное ориентирование пары снимков можно выполнить двумя способами: поворотами обоих снимков или поворотами и смещениями только одного снимка, например правого при неподвижном положении левого. В соответствии с этим различают две системы элементов взаимного ориентирования.

В первой системе неподжным считают *базис фотографирования*. Начало системы координат $S_1X'_1Y'_1Z'_1$ – в центре проекции S_1 левого снимка P_1 (рис. 3.39).

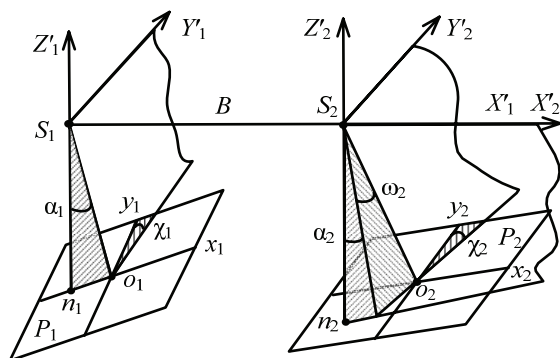


Рис. 3.39. Первая (базисная) система элементов взаимного ориентирования

Ось X'_1 совмещена с базисом фотографирования, а ось Z'_1 установлена в главной базисной плоскости левого снимка. Система координат $S_2X'_2Y'_2Z'_2$ параллельна системе координат $S_1X'_1Y'_1Z'_1$.

Элементами взаимного ориентирования являются:

α_1 – угол в главной базисной плоскости левого снимка между осью Z'_1 и главным лучом связи;

χ_1 – угол на левом снимке между осью y_1 и следом плоскости $o_1S_1Y'_1$;

α_2 – угол в главной базисной плоскости левого снимка между осью Z'_2 и проекцией главного луча правой связи на главную базисную плоскость левого снимка;

ω_2 – угол между проекцией главного луча правой связи на главную базисную плоскость левого снимка и главным лучом;

χ_2 – угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $o_2S_2Y'_2$.

Во второй системе неподжным считают левый снимок стереопары (рис. 3.40).

За начало пространственной фотограмметрической системы координат принимается центр проекции левого снимка S_1 . Координатные оси X'_1 и Y'_1 этой системы направлены параллельно соответствующим

координатным осям x_1 и y_1 левого снимка, а ось Z'_1 совпадает с главным лучом левой связки. Система координат $S_2X'_2Y'_2Z'_2$ параллельна системе координат $S_1X'_1Y'_1Z'_1$.

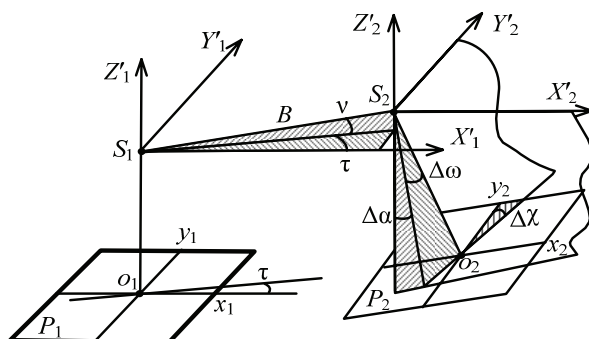


Рис. 3.40. Вторая (линейно-угловая) система элементов взаимного ориентирования снимков

Элементами взаимного ориентирования являются:

τ – угол между осью X'_1 и проекцией базиса на плоскость $X'_1S_1Y'_1$;

ν – угол наклона базиса S_1S_2 относительно плоскости $X'_1S_1Y'_1$;

$\Delta\alpha$ – взаимный продольный угол наклона снимков, составленный осью Z'_2 с проекцией главного луча правой связки на плоскость $X'_2S_2Z'_2$;

$\Delta\omega$ – взаимный поперечный угол наклона снимков, заключенный между плоскостью $X'_2S_2Z'_2$ и главным лучом правой связки;

$\Delta\chi$ – взаимный угол поворота снимков, угол на правом снимке между осью y_2 и следом плоскости $o_2S_2Y'_2$.

Таким образом, каждая система включает пять элементов взаимного ориентирования, зная которые можно найти пространственные координаты любой точки модели.

3.2.7. Фототриангуляция

Фототриангуляцией называют метод камерального сгущения съёмочного обоснования путем построения и уравнивания триангуляционной сети; его сущность заключается в построении по снимкам модели местности, ее ориентировании относительно геодезической системы координат и определении координат точек сгущения.

Основная цель фототриангуляции – максимально сократить трудоемкие полевые геодезические работы, заменив их камеральными.

По количеству маршрутов, участвующих в построении модели, фототриангуляцию разделяют на *маршрутную* и *блочную*.

Маршрутную фототриангуляцию проводят по снимкам, принадлежащим одному маршруту, при этом маршрут должен содержать опорные точки для ориентирования модели относительно геодезической системы координат.

Блочная фототриангуляция строится по двум и более маршрутам. В этом случае отпадает необходимость определения опорных точек для каждого из них. Блочная фототриангуляция особенно эффективна, поскольку минимальное число точек, необходимое для внешнего ориентирования модели, не зависит от числа маршрутов, участвующих в ее построении, при этом значительно сокращается объем полевых работ.

В зависимости от того, какие координаты необходимо получить, фототриангуляцию подразделяют на *плоскостную (радиальную)*, если определяют только плановые координаты точек, и *пространственную*, если определяют все три координаты.

Основой *плоскостной фототриангуляции* является свойство планового снимка, заключающееся в том, что углы между направлениями, исходящими из точки нулевых искажений, практически равны соответствующим горизонтальным углам на местности, если угол наклона снимка мал, а местность равнинная или холмистая. Если эти углы измерить или отложить (например, с помощью восковки), то можно построить сеть точек сначала в произвольном масштабе, а затем привести к заданному масштабу по включенным в нее опорным точкам (рис. 3.41). Для построения такой сети необходимы аэроснимки с продольным перекрытием не менее 60%.

Вначале намечаются центральные и связующие точки. Связующими называются точки, общие для смежных стереопар, расположенные в зонах тройного перекрытия снимков. Направление из центральной точки первого снимка через точку, соответствующую центральной точке соседнего снимка, называется начальным.

Измерив на снимках центральные углы между начальными направлениями и направлениями на связующие точки, можно найти координаты всех точек сети путем решения уравнений прямых и обратных засечек.

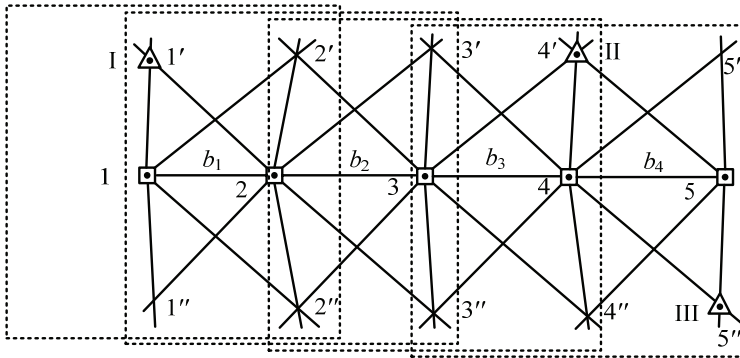


Рис. 3.41. Плоскостная фототриангуляционная сеть

Например, выбрав произвольно длину и плановое положение первого базиса b_1 , прямыми засечками из центральных точек 1 и 2 получим точки $1'$, $2'$ и $1''$, $2''$. Затем из точек $2'$, $2''$ обратными засечками найдем и проконтролируем положение центральной точки 3, построив базис b_2 . Из точек 2 и 3 прямыми засечками получим точки $3'$ и $3''$. Аналогично продолжим построение фотограмметрической сети по другим снимкам данного маршрута, в результате чего получим свободную маршрутную сеть в произвольном масштабе. Для приведения ее к заданному масштабу и ориентирования относительно геодезической системы координат необходимо иметь не менее двух опознанных на снимках и включенных в маршрутную сеть опорных точек, например в начале и конце маршрута (точки I, II, III), геодезические координаты которых известны.

В зависимости от технических средств, используемых для построения радиальной фототриангуляции, ее разделяют на графическую, механическую, аналитическую и цифровую [50]. В графической плоскостной фототриангуляции центральные углы со снимков переносят на восковки, которые используют для построения сети. В механической фототриангуляции вместо восковок применяют щелевые шаблоны. При аналитической радиальной фототриангуляции центральные углы между направлениями на связующие точки измеряются на специальном приборе – радиалтриангуляторе и затем используются для вычисления на ЭВМ координат точек фототриангуляционной сети.

В настоящее время на производстве чаще применяют *пространственную фототриангуляцию*, которую в зависимости от технических средств также можно подразделить на аналоговую, аналитическую и цифровую. В аналоговой и аналитической фототриангуляции построение модели осуществляется на универсальных аналоговых стереофотограмметрических приборах, которые в связи с переходом на цифровые методы производства планов и карт сегодня практически не используются.

В цифровой пространственной фототриангуляции построение модели и определение координат точек сгущения выполняются на ЭВМ по результатам измерения снимков на экране монитора. Для этой цели используется специализированное программное и аппаратное обеспечение – цифровая фотограмметрическая станция. Цифровая фототриангуляция позволяет использовать различные исходные данные, методы, отличается самой высокой производительностью и точностью, так как в процессе компьютерной обработки результатов измерений учитываются все систематические погрешности, влияние которых можно выразить в математической форме, а многие операции можно выполнять в автоматическом режиме.

В зависимости от назначения различают два вида фототриангуляции: *заполняющая* и *каркасная*. Заполняющая фототриангуляция строится по снимкам площадной аэрофотосъемки, а каждая стереопара обеспечивается опорными точками. Каркасная фототриангуляция строится по снимкам каркасных маршрутов, проложенным перпендикулярно к направлению заполняющих маршрутов для обеспечения их опорными точками. Таким образом, вначале выполняется пространственная фототриангуляция по каркасным маршрутам, что позволяет обеспечить необходимым числом опорных точек заполняющие маршруты, а затем строятся заполняющие фототриангуляционные сети.

Различают три основных способа цифровой маршрутной фототриангуляции: способ частично зависимых моделей, способ независимых моделей и способ связей.

Способом частично зависимых моделей вначале строится модель по первой стереопаре. За начало фотограмметрической системы координат принимается центр проекции левого снимка. Его угловые элементы внешнего ориентирования и базис фотографирования

устанавливаются произвольно. Затем строится модель по второй стереопаре, но за угловые элементы внешнего ориентирования ее левого снимка принимаются не произвольные величины, а полученные в результате обработки первой пары снимков. Так поступают со всеми последующими моделями, и в результате обеспечивается построение всех моделей в единой системе координат, принятой для создания первой модели.

В способе независимых моделей для построения выбирают базисы произвольной длины, измеряют координаты соответственных точек, включенных в сеть, вычисляют элементы взаимного ориентирования в базисной системе координат и трансформируют снимки относительно плоскости, перпендикулярной к главной базисной плоскости левого снимка. В результате координаты точек модели можно вычислять по упрощенным формулам для нормального случая съемки. При построении общей для всего маршрута модели выполняют операцию внешнего ориентирования моделей относительно друг друга по связующим точкам, а затем внешнее ориентирование всей модели.

В способе связок для каждой точки, включенной в фотограмметрическую сеть, составляются уравнения коллинеарности, выражающие зависимости между координатами точки снимка и координатами соответствующей точки местности. Особенность данного способа заключается в одновременном построении и уравнивании фотограмметрической сети по всем снимкам данного маршрута. Кроме того, этот способ дает возможность при построении сети использовать элементы внешнего ориентирования, полученные GPS/IMU-системой в полете при проведении съемки.

Перед выполнением фототриангуляции составляется проект, согласованный с проектом привязки снимков. В фототриангуляционную сеть включаются точки, необходимые для внешнего ориентирования модели и трансформирования снимков, связующие точки (в зоне тройного перекрытия), а также характерные точки рельефа.

3.2.8. Изготовление фотосхем, трансформирование снимков и изготовление фотопланов

Чтобы иметь возможность обзора всей территории объекта, составляются фотосхемы. *Фотосхема* представляет собой фотографи-

ческое изображение местности, полученное в результате монтажа рабочих областей нетрансформированных снимков. На фотосхеме более детально, чем на плане, изображаются контуры местности и отдельные элементы рельефа. Точность фотосхемы ниже точности плана и зависит от углов наклона снимков, рельефа местности, колебаний высоты полета и ошибок монтажа снимков.

Фотосхемы используются в качестве обзорного документа при полевом дешифрировании, съемке рельефа, геологических, географических и других исследованиях, а также при выполнении предварительных инженерно-проектировочных работ. В отдельных случаях, когда допускается невысокая точность измерений, фотосхемы могут быть использованы для определения расстояний и площадей. Различают маршрутные и многомаршрутные фотосхемы, составленные соответственно из снимков одного или нескольких маршрутов.

Применяют два способа монтажа фотосхем: по начальным направлениям и по соответственным точкам (контурам). По начальным направлениям монтируются фотосхемы, предназначенные для измерительных работ. Монтаж по соответственным точкам выполняется для рекогносцировки, дешифрирования и работ, не связанных с проведением измерений.

Фотоплан – это фотографическое изображение местности в данном масштабе, полученное в результате монтажа трансформированных аэрофотоснимков. Составление фотоплана включает создание геодезической основы, сгущение ее методом фототриангуляции, трансформирование аэроснимков и их печать.

Трансформирование снимка – это преобразование изображения аэрофотоснимка местности из центральной проекции с одними параметрами в центральную проекцию с другими параметрами или в другую проекцию. В общем случае это преобразование изображения сфотографированного объекта, полученного на снимке, в его изображение на фотоплане, плане или карте. Методика преобразования определяется проекцией, в которой получено изображение объекта на снимке, и проекцией, которая выбрана для создаваемого плана или карты. Топографическая карта представляет изображение точек земной поверхности на плоскости в ортогональной проекции. Аэроснимок, выполненный кадровой камерой, является изображением точек местности на плоскости в центральной проекции.

Центральная проекция соответствует ортогональной только в том случае, когда на горизонтальном аэрофотоснимке сфотографирована плоская горизонтальная местность. При фотографировании рельефной местности положение точек на аэроснимке по сравнению с ортогональной проекцией искажено превышениями этих точек на местности. Кроме того, положение точек на снимке искажено из-за его наклона.

Таким образом, для составления высокоточных карт необходимо выполнить трансформирование снимков из центральной проекции в ортогональную с исключением перспективных искажений, называемое *ортотрансформированием*. Смещения точек, вызванные углом наклона аэроснимка, подчиняются определенному закону и могут быть легко учтены для всех точек снимка. Смещения точек и изменения масштаба изображения, вызванные рельефом, соответствуют превышениям местности, поэтому учет влияния рельефа является наиболее трудной задачей трансформирования снимков, решить которую можно только разложив фотоизображение на точки и трансформируя каждую в отдельности.

Для трансформирования аэроснимков применяют фотомеханический, оптико-графический, дифференциальный, аналитический и цифровой способы. Цифровой способ применим как для аналоговых, так и для цифровых снимков, остальные – только для аналоговых снимков на твердой основе.

Фотомеханический способ основан на использовании фототрансформаторов и применяется для трансформирования аэроснимков равнинной и легко холмистой местности с целью получения фотопланов. В прошлом столетии он являлся основным способом трансформирования аэрофотоснимков.

Оптико-графический способ основан на использовании оптических проекторов и позволяет по аэроснимкам рельефной местности получить трансформированное изображение в графическом виде. Ранее широко использовался для трансформирования контуров выделов с отдешифрированных фотоснимков на лесоустроительные планшеты.

Дифференциальный способ (ортотототрансформирование) основан на использовании специальных ортофототрансформаторов, позволяющих трансформировать аэрофотоснимки рельефной местности

небольшими участками через щель, размеры которой можно изменять. Трансформированные изображения получали в виде ортофотоснимков.

Все вышеназванные методы в настоящее время практически не применяются, так как большинство производств перешли на цифровые технологии, позволяющие эффективно реализовать наиболее точный аналитический метод трансформирования снимков.

Аналитический способ основан на измерениях, выполняемых на аналитических приборах, и вычислениях на ЭВМ с использованием рассмотренных выше формул связи координат точек снимка и местности, а также координат наклонного и горизонтального снимков.

Цифровой способ является в настоящее время наиболее распространенным [74]. В его основу положены аналитические формулы, с учетом которых разработано и используется все программное обеспечение, применяемое для фотограмметрических работ. Анализ формул (3.36)–(3.37) показывает, что для выполнения трансформирования наклонного снимка в горизонтальный необходимо знание элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Элементы внутреннего ориентирования известны, так как являются техническими характеристиками съемочной камеры, элементы внешнего ориентирования можно определить в процессе аэросъемки с помощью специальной GPS/IMU-системы, установленной на борту летательного средства, или по координатам опорных точек.

Необходимо отметить, что с внедрением цифровых методов производства плано-картографических материалов изготовление фотосхем, фотопланов и трансформирование снимков в настоящее время выполняется с использованием ЭВМ и специализированного программного обеспечения – цифровых фотограмметрических станций (ЦФС).

3.2.9. Методы стереоскопических измерений по снимкам

Измерения могут выполняться как на отдельном снимке, так и на стереопаре. На одном снимке могут измеряться координаты точек, протяженность объектов, их площади и другие показатели. Для этой цели применяются циркуль-измеритель, масштабная линейка, палетки, планиметры, измерительные лупы и другие простые приборы, которые будут рассмотрены в последующих разделах. Основным

недостатком измерений на отдельных снимках является невозможность определения высотных отметок (хотя существуют методы измерения высоты отдельных объектов).

На стереопаре выполняются измерения стереоскопической (объемной) модели местности, что позволяет получить не только плановые координаты, но и высотные отметки. Для стереоскопических измерений пары снимков в фотограмметрии используется два способа – способ действительной марки, предложенный Девилем в 1902 г., и способ мнимой марки, предложенный К. Пульфрихом в 1899 г. (рис. 3.42).

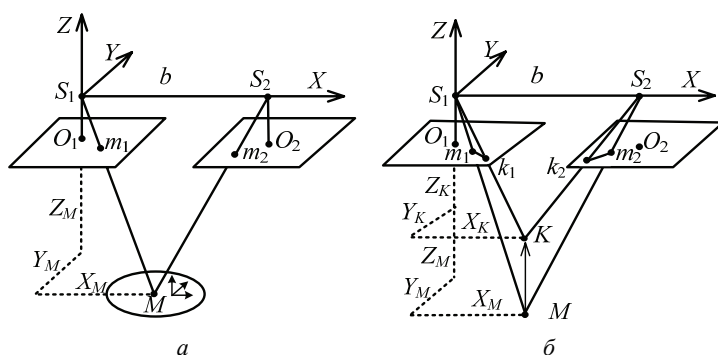


Рис. 3.42. Способы стереоскопических измерений:
а – способ действительной марки; б – способ мнимой марки

При способе действительной марки (рис. 3.42, а) оба снимка проектируют на экран, который перемещается вдоль трех координатных осей и имеет на поверхности измерительную марку M (свещающую точку). Перемещая в пространстве и совмещая измерительную марку с точками стереоскопической модели, по шкалам получают координаты точек. Способ нашел применение в отдельных конструкциях проекторов и в настоящее время не используется.

Способ мнимой марки (рис. 3.42, б) основан на том, что на каждый снимок проектируется изображение измерительной марки. В результате наблюдатель видит каждым глазом участок снимка с маркой. Марки имеют одинаковую форму и размер, поэтому при их приближении к соответственным точкам на обоих снимках они сливаются в одну мнимую стереоскопическую марку, словно висящую

над поверхностью фотограмметрической модели. Если совместить обе марки с одноименными точками, например m_1 и m_2 , то стереоскопическая марка будет восприниматься лежащей на поверхности фотограмметрической модели в точке M . При смещении марок на снимках от точек m_1 и m_2 к точкам k_1 и k_2 стереоскопическая марка будет восприниматься поднимающейся по высоте в пространстве модели от точки M к точке K . В результате совместное перемещение обеих марок в плоскости снимков позволяет измерить плановые координаты X и Y , а изменение расстояния между марками – координату Z . Данный способ является основным в фотограмметрии и применяется в большинстве фотограмметрических приборов.

На фотограмметрических приборах измерительные марки бывают несветящиеся и светящиеся. Цвет и интенсивность освещения марки регулируется в зависимости от плотности и цвета снимков. Наиболее распространенной формой марки является точка, диаметр которой можно изменять.

3.3. Аналоговые и цифровые фотограмметрические системы

Современная фотограмметрия прошла длительный путь от простых оптико-графических устройств до современных цифровых фотограмметрических станций, позволяющих выполнять полный цикл работ по производству планово-картографических материалов. Еще недавно фотограмметрические измерения выполнялись на аналоговых приборах, представляющих сочетание стереокомпаратора с персональным компьютером, выполняющим обработку результатов измерений аналитическими методами в момент их получения. К таким приборам можно отнести аналитические плоттеры AP (Италия, США), Traster (Франция), Planicomp (Германия), Aviolyt (Швейцария), Анаграф (СССР) и др., которые фактически стали прообразами цифровых фотограмметрических систем.

Появление в середине 1980-х гг. мощных персональных ЭВМ, позволяющих обрабатывать большие объемы графической информации, послужило толчком к интенсивному развитию методов цифровой фотограмметрии. Широкое применение цифровых методов

обработки данных аэро- и космической съемки стало возможным благодаря достижениям в аналитической фотограмметрии, теории компьютерного зрения, машинной графики и распознавания образов, теории сигналов и теории информации, вычислительной геометрии и во многих других отраслях знаний.

Цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) представляет собой персональную ЭВМ с установленным программным обеспечением и оснащенную специальными видеоадаптером, монитором и стереоскопическими очками, позволяющими выполнять измерения в стереорежиме. Программное обеспечение имеет, как правило, модульную структуру, позволяющую гибко конфигурировать станцию в зависимости от решаемых задач. Из используемых в настоящее время цифровых фотограмметрических станций можно отметить PHOTOMOD (ЗАО «Ракурс», Россия), Leica Photogrammetry Suite (Leica, Швейцария), «Талка» (НПФ «Талка-ТДВ», Россия), «Дельта» (НПП «Гео-система», Украина), INPHO (Германия), из которых, пожалуй, наиболее широко распространена ЦФС PHOTOMOD, поэтому остановимся подробнее на его функциональных возможностях (рис. 3.43).



Рис. 3.43. Цифровые фотограмметрические станции:
а – «Дельта»; б – PHOTOMOD

PHOTOMOD представляет собой набор программных средств цифровой фотограмметрической обработки данных ДЗ Земли, позволяющих получать пространственную информацию на основе

изображений практически всех коммерчески доступных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы высокого разрешения, а также радары с синтезированной апертурой (<http://www.racurs.ru>). PHOTOMOD может использоваться как локальная полнофункциональная цифровая фотограмметрическая станция или распределенная сетевая среда для реализации больших проектов.

В состав системы входит управляющая оболочка PHOTOMOD Core и 10 основных модулей: PHOTOMOD AT, PHOTOMOD SolverA, PHOTOMOD SolverS, PHOTOMOD DTM, PHOTOMOD StereoDraw, PHOTOMOD Mosaic, ГИС «Панорама Мини», PHOTOMOD StereoVectOr, PHOTOMOD StereoLink, PHOTOMOD ScanCorrect.

Кроме модулей, система PHOTOMOD включает набор вспомогательных утилит, предназначенных для создания системы ресурсов, управления размещением данных, подготовки растровых изображений и т. п.

Каждый модуль является одним из этапов общей технологической схемы и связан с другими модулями с точки зрения обмена данными, благодаря чему возможно построение четкой технологической цепочки обработки проекта при сохранении автономности на каждом этапе.

PHOTOMOD Core. Управляющая оболочка системы служит для подключения функций различных модулей, а также реализует средства для создания и управления проектами, формирования блока изображений, управления камерами, просмотра, импорта и экспорта ЦМР, векторов, точек триангуляции, просмотра данных обработки в 3D-окне, отчетов, моновекторизации, импорта элементов внешнего ориентирования и построения накидного монтажа с учетом различных входных данных.

PHOTOMOD AT. Модуль сбора данных для уравнивания сетей фототриангуляции включает внутреннее и взаимное ориентирование, а также ввод и измерение опорных точек. Поддерживаются автоматические режимы выполнения внутреннего ориентирования и измерения связующих точек. Алгоритм автоматического измерения связующих точек с широкими возможностями контроля точности измерений (в том числе контроля автокорреляции) позволяет получить практически готовый набор точек для успешного уравнивания сети и избежать ручного редактирования.

PHOTOMOD Solver. Модули предназначены для уравнивания сети фототриангуляции снимков в центральной проекции (SolverA) и сканерных изображений (SolverS). Инструменты контроля точности и графические средства представления и анализа ошибок обеспечивают высокое качество формируемых ЦМР, ортофотопланов и цифровых карт. Средства обмена через формат РАТ-В позволяют использовать систему PHOTOMOD в связке с другими фотограмметрическими системами.

PHOTOMOD DTM. Модуль предназначен для построения ЦМР (в виде регулярной модели рельефа – DEM, нерегулярной триангуляционной сети – TIN, в виде пикетов, структурных линий и горизонталей). Система поддерживает набор алгоритмов автоматического построения TIN, а также позволяет использовать различные алгоритмы для отдельных областей модели. Редактирование модели рельефа производится в стереорежиме или 3D-окне. Модуль содержит наборы инструментов группового и одиночного редактирования вершин TIN, автоматической фильтрации выбросов и контроля точности модели рельефа, редактирования и сглаживания структурных линий и горизонталей, конвертирования TIN-DEM и др.

PHOTOMOD StereoDraw. Модуль предназначен для создания и редактирования трехмерных (3D) векторных объектов в стереорежиме (с использованием затворных или анаглифических очков), а также для проведения 3D-измерений. Модуль содержит такие удобные инструменты, как автоматическое перемещение курсора по рельефу, 2D- и 3D-снэппинг, векторизацию сегментов линий под прямым углом, копирование векторных объектов, автоматическое проведение линии вдоль границы существующего объекта, построение буферных зон и многие др. К графическим объектам могут быть привязаны записи из таблицы классификатора и атрибуты. Кроме того, модуль включает опцию 3D-Mod для трехмерного моделирования и экспорта в формат DXF.

PHOTOMOD Mosaic. Модуль создания ортофотопланов по аэрофотоснимкам или спутниковым сканерным изображениям на основе ЦМР, импортированной или построенной в модуле PHOTOMOD DTM. Модуль содержит средства для определения областей трансформирования (редактор «порезов»). Инструменты автоматического яркостного выравнивания и обработки порезов обеспечивают

отсутствие цветовых контрастов на границах снимков выходного изображения. Ортофотоплан создается с заданным размером элемента на местности и геопривязкой, предусмотрен прямой экспорт в MapInfo и ArcInfo, а также сохранение мозаики в формате GeoTIFF. Поддерживается нарезка на листы или трапеции заданного пользователем размера, а также осуществление контроля точности построения ортофотоплана по опорным и контрольным точкам.

ГИС «Панорама Мини». Начиная с версии 5.23, в состав PHOTOMOD включена ГИС «Панорама Мини» (КБ «Панорама»). Интеграция программных сред PHOTOMOD и ГИС «Панорама Мини» обеспечивает единую цепочку картографического производства: от пространственной фототриангуляции исходных снимков до печати готовых карт. Геоинформационная система «Панорама Мини» предназначена для создания, редактирования и печати цифровых карт и планов городов различного назначения, ведения баз данных с настройкой пользовательских форм для просмотра таблиц, формирования запросов и отчетов для просмотра схем территориального планирования, градостроительного кадастра и других задач.

ГИС содержит средства импорта векторных пространственных данных, растров и матриц высот в наиболее популярных форматах, таких как SXF, SHP, MIF/MID, DXF, GML, KML, MP, S57, DGN, GDF, TXT, DBF, XLS, форматы OziExplorer (WPT, RTE, PLT, EVT), Magellan Explorist (UPT, RTE), RSW, BMP, JPEG, GeoTIFF, TIFF, растры MrSID (SID, JPEG2000, NITF), SRTM, GRID, MTQ, MTL, TIN-модели, данные лазерного сканирования (облако точек в формате MTD и LAS) и другие.

PHOTOMOD StereoVectOr. Модуль параллельной работы с картой формата «ГИС «Карта 2011» в стерео- (PHOTOMOD StereoDraw) и моноокнах. Моноокно используется для отображения и редактирования карты в условных знаках. При работе с модулем удобен двухмониторный режим. Модуль предназначен главным образом для обновления существующих векторных карт. Использование модуля StereoVectOr рекомендуется, если окончательную обработку цифровой карты предполагается производить в ГИС «Панорама Мини» или «ГИС «Карта 2011».

PHOTOMOD StereoLink. StereoLink – программный комплекс, предназначенный для выполнения стереосъемки объектов местности,

в том числе объектов ЦМР, в среде MicroStation. Позволяет осуществлять стереонаблюдение ориентированных пар снимков, коррекцию фотометрических параметров снимков стереопары, измерения пространственных координат местности и стереосъемку объектов местности, а также позволяет создавать таблицы объектов, подлежащих съемке.

PHOTOMOD ScanCorrect. Программа предназначена для геометрической калибровки планшетных сканеров. PHOTOMOD ScanCorrect позволяет использовать недорогие полиграфические сканеры в точной цифровой фотограмметрии после их специальной калибровки. Изображения, оцифрованные на планшетном сканере, исправляются программой PHOTOMOD ScanCorrect с целью устранения ошибок сканирования.

4. СТРОЕНИЕ ПОЛОГА ДРЕВОСТОЯ

4.1. Морфологические показатели полога древостоя

При дешифрировании лесных насаждений по снимкам, полученным с воздушных и космических летательных аппаратов, большинство таксационных показателей древостоев оценивается на основе косвенных признаков и взаимосвязей с дешифровочными показателями полога древостоя, поэтому изучение его строения является одним из основных этапов процесса дешифрирования.

Полог древостоя состоит из множества крон отдельных деревьев разных пород, различающихся по форме, размерам, характеру смыкания и местоположению (рис. 4.1).

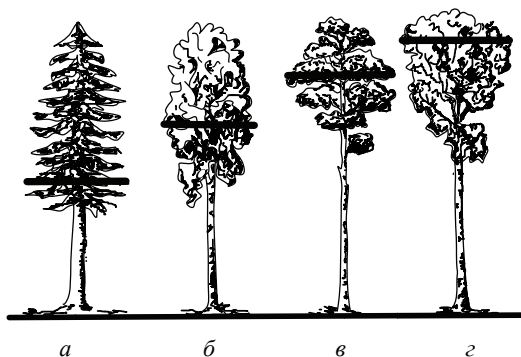


Рис. 4.1. Форма крон различных древесных видов:
а – ель; б – береза; в – сосна; з – осина

Совокупность этих показателей и определяет строение полога древостоя, его внешний облик, а также возможность интерпретации данных дистанционного зондирования. Знание закономерностей строения полога,

взаимосвязей между его дешифровочными показателями и таксационными показателями древостоя, условиями местопроизрастания, почвами позволит обеспечить высокую точность лесного дешифрирования.

Изучением строения полога древостоев и взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями занимались многие авторы: Г. Г. Самойлович, Н. И. Баранов, А. Е. Колосова, А. К. Пронин, С. В. Белов, В. С. Моисеев, Д. М. Киреев, В. И. Сухих, Н. Г. Харин, А. М. Березин, И. А. Трунов, А. Я. Жуков, И. Н. Мажугин, В. М. Жирин, А. С. Агеев, П. А. Кропов, Ю. А. Прокудин, И. Д. Дмитриев, Е. П. Данюлис, А. Н. Федосимов, В. И. Березин, Т. И. Берестова, Л. В. Любимов, С. В. Вавилов, Т. Б. Товянскас, Г. М. Давидов, А. В. Богачев, Е. А. Бабинская, Н. Д. Скоробогатько и многие другие, работы которых нашли свое отражение в изданных учебниках и пособиях [11, 18, 22, 33, 40, 48, 67, 68, 75]. В результате их исследований сделан значительный шаг в использовании материалов аэро- и космической съемки для целей лесного хозяйства.

Основными показателями, характеризующими строение полога древостоя, являются размеры и форма крон, сомкнутость крон и полога, размещение деревьев в пологе, густота, расстояние между деревьями и кронами, закономерности распределения и взаимосвязи между показателями.

Размер крон. К показателям, характеризующим положение и размер крон, относятся: h – высота дерева; l_k – длина кроны; d_k – диаметр кроны; h_{dk} – высота до наибольшего диаметра кроны, где крона делится на верхнюю и нижнюю части; $h_{нк}$ – высота до начала кроны (рис. 4.2).

Длина кроны – ее протяженность от начала кроны (первых живых сучьев) до вершины. Отдельные ветви, расположенные ниже и не участвующие в образовании кроны, не принимают во внимание. Длину кроны определяют как разность между высотой дерева и высотой начала кроны, измеряемыми при помощи высотомеров.

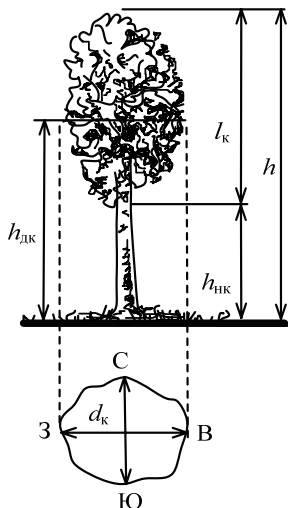


Рис. 4.2. Размеры кроны отдельного дерева

Диаметр кроны определяется как среднее значение измерений проекции кроны в двух направлениях. При изучении горизонтальных проекций крон измерение диаметра выполняется в четырех направлениях – С – Ю, СВ – ЮЗ, В – З, СЗ – ЮВ.

Для определения размеров крон используют кронометры, высотометры-кронометры, например ВК-1. При отсутствии кронометра проецирование контура кроны на землю может выполняться с помощью вехи или отвеса.

Форма крон. Кроны различных древесных видов значительно различаются не только по размерам, но и по форме. При этом можно выделить горизонтальную и вертикальную форму проекций крон. Горизонтальная форма получается путем проецирования контура кроны на горизонтальную, а вертикальная – на вертикальную плоскости, установленные перпендикулярно проецирующим лучам (рис. 4.3).

При одинаковых высоте дерева, ширине и длине кроны ее вертикальная форма неодинакова и зависит от высоты наибольшей ширины кроны. Чем выше она расположена, тем выпуклее ее вершина, больше освещенность, а следовательно, тем отчетливее она изобразится на снимках. Внешний вид кроны складывается из формы верхней и нижней частей, которые, как правило, несимметричны.

Например, верхняя часть кроны может быть конусовидной, а нижняя – закругленной или овальной. Относительно законченную классификацию форм крон деревьев и их определений применительно к лесам таежной зоны дал Н. И. Баранов (рис. 4.4) [67, 68, 11].

Согласно этой классификации выделяют следующие формы крон деревьев: остроконусовидная (визуально угол меньше 45°), тупоконусовидная, яйцевидная, параболоидная, парашютовидная, полшаровидная, шаровидная и цилиндрическая.

Профессор Г. Г. Самойлович предложил более сложную классификацию форм крон деревьев. Для классификации горизонтальных проекций крон он выделил четыре группы, каждая из которых включает пять видов (рис. 4.5).

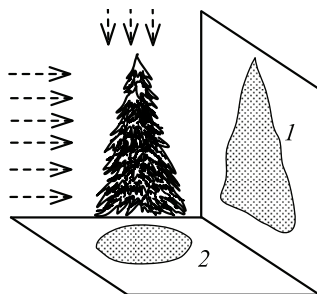


Рис. 4.3. Проекция крон:
1 – вертикальная;
2 – горизонтальная

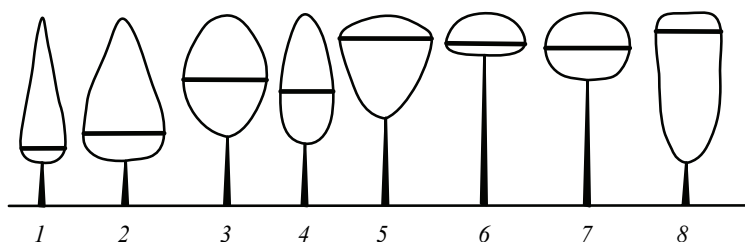


Рис. 4.4. Формы крон древесных пород по классификации Н. И. Баранова:
1 – остроконусовидная; 2 – тупоконусовидная; 3 – яйцевидная; 4 – параболоидная;
5 – парашотовидная; 6 – полушаровидная; 7 – шаровидная; 8 – цилиндрическая

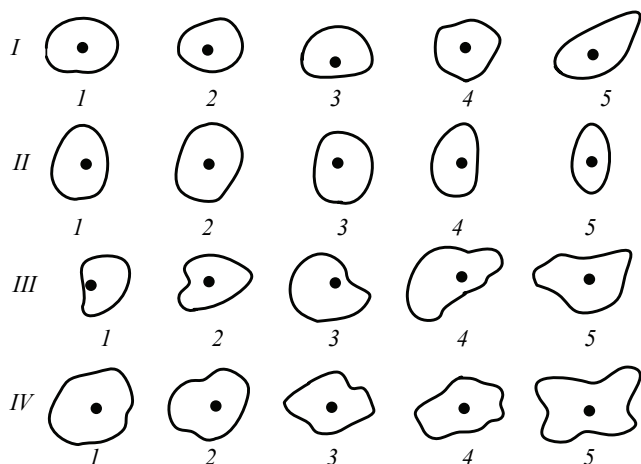


Рис. 4.5. Классификация форм горизонтальных проекций крон:
I – округлые: 1 – округлая; 2 – неправильно-округлая; 3 – асимметрично округлая;
4 – округло-вытянутая; 5 – округло-длинновытянутая;
II – эллипсовидные: 1 – эллипсовидная;
2 – расширенно-эллипсовидная; 3 – неправильно-эллипсовидная;
4 – асимметрично выпукло-вытянутая; 5 – выпукло-вытянутая;
III – однобокосжатые (1–5);
IV – неправильные: 1, 2, 4 – неправильные; 3 – ромбовидная; 5 – узорчатая

Все возможные вертикальные формы проекций крон Г. Г. Самойлович разделил на 8 рядов (типов), а каждый ряд в зависимости от характера ветвления и формы верхних и нижних частей крон – на 3–5 видов (рис. 4.6).

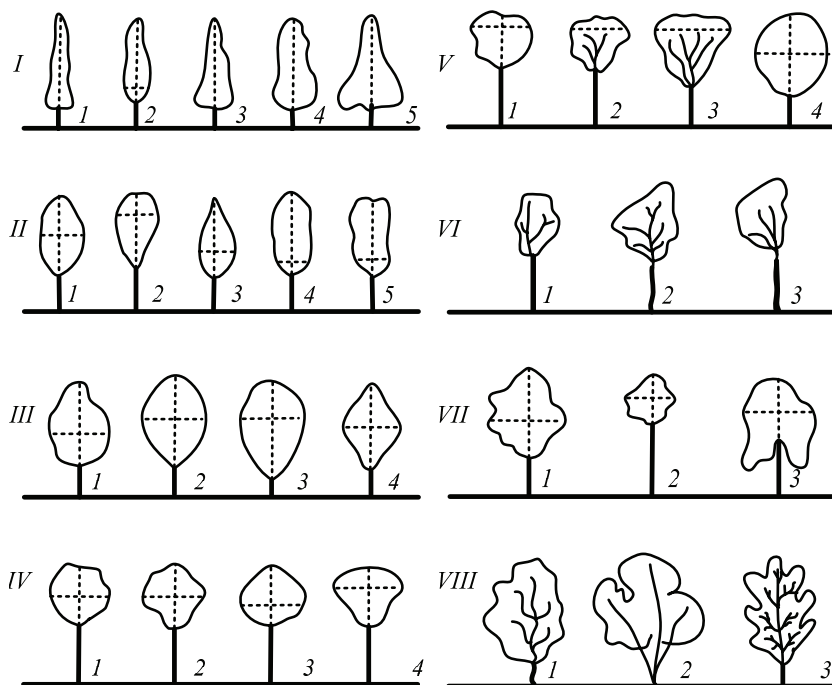


Рис. 4.6. Формы крон древесных пород
по классификации Г. Г. Самойловича:

- I* – конусовидные: 1 – узкоконусовидная (шиловидная); 2 – узкопирамидальная; 3 – конусовидная; 4 – тупоконусовидная; 5 – ширококонусовидная;
- II* – эллипсовидные и цилиндрические: 1 – эллипсовидная; 2 – овально-конусовидная (снизу); 3 – конусовидно-овальная (снизу); 4 – цилиндрическая; 5 – неправильно-цилиндрическая;
- III* – параболоидные (яйцевидные) и ромбовидные: 1 – параболоидная (яйцевидная); 2 – полукругло-овальная; 3 – полукругло-длинновытянутая; 4 – ромбовидная;
- IV* – шаровидные и сфероидальные: 1 – шаровидная; 2 – неправильно-округлая; 3 – сфероидальная (полусферовидная); 4 – широкоовальная;
- V* – плосковершинные и куполообразные: 1 – плосковершинная; 2 – плосковершинно-узурчатая; 3 – плосковершинно-раскидистая (зонтичная); 4 – куполообразная;
- VI* – неправильные: 1 – неправильно-однобокая; 2 – неправильно-узурчато-однобокая; 3 – овально-однобокая высокопосаженная;
- VII* – узурчатые, раскидистые и плакучие: 1 – узурчатая; 2 – узурчатая высокопосаженная; 3 – плакучая;
- VIII* – сложные: 1 – длинная рассеченно-узурчатая; 2 – многоствольная сложная; 3 – канделябровидная

Такая классификация в зависимости от вида верхней и нижней частей позволяет при изучении в натуре полога древостоев присваивать формам крон двойное наименование, например II, 3 [22, 67, 75].

При изучении форм крон в каждой категории насаждений производится перечет деревьев с подразделением по форме крон (в пределах каждой породы отдельно) или при наличии достаточной тренировки глазомерно определяется процентное распределение деревьев по формам крон. Однако при дешифрировании аэрофотоснимков выделить формы крон деревьев бывает очень сложно, так как на изображении полога древостоя просматриваются только их верхние части. Поэтому при описании дешифровочных признаков большое внимание уделяется именно им.

Формы крон деревьев одной породы не остаются постоянными, хотя для каждой породы одна из форм является преобладающей. Изменение формы кроны происходит с возрастом древостоя, значительное влияние оказывает полнота и состав. С увеличением возраста или понижением полноты кроны всех древесных пород приобретают более закругленные формы.

Густота крон. Значительное влияние на контрастность изображения, четкость границ теней оказывает густота крон. В зависимости от общей доли просветов между ветвями кроны подразделяются на три категории: густые кроны – кроны, имеющие не более 25% просветов между ветвями; кроны средней густоты – 26–50% просветов; редкие кроны – кроны, сквозь которые видны сучья и ветви деревьев, расположенных за данным деревом, или же у которых при виде сбоку имеется более 50% промежутков между ветвями (рис. 4.7).

Чем гуще крона, тем контрастнее ее изображение на снимке, более четко выражены собственные тени и очертания кроны, переход от освещенной части к затененной, что имеет существенное значение для оценки видового состава при дешифрировании снимков. Изучение густоты крон показало, что ели свойственны густые кроны, у сосны, березы и осины – кроны средней густоты. Влияние возраста на густоту крон светолюбивых пород почти не сказывается, у пород теневыносливых с повышением возраста густота крон снижается; с уменьшением полноты густота крон повышается. Значительное влияние на густоту крон оказывают условия произрастания: чем благоприятнее условия произрастания, тем гуще крона. Густота крон затененных деревьев ниже, чем деревьев, растущих свободно [11].

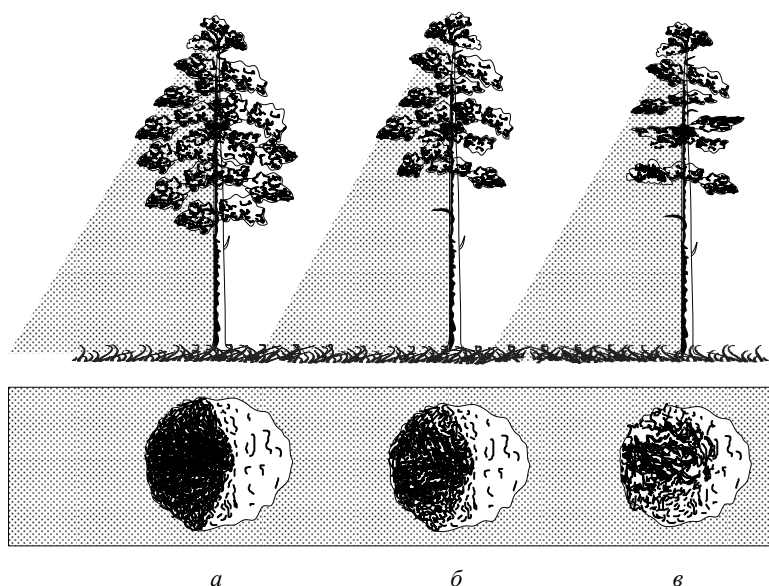


Рис. 4.7. Густота кроны:
а – густая; б – средняя; в – редкая

Сомкнутость кроны и полога древостоя. Перекрывание кроны рядов стоящих деревьев называют сомкнутостью кроны. Кроны могут перекрываться на ту или иную величину или находиться на некотором расстоянии друг от друга.

В зависимости от плоскости перекрытия выделяют горизонтальную и вертикальную сомкнутость кроны. Кроны двух деревьев сомкнуты по горизонтали, если высота деревьев приблизительно одинакова и все кроны находятся на одной высоте. Вертикальная сомкнутость кроны наблюдается у деревьев разной высоты, когда верхняя часть кроны более низкого дерева перекрывается нижней частью кроны более высокого.

В зависимости от характера перекрытий кроны деревьев выделяют несколько типов полога древостоя: горизонтальной сомкнутости, вертикальной сомкнутости, вертикально-ступенчатой сомкнутости.

Полог с горизонтальной сомкнутостью кроны наблюдается в чистых одновозрастных древостоях, когда кроны составляющих полог

деревьев имеют близкие форму и размер, а разница деревьев по высоте незначительна. В этом случае кроны смыкаются примерно на одной высоте и создают горизонтальную сомкнутость (рис. 4.8, *а*).



а



б



в

Рис. 4.8. Сомкнутость полога:

а – горизонтальная; *б* – вертикальная; *в* – вертикально-ступенчатая

Полог с вертикальной сомкнутостью встречается у сложных насаждений, когда верхняя часть крон деревьев 2-го яруса смыкается с кронами деревьев 1-го яруса или входит в нижнюю часть полога 1-го яруса (рис. 4.8, б). Глубина полога таких насаждений, т. е. протяженность от вершины самого высокого дерева до начала живой кроны самого низкого, значительно больше, чем при горизонтальной сомкнутости.

Полог с вертикально-ступенчатой сомкнутостью (рис. 4.8, в) характерен для сложных многоярусных насаждений, когда деревья имеют неодинаковые высоты и расположение в пространстве, а кроны – разные форму и размеры. Глубина этого полога наибольшая, просматриваемость в глубину незначительна [22]. При этом на отдельных участках выдела может наблюдаться как горизонтальная, так и вертикальная сомкнутость полога.

Площадь горизонтальной проекции полога древостоя складывается из сумм площадей проекций крон деревьев, входящих в полог, за исключением площадей перекрытых частей крон. При изучении строения полога древостоя зарисовывают его профиль и план, на которых отражаются характерные особенности полога, а также отображаемые кронами деревьев тени.

Числовая характеристика горизонтальной проекции выражается через степень сомкнутости полога ($C_{\text{п}}$), определяемую как отношение покрытой проекциями крон площади, за исключением перекрывающихся частей крон, к общей площади участка:

$$C_{\text{п}} = \frac{(\sum S_{\text{к}} - \sum S_{\text{пк}})}{S_{\text{уч}}}, \quad (4.1)$$

где $\sum S_{\text{к}}$ – сумма площадей проекций крон; $\sum S_{\text{пк}}$ – сумма перекрывающихся частей крон; $S_{\text{уч}}$ – площадь участка.

Густота древостоя и расстояние между деревьями. Густота и расстояние между деревьями тесно взаимосвязаны между собой и являются важными показателями при дешифрировании. Густота характеризует количество деревьев на одном гектаре. В большинстве насаждений кроны деревьев, как правило, соприкасаются или перекрываются друг с другом, а часть их находится под кронами более крупных деревьев. По этой причине отображаются не все, а только отдельно стоящие деревья верхнего полога и деревья, кроны которых освещаются солнцем, что необходимо учитывать при дешифрировании.

Особенно большие различия могут наблюдаться в смешанных еловых или с участием ели насаждениях. Число деревьев, видимых на снимках, увеличивается по мере увеличения возраста насаждений, уменьшения полноты и снижения класса бонитета.

Динамика густоты с возрастом древостоя приведена в таблицах хода роста насаждений. Можно отметить, что с увеличением возраста размеры крон становятся больше, увеличивается расстояние между деревьями и промежутки между кронами, а густота уменьшается. Расстояние между кронами имеет важное значение, так как оказывает большое влияние на текстуру изображения полога и его просматриваемость в глубину.

4.2. Изучение строения полога древостоя

Для изучения закономерностей строения полога, взаимосвязей между показателями полога и таксационными показателями насаждений закладываются стационарные (постоянные) и временные таксационно-дешифровочные пробные площади (ТДПП) или таксационно-дешифровочные выделы (ТДВ). Закладку таксационно-дешифровочных пробных площадей и выделов желательно проводить в период съемки. Величина и порядок закладки пробных площадей определяются ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки», дополнительно оцениваются также дешифровочные показатели древостоев. Подробно работы по закладке пробной площади описаны в литературе по лесной таксации [7]. На пробной площади выполняется описание подроста, подлеска, живого напочвенного покрова, почвы. Возраст каждого элемента леса определяют возрастным буравом или подсчетом годичных колец на пнях, по главной породе определяются класс бонитета, тип леса и тип условий произрастания. Подробно описываются характерные формы и густота крон для каждой древесной породы.

Работы по закладке и таксации таксационно-дешифровочной пробной площади выполняются в несколько этапов.

Привязка и отвод пробной площади производится с помощью буссоли (гониометра) и мерной ленты. Размер определяется

по минимальному количеству деревьев главной породы, однако он должен быть таким, чтобы пробную площадь можно было уверенно опознать на снимке. По данным отвода на местности и в соответствии с масштабом границы пробной площади переносятся на снимок.

В связи с широким применением в последнее время компьютерных технологий обработки информации и цифровых снимков нанесение границ пробной площади и анализ изображений выполняется с использованием геоинформационных систем. Для этого вначале выполняется трансформирование и привязка снимка к системе координат, а затем наносятся привязочный ход и границы пробной площади.

Перечет деревьев проводится при условиях (время года, высота и азимут солнцестояния), близких к условиям проведения съемки. Это необходимо, чтобы установить, какие деревья будут изображены на снимках, а какие нет. Дата и время проведения съемки указаны на снимке, а зная географическую широту местности по астрономическим таблицам, можно определить угол и азимут Солнца. Перечет деревьев выполняют по ступеням толщины дополнительно с разделением на три категории: свободно стоящие – деревья, кроны которых освещены солнцем и не затеняются кронами соседних деревьев; частично закрытые – деревья, кроны которых находятся несколько ниже и частично затенены; закрытые – деревья, кроны которых находятся под кронами вышестоящих деревьев или полностью затенены их кронами. На стационарных пробных площадях все деревья нумеруются, диаметры измеряются в двух направлениях с точностью до 1 мм и для каждого дерева указывается вышеназванная категория.

На основании выделенных категорий деревья разделяются на видимые и невидимые на снимке. К видимым на снимке относят свободно стоящие деревья (кроны находятся отдельно в верхнем пологе насаждения и практически всегда освещены лучами Солнца) и частично закрытые (часть крон располагается под кронами соседних деревьев или затенена в момент фотографирования кронами соседних деревьев, изображаются на аэрофотоснимках только тогда, когда освещены их вершины). К невидимым относят категорию «закрытые», которые при всех условиях съемки на снимках не изображаются. При разделении деревьев на видимые и невидимые необходимо принимать во внимание разрешающую способность снимка. Для более детального анализа категория «частично закрытые» при перечете может

дополнительно подразделяться по 10%-ным или 25%-ным градациям перекрытия.

Картирование деревьев и проекций крон проводится, как правило, сплошное – на стационарных и частичное – на временных пробных площадях. При сплошном картировании всю пробную площадь разбивают на квадраты или прямоугольники размером 5×5 , 5×10 или 10×10 м в зависимости от среднего диаметра крон и густоты древостоя, по углам которых вбиваются колышки. Все деревья нумеруются и определяются их координаты в пределах квадрата. Кроме того, определяется местоположение деревьев, находящихся за границей площади, проекции крон которых попадают на пробную площадь.

Для каждого дерева измеряются диаметр на высоте 1,3 м, диаметр кроны, диаметр видимой на аэрофотоснимке части кроны, высота дерева, высота расположения наибольшего диаметра кроны, длина кроны; описываются густота и форма кроны (по классификации Г. Г. Самойловича). Диаметр крон правильной формы измеряют в двух, а сильно асимметричных крон в четырех направлениях – С – Ю, В – З, СВ – ЮЗ, СЗ – ЮВ.

Частичное картирование проводится на полосе (ленте), отграниченной вдоль одной из сторон или по диагонали пробной площади. Ширина полосы зависит от среднего диаметра кроны: если $d_k < 5$ м, то ширина полосы принимается равной 5 м; при $d_k > 5$ м – 10 м. Длина полосы должна быть не менее 50 м, чтобы на ней было 40–60 деревьев основного элемента леса. Отграниченную полосу разбивают на квадраты размером 5×5 или 10×10 м. Все последующие операции выполняются как и при сплошном картировании деревьев.

Местоположение деревьев и проекции крон зарисовываются на миллиметровой бумаге в масштабе 1:100 или 1:200. Для наглядного представления о вертикальном строении полога насаждения зарисовывается вертикальный профиль полога (разрез насаждения в вертикальной плоскости). Он позволяет судить о форме и размерах крон, высоте деревьев, участии крон в формировании полога и изображения на снимке.

Определение степени сомкнутости полога может выполняться различными способами. При сплошном картировании деревьев и проекций крон степень сомкнутости полога определяется как отношение площади проекций крон (проекции перекрывающихся частей

крон учитываются только один раз) к общей площади участка, на котором выполняется учет (4.1). При определении степени сомкнутости полога учитываются все проекции крон, попадающие на пробную площадь, в том числе деревьев, находящихся за пределами пробной площади. Если деревья находятся на пробной площади, а проекции их крон за ее пределами, их не учитывают. Так как составление плана проекций крон и оценка площади требуют больших затрат, на практике применяют более простые методы: линейный и точечный.

Линейный способ заключается в следующем. На местности равномерно по территории пробной площади (выдела) закладываются параллельные (или взаимно перпендикулярные) линии, на которых откладываются и измеряются отрезки, приходящиеся на проекции крон. Для этого протягивается лента, по которой снимаются отсчеты, приходящиеся на начало и окончание проекции кроны (рис. 4.9, *а*).

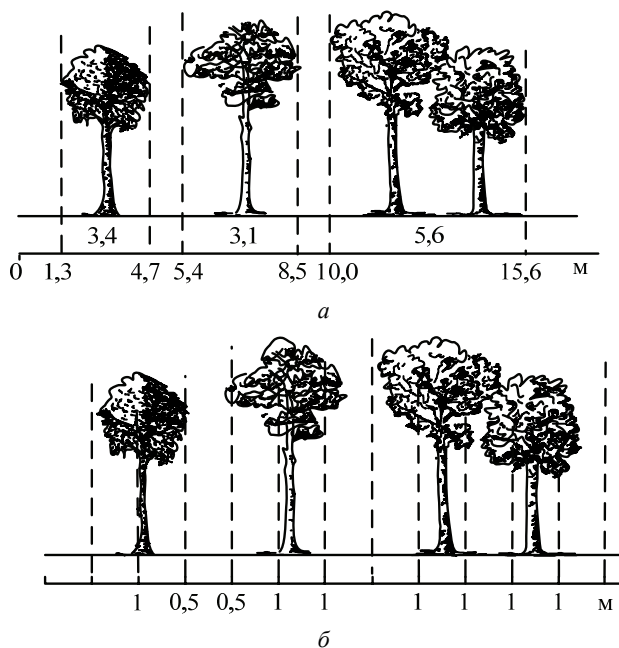


Рис. 4.9. Оценка сомкнутости полога древостоя:
а – линейный способ; *б* – точечный способ

Протяженность проекции кроны вычисляется как разность между отсчетами. Степень сомкнутости крон определяется как отношение суммы отрезков, приходящихся на проекции крон, к общей длине линии. Расстояние между параллельными линиями принимается в зависимости от среднего диаметра крон и площади участка и может быть от 5 до 50 м. Для получения результатов приемлемой точности общая длина всех линий должна быть не менее 200 м.

Точечный способ в целом похож на линейный (рис. 4.9, б). На пробной площади также закладываются параллельные линии, при движении по которым через равные интервалы выполняется визирование вверх и подсчитывается число точек визирования, попавших на крону или край кроны. Точки визирования, приходящиеся на крону, принимают за 1, на край кроны – за 0,5. Степень сомкнутости полога определяется как отношение суммы точек, попавших на крону и край кроны, к общему числу точек. Для обеспечения точности определения сомкнутости полога $\pm 5\%$ общее число точек измерений на пробной площади размером 0,5–1,0 га должно быть 250–300 шт.

Обработка материалов таксации выполняется вручную или с использованием ЭВМ. Для каждого элемента леса вычисляются таксационные (возраст, средние диаметр и высота, сумма площадей сечений, относительная полнота, запас) и дешифровочные (средние диаметр крон, диаметр видимой части крон, длина крон и др.) показатели. Определяются видимый на снимке состав древостоя (дешифровочный состав), степень сомкнутости полога, для каждого элемента леса выполняется статистический анализ распределений по различным показателям [7].

В камеральных условиях по снимкам выполняется измерительное дешифрирование насаждений на пробных площадях, оцениваются диаметр и форма крон, густота и состав древостоя, степень сомкнутости полога, подробно описываются форма собственных и падающих теней, выпуклость крон, разновысотность древостоя, соотношение размеров крон и т. д., исследуются закономерности строения и взаимосвязи между дешифровочным и таксационным показателями.

Такой детальный анализ таксационных и дешифровочных показателей насаждений, особенностей их изображения на снимках, позволяет установить влияние разных факторов на изобразительные и информативные свойства аэрофотоснимков.

4.3. Закономерности строения полога древостоя

В настоящее время нет нормативных таблиц, характеризующих строение и взаимосвязи между показателями полога древостоя. В литературе встречаются отдельные публикации по результатам изучения форм крон и их изменению в зависимости от возраста, полноты, состава, возрастной структуры и других таксационных показателей насаждений. Однако таких научных работ очень мало, хотя эта тема сегодня достаточно актуальна, что связано с развитием цифровых технологий и автоматизированных методов дешифрирования снимков.

Формы и размеры крон деревьев. Формы крон деревьев не остаются постоянными для одной и той же породы в пределах одного древостоя, тем более в древостоях разного состава, возраста, полноты, типа леса, однако для каждой породы одна из форм является преобладающей. С возрастом формы крон меняются. В табл. 4.1 приведены типичные формы крон основных древесных видов и их изменения с возрастом в чистых насаждениях I–III классов бонитета с полнотой 0,6 и выше (по данным С. В. Белова, классификация Н. И. Баранова [11]). Анализируя данную таблицу, можно отметить, что с увеличением возраста и понижением полноты (независимо от возраста) кроны всех древесных пород приобретают более закругленные формы. Смещение светолюбивых пород (С, Лц, Б, Ос) с теневыносливыми (Е, П) определяет преобладание у первых более закругленных, у вторых более заостренных форм. Влияние условий произрастания сказывается в большей закругленности форм с ухудшением условий роста.

И. Д. Дмитриев, Е. С. Мурахтанов, В. И. Сухих, А. В. Любимов, С. В. Вавилов при изучении форм крон использовали классификацию Г. Г. Самойловича. По их данным (по Дмитриеву [22]), в сосновых древостоях Лисинского учебно-опытного лесхоза Ленинградской области преобладают: в возрасте до 45 лет – конусовидно-овальные (40–50%) и неправильные (25%); 110 лет – неправильные (40%), плосковершинные и куполообразные (45%); 70–80 лет – овально-конусовидные (снизу), эллипсовидные и параболоидные (по 20–30%).

Для насаждений с преобладанием ели в возрасте до 60–80 лет наиболее характерны конусовидные кроны; к 100 годам кроме конусовидных крон (70–80%) появляются эллипсовидные (II, 1 – 8–9%) и тупоконусовидные (I, 4 – 3–5%), а к 150 годам – кроны неправильной формы (VI).

Таблица 4.1

Формы крон древесных видов и их изменения с возрастом

Возраст, лет	Древесный вид	Преобладающая форма	Сопутствующая форма
До 20	Ель, пихта Сосна Кедр Лиственница Береза Осина	Остроконусовидная	Остроконусовидная
30–50	Ель, пихта	Остроконусовидная	Параболоидная
	Сосна, кедр	Остроконусовидная, яйцевидная	Тупоконусовидная
	Лиственница	Остроконусовидная	Тупоконусовидная,
	Дуб, береза, осина	Яйцевидная	Шаровидная
70–100	Ель, пихта	Тупоконусовидная, парабоидная	Яйцевидная
	Сосна	Яйцевидная	Яйцевидная
	Кедр	Тупоконусовидная	Тупоконусовидная
	Лиственница	Тупоконусовидная	Параболоидная
	Дуб	Яйцевидная	Полушаровидная, парабоидная
	Береза	Яйцевидная	Полушаровидная, парашотовидная
	Осина	Шаровидная, яйцевидная	Полушаровидная, парашотовидная
Больше 100	Ель, пихта	Параболоидная	Тупоконусовидная
	Сосна	Полушаровидная	Парашотовидная
	Кедр	Цилиндрическая	Тупоконусовидная
	Лиственница	Полушаровидная	Тупоконусовидная
	Дуб	Полушаровидная	Шаровидная

В березняках преобладающая форма крон: в возрасте до 30 лет – конусовидно-овальная (II, 3); в 50 лет – парабоидная (III, 1); в 70 лет эллипсовидная (II, 1); от 80 лет и выше – ромбовидная (III, 4), шаровидная и сфероидальная (IV).

В молодняках осины преимущественны островершинные конусовидно-овальные (II, 3) формы крон, в средневозрастных древостоях – парабоидные (III, 1) или эллипсовидные (II, 1), в спелых – неправильно-округлые, сфероидальные или шаровидные (IV).

Формы верхних частей крон каждой породы разнообразны, но в спелом возрасте преобладают более закругленные формы, в смешанных насаждениях деревья всех пород приобретают более заостренные формы. Размеры крон и соотношение между максимальным и минимальным размерами изменяются под влиянием возраста, состава, полноты и условий произрастания. С увеличением возраста размеры крон увеличиваются, а с увеличением полноты при прочих одинаковых условиях – уменьшаются. Изменение полноты оказывает, как правило, более сильное воздействие, т. е. при низкой полноте в более молодом возрасте кроны крупнее, чем при высокой полноте в более старшем. Этот факт особенно важно учитывать при дешифрировании по аэроснимкам возраста древостоев.

Влияние состава определяется степенью теневыносливости образуемых насаждений древесных видов и их высотой. Так, при равных высотах размеры крон светолюбивых пород меньше, а теневыносливых больше, чем в чистых насаждениях.

Размеры крон отдельных деревьев изменяются в зависимости от их диаметров: чем толще деревья, тем больше размеры их крон. Кривые распределения деревьев по диаметрам крон имеют положительную асимметрию и по своему характеру близки к кривой нормального распределения.

Ряды распределения деревьев по диаметрам крон подчиняются той же закономерности, что и ряды деревьев по диаметрам на высоте 1,3 м. Ранг дерева со средней кроной равен примерно 60%.

Редукционные числа для еловых насаждений были определены Ю. А. Прокудиным (табл. 4.2), которые наглядно показывают ранг деревьев со средним значением показателей крон в процентном ряду распределения (по В. И. Сухих [75]).

Таблица 4.2

Редукционные числа по высоте до наибольшей ширины крон ($h_{\text{дк}}$), диаметрам ($d_{\text{к}}$) и протяженности крон ($l_{\text{к}}$) для еловых насаждений

Показатель	Ранг										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$h_{\text{дк}}$	40	72	83	89	92	96	100	105	110	116	150
$d_{\text{к}}$	20	55	65	73	81	89	100	110	123	140	190
$l_{\text{к}}$	10	57	70	78	87	98	103	110	121	131	175

Структура полога древостоя. В пологе древостоя кроны занимают разное пространственное положение, в зависимости от которого они могут изображаться на снимках или нет. Изображаются деревья, растущие свободно или частично закрытые соседними деревьями, если размеры освещенных их частей больше разрешающей способности аэрофотоснимка.

Эти деревья сосредоточены в правой части рядов распределения и образуют верхнюю часть полога древостоя. По данным Г. Г. Самойловича, в сосновых, березовых и осиновых насаждениях различной полноты и возраста разница между видимыми на снимках деревьями и их общим числом значительно зависит от масштаба и составляет: для снимков М 1:5000 – от 23 до 54%; М 1:10 000 – от 33 до 63%, М 1:15 000 – от 56 до 73%.

Ошибки при оценке числа деревьев характерны для древостоев всех пород. С возрастом процент видимых на аэроснимках деревьев увеличивается, особенно в древостоях осины, березы и сосны, что объясняется интенсивным отпадом угнетенных и тонкомерных деревьев.

В сосняках и березняках состав видимого полога и первого яруса совпадает в 70% случаев, в 25% случаев доля березы или сосны меньше или больше на 1 единицу состава и в 5% случаев расхождение составляет ± 2 единицы. В ельниках разница в дешифровочном и таксируемом составе зависит от доли сопутствующих пород, их светолюбия, возраста и других факторов. Доля участия ели ниже на 1–2 единицы в 55–65% случаев, на 2–3 единицы – в 35–40%, на 4 единицы – в 5% случаев. Это характерно для высокопроизводительных ельников высокой полноты и сложной структуры с большой долей участия лиственных пород [22].

4.4. Взаимосвязи между дешифровочными и таксационными показателями полога древостоя

Как указывалось ранее, взаимосвязи между показателями, характеризующими полог древостоя, и таксационными показателями древостоя являются основой лесотаксационного измерительно-

го дешифрирования. Эти связи не остаются постоянными, но они могут быть установлены и использованы при оценке показателей древостоя по снимкам. Основными показателями, которые возможно измерить на снимках, являются высота деревьев и средняя высота древостоя, густота древостоя, дешифровочный состав, размеры и форма крон, сомкнутость полога, поэтому в первую очередь представляют интерес зависимости от них таксационных показателей насаждения (состава, полноты, среднего диаметра, запаса).

Так, существуют регрессионные зависимости между высотой и диаметром деревьев на высоте 1,3 м, диаметрами крон и ствола на высоте 1,3 м, высотой дерева и длиной кроны, высотой дерева, длиной и высотой до наибольшей ширины кроны и пр. Эти связи аппроксимируются с помощью различных уравнений (парабол 1–3-го порядков, логарифмическими, показательными, гиперболическими и др.) и характеризуются достаточно высокими коэффициентами множественной корреляции, достигающими 0,8 и более.

Изменчивость размеров горизонтальных проекций крон в чистых насаждениях высокой сомкнутости полога незначительная, наименьшие колебания в диаметрах крон и высотах деревьев наблюдаются в осиновых, березовых, сосновых, лиственничных и кедровых насаждениях [75]. В низкополнотных и еловых насаждениях, представленных несколькими поколениями, различия по высоте и размерам проекций крон более выражены.

Средние диаметр крон и высота деревьев, видимых на снимках и составляющих горизонтальную проекцию полога, больше, чем для всего насаждения. Так, по данным Г. Г. Самойловича [68], в сосновых насаждениях средняя высота деревьев в горизонтальной проекции полога больше его средней высоты на 0,7–3,0 м. Некоторое влияние на амплитуду колебаний таксационно-дешифровочных показателей оказывают возраст и полнота насаждений.

Анализ материалов различных исследований показывает, что длина крон у разных древесных видов различна: наибольшая у ели, несколько меньше у березы, сосны и наименьшая у осины. Наибольшая ширина крон выше расположена у осины, затем по степени уменьшения у сосны, березы и ели.

В горизонтальной проекции полога практически любого насаждения есть промежутки между кронами, которые могут быть различной

величины и конфигурации. Как показали исследования разных авторов, наиболее тесная корреляция наблюдается между сомкнутостью полога и полнотой древостоя. Так, в чистых сосновых насаждениях различных возрастов с небольшой примесью березы или других пород сомкнутость полога меньше полноты на 0,1–0,5, в еловых – на 0,1–0,4, лиственничных – на 0,2–0,6; кедровых – на 0,2–0,5, дубовых – на 0,2, березовых – на 0,3 единицы. В осиновых древостоях сомкнутость равна полноте или больше на 0,1–0,2 единицы.

По данным И. М. Данилина, уравнения, характеризующие взаимосвязь между полнотой (P) и сомкнутостью полога (C_n) спелых кедровых, сосновых и березовых насаждений Восточной Сибири, имеют следующий вид [75]:

$$\text{кедр: } P = 0,1094 + 1,2684C_n + 0,1218C_n^2;$$

$$\text{сосна: } P = -0,0043 + 2,0028C_n - 0,7439C_n^2;$$

$$\text{береза: } P = 0,2548 + 0,8554C_n + 0,1140C_n^2;$$

а численные соотношения между ними представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Полнота насаждений при различных значениях сомкнутости полога

Древесный вид	Полнота при сомкнутости									
	0,15	0,25	0,35	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
Кедр	0,30	0,43	0,57	0,70	0,77	0,84	0,91	0,98	1,06	–
Сосна	0,28	0,45	0,61	0,75	0,81	0,87	0,93	0,98	1,03	–
Береза	0,33	0,47	0,57	0,66	0,71	0,76	0,81	0,86	0,91	0,96

Разница в показателях полноты и сомкнутости полога зависит от целого ряда факторов: состава, возраста, условий местопроизрастания насаждений, и эти особенности должны учитываться при определении полноты насаждений по снимкам.

Между таксационно-дешифровочными показателями, характеризующими древостой и его полог, существуют не только парные, но и множественные зависимости, например между диаметром на высоте груди, высотой и полнотой – $d_{1,3} = f(h, P)$ или диаметром на высоте груди, высотой, диаметром крон и сомкнутостью полога, классом бонитета – $d_{1,3} = f(h, d_k, C_n, \text{класс бонитета})$, которые моделируются с помощью различных корреляционных уравнений или выражаются

в виде графиков, номограмм, таблиц, в том числе хода роста, дополненных дешифровочными показателями (d_k , C_p , l_k , $h_{нк}$, $h_{дк}$ и др.).

Установлено, что средний диаметр на высоте груди и сумма площадей сечения древостоя зависят от средних высоты, сомкнутости полога (полноты), количества деревьев на 1 га, длины кроны, возраста, класса бонитета. Видовая высота зависит от $d_{1,3}$, P и l_k . Зависимости высоты от возраста, процента выхода деловой древесины и текущего прироста от других факторов являются региональными.

В качестве примера в табл. 4.4 приводятся уравнения взаимосвязей между $d_{1,3}$, h и P древостоев некоторых лесообразующих древесных видов Сибири для различных классов бонитетов, составленные И. М. Данилиным [75]. Проведенный анализ значимости различных показателей, входящих в приведенные в табл. 4.4 уравнения, показал, что наибольшее значение при определении среднего диаметра на высоте груди имеет средняя высота насаждения.

Таблица 4.4

Зависимости между средними диаметрами ($d_{1,3}$), высотами (h) и полнотами (P) древостоев основных лесообразующих пород Сибири

Порода	Класс бонитета	Уравнение связи
Кедр	III	$d_{1,3} = 3,270 + 1,772h - 0,003h^2 - 12,485P + 1,157P^2$
	IV	$d_{1,3} = 1,335 + 1,982h - 0,011h^2 - 7,299P - 1,031P^2$
Сосна	II	$d_{1,3} = 4,791 + 0,749h + 0,022h^2 - 4,616P - 1,353P^2$
	III	$d_{1,3} = 6,843 + 0,556h + 0,026h^2 - 7,475P + 1,169P^2$
	IV	$d_{1,3} = 5,419 + 0,744h + 0,025h^2 - 5,050P + 0,086P^2$
Лисвенница	III	$d_{1,3} = 8,799 + 0,109h + 0,049h^2 - 10,685P + 1,062P^2$
	IV	$d_{1,3} = 9,917 + 0,219h + 0,046h^2 - 13,338P + 3,270P^2$
Береза	I–III	$d_{1,3} = 3,949 + 0,546h + 0,022h^2 - 2,674P - 0,903P^2$
Осина	I–III	$d_{1,3} = 15,464 - 0,811h + 0,054h^2 + 9,000P - 10,272P^2$

Влияние полноты составило 7,2%, а производительности – 6,4%. Влияние неучтенных факторов несущественно и составило всего 3%. При увеличении производительности насаждения и стабилизированных значениях высоты и полноты наблюдается некоторое уменьшение среднего диаметра древостоя.

Для приведенных уравнений коэффициенты множественной корреляции не ниже 0,96, все уравнения значимы по критерию Фишера, среднеквадратическая ошибка не превышает 2,62 см [75].

5. ДЕШИФРИРОВАНИЕ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

5.1. Понятие о дешифрировании

На самых ранних этапах использования материалов аэрофото- съемки возникла необходимость правильного толкования и оценки объектов, изображенных на снимках. Процесс чтения изображений на аэро- и космических снимках в зарубежной и специальной литературе часто называется интерпретацией. В нашей стране в лесохозяйственной литературе более широкое распространение получил термин дешифрирование.

Дешифрирование – это процесс опознавания объектов, определение их количественных и качественных показателей по изображению. Дешифрирование является составной частью комплекса работ по формированию топографических карт, изучению ландшафтов, выявлению и учету сырьевых ресурсов, оценке степени загрязнения окружающей среды, наблюдению за перемещением воздушных масс и др.

По этому признаку дешифрирование можно подразделить на *топографическое*, или *общее*, и *тематическое*, или *отраслевое*, – дешифрирование в пределах отдельной области или отрасли (например, оценка сельскохозяйственных, лесного фонда и т. д.) [12, 20, 21, 30].

Для разных отраслей народного хозяйства интерес представляют не все объекты и явления, изображенные на снимках, а те из них, которые связаны с деятельностью в данной отрасли. Поэтому дешифрирование имеет, как правило, тематическую направленность, определяющую перечень объектов и их свойств (характеристик), которые должны быть интерпретированы. Одним из видов тематического дешифрирования является *лесное* дешифрирование, которое по своему содержанию может быть подразделено на *контурное* и *таксационное*.

Контурное дешифрирование заключается в разделении площади лесного фонда на отдельные участки (выделы), определение границ и планового положения каждого участка, таксационное дешифрирование – в оценке таксационных показателей насаждений, произрастающих на отдельных участках, и других категорий земель. Таксационное дешифрирование является наиболее сложным, так как имеет целью определение состава, возраста, полноты, класса бонитета, запаса и других таксационных показателей древостоя. Указанное подразделение достаточно условно, так как выделение границ отдельных лесотаксационных участков производится на основе визуальной оценки их таксационных показателей.

По технике выполнения дешифрирование можно подразделить на *визуальное* (или глазомерное) и *измерительное*. При измерительном дешифрировании применяют оптико-механические приборы, имеющие специальные устройства для измерений.

В зависимости от того, используется одиночный снимок или стереопара, выделяются *моноскопическое* или *стереоскопическое* дешифрирования.

В практике лесного хозяйства контурное дешифрирование чаще выполняется визуально, таксационное – с использованием измерительных приборов и инструментов для определения высот древостоев, размеров проекций крон деревьев, сомкнутости полога и густоты древостоя. Все виды лесного дешифрирования выполняются с использованием стереоскопических приборов.

В последнее время в связи с интенсивным развитием компьютерной техники и специализированных программных комплексов широкое распространение получило *автоматизированное* дешифрирование на ЭВМ. Преимущества автоматизированного дешифрирования заключаются в возможностях современных компьютерных технологий по цифровой обработке графической информации, выполнению измерений в стереоскопическом режиме, статистическому анализу, классификации изображений.

В зависимости от места проведения дешифрирование разделяется на *полевое* (выполняется непосредственно на местности путем сопоставления с ней снимка) и *камеральное* (в лабораторных условиях с применением ЭВМ и сложного оборудования для детального анализа и измерений).

5.2. Прямые и косвенные дешифровочные признаки

В связи с тем что объекты земной поверхности имеют различные спектральные отражательные характеристики, они по-разному изображаются на снимке, так как тон и цвет изображения фактически являются функцией отражательной способности объекта в части спектра, где производится съемка. Признаки, по которым объекты земной поверхности могут быть распознаны на снимках, называют дешифровочными. Некоторые признаки, такие как цвет, тон, форма, размеры, границы, особенности и текстура изображения, можно непосредственно увидеть на снимке. Такие признаки называются *прямыми*. Однако многие характеристики и свойства объектов непосредственного отражения на снимках не получают, а дешифрируются на основе закономерностей строения объектов и взаимосвязей с другими признаками. Эти признаки называются *косвенными*. В качестве косвенных обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов или сам факт наличия (либо отсутствия) этих объектов. При лесотаксационном дешифрировании многие таксационные показатели древостоев являются косвенными, и их можно оценить с использованием известных закономерностей строения и роста древостоев, а также на основе взаимосвязей между ними и прямыми дешифровочными признаками древостоев [37, 38].

5.2.1. Прямые дешифровочные признаки

К прямым дешифровочным признакам относятся форма, размеры, границы, цвет, тон, тени, особенности и текстура изображения, расположение объектов, т. е. признаки, которые можно увидеть непосредственно на снимке. Они позволяют выделить изображения отдельных объектов местности на снимке и опознать их.

Форма объектов. На снимках, в зависимости от геометрических свойств, можно выделить три типа объектов: точечные, линейные и площадные. К точечным объектам относятся объекты, величина которых незначительная и которые отображаются на снимках данного масштаба в виде отдельных точек. Точечные объекты видны на изображениях, но из-за малых (в масштабе изображения) размеров их

нельзя идентифицировать. К линейным объектам относятся дороги, просеки, линии электропередач, каналы и другие объекты, имеющие большую протяженность при незначительной ширине. Площадными объектами являются объекты, имеющие значительные размеры на снимке, – это сельхозугодия, лесные массивы, лесотаксационные участки, озера, крупные реки и т. д.

В целом форма площадных объектов может быть близкая к правильным геометрическим фигурам или неправильная. Так, например, объекты искусственного происхождения имеют, как правило, более правильную геометрическую форму, чем естественные объекты. Форму линейных объектов различают в основном по их извилистости. При стереоскопическом дешифрировании различают также плоскую и объемную формы. Однако следует отметить, что при дешифрировании отдельного снимка форма объемных объектов, изображенных в центре и на краю, может значительно различаться.

Размер – признак, сильно зависящий от масштаба снимка, менее определенный, чем форма. При дешифрировании чаще используются не абсолютные, а относительные в сравнении с другими объектами размеры (например: очень крупные, крупные, среднего размера, мелкие, очень мелкие или точечные).

Границы (выделяются по изменению цвета или тона) признак, позволяющий разделять соседние объекты, оценивать их форму. Границы оцениваются по четкости (четкие или нечеткие) и степени извилистости (прямолинейные, слабо извилистые и т. д.). Границы искусственно образованных объектов, как правило, более четкие и прямолинейные, чем у естественных.

Тон и цвет являются основными признаками, позволяющими выделить изображения различных объектов на снимках. Цвет и тон не всегда могут быть определяющими признаками при дешифрировании, так как зависят от условий съемки, применяемых фильтров, фотопленок и фотобумаг, спектральных диапазонов и т. д. Как правило, для дешифровщика более важны цветовые и тоновые различия между объектами. Визуально цвет и тон оцениваются по специальным шкалам, в которых основная характеристика дана по цветовому тону, а дополнительная – по смешению цветов, при этом преобладающий цвет указывается последним, например: темно-оранжевый или светлый тон, сине-зеленый цвет (преобладает зеленый). Человеческий

глаз хорошо улавливает различия по тону двух участков, расположенных рядом и способен различить до 25 ступеней серого тона, но обычно при визуальном дешифрировании ограничиваются шкалой, содержащей 5–7 ступеней (таблица).

Тоновые шкалы

Балл	Тон	
	на панхроматических снимках	на спектрзональных и цветных снимках
1	Белый	Белый
2	Почти белый	Очень светлый
3	Светло-серый	Светлый
4	Средне-серый	Средний
5	Темно-серый	Темный
6	Почти черный	Очень темный
7	Черный	Черный

На панхроматических снимках тоновая шкала представлена серым цветом, на цветных и спектрзональных – различной насыщенностью цвета.

Автоматизированные методы дешифрирования основываются на количественной оценке тона (яркости) монохромных изображений отдельных каналов, полученных в различных спектральных диапазонах. Цифровые методы обработки информации и синтеза цветных изображений с использованием различных комбинаций каналов и преобразований изображений позволяют значительно повысить дешифровочные возможности. При автоматизированном дешифрировании цветных и многозональных снимков используется понятие *сигнатуры*, или *спектрального образа объекта*, – набора значений яркостей изображения объекта в различных спектральных диапазонах. Более подробно методы обработки и дешифрирования цифровых снимков будут рассмотрены в разд. 7.

Размещение объектов позволяет интерпретировать их свойства. Так, взаимное расположение отдельных структурных элементов изображения полога древостоя – крон деревьев различных пород, а также промежутков между ними свидетельствует о характере состава насаждений (равномерный, куртинный), структуре и сомкнутости

полога; размещение не покрытых лесом и нелесных площадей – о степени лесистости и т. д.

Тени – дают представление о вертикальной форме и относительной высоте объектов, в горных районах позволяют дешифровать особенности рельефа и геологические структуры. По тени можно измерить и абсолютную высоту объекта. Вместе с тем тени скрывают часть территории, чем затрудняется процесс дешифрирования, а в гористой или сильно холмистой местности измерение высоты объектов по их теням может привести к значительным ошибкам. При дешифрировании выделяют собственные (образующиеся на части объекта, расположенной с противоположной стороны от солнца) и падающие (отбрасываемые на поверхность земли и другие объекты) тени.

Особенности изображения. Изображение природных объектов может быть однородным или неоднородными и состоять из повторяющихся, более либо менее близких по восприятию, или различных элементов. Выделяют три показателя, характеризующие изображение – текстуру, структуру и рисунок изображения [22, 37, 38, 75].

Элементы, определяющие цветовые и тоновые характеристики изображения, называют текстурой изображения. Текстуру, когда цвет и тон практически не изменяются, называют однородной или гомогенной. Чаще на изображениях природных объектов преобладает гетерогенная, или разнородная, текстура, проявляющаяся в изменениях цвета и тона.

Структурой изображения при дешифрировании называют, как правило, пространственную организацию и взаимное расположение элементов, у которых распознаются форма и размер. Такие элементы могут иметь однородную или различную текстуру. Структура изображения может состоять из регулярно (систематически) или нерегулярно (случайным образом) повторяющихся элементов или быть сложной, состоящей из различных элементов. Типичными примерами регулярной структуры служат изображения садов, пашен и сельхозугодий, нерегулярной – изображения лесных насаждений, сложной – изображения на снимках высокого разрешения городов и населенных пунктов.

Устойчивые сочетания пространственного расположения разных структур, характерные для определенных регионов земной поверхности, называют *рисунком изображения*. В рисунке находят отражение как природные особенности территории, так и пространственные

взаимоотношения объектов антропогенного происхождения. Часто рисунок изображения территории определяется ее рельефом, типом ландшафта или их сочетанием. Благодаря этим свойствам рисунок изображения мало зависит от условий освещения, сезона и технических параметров съемки, несмотря на изменчивость его отдельных составляющих, поэтому считается надежным дешифровочным признаком.

5.2.2. Косвенные дешифровочные признаки

Косвенные признаки используются, как правило, для дешифрирования свойств объектов, а также процессов, явлений и объектов, не отображенных на снимке. Основой дешифрирования по косвенным признакам служит наличие взаимосвязей между объектами и их свойствами. Объекты и свойства, на основе которых возможно дешифрирование других объектов или свойств, называют *индикаторами*. Их можно условно разделить на три группы: индикаторы объектов, индикаторы свойств объектов, индикаторы явлений (движения или изменений) [37, 38].

Индикаторы объектов позволяют выявить (предположить) наличие объектов, не видимых на снимках. Так, пересечение изображений дороги и реки предполагает наличие моста или брода, наличие дешифрируемых на снимках больших отвалов пустой породы свидетельствует о наличии шахт и т. д.

Индикаторы свойств выявляют скрытые свойства объектов. Чаще это относится к объектам хозяйственной деятельности. Например, относительно крупные, вытянутой формы здания, расположенные вблизи сельских населенных пунктов, с минерализованной поверхностью почвы вокруг них и сетью расходящихся прогонов являются косвенным признаком животноводческой фермы; правильная форма водоемов свидетельствует об их искусственном происхождении; наличие системы мелиоративных канав свидетельствует о повышенном увлажнении.

Индикаторы явлений позволяют выявить на отдельном снимке движение или временные изменения. Индикатором направления ветра может служить форма гари или направление распространения дыма, направления преобладающих ветров – расположение песчаных дюн и т. д.

5.3. Ландшафтное (индикационное) дешифрирование

Поверхность нашей планеты неоднородна и представлена множеством природных территориальных комплексов (ПТК) – закономерных пространственных сочетаний компонентов природной среды: атмосферы, воды, почв, растительности, животного мира, микроорганизмов, образующих целостную систему. В пределах природного территориального комплекса его компоненты развиваются как части целого, а их взаимосвязи выражаются в обмене веществом и энергией. Природный территориальный комплекс обладает определенной устойчивостью и способностью самовосстанавливаться при воздействии внешних факторов.

Природные комплексы могут охватывать различные территории: самый крупный природный комплекс – географическая оболочка Земли, комплексы более низкого ранга – материки и океаны, которые, в свою очередь, разделяются на природные комплексы еще более низких рангов [22, 37, 38, 75].

Ландшафт – генетически однородный природный территориальный комплекс регионального уровня с одинаковыми геологическим фундаментом, климатом и типом рельефа. Ландшафт состоит из свойственного ему набора динамически сопряженных и закономерно повторяющихся в пространстве урочищ. Ландшафт состоит из местностей, урочищ, подурочищ, фаций, которые повторяются в виде его обособленных частей. Местности, урочища и фации называют морфологическими частями или элементами (компонентами) ландшафтов. Под морфологической структурой ландшафта понимается его строение, т. е. состав и взаимное расположение местностей, урочищ и фаций.

Местность является наиболее крупной морфологической частью и представляет собой множество урочищ данного ландшафта. Выделение местностей основывается на сочетаниях характерных форм рельефа, основных и второстепенных урочищ и подурочищ.

Урочищем называют природно-территориальный комплекс, с единым рельефом и представляющий систему генетически, динамически и территориально связанных фаций или их групп. Урочища подразделяются на основные – занимающие большую часть

территории и второстепенные – доля которых составляет незначительную часть.

Фация – это природный территориальный комплекс, на всем протяжении которого сохраняется одинаковая литология поверхностных пород, одинаковые элементы рельефа и увлажнение, один микроклимат, одна почвенная разность и один биоценоз. Таким образом, наиболее существенным признаком фации выступает пространственная однородность всех природных компонентов, и в этом смысле фация имеет сходство с биогеоценозом. Фации являются наименьшими по размерам компонентами ландшафта и их формирование связано с локальными факторами, имеющими небольшой радиус действия, например с отдельными элементами рельефа.

Таким образом, вся географическая оболочка нашей планеты состоит из сложной мозаики природных комплексов разного ранга. Чем меньше по размерам природный комплекс, тем однороднее его природные условия.

Определение одних элементов ландшафта по другим, легко опознаваемым на снимке, так называемым индикаторам, часто называют *ландшафтным* или *индикационным дешифрированием*. Его основой служат взаимосвязи между элементами ландшафта, обусловивших появление раздела географической науки – ландшафтной индикации [38]. Сущность метода заключается в распознавании элементов ландшафта по всей совокупности признаков, видимых на снимке, для последующего выявления, изучения и картографирования его отдельных составляющих.

В качестве индикаторов могут выступать отдельные компоненты природной среды, такие как растительность, рельеф, называемые частными индикаторами, или совокупности элементов ландшафта, называемые комплексными индикаторами.

Так, например, почвы могут распознаваться по типу растительности: индикатором подзолистых почв служат лесные насаждения, а торфянистых – болотная растительность. Индикатором ландшафта может быть его рисунок, обусловленный взаимным расположением и чередованием компонентов ландшафта.

Однако индикационные связи действуют лишь в пределах определенного ландшафта, поэтому ландшафтно-индикационному дешифрированию должно предшествовать районирование территории.

На каждой из выделенных территориальных единиц выявляются взаимосвязи между компонентами ландшафта и индикаторы, так как экстраполяция индикаторов на соседние районы может привести к существенным ошибкам. Точность индикационного дешифрирования зависит от знания особенностей территории, формирующих ее факторов, взаимосвязей между компонентами природной среды, влияния на нее антропогенного воздействия.

Метод ландшафтного дешифрирования можно успешно использовать для лесного дешифрирования. В лесных экосистемах формируются устойчивые биогеоценозы, в которых условия произрастания и лесная растительность тесно взаимосвязаны между собой, что позволяет дешифрировать показатели, которые нельзя увидеть на снимках.

Некоторые древесные виды произрастают лишь в определенных условиях, по которым можно их легко идентифицировать, и наоборот, экстремальные условия произрастания или антропогенные воздействия могут идентифицироваться по древесному виду и другой растительности, которые способны расти в этих условиях (например, сосна по болоту).

Некоторые виды (сосна, береза и др.), обладая экологической пластичностью, встречаются в широком диапазоне лесорастительных условий, однако в разных условиях произрастания для них характерны различная производительность и состав насаждений. Это позволяет на основе ландшафтного дешифрирования картографировать почвы, типы леса и условий местопроизрастания, видовой состав и пр. При этом растительность используют как индикатор для дешифрирования почв и условий произрастания, а рельеф, тип почвы и увлажнение – для дешифрирования древесных видов, состава и производительности насаждений.

Применение ландшафтного метода значительно повышает возможности и точность лесного дешифрирования, поскольку целенаправленно используются косвенные дешифровочные признаки и индикаторы (положение на местности относительно элементов гидро-сети, приуроченность к отдельным элементам рельефа, микрорельеф и др.), однако его нельзя применять обособленно, а лишь в комплексе с измерительным или автоматизированным методом дешифрирования.

5.4. Особенности изображения крон деревьев и полога древостоя на снимках

Снимок является центральной проекцией участка местности, поэтому изображения объектов строятся по законам центральной проекции. Однако лишь в центральной части снимка форма объектов близка к форме, полученной в ортогональной проекции, а изображение на периферийной части снимка является перспективным.

При плановой съемке, когда угол наклона оптической оси небольшой, а местность равнинная, форма плоских объектов практически совпадает с их формой в ортогональной проекции, т. е. плоские объекты, такие как поля, прогалины, вырубки, сенокосы, водоемы, во всех частях снимка сохраняют свою форму.

Форма объектов и теней в условиях холмистой или гористой местности, а также объемных объектов в разных частях снимка в соответствии с законами центральной проекции сильно изменяется. Так как деревья относятся к категории объемных объектов, имеющих высоту, при дешифрировании необходимо учитывать особенности их изображения.

Особенности изображения формы и размеров крон. В зависимости от того, в какой части аэрофотоснимка располагаются деревья, размеры их крон изменяются в соответствии с законами центральной проекции. В центре и непосредственной близости от центра вертикально стоящие деревья изображаются почти в ортогональной проекции (рис. 5.1, рис. 5.2, рис. III).

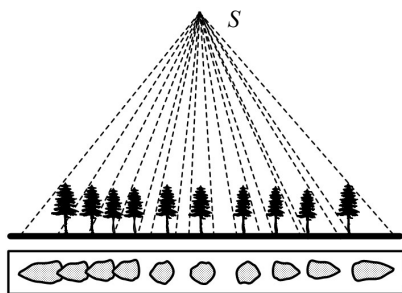


Рис. 5.1. Изображения формы и размеров крон деревьев в разных частях снимка

Деревья, расположенные на некотором расстоянии от центра, изображаются словно лежащими на земле, причем по мере удаления от центра снимка их длина увеличивается. Вершина кроны смещается от основания ствола в радиальном направлении от центра к краям аэрофотоснимка. Величина смещения

возрастает в периферийной части аэрофотоснимка. Форма кроны также изменяется и вытягивается.

Изображение полога древостоя состоит из освещенных или частично освещенных в момент экспозиции крон, а также промежутков между ними. Проекция крон и местоположение деревьев в центре снимка практически соответствуют их расположению на местности (ортогональной проекции). По мере удаления от центра к краю кроны частично перекрываются, поэтому видно лишь изображение их верхних частей. Поскольку верхние части крон смещаются от основания в радиальном направлении от центра (точки надира) к краям аэрофотоснимка, они перекрывают расположенные возле них соседние деревья меньшей высоты и другие объекты под пологом леса. По мере удаления от центра снимка форма промежутков между кронами также изменяется, а на периферийной части снимка они не просматриваются вообще.

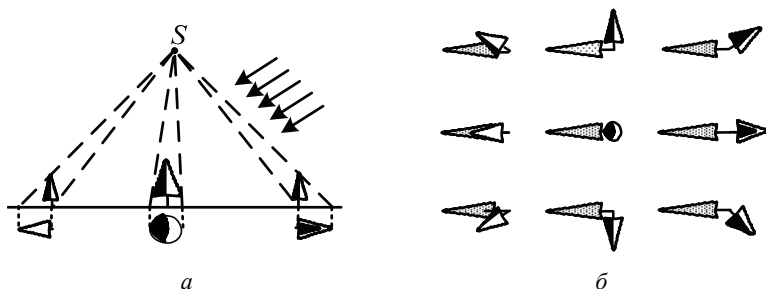


Рис. 5.2. Изображения крон деревьев, падающих и собственных теней в зависимости от направления солнечных лучей и местоположения на снимке:

a – в направлении солнечных лучей по линии, проходящей через центр снимка; *б* – в разных частях снимка

Большое влияние на изображение кроны дерева и полога древостоя оказывает направление солнечных лучей (рис. 5.2). Если в момент съемки дерево расположено в центре снимка, проекция его кроны близка к ортогональной, а изображение кроны состоит из двух частей – освещенной и затененной.

Если дерево находится на краю снимка по направлению солнечных лучей (направление солнечных близко к направлению проектирующих

лучей или почти параллельно им), крона вся освещена Солнцем и будет иметь светлый тон.

Если дерево расположено со стороны Солнца, его крона будет затенена, однако благодаря прохождению солнечных лучей сквозь более редкие периферийные части крон на изображении будут видны более светлые контуры (в виде светлых ободков по краям).

Вследствие рассмотренных выше особенностей, характер изображения полога древостоя различается в зависимости от того, в какой части аэрофотоснимка он отображен [22, 68].

В одном направлении на снимке изобразятся только освещенные или частично освещенные стороны крон, а в другом, противоположном, только затененные или частично затененные стороны крон. На снимках крупного масштаба затененные стороны хорошо

передают характерные формы крон деревьев, а полностью освещенные стороны крон выделяются менее отчетливо и сливаются друг с другом.

При дешифрировании лесных насаждений размеры и соотношение размеров крон деревьев имеют большое значение. Так, по размерам изображений крон можно оценить возраст древостоя, средний диаметр, по соотношению размеров – его возрастную структуру. На размер изображения крон деревьев в пологе древостоя значительное влияние оказывает угол солнцестояния, поскольку на снимках отображается только освещенная часть кроны. Размеры крон, видимые на снимках, как правило, меньше их действительных размеров (рис. 5.3), так как часть кроны затенена и не просматривается.

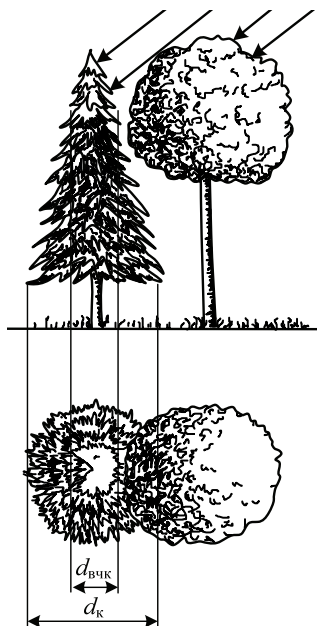


Рис. 5.3. Размеры видимой на снимке части кроны дерева: D_k – диаметр кроны; $D_{вчк}$ – диаметр видимой части кроны

Особенности изображения теней. Тени крон деревьев имеют важное значение для дешифрирования.

В зависимости от того где находится затененная поверхность, можно выделить падающие и собственные тени. *Падающие тени* – это тени, отбрасываемые кронами деревьев на землю и другие объекты. *Собственные тени* образуются на кронах с противоположной Солнцу стороны в результате затенения кроной самой себя.

В зависимости от формы кроны можно выделить следующие формы собственных теней: *треугольные* – характерны для конусовидных крон, *эллипсовидные* – для параболоидных, *серповидные* – для шаровидных и сфероидальных, *подковообразные* – для плоско-вершинных (рис. 5.4).

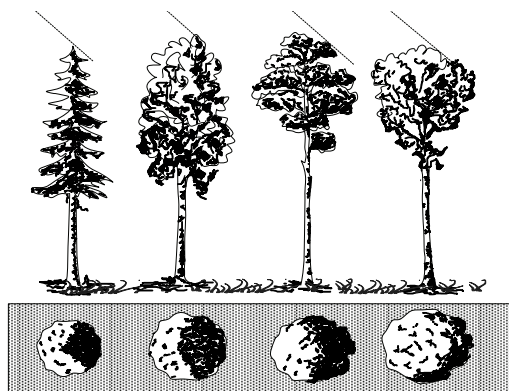


Рис. 5.4. Формы собственных теней:
а – треугольные; *б* – эллипсовидные; *в* – серповидные;
г – подковообразные

Однако следует отметить, что указанные формы собственных теней можно наблюдать только в центральной части снимка. В периферийной его части изображения собственных теней, как и изображения крон деревьев, имеют иную форму.

Падающие на ровную поверхность тени правильно передают форму крон деревьев при условии, что длина тени примерно равна высоте дерева. При меньшей длине тени форма кроны получается сжатой, при большей – вытянутой, т. е. форма искажается. Использование падающей тени как признака дешифрирования состава насаждений ограничено, так как в насаждениях они перекрываются рядом стоящими деревьями.

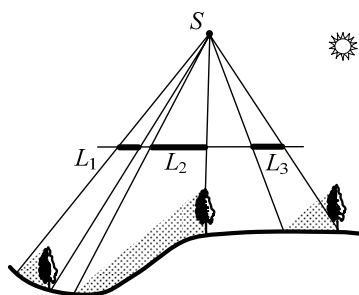


Рис. 5.5. Влияние рельефа местности на длину падающей тени

Форма падающих теней не зависит от местоположения на снимке, но зависит от рельефа и высоты солнцестояния. Если тень падает на освещенный склон горы, размер ее уменьшается, если же тень падает вниз по склону – размер увеличивается, что может привести к значительным ошибкам определения высоты (рис. 5.5).

Кроны деревьев, имеющие округлые формы вершин, вследствие различной степени освещенности

их Солнцем создают постепенный переход от освещенной стороны к затененной, благодаря чему складывается ощущение некоторой выпуклости кроны. Четкость перехода от освещенной части кроны к затененной во многом зависит от густоты кроны, так, у деревьев с густыми кронами в сравнении с редкими переход более четкий.

Тон и цвет изображения полога. Наши глаза во много раз чувствительнее к изменению цвета, поэтому цвет как дешифровочный признак имеет большое значение. Тон и цвет изображений кроны деревьев зависит от многих факторов, которые можно подразделить на две основные группы: факторы, зависящие от фенологического состояния и строения насаждений, и факторы, зависящие от применяемых светофильтров, типов пленок, фотобумаг, условий фотографирования [11].

Сам по себе цвет не является определяющим дешифровочным признаком, и не обязательно получение естественного воспроизведения цветов. Гораздо более важно с помощью разницы в цвете подчеркнуть различия между дешифрируемыми объектами. Это особенно актуально в настоящее время с появлением цифровых мультиспектральных камер и современных методов синтеза и обработки изображений.

Кроме того, даже в пределах одного снимка цвет и тон изображения не остаются постоянными. Наиболее темные тона можно наблюдать на периферийной части снимка, в направлении навстречу солнечным лучам, где изображены затененные стороны кроны деревьев.

Наиболее светлые тона изображения находятся на противоположной по ходу солнечных лучей стороне снимка. При высоком стоянии Солнца проецирующие лучи, формирующие изображение, могут быть параллельны солнечным. В этом случае собственные и падающие тени окажутся полностью закрытыми освещенными частями крон, и на снимке возникнет светлое размытое пятно (рис. 5.6, см. рис. III).

Дешифрирование древесных пород в области светлого пятна затруднено, поскольку тени, как дешифровочный признак, не просматриваются, а изображения крон сливаются между собой. Таким образом, изображения освещенной и затененной частей крон одного и того же древостоя будут значительно различаться между собой.

В условиях горного рельефа это обстоятельство приобретает еще большее значение, так как могут быть затенены значительные площади лесного полога, что приводит к различиям в цвете и тоне изображения.

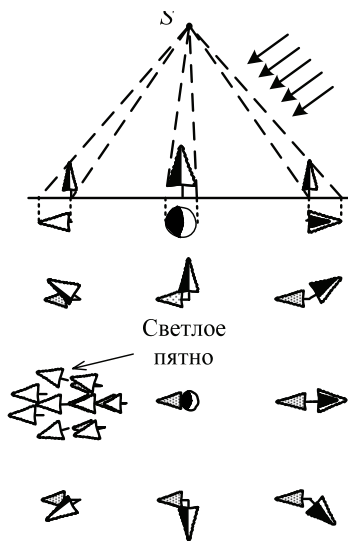


Рис. 5.6. Положение светлого пятна на снимке

5.5. Дешифровочные признаки основных лесобразующих пород

Дешифровочные признаки всех древесных пород не остаются неизменными и значительно варьируют в зависимости от возраста, условий произрастания, полноты, состава и других таксационных показателей. При этом в разных частях снимка полог древостоя и изображения крон деревьев различаются. Особенности изображения зависят от положения Солнца и деревьев на снимке. В центральной

части снимка изображение близко к изображению, полученному в ортогональной проекции, поэтому кроны большинства древесных видов выглядят округлыми. В периферийных частях снимка кроны вытянуты, деревья изображаются согласно законам центральной проекции словно лежащими, и можно различить их форму. Фактически снимок с некоторой долей условности можно разделить на две части: центральную, где изображение близко к плановому, и периферийную – с перспективным изображением.

Цвет изображения на различных снимках также различается. Наиболее пригодны для лесотаксационного дешифрирования спектрональные и мультиспектральные снимки, однако нужно отметить, что цвет у мультиспектральных снимков необходимо указывать вместе с синтезируемыми каналами изображения.

5.5.1. Сосна

Вид в натуре. Характерной особенностью сосны является мутовчатое расположение ветвей и расположение мутовок по стволу с довольно значительным расстоянием между ними (рис. 5.7).

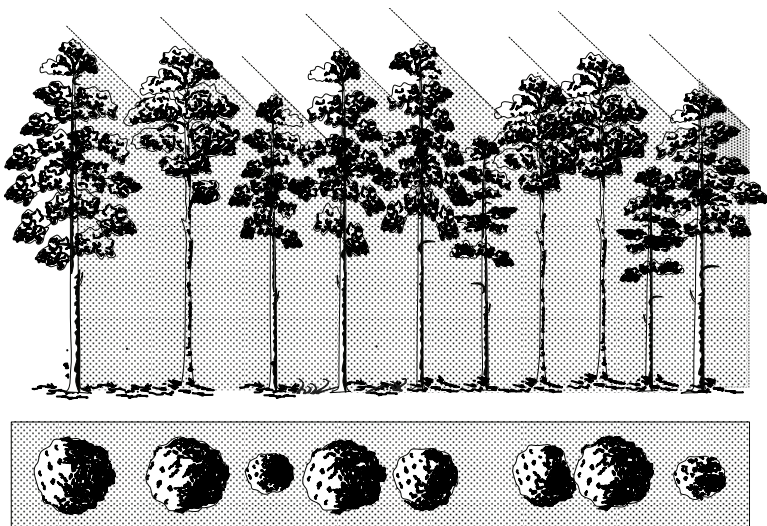


Рис. 5.7. Вертикальный профиль и схематичный вид полога соснового древостоя

В летний период хвоя сосны имеет светло-зеленый с сизоватым оттенком цвет. Сквозь крону часто просвечиваются ветви и ствол, имеющие оранжевый цвет в верхней части и темно-коричневый в нижней. Издали кроны выглядят коричневато-зелеными. В связи с особенностью расположения ветвей и хвои кроны сосны характеризуются средней густотой.

С изменением возраста, а также в зависимости от условий местопроизрастания, состава, полноты и других таксационных показателей форма крон изменяется. Для молодняков характерна конусовидная форма крон. По мере роста крона постепенно округляется и поднимается над землей, приобретая яйцевидную, шаровидную и полушаровидную формы. В спелом возрасте кроны высоко приподняты над поверхностью земли, их длина составляет 25–30% от общей высоты дерева. Полог чистых сосновых древостоев во всех возрастах характеризуется горизонтальной сомкнутостью и незначительной разновысотностью, так как кроны преобладающего большинства деревьев находятся в его верхней части. Соотношение размеров крон деревьев, выходящих в верхний полог, колеблется в пределах 1 : 3, распределение деревьев по площади также равномерно.

Вид на снимках. Закономерностями строения полога сосновых древостоев определяется и характер его изображения на снимках. В центральной части аэроснимов масштаба 1:5000–1:10 000 изображение полога соснового насаждения состоит из округлых, равномерно расположенных по площади проекций крон с близкими размерами (см. рис. IV, V). Промежутки между кронами более темного тона также близкие по величине и форме. Переход от освещенной части кроны к затененной постепенный, контрастность между изображением крон и промежутков между ними сравнительно небольшая. Собственные тени серповидные, эллипсовидные или подкововидные, в зависимости от формы кроны и высоты солнцестояния.

На панхроматических аэроснимках кроны светло-серые, на спектрзональных цвет изображения крон зеленый или синевато-зеленый, иногда с коричневым оттенком. Затененные стороны крон сине-зеленые, а освещенные солнцем – светло-зеленые. Промежутки между кронами темно-зеленого или темно-зелено-синего цвета.

В молодняках полог сосновых древостоев сильно сомкнут, промежутки между кронами не просматриваются, текстура изображения

мелкозернистая. В результате интенсивного изреживания древостоя после 40–50 лет между кронами появляются небольшие промежутки, размер которых продолжает с возрастом увеличиваться, изображение приобретает зернистую, а затем точечную текстуру. В возрасте 80–100 лет изображения крон четко разделяются промежутками и имеют ярко выраженную точечную текстуру. На величину промежутков большое влияние оказывает полнота древостоя. Насаждения при полноте от 0,6 и ниже имеют достаточно хорошую просматриваемость в глубину, часто до поверхности земли.

Изображение крон изменяется по мере удаления от середины к краям снимка. В периферийных частях снимка форма изображений крон близка к таковой в действительности, однако сами изображения крон значительно различаются в зависимости от направления солнечных лучей. В части снимка, где проецирующие лучи параллельны солнечным, видны изображения освещенных сторон крон, в противоположном направлении – их затененных сторон. Благодаря тому что крона сосны имеет среднюю густоту, лучи частично проходят через ее край, отображаясь на снимках более светлым тоном. Светлый ореол целиком огибает затененную часть и подчеркивает форму кроны. В периферийной части снимка изменяется и характер промежутков между кронами.

Вид в стереорежиме. Под стереоскопом полог насаждений сосны, произрастающих на равнинных участках, представляется в виде почти ровной горизонтальной плоскости. Отсутствие разновысотности определяется светолюбием вида и присущей соснякам горизонтальной сомкнутостью полога. До 40 лет полог практически сплошной, не просматривается в глубину, выпуклость крон деревьев не выделяется. С появлением точечной текстуры изображения, благодаря постепенному переходу от освещенных сторон крон к затененным, проявляется и выпуклость крон, обусловленная их более округлой формой в старших возрастах. В возрасте 60–70 лет выпуклость крон хорошо заметна, а после 100 лет четко видна их приподнятость над земной поверхностью.

Особенности дешифрирования. В целом изображения насаждений сосны на аэроснимках характеризуются сравнительной однородностью, зернистой или точечной текстурой с четко выраженными ровными очертаниями проекций крон. Примесь других пород

нарушает однообразие рисунка по тону и цвету, появляются зерна более светлых (осина) или темных (ель, пихта) тонов, разновысотность полога и групповое размещение крон, характерное при значительной примеси лиственных пород.

По форме крон сосна имеет большое сходство с березой во всех возрастах до 100 лет, а в молодых и средневозрастных насаждениях – с кедром, лиственницей и елью. Для их отличия необходимо учитывать длину крон. Сосна характеризуется более короткими кронами. Под стереоскопом на изображении спелых насаждений хорошо видны высоко приподнятые, как бы оторванные от земли проекции крон деревьев. Этот признак является характерным отличием сосны от ели.

Очертания проекций крон сосны ровные, что также придает ей сходство с березой. По тону изображения на панхроматических аэроснимках летней съемки сосна почти неотличима от березы. В спелых возрастах различия в тонах изображения увеличиваются, а с учетом более ясно выраженных отличий в формах проекций крон и строении полога преобладание той или иной породы устанавливается более достоверно.

5.5.2. Ель

Вид в природе. Характерной особенностью еловых насаждений является конусовидная форма кроны (рис. 5.8), которая сохраняется на протяжении практически всей жизни дерева, реже встречаются эллипсовидные кроны с острой или закругленной вершиной. Кроны преимущественно густые, однако с ухудшением условий местопрорастания и увеличением возраста их густота уменьшается. Цвет хвои в молодом возрасте зеленый. С увеличением возраста хвоя темнеет и к возрасту спелости становится темно-зеленой. Весной и ранним летом молодые побеги, расположенные на периферии кроны, ярко-зеленого цвета.

Протяженность крон у ели больше, чем у других древесных видов, и в зависимости от возраста и сомкнутости крона может занимать от 25 до 80%. В спелых насаждениях протяженность крон ели в 1,5–2,0 раза больше, чем у крон сосны, березы и осины. Соотношение размеров крон, образующих верхний полог молодняков и средневозрастных насаждений, изменяется от 1 : 2 до 1 : 5.

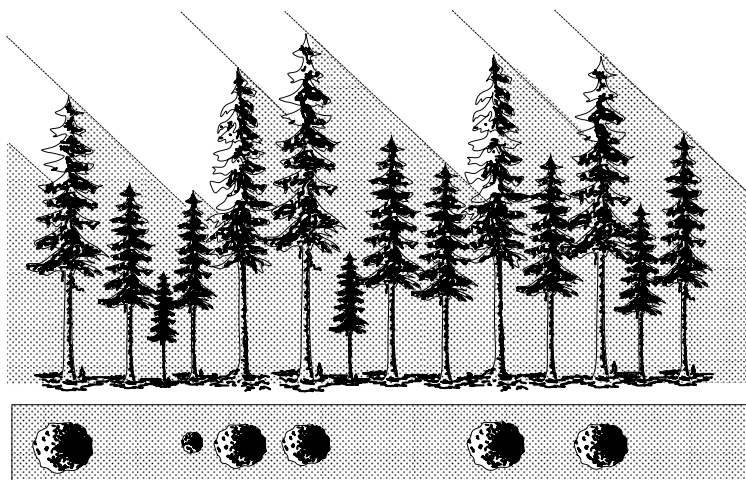


Рис. 5.8. Вертикальный профиль и схематичный вид полога елового древостоя

От других пород ель отличается теневыносливостью и слабой ветроустойчивостью. После ветровалов, рубок ухода в появившихся «окнах» формируется новое поколение ели, что приводит к большой разновысотности деревьев, неравномерному распределению их по площади участка и неравномерной сомкнутости полога в целом. В связи с этим для еловых насаждений более характерны вертикальная и ступенчатая сомкнутость полога.

Вид на снимках. Характер изображения полога елового древостоя определяется его строением. На панхроматических снимках масштаба 1:5000–1:10 000 в центре снимка кроны ели округлые (см. рис. VI, VII). Формы проекций кроны ели на аэроснимках крупного масштаба (1:2000) звездчатого типа, с изрезанными остроугольными очертаниями, обусловленными изображением выдающихся от центра в стороны радиально расположенных ветвей.

В центральной части аэроснимка наблюдается резкая разница между освещенными и затененными сторонами кроны (собственными тенями). Собственные тени имеют преимущественно треугольную, реже эллипсовидную форму. В периферийной части аэроснимка кроны изображаются в виде треугольника или эллипса, при

этом в направлении против лучей солнца контуры крон имеют более светлый тон.

На панхроматических снимках цвет крон серый, реже светло-серый. Промежутки между кронами очень темные, почти черные, затененные стороны крон темно-серого, иногда почти черного тона, как правило, сливаются с собственными тенями такого же тона. Поэтому изображения еловых насаждений имеют более темный тон и достаточно хорошо отличаются от насаждений с преобладанием других пород на аэроснимках разных масштабов.

На спектрально-зеленых аэроснимках кроны ели получают темными сине-зелеными или темно-зелеными, в зоне конуса собственной тени – темно-синего цвета.

В связи с выраженной конусовидной формой и густотой крон их размеры на аэроснимках во многом зависят от высоты солнцестояния. При утренней аэрофотосъемке на снимках отображаются только верхние, освещенные части крон. Наиболее широкие нижние части затеняются соседними деревьями и не отображаются. Поэтому на изображении полого еловых насаждений заметны преимущественно мелкие, разомкнутые друг от друга кроны. Чем выше угол солнцестояния и лучше освещенность крон, тем лучше просматриваются их нижние, более широкие части и больше размеры изображений на снимках.

Вид в стереорежиме. В стереорежиме отчетливо заметны резкое различие в высоте деревьев, зубчатость, наличие в изреженных местах полого глубоких провалов и, наоборот, близкое расположение крон рядом стоящих деревьев. Из-за различного расстояния между деревьями падающие от них тени создают разные по величине и неправильные по форме затененные промежутки между кронами.

Соотношения в размерах крон по причине разновозрастности значительные и составляют до 1 : 5. Деревья второго яруса заметны на аэроснимках крупного масштаба (1:2000–1:5000) и позволяют судить о его густоте. При уменьшении масштаба они просматриваются с трудом.

Из-за конусовидной формы крон, расширяющихся ближе к основанию, в изреженных ельниках при просмотре в стереоскоп кроны кажутся низко опущенными, и в сомкнутых насаждениях

просматриваются не более чем до половины их высоты. Полной сомкнутости крон, особенно в спелых насаждениях, не бывает вследствие их остроконечной формы.

Особенности дешифрирования. Насаждения ели имеют характерное строение полога и отдельных деревьев, что облегчает их распознавание на аэроснимках. Ель теневынослива и имеет густую конусовидной формы крону, что существенно отличает ее от других видов. Отмеченные особенности крон лучше просматриваются на периферийной части аэроснимков. Тон изображения на всех снимках наиболее темный по сравнению с другими породами. Очертания проекций крон ели слегка неровные, звездчатые. Изображение полога отличается большой разнородностью по контрастности освещенных и затененных частей крон. Падающие тени также имеют очень темный, почти черный тон и сливаются с собственными. В проекции полога насаждений ели и пихты под стереоскопом хорошо просматривается свойственная им разновысотность. Равномерное расположение деревьев в насаждениях ели и пихты чередуется с группами и куртинами, что создает соответствующее изображение и на аэроснимках, характеризующееся разновысотностью деревьев и групп, разнородностью размеров проекций крон и промежутков между ними.

5.5.3. Береза

Вид в натуре. Кроны березы в молодом возрасте характеризуются конусовидной формой. По мере роста кроны приобретают яйцевидную, параболоидную или полушаровидную форму, а их вершины – более округлые очертания (рис. 5.9). Кроны березы имеют среднюю густоту, которая увеличивается по мере улучшения условий местопроизрастания и снижения сомкнутости полога насаждений, вершина крон густая. Очертания крон, как правило, ровные, в старом возрасте – ажурные.

Цвет листвы ярко-зеленый с сероватым или легким синеватым оттенком. Протяженность крон у березы больше, чем у сосны, а высота до наибольшей ширины кроны расположена ниже.

Разновысотность деревьев, составляющих полог, и степень сомкнутости полога древостоя незначительны. Распределение крон в пологе в целом равномерное, однако в порослевых насаждениях деревья произрастают гнездами, по 4–5 в каждом.

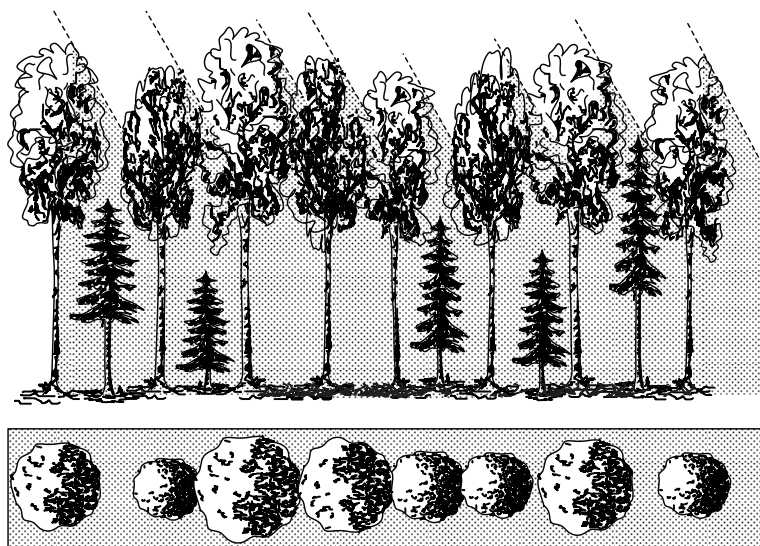


Рис. 5.9. Вертикальный профиль и схематичный вид полога березового древостоя

Вид на снимках. Характер изображения крон березы на снимках изменяется с возрастом древостоя. Молодняки имеют мелкие кроны, которые из-за высокой степени сомкнутости сливаются между собой. В возрасте 30–35 лет на аэроснимках масштаба 1:50 000–1:10 000 и крупнее между ними появляются небольшие промежутки и обособленность крон (см. рис. VIII, IX). Выпуклость крон выражена слабо.

В возрасте 40–50 лет промежутки между кронами увеличиваются и различия между отдельными деревьями становятся четко заметны. Соотношения между размерами крон небольшие и составляют, как правило, 1 : 2. Ясно выражено различие между освещенными и затененными сторонами крон. В возрасте 40–60 лет выпуклость крон хорошо выражена, в более старых насаждениях крона более плоская и развесистая.

Полг березового древостоя в возрасте 70–80 лет изображается на аэроснимках в виде плоских, неправильно-округлых по форме крон, соотношение в величине которых доходит до 1 : 3.

Переход от освещенных частей крон к затененным постепенный, затененная часть кроны занимает не более одной трети ширины и отличается серым или темно-серым тоном. Форма собственных теней, как правило, серповидная или подковообразная. В периферийных частях аэроснимков форма крон изменяется, они становятся более вытянутыми, эллипсовидными. Падающие тени в молодняках – остроконечны, в средневозрастных насаждениях – эллипсовидной формы, в спелом возрасте – тупые или закругленные.

Общий тон участков на панхроматических аэроснимках светло-серый или серый. На инфрахроматических аэроснимках березовые насаждения резко отличаются от хвойных ярко-светлым, почти белым тоном крон. На спектрзональных аэроснимках кроны березы светло-оранжевого или оранжевого цвета. В смешанных спелых насаждениях у березы оранжевый цвет менее насыщен, чем у осины.

Вид в стереорежиме. Полог березовых древостоев до 30 лет, состоящий из незначительно разновысотных деревьев с более или менее одинаковыми по размерам проекциями крон, ровный. Расположение крон деревьев в пологе однородно и равномерно. Просматриваемость полога в глубину отсутствует или незначительная.

После 40 лет выпуклость крон становится хорошо заметна. Она зависит от формы их верхних частей: чем ближе они к форме параболоида, тем более выпуклыми выглядят на аэроснимках. Выпуклость кроны теряется при групповом расположении деревьев и в смешанных древостоях. Поверхность земли просматривается только при средних полнотах.

При наличии второго яруса просматриваемость полога в глубину резко снижается или становится невозможной. Второй ярус если хорошо обнаруживается на аэроснимках масштаба 1:10 000–1:15 000 при полноте основного яруса не более 0,5.

Особенности дешифрирования. По признакам дешифрирования на летних панхроматических аэроснимках эти насаждения имеют большое сходство с сосной, что определяется подобием форм крон, отражательной способностью, строением полога насаждений обеих пород. Очертания проекций крон у березы, как и у сосны, ровные, переход от света к тени в пределах проекций крон постепенный.

Уверенное разделение этих пород в смешанных насаждениях достигается на спектрозональных и инфрахроматических аэроснимках. На панхроматических аэроснимках летней съемки разделение сосны и березы в смешанных насаждениях очень затруднительно, а оценка доли участия каждой из них сопровождается большими ошибками. Чистые березняки отличаются от сосняков большей слитностью крон и светлее по тону изображения.

В молодых и средневозрастных насаждениях береза имеет почти одинаковые формы крон с осиной. Различаться они могут только диаметром крон, которые у осины несколько больше (в одинаковых условиях), а длина крон короче. Учет этих различий при дешифрировании затруднен, тем более что тон и цвет изображения крон березы и осины близки. В спелых насаждениях под стереоскопом легче установить разницу в формах крон – у березы верхние части крон более закругленные, кроны длиннее, а поперечники их меньше, и легче улавливается разница в оттенках тона изображения. В спелом возрасте строение полога березовых насаждений по сравнению с осиновыми более рельефное в связи с менее выраженной куртинностью расположения деревьев.

В целом изображение березовых насаждений на аэроснимках отличается достаточной однородностью рисунка без резких различий в тонах изображения крон и промежутков между ними.

5.5.4. Осина

Вид в натуре. Кроны осины, формирующие полог древостоя, претерпевают с возрастом значительные изменения. В пологе молодых насаждений преобладают острые конусовидные кроны, в средневозрастных – параболоидные, эллипсовидные или округлые, в спелых насаждениях – округлые, полушаровидные или шаровидные формы, а в перестойных – плосковершинные (рис. 5.10). В смешанных насаждениях с примесью хвойных пород чаще всего сохраняются яйцевидная, эллипсовидная или полушаровидная формы кроны.

Варьирование размеров крон и высоты деревьев небольшое. Расположение деревьев по площади равномерное или куртинное. Сомкнутость крон значительная практически во всех возрастах. Продолговатые по форме провалы в пологе наблюдаются только между отдельными сомкнутыми куртинами.

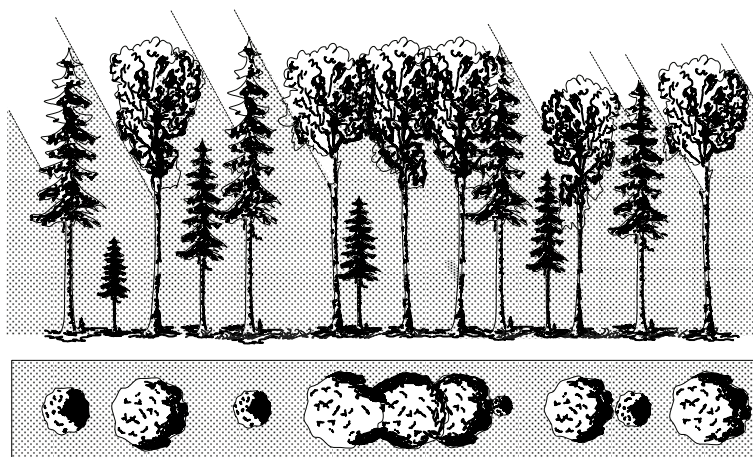


Рис. 5.10. Вертикальный профиль и схематичный вид полога осинового древостоя

Кроны осины имеют среднюю густоту, в спелом возрасте высоко прикреплены и занимают около 25–30% от общей высоты дерева. Для осиновых древостоев характерна горизонтальная сомкнутость и почти полное отсутствие разновысотности в верхней части полога.

Цвет листвы ярко-зеленый. Вследствие постоянного колебания листьев и более светлой нижней стороны листа крона осины сильнее отражает солнечный свет и формирует нечеткое, размытое изображение.

Вид на снимках. Осинники из-за своих характерных биологических особенностей в изображении на аэроснимках имеют ряд отличительных признаков. Погол осинников, как правило, состоит из крон, одинаковых по величине, равномерно и густо сомкнутых во всех возрастах, разновысотность не наблюдается (см. рис. X). В возрасте до 30 лет они имеют мелкие проекции крон и высокую степень сомкнутости, в результате чего сливаются между собой. Часто характерно групповое и куртинное расположение деревьев.

В возрасте около 40 лет кроны начинают разделяться, и в 60-летних насаждениях расположены обособленно. Они неправильно-округлой или шаровидной формы, в старом возрасте с плоскими вершинами и разорванными краями.

Размеры крон в видимом на аэроснимке положе почти одинаковы и изменяются в пределах 1 : 1,5 или 1 : 2, как правило, всегда больше крон других пород.

Из-за особенностей формы крон четкой границы между их освещенной и затененной сторонами не наблюдается. Кроны максимально расширяютсяверху, поэтому они хорошо освещаются Солнцем, не имеют резко выраженной затененной стороны. Собственные тени, как правило, подковообразные или отсутствуют.

Кроны осины на панхроматических снимках имеют светлосерые тона, несколько более светлые, чем у березы и сосны.

На спектрзональных аэроснимках осина изображается оранжевым или красно-оранжевым цветом, иногда с желтым или зеленым оттенком. Густые молодняки и средневозрастные насаждения изображаются таким же цветом, но более светлого тона.

Вид в стереорежиме. Насаждения осины почти во всех возрастах имеют высокую сомкнутость полога, что связано с ее светолюбием и приводит к незначительной просматриваемости полога в глубину, хотя в насаждениях полнотой 0,6 и ниже возможность просматривания в глубину имеется. Крона осины кажется оторванной от земли, чем отличается от крон березы. В средневозрастных насаждениях формы крон эллипсовидные или округлые, а в спелом – шаровидные или плосковершинные. Кроны не имеют четких очертаний, края крон осины неправильные, разорванные, часто расплывчатые. От других пород отличается по более светлому тону, выпуклость крон незначительная.

Особенности дешифрирования. В смешанных одновозрастных насаждениях осина чаще всего имеет наибольшие (не считая дуб) по размерам проекции крон, что позволяет отличить ее от других пород, но может вызвать завышение доли ее участия в общем составе насаждения.

Осина характеризуется более тупыми, чем у других пород, формами верхних частей крон с высоким расположением. Кроны изображаются на аэроснимках без заметной выпуклости. Плоская верхняя часть кроны хорошо освещается, характерны слабая разница между освещенной и затененной частями крон, более светлый общий тон изображения. На летних спектрзональных снимках осина изображается наиболее насыщенным оранжевым цветом.

Очертания проекции крон осины неровные, волнистые. Общий рисунок изображения осиновых насаждений создается явно выраженным куртинным расположением деревьев по площади, слитностью крон нескольких деревьев, что обусловлено порослевым происхождением, отсутствием разновысотности деревьев. Данные особенности строения полога осиновых насаждений определяют пятнистое изображение их на аэроснимках, малую контрастность, размытость границ и общий более светлый тон изображения.

5.5.5. Ольха черная

Вид в натуре. Формы крон деревьев в насаждениях спелого возраста при отдельном их стоянии обратнойцевидные, эллипсовидные, а при гнездовом расположении – плоские в верхней части. Цвет листвы черной ольхи летом зеленый или темновато-зеленый. Кроны средней густоты и густые.

В сомкнутых спелых насаждениях кроны занимают примерно 30% общей высоты деревьев. Соотношение размеров крон в верхнем пологе составляет не более 1 : 3. Сомкнутость полога значительная. Деревья в насаждении распределяются в зависимости от происхождения: отдельно или порослевыми группами (гнездами). В верхнем пологе чистых насаждений разновысотность практически отсутствует, характерна горизонтальная сомкнутость полога.

Вид на снимках. Особенности крон и полога черноольховых насаждений создают ряд характерных признаков для их дешифрирования по аэроснимкам. На аэроснимках масштаба 1:5000–1:10 000 кроны отдельных деревьев неправильно-округлой формы, слегка выпуклые и не имеют четких очертаний (см. рис. XI, XII). Кроны групп деревьев сливаются и формируют изображения неправильной формы, иногда продолговатые, с неровными очертаниями, размеры которых значительно превышают размеры отдельных крон. В этом случае соотношение размеров может достигать 1 : 5. К возрасту 40–50 лет становятся хорошо заметны промежутки между кронами. Четко выражено различие между освещенными сторонами крон и собственными тенями. Переход от освещенных частей крон к затененным постепенный, форма собственных теней, как правило, серповидная или подковообразная. В периферийных частях аэроснимков форма крон эллипсовидная. В возрасте 40 лет выпуклость крон

достаточно хорошо выражена, в более старых насаждениях крона более плоская.

По цвету и тону изображения на панхроматических и спектрально-зональных снимках ольха черная схожа с березой. Тон на панхроматических снимках светло-серый или серый. На спектрально-зональных аэроснимках кроны ольхи черной светло-оранжевого или оранжевого цвета иногда с зеленым оттенком.

Вид в стереорежиме. Вид полога черноольховых древостоев в стереорежиме определяется его строением. В молодняках полог ровный, разновысотность не наблюдается. Сомкнутость полога высокая, просматриваемость в глубину отсутствует или незначительная. Выпуклость крон становится заметна после 40 лет и снижается к возрасту спелости. Выпуклость кроны теряется при групповом расположении деревьев. Поверхность земли просматривается только при средних полнотах между группами крон деревьев. Наличие черного тона и плоских светлых крон может служить одним из характерных признаков для дешифрирования черноольховых насаждений.

Особенности дешифрирования. По признакам черноольшаники имеют сходство с березой. Очертания проекций крон ровные, переход от света к тени в пределах проекций крон постепенный. Уверенное разделение этих пород возможно лишь по приуроченности к определенным условиям местопроизрастания.

5.6. Дешифровочные признаки основных категорий нелесных и не покрытых лесом земель

Пашни, сельхозугодья. В условиях Беларуси сельхозугодья занимают большинство площадей, расположены вокруг и среди лесных массивов, населенных пунктов, характеризуются наличием дорог, сети мелиоративных каналов, иногда поросших кустарниковой растительностью (см. рис. XIII).

Это площадные объекты, часто геометрически правильной формы, близкой к прямоугольной (четырёхугольной, многоугольной). Границы четкие, прямолинейные или слегка извилистые, совпадающие с естественными границами других категорий земель.

В зависимости от возделываемой культуры, почвы и увлажнения, тон изображения может значительно изменяться от очень светлого до темного, однако чаще преобладают очень светлые и светлые тона. Цвет изображения определяется используемыми сочетаниями каналов, но в целом сильно варьирует и зависит от сельхозкультуры, характера обработки почвы, влажности, фенологического состояния и биомассы растений. В пределах одного участка, занятого одной культурой, сохраняются, как правило, однородные тон и цвет, но на отдельных участках цвет и тон изображения могут изменяться.

Изображение имеет характерную структуру. Просматриваются параллельные полосы различного цвета и тона, формирующиеся при возделывании площадей. В период уборки четко различаются убранные и неубранные площади, посреди полей выделяются необработанные участки с избыточной увлажненностью, часто заросшие кустарниковой растительностью.

Болота. Площадные объекты округлой или неправильной формы с нечеткими слегка извилистыми границами (см. рис. XIV).

Тон светлый, средний или темный, в зависимости от растительности и влаги. В более влажных местах тон изображения темнее, выход воды наружу создает очень темный, почти черный тон.

Цвет изображения на мультиспектральных снимках желтый или желто-зеленый, в сильно увлажненных местах – синий или сине-зеленый. Заросли кустарников изображаются оранжевым или оранжево-бурым, низкостебельные сосновые древостои – зеленым или сине-зеленым цветами.

Сфагновые болота отличаются неодинаковым тоном, который изменяется в зависимости от наличия моховой, травяной или древесной растительности, степени влажности.

Моховые болота имеют характерный волнистый рисунок, создаваемый грядово-мочажинным комплексом. Он состоит из светлых извилистых полос, образующих более повышенную грядовую поверхность, и темно-серых мочажин – понижений, насыщенных водой.

Низкорослая древесная растительность выделяется среди болот благодаря мелким однообразным светлым кронам деревьев, большей частью неравномерно и редко разбросанных по площади участка.

Иногда среди болот можно встретить резко выделяющиеся острова леса.

Низинные (травяные) болота располагаются чаще всего в поймах рек с низкими берегами или в пониженных местах среди леса. На мультиспектральных снимках они чаще всего оранжевого цвета. Контуры их преимущественно вытянуты вдоль рек. Наличие древесной растительности заметно по неравномерно разбросанным светлым проекциям крон деревьев.

Луга и сенокосы. Площадные объекты обычно неправильной формы. Границы нечеткие, извилистые, совпадающие с естественными. Если сенокосы расположены среди лесных массивов, границы четкие (см. рис. XV).

Тон изображения очень светлый, светлый или средний. Он изменяется в зависимости от времени съемки и степени увлажнения почвы, с повышением влажности и количества биомассы тон темнее. Весной и осенью из-за значительной влажности почвы луга изображаются более темным тоном. После сенокосения луга имеют светлый тон. Цвет изображения также значительно изменяется и может быть желтый, желто-оранжевый, коричневый, салатовый, зеленый.

Структура изображения, как правило, неоднородная. Просматриваются пятна неправильной формы с извилистыми нечеткими границами, отличающиеся по цвету и тону. Сенокосы, находящиеся среди лесов, отличаются гомогенной текстурой – ровным тоном и цветом. На снимках пространственного разрешения 0,5 м просматриваются стога сена, изображенные в виде светлых круглых зерен с примыкающей к ним характерной тупой тенью, передающей форму стогов. Кустарники, встречающиеся на лугах, имеют вид пятен более темного тона с характерной полоской тени. При наличии отдельных деревьев или их групп заметны падающие от них тени черного тона.

Воды (озера, крупные реки и каналы). Площадные объекты естественного происхождения – чаще неправильной формы, искусственного происхождения – обычно правильной (см. рис. XV). Реки изображаются в виде извилистых полос или лент, каналы – в виде прямолинейных. Старые русла рек (старицы) выделяются причудливыми полукруглыми, серповидными или подковообразными формами.

Границы водных поверхностей рек и озер, за исключением мелких речек и ручьев, четкие, слегка извилистые.

Тон чаще всего ровный, преимущественно очень темный, почти черный. При ветреной погоде и ряби на воде, если камера находится в зоне зеркального отражения, тон изображения может изменяться от среднего до очень светлого, почти белого.

На тон оказывают влияние также глубина реки, цвет дна, чистота воды. При большой глубине реки, а также илистом или глинистом дне тон изображения очень темный. У мелких рек с песчаным или каменистым дном, а также при мутной воде тон изображения становится светлее. Цвет изображения водных поверхностей сложно распознается из-за очень темного тона. Изображение имеет обычно синий, сине-зеленый или коричневый оттенок. Вдоль берегов хорошо просматривается древесная и кустарниковая растительность.

Мелиоративные каналы. Линейные объекты, размещаются среди болот и заболоченных пространств, покрытых и не покрытых лесом земель. Они изображаются в виде прямых темных линий, расположенных параллельно на том или ином расстоянии. На спектрально-зональных аэроснимках каналы, заполненные водой, изображаются синим, а свежие отвалы минерального грунта вдоль них – светло-синим цветом. Степень различимости их в лесу зависит от характера сомкнутости полога насаждений (см. рис. XVI).

Изображение осушительных каналов отличается от изображения любых пограничных линий тем, что каналы большей частью связаны между собой и составляют единую систему. Каналы-осушители, будучи параллельны друг другу, впадают в собирательные каналы под острым углом, а собирательные каналы, в свою очередь, впадают также под острым углом в магистральную каналу, более широкую, чем предыдущие. Вдоль старых каналов заметно увеличение степени сомкнутости крон и высот деревьев. Наличие своеобразной системы в расположении каналов наглядно отличает их от других подобных объектов, например сети просек.

Населенные пункты. Площадные объекты, как правило, многоугольной формы с четкими прямолинейными границами (см. рис. XVII). Структура изображения населенного пункта сложная, состоящая из почти одинаковых участков, представляющих отдельные подворья и расположенных по одну или обе стороны дороги.

Структура участков приблизительно одинакова. Ближе к дороге расположен жилой дом, огород и сад, далее – хозяйственные постройки и наделы, которые выглядят аналогично пашням и сельскохозяйственным угодьям, но значительно меньшего размера и почти всегда прямоугольной формы.

Тон и цвет сильно изменяются в пределах отдельных участков, поэтому изображение на мультиспектральных снимках среднего пространственного разрешения выглядит пестрым.

На снимках с пространственным разрешением выше 2 м отчетливо видны отдельные постройки, плодовые деревья и наделы.

Асфальтированные дороги. Линейные объекты одинаковой ширины, как и железные дороги, имеющие большие радиусы закруглений в поворотах. Тон изображения, как правило, средний или темный. Цвет в зависимости от комбинаций каналов – синий, сине-зеленый или коричневый (см. рис. XVII). На изображениях четко видны полосы отчуждения более светлого тона, расположенные по обе стороны дороги, ветрозащитные полосы, развязки, а также разветвления и съезды на грунтовые дороги. На снимках с пространственным разрешением 0,5 м видны изображения автомобилей, дорожной разметки, полос движения, столбов линий электропередач.

Грунтовые дороги. Линейные объекты, в отличие от железных и шоссейных дорог, более извилистые, имеют разную ширину и небольшие радиусы поворотов, часто под прямым и острым углом (см. рис. XVII). Тон изображения очень светлый или светлый; цвет в зависимости от комбинаций каналов – голубой, желтый, серый, или коричневый.

Весной и после дождей дороги приобретают более темный тон, на снимках сверхвысокого разрешения видны лужи, объезды. Среди лесных массивов дороги изображаются светлым тоном, если солнечные лучи направлены вдоль дороги, или темным, если поперек. Среди сельскохозяйственных угодий грунтовые дороги часто проходят по межам, вдоль мелиоративных канав, соединяя отдельные населенные пункты.

Железные дороги. Объекты линейного типа, одинаковой ширины, в поворотах имеющие большие радиусы закруглений. Тон изображения может быть светлый, средний или темный. Цвет в зависимости от комбинаций каналов – синий, сине-зеленый или коричневый (см. рис. XVIII).

На изображениях четко видны полосы отчуждения более светлого тона, расположенные по обе стороны дороги, а также ветрозащитные полосы. На снимках с пространственным разрешением 0,5 м видно изображение рельсового пути в виде тонких прямых линий, столбов линий электропередач. На некоторых дорогах вблизи железнодорожного полотна вдоль полосы отчуждения заметны живые изгороди.

Прогалины. Площадные объекты неправильной формы с четкими извилистыми границами, хорошо выделяющиеся среди покрытых лесом площадей. Тон очень светлый, светлый или средний; цвет зависит от растительности и степени минерализации: желтый, оранжевый, коричневый, сине-зеленый или зеленый (см. рис. XIX). Прогалины по своему изображению сходны с сенокосами, особенно суходольными, расположенными вдали от берегов рек и ручьев, если на последних нет стогов сена.

Сплошные вырубки. Площадные объекты в форме неправильного многоугольника, совпадающего с формой выдела, трех- или четырехугольника. Границы четкие, как правило, прямолинейные (см. рис. XX). Тон изображения светлый или очень светлый, поэтому вырубки четко выделяются среди покрытой лесом площади. Цвет изображения во многом зависит от давности вырубки и возобновления.

Свежие вырубки в связи с сильной минерализацией почвы более светлого тона, в зависимости от каналов – голубого, желтовато-зеленого цвета. Возобновленные лиственными породами – оранжевого, а хвойными – сине-зеленого цвета.

На аэро- и космических снимках сверхвысокого разрешения выделяются куртины или группы семенников с ясно заметными падающими темными от крон тенями. Недорубы расположены, как правило, куртинами. Хорошо заметны следы тракторной трелевки, кучи порубочных остатков, не убранные штабеля древесины.

Поленницы дров и мелкие штабеля бревен изображены в виде ярких светлых прямоугольников с рядом расположенной тенью от них.

Гари. Площадные объекты с четкими изорванными извилистыми границами, по форме вытянутые несколькими сужающимися полосами в направлении ветра во время пожара (см. рис. XXI).

Тон изображения светлый или средний. На цветных и мультиспектральных снимках гари изображаются разным цветом –

от синеватого до оранжевого, в зависимости от характера оставшегося древостоя и травяного покрова. Сухостой на спектрзональных аэрофотоснимках имеет преимущественно ярко-синий или зеленовато-синий цвет (надежно дешифрируется и в насаждении).

Среди гарей встречаются единичные разбросанные деревья, группы или уцелевшие куртины леса, имеющие причудливые границы. Чаще всего куртины хвойного или лиственного леса сохраняются в пониженных, наиболее влажных местах.

Ветровалы. Отличаются от гарей тем, что деревья повалены по направлению ветра, примерно в одну сторону. В эту же сторону, чаще всего, вытянут и ветровальный участок. На аэроснимках масштаба 1:5000 видно почти каждое лежащее дерево, его длина и форма кроны, а также заметна толщина выворота корневой системы.

Квартальные просеки. При достаточной ширине они выделяются в виде прямых темных или светлых линий (см. рис. XXII). Темные линии получаются в случае затенения просек падающими от крон деревьев тенями. Светлые линии получаются при направлении солнечных лучей вдоль просеки. Просеки проходят, как правило, в двух взаимно-перпендикулярных направлениях: север – юг, запад – восток. Часто по просекам проходят грунтовые дороги и минерализованные полосы, что значительно повышает их дешифрируемость.

Б.7. Особенности дешифрирования основных лесообразующих пород на космических снимках высокого разрешения

Особенности дешифрирования космических снимков обусловлены, в первую очередь, тремя факторами: пространственным разрешением, спектральным разрешением, наклоном оптической оси камеры.

Пространственное разрешение оказывает наиболее значимое влияние на качество дешифрирования. Для целей лесотаксационного дешифрирования можно выделить несколько уровней пространственного разрешения. Основным критерием выделения уровней является возможность дешифрирования тех или иных показателей древостоев.

Снимки сверхвысокого разрешения (пространственное разрешение менее 1 м). Уровень дешифрирования – кроны отдельных деревьев и групп деревьев. Снимки по возможностям дешифрирования можно приравнять к аэроснимкам. Хорошо выделяются кроны отдельных деревьев, можно различить собственные и падающие тени, форму крон в плане. Перспективные снимки позволяют оценивать форму крон древесных видов. Использование мультиспектральных синтезированных изображений позволяют достаточно уверенно идентифицировать состав древостоев, густоту, размены крон, возраст. Такие снимки пригодны для дешифрирования тех же показателей, что и на аэроснимках.

Снимки высокого разрешения (1–10 м). Уровень дешифрирования отдельного выдела. Кроны отдельных деревьев не выделяются, так как их размеры соизмеримы с размерами пикселя. Кроны, превышающие размеры пикселя, выделяются в виде пятен различной формы. На мультиспектральных синтезированных изображениях достаточно хорошо дешифрируются состав древостоя, в основном по цвету, и границы выделов. Возраст и сомкнутость полога древостоя дешифрируются несколько хуже. На снимках с пространственным разрешением 8–10 м хорошо дешифрируются границы лесотаксационных участков так как преобладают смешанные пиксели изображения.

Снимки среднего разрешения (более 10 м). Уровень дешифрирования – границы лесных массивов, категории земель, преобладающие группы пород. Большое спектральное разрешение способствует улучшению качества дешифрирования. Использование космических мультиспектральных снимков позволяет получать синтезированные изображения, значительно улучшающие их дешифровочные свойства и подчеркивающие визуальные различия древесных видов. Однако при использовании синтеза возникает сложность описания цвета, как одного из дешифровочных признаков. Различные сочетания каналов мультиспектрального изображения дают разный цвет одних и тех же объектов. Поэтому при описании цвета необходимо указывать сочетание спектральных каналов снимка. Наиболее пригодны для дешифрирования синтезированные изображения на основе панхроматических снимков с разрешением 0,5 м и зеленой, красной и инфракрасной зон мультиспектральных снимков с разрешением 2 м.

В зависимости от угла наклона оптической оси во время съемки полученные снимки позволяют более точно оценивать разные таксационные показатели. Так, на плановых снимках различного пространственного и спектрального разрешения лучше дешифрируются формы (в плане) и размеры крон, сомкнутость полога и густота. На перспективных снимках хорошо различаются вертикальные формы крон, в то время как другие показатели оцениваются с большими ошибками.

5.8. Измерительное дешифрирование крон деревьев и полога древостоя

Дешифрирование аэро- и космических снимков – сложный и трудоемкий процесс. В настоящее время в практике лесного хозяйства широко используются как аналоговые аэро-, космические фотоснимки, так и цифровые, поэтому все методы, приборы и оборудование, предназначенные для измерительного дешифрирования, можно разделить на две группы.

К первой группе относятся разнообразные приборы и инструменты от простых палеток до высокоточных фотограмметрических станций предназначенные для дешифрирования аналоговых фотоснимков, ко второй – программные и аппаратные средства оцифровки, обработки и дешифрирования цифровых снимков: сканеры, графические редакторы, цифровые фотограмметрические станции (такие как PHOTOMOD, Талка и др.), специализированные пакеты прикладных программ интерпретации ДДЗ (такие как ENVI, ERDAS Imaging и др.), географические информационные системы [3, 14, 24, 60].

5.8.1. Рабочая область снимка

Из анализа формул, приведенных в разд. 3, следует, что искажения изображений из-за наклона и рельефа местности существенно сказываются в периферийной части аэроснимка. В его средней части искажения незначительные и не превышают значений, допустимых при изготовлении планово-картографических материалов заданного масштаба. Эта часть аэроснимков называется его

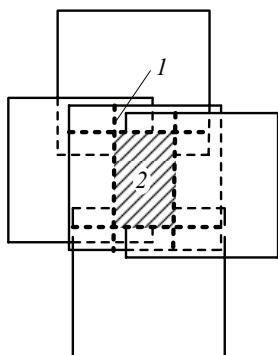


Рис. 5.11. Рабочая область снимка:

- 1 – линии по середине продольных и поперечных перекрытий;
2 – рабочая область

рабочей областью (площадью). Рабочая площадь отграничивается линиями, проведенными через середины продольных и поперечных перекрытий смежных аэроснимков как в маршруте, так и между маршрутами (рис. 5.11).

Для отграничения рабочей области снимка после накидного монтажа по серединам перекрытий между аэроснимками выбирают и накалывают отчетливо видимые ориентиры, которые соединяются прямыми линиями. В результате этого на каждом аэроснимке приблизительно в середине отграничивается область прямоугольной формы, охватывающая немногим более одной трети от общей площади снимка, – рабочая площадь.

В дальнейшем выделение границ кварталов, землепользователей, контуров таксационных участков, дешифрирование насаждений производят внутри рабочих площадей.

5.8.2. Приборы и инструменты для дешифрирования аналоговых фотоснимков

Для измерительного дешифрирования аналоговых снимков используются разнообразные приборы и инструменты. В зависимости от выполняемых функций и измерений приборы и инструменты для лесотаксационного дешифрирования аналоговых снимков можно разделить на несколько категорий.

Увеличительные приборы, к которым относятся монокулярные и бинокулярные увеличительные лупы, предназначены для увеличения изображения объекта. Для лесотаксационного дешифрирования применяют главным образом монокулярные лупы различного увеличения от двух до десяти крат. Специальные измерительные лупы, имеющие, как правило, десятикратное увеличение, оснащены шкалой и позволяют выполнять измерения с точностью до 0,1 мм. Обычно увеличительные лупы используются вместе с измерительными палетками.

Биноклярные лупы предназначены для рассматривания объектов обоими глазами. Для дешифрирования мелкомасштабных снимков иногда применяются биноклярные микроскопы.

Измерительные приборы и инструменты (рис. 5.12) предназначены для выполнения различных измерений, например для измерения размеров объектов и дешифровочных показателей древостоев. К ним относятся циркуль-измеритель, масштабная линейка, пропорциональный циркуль, измерительная лупа, различные шкалы, измерительные пластины, клинья, палетки, стереоскопические приборы и др.

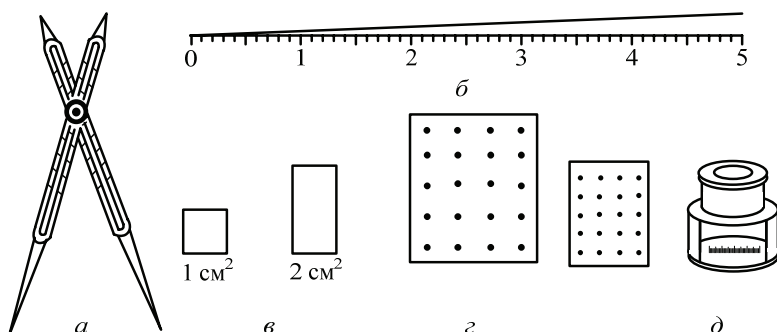


Рис. 5.12. Измерительные инструменты:

а – пропорциональный циркуль; б – измерительный клин;
в – площадные палетки; г – точечные палетки; д – измерительная лупа

Циркуль-измеритель и масштабная линейка служат для измерения расстояний, нанесения на снимки промеров линий.

Пропорциональный циркуль (рис. 5.12, а) используется для переноса результатов измерений со снимков на лесостроительные планшеты, планы, карты и наоборот в тех случаях, когда масштабы аэроснимков и карт различны.

Измерительный клин (рис. 5.12, б) также предназначен для измерения размеров крон отдельных деревьев и других небольших объектов. Он состоит из двух сходящихся под острым углом тонких линий, нанесенных на прозрачную основу, например стекло или пленку. На одной из линий имеется шкала, размеченная в миллиметрах и долях миллиметра. Для выполнения измерений клин накладывается на аэрофотоснимок (можно под стереоскопом) таким образом, чтобы

измеряемая крона находилась между линиями клина. Перемещая клин над измеряемой кроной, добиваются, чтобы ее края соприкасались одновременно с обеими линиями клина и в точке касания берут отсчет по шкале. Для определения диаметра кроны полученный отсчет редуцируется в соответствии с масштабом снимка.

Площадные палетки (рис. 5.12, в) предназначены для оценки густоты и состава древостоя. Палетки имеют вид нанесенных на прозрачную основу различного размера окружностей, квадратов или прямоугольников, площадь которых известна. Для выполнения измерений размер палетки подбирается таким образом, чтобы в нее входило 30–50 видимых крон деревьев. Палетка накладывается на выдел в нескольких местах и подсчитывается количество деревьев с подразделением по породам. Зная площадь палетки и масштаб снимка, полученные результаты редуцируют на 1 га.

Точечные палетки (рис. 5.12, г) используются для определения сомкнутости полога древостоя. Палетка выполнена на прозрачной основе в виде прямоугольников разной площади, на которых в углах сетки квадратов различной густоты нанесены точки. Палетка накладывается на выдел и под стереоскопом производится подсчет точек, проектирующихся на кроны и на промежутки между ними. Отношение количества точек, попавших на кроны, к общему количеству точек на палетке, в пределах которой производился подсчет, дает сомкнутость полога. Измерения нужно повторять несколько раз, перемещая палетку по выделу. Следует отметить, что накладывать палетку необходимо на тот снимок, на котором дешифрируемый выдел расположен как можно ближе к центру.

Измерительные лупы (рис. 5.12, д) служат для измерения мелких предметов и объектов. В фокальной плоскости лупы помещается прозрачное стекло со шкалой с делениями 0,1 мм или мельче.

К числу измерительных приборов можно отнести также *шкалы тонов и цветов*, представляющие собой наборы эталонов, с которыми сравниваются изображения на снимках. На эталонах указываются измеренные на спектрографе коэффициенты спектральной яркости, что дает возможность выполнять приблизительную количественную оценку спектральных и яркостных показателей изображений.

Стереоскопические приборы используются для дешифрирования лесных насаждений в стереорежиме. Стереоскопический

эффект, возникающий при использовании стереоскопа, позволяет оценивать высоту древостоя и значительно повысить точность дешифрирования. В настоящее время разработаны и используются стереоскопы разных конструкций (рис. 5.13), но принцип действия у всех их практически один и тот же. В его основу положено разделение с помощью системы линз и зеркал зрительных лучей глаз таким образом, чтобы левый и правый глаз наблюдателя мог видеть различные снимки. Существуют и другие способы получения стереоскопического эффекта, которые подробно описаны в разд. 3.

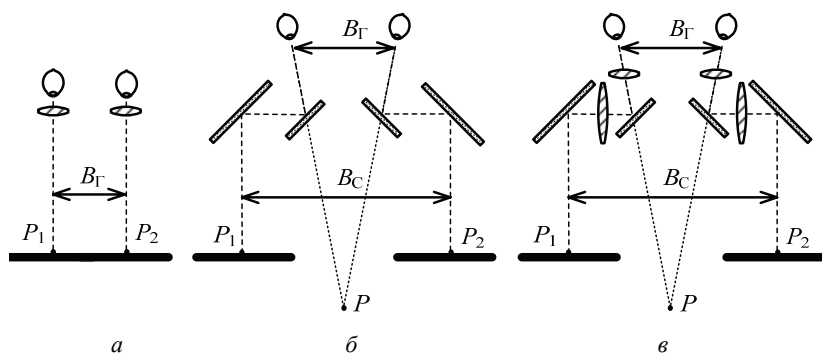


Рис. 5.13. Схемы стереоскопов:

а – линзовый; *б* – зеркальный; *в* – зеркально-линзовый

Линзовый стереоскоп (рис. 5.13, *а*) имеет две линзы, через которые рассматриваются фотоснимки. Расстояние между изображениями одного объекта на разных снимках (P_1 и P_2) приблизительно равно главному базису (B_{Γ}), поэтому основным недостатком линзовых стереоскопов является малое поле зрения, неудобство работы с аэрофотоснимками большого формата, и в этой связи широкого распространения они не получили.

Зеркальный стереоскоп (рис. 5.13, *б*) состоит из двух пар больших и малых зеркал, установленных под углом 45° к плоскости аэрофотоснимка. Преимуществом зеркального стереоскопа является то, что базис стереоскопа ($B_{\text{С}}$) значительно больше главного базиса (B_{Γ}), и поэтому поле зрения значительно шире. Основным недостатком зеркальных стереоскопов заключается в отсутствии увеличения

изображения, что вызывает сложности дешифрирования средне-масштабных снимков.

Наиболее широко используются *зеркально-линзовые стереоскопы* (рис. 5.13, в; XXIII, XXIV). Их конструкция схожа с конструкцией зеркального стереоскопа, но добавлены увеличивающие линзы, что позволяет устранить недостатки и использовать преимущества, свойственные и зеркальным, и линзовым стереоскопам.

Конструктивные решения зеркально-линзовых стереоскопов достаточно разнообразны. Линзы могут устанавливаться постоянные или съемные, перед зеркалами, между ними или непосредственно над снимками.

Некоторые зеркально-линзовые стереоскопы оснащаются дополнительными приспособлениями для выполнения различных измерений, в том числе измерений высоты объектов.

В сочетании со стереоскопическими приборами при лесном измерительном дешифрировании применяют синусные линейки, параллактические пластины (рис. 5.14), параллактический клин и параллаксометр (рис. 5.15).

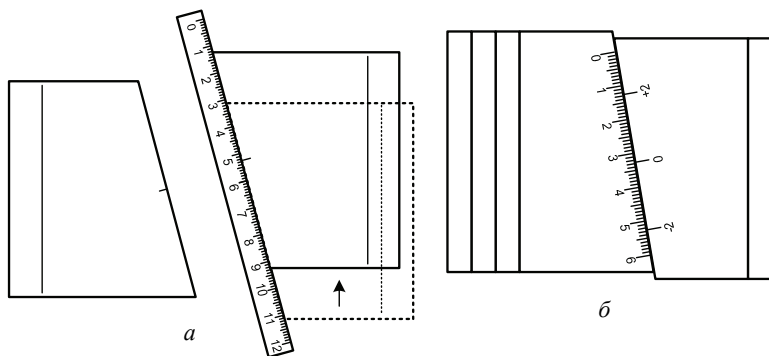


Рис. 5.14. Синусные линейки (а) и параллактические пластины (б)

Синусные линейки (рис. 5.14, а) предназначены для измерения на аэрофотоснимках продольных параллаксов и позволяют получать точность измерения до 0,1 мм (сотые доли отсчитываются приблизительно). Прибор состоит из металлической линейки и двух прозрачных стеклянных пластин, форма которых близка

к прямоугольной трапеции. Одна сторона пластины скошена на угол $\approx 5^\circ 44'$, синус которого равен 0,1 мм. Кромка скошенной стороны матовая и на ней имеется риска для выполнения отсчетов по линейке. Параллельно ровной стороне на стекле прорезана линия, используемая в качестве марки. В концы металлической линейки вмонтированы два винта с иглами для ее закрепления в нужном положении и предохранения от сдвигов.

Разность продольных параллаксов измеряют перемещением стеклянной пластины вдоль края металлической линейки, при этом марка смещается перпендикулярно направлению сдвига. Недостатком синусных линеек является невозможность измерения разности параллаксов по двум снимкам, поэтому перемещаемую пластину и металлическую линейку располагают на участках в периферийной части снимка.

Принцип устройства и работы *параллактических пластин* (рис. 5.14, б) такой же, что и синусных линеек. Отличие заключается только в том, что параллактические пластины шире, чем синусные линейки, и при работе обе пластины могут перемещаться друг относительно друга, тогда как синусные линейки располагаются одна от другой на расстоянии, равном главному базису или базису стереоскопа, и друг с другом не соприкасаются. Кроме того, поскольку обе пластины перемещаются, разность продольных параллаксов можно измерить с несколько большей точностью.

Параллаксометр (рис. 5.15) по принципу действия напоминает винтовой микрометр и позволяет измерять разность продольных параллаксов с точностью до 0,01 мм.

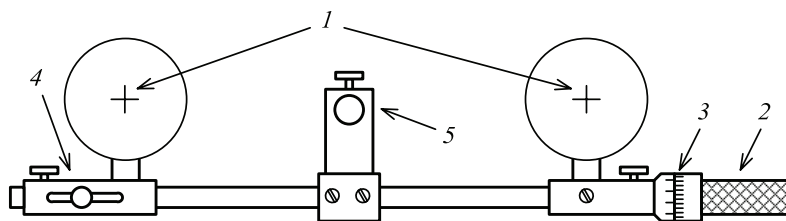


Рис. 5.15. Параллаксометр:

1 – марки; 2 – параллактический винт; 3 – шкалы;
4 – винт установки базиса; 5 – устройство крепления к стереоскопу

К параллаксометру прикреплены прозрачные пластины изготовленные, как правило, из стекла с нанесенными на них марками в виде точек, линий или крестиков. При вращении параллактического винта расстояние между марками изменяется, в стереорежиме марки сливаются и изменение расстояния между ними (продольного параллакса) вызывает ощущение перемещения марки по вертикали. Для измерения высоты марка позиционируется вначале на вершину, а затем на поверхность земли. Отсчеты снимаются по шкалам, нанесенным на параллактический винт и корпус параллаксометра, разность отсчетов в первом и втором случаях является разностью продольных параллаксов. Для определения высоты используется формула (5.4). Прибор позволяет оперативно изменять базис, что дает возможность использовать его с различными типами стереоскопов.

5.9. Дешифрирование основных таксационных показателей древостоев

Дешифрирование таксационных показателей древостоев является наиболее сложной задачей лесного дешифрирования. Часть показателей можно непосредственно увидеть на снимках и оценить или измерить по прямым дешифровочным признакам – цвету, тону, размерам, форме и т. д., часть можно оценить лишь по косвенным признакам с использованием закономерностей строения и взаимосвязей между показателями. С этой точки зрения все таксационные показатели древостоя и его полога можно разделить на две категории:

- видимые на снимках и дешифрируемые по прямым признакам;
- дешифрируемые по косвенным признакам с использованием моделей строения полога, закономерностей и взаимосвязей между показателями.

Состав древостоя. Необходимым условием дешифрирования состава древостоя является возможность визуального распознавания крон отдельных древесных видов. Основными показателями, по которым это можно сделать, являются: цвет и тон изображения, форма и размеры крон, различия деревьев по высоте, характер их распределения по площади, различие крон по длине, собственные и падающие тени крон.

Доля участия каждого древесного вида в составе насаждения определяется пропорционально площадям, занятым проекциями крон соответствующих видов, глазомерно или с использованием точечных палеток. Состав может определяться также по числу деревьев путем их подсчета по породам на площадных палетках.

Как показали исследования, состав, определенный по снимкам и данным натурной таксации, в сложных и смешанных насаждениях не всегда соответствует. Часть деревьев той или иной породы скрыта под кронами или в тени соседних, более высоких или с более широкой кроной деревьев. На снимках изображены лишь кроны деревьев, освещенные в момент аэрофотосъемки Солнцем. С учетом этого Г. Г. Самойлович предложил использовать термин «дешифровочный состав», под которым подразумевается состав части насаждения, изображенной на снимке определенного масштаба в определенных условиях съемки. В дешифровочный состав на основе ранее установленных зависимостей между истинным и дешифровочным составами насаждений вносятся поправки, которые определяются по результатам массовых измерений.

Густота древостоя. Для определения количества деревьев и густоты насаждений используются разные методы, которые можно разделить на две категории: по числу деревьев и среднему расстоянию между ними.

Для определения густоты по числу деревьев применяются площадные палетки разных размеров и форм. Размер палетки в зависимости от масштаба снимка и полноты насаждения подбирается таким образом, чтобы в нее попадало 30–50 видимых крон. Палетка накладывается на дешифрируемый участок в нескольких местах (как правило, 3–5 измерений), чтобы равномерно его охватить, и подсчитывается количество видимых крон с подразделением по породам. Для определения густоты по масштабу снимка вычисляется площадь на местности, соответствующая площади палетки, которая умножается на количество измерений, и число деревьев редуцируется на 1 га.

Для определения густоты по среднему расстоянию между деревьями используются два метода, различающиеся способом определения среднего расстояния: метод многоугольника и метод прямых линий.

В соответствии с первым измеряются расстояния между центрами пяти-семи крон соседних деревьев, подобранных в наиболее типичном месте участка. Затем с помощью измерительной лупы 10–12-кратного увеличения, а для цифровых снимков в ГИС измеряются расстояния между ними и вычисляется среднее.

Способ подсчета крон на прямых линиях заключается в следующем. На аэроснимках прочерчиваются прямые линии в двух взаимно перпендикулярных направлениях, на которых подсчитывается количество деревьев, чьи кроны пересекаются и касаются линий. Слившиеся кроны считаются за две-три в зависимости от величины изображения крон, преобладающих в пологе. Среднее расстояние вычисляется как частное от деления длины линий на общее количество крон.

Для глазомерной оценки густоты используются эталоны – набор подобранных выделов или палеток с точками разной густоты, измеренной ранее.

При измерении густоты необходимо иметь в виду, что учитываются кроны не всех деревьев, а лишь видимой части полога, и число неучтенных деревьев по мере уменьшения масштаба возрастает. Количество неучтенных деревьев в зависимости от масштаба снимка может достигать 70%, в связи с чем необходимо вносить корректирующие поправки, вычисленные на основе регрессионных зависимостей между дешифрируемыми и истинными показателями.

Диаметры крон. Измерение диаметров крон можно производить как в моно-, так и стереоскопическом режимах различными приборами – от простейших палеток, измерительных луп до стереометров и фотограмметрических станций. Наиболее точные результаты измерений дают стереоизмерительные приборы. Диаметр кроны на снимке измеряется в двух направлениях в рабочей области как можно ближе к центру снимка. Затем вычисляется среднее значение и по масштабу находится диаметр кроны на местности. Количество необходимых измерений определяется степенью варьирования диаметров крон для данного насаждения.

Исследования показали, что отклонение от натурных данных на снимках масштаба 1:5000–1:10 000 редко превышали 10–13%, однако вследствие затенения части крон падающими на них тенями от соседних деревьев наблюдается систематическое занижение

диаметров крон в сравнении с натурными данными. Особенно характерно это для еловых насаждений, имеющих конусовидные кроны, у которых наибольшая ширина находится в нижней части.

Сомкнутость полога. Определение сомкнутости полога может выполняться как глазомерным, так и измерительным способами. Для глазомерной оценки используются, как и при оценке густоты, эталонные насаждения или палетки. Измерения выполняют чаще всего с помощью точечных или линейных палеток на участке, расположенном как можно ближе к центру снимка. В первом случае подсчитывается количество точек, а во втором – сумма длин линий, попавших на кроны деревьев. Сомкнутость полога рассчитывается по отношению числа точек (суммы длин линий), попавших на кроны, к общему числу точек (общей длине линии) на дешифрируемом участке. Для повышения точности можно использовать стереоскопический режим, поместив две одинаковые точечные палетки вместо измерительных марок параллаксометра.

М. К. Бочаров предложил метод определения сомкнутости полога по среднему диаметру крон и густоте древостоя, измеренные вышеописанными способами по следующей формуле:

$$C_{\Pi} = 785 \cdot 10^{-7} \cdot N d_k, \quad (5.1)$$

где C – сомкнутость полога; N – густота древостоя, шт./га; d_k – средний диаметр кроны, м.

По его данным точность такого метода составляет 10–15%.

Высота деревьев и древостоя. Измерения высот отдельных деревьев и средней высоты древостоя выполняются как на отдельном снимке, так и на стереопаре с использованием измерительных стереоприборов. На отдельном снимке высота может быть измерена двумя способами: по длине падающей тени (рис. 5.16) или методом, основанном на свойствах центральной проекции – по радиальному смещению, вызванному превышениями точек.

Для определения высоты по длине теней нужно знать масштаб снимка, время и дату съемки, широту местности, а также рельеф местности.

Высоту дерева определяют по формуле

$$h = 0,001 l \operatorname{tg} \alpha, \quad (5.2)$$

где h – высота дерева, м; l – длина тени на снимке, мм; m – знаменатель численного масштаба аэрофотосъемки; α – угол высоты солнцестояния, град.

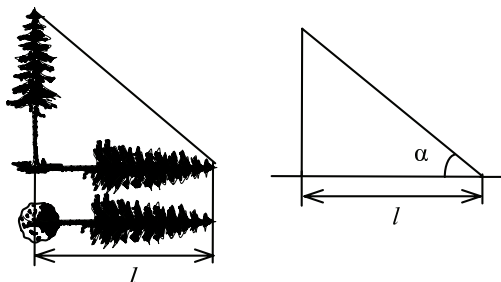


Рис. 5.16. Измерение высоты объекта по длине тени

Этот способ можно применять только в низкополнотных насаждениях или на границе с открытыми участками (вырубки, прогалины и т. д.) по аэрофотоснимкам крупных и средних масштабов. Исследования точности определения высот деревьев по длине тени в условиях равнинной местности показали, что ошибки составляют 1–2 м.

В периферийной части снимка в соответствии со свойствами центральной проекции происходит смещение крон относительно основания деревьев, поэтому они выглядят вытянутыми, словно лежащими на земле. Величина смещения тем больше, чем дальше от центра снимка находится дерево и чем оно выше. По изображениям деревьев в периферийной части снимков можно с достаточно высокой точностью измерять их высоту (рис. 5.17). Для этого используется формула

$$h = \frac{\Delta r H}{r}, \quad (5.3)$$

где Δr – длина проекции дерева на снимке, мм; H – высота фотографирования, м; r – расстояние от главной точки до проекции вершины дерева, мм.

Этот способ измерения высот пригоден при использовании аэрофотоснимков масштаба 1:2000–1:10 000. Результаты измерений, выполненные Д. М. Киреевым, показали, что их лучше проводить

в условиях равнинной местности, в древостоях низкой и средней полноты, когда наблюдаются достаточно большие промежутки между деревьями в пологе древостоя. Точность измерений в этом случае составляет $\pm 1-2$ м.

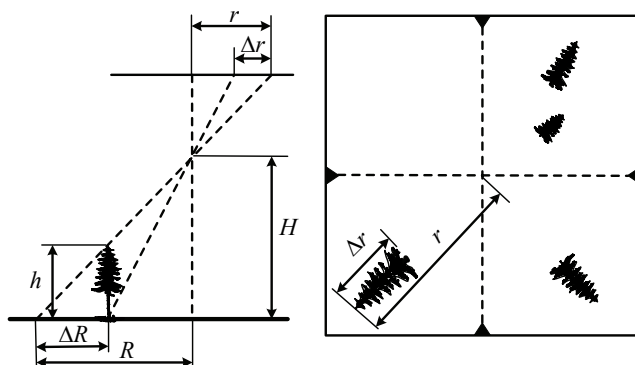


Рис. 5.17. Измерение высоты дерева по радиальному смещению

Измерение продольных параллаксов в стереорежиме выполняется методом мнимой марки с использованием стереоскопа, параллаксметра, стереокомпаратора, ЦФС или другого стереоизмерительного оборудования.

Рассмотрим измерение высоты дерева с помощью стереоскопа и параллаксметра. При наблюдении стереоскопического эффекта две марки параллаксметра визуально сливаются в одну пространственную, которую совмещают с вершиной дерева и измеряют первый параллакс (рис. 5.18).

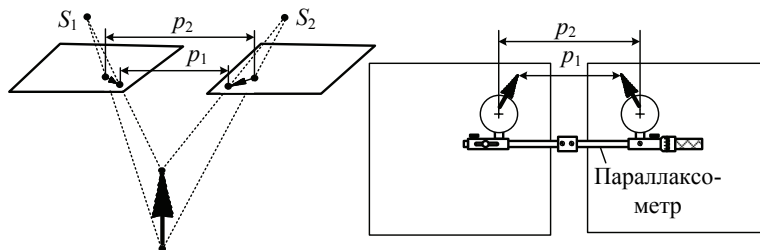


Рис. 5.18. Измерение высоты дерева по разности параллаксов

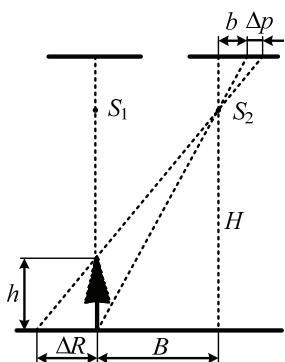


Рис. 5.19. Измерение высоты по разности параллаксов

Вращение винта параллаксометра вызовет визуальный эффект перемещения пространственной марки по высоте, таким образом она совмещается с основанием дерева или уровнем земли и измеряется второй параллакс.

Затем высота дерева определяется по формуле

$$h = \frac{H \Delta p}{b + \Delta p}, \quad (5.4)$$

где H – высота фотографирования, м; $\Delta p = p_2 - p_1$ – длина проекции дерева на снимке, мм; b – средний базис фотографирования, измеренный на снимке, мм (рис. 5.19).

Показатели H и b определяются для стереопары как среднее из значений, полученных для каждого снимка.

Точность стереоскопических измерений высоты деревьев, особенно с помощью фотограмметрических станций, может быть очень высокой (<1 м) и зависит от масштаба и разрешающей способности снимков, кратности увеличения, формы крон деревьев, сомкнутости и просматриваемости полога в глубину и пр.

Возраст древостоев. Для дешифрирования возраста используется комплекс прямых и косвенных признаков, таких как размеры и форма крон, соотношение их размеров, цвет и тон изображения, средняя высота древостоя, величина промежутков между кронами и степень просматриваемости полога в глубину, густота, протяженность крон и др.

У молодых древостоев проекции крон мелкие, высота деревьев незначительна, степень сомкнутости крон часто настолько велика, особенно для лиственных пород, что на снимках масштаба 1:10 000 кроны кажутся слившимися, промежутки между ними не выражены. В молодом возрасте полог имеет, как правило, мелкозернистую структуру изображения, отдельные кроны практически не выделяются. Для лиственных пород в возрасте до 30 лет и хвойных до 40 лет поверхность земли сквозь полог в большинстве случаев не просматривается.

В целом можно отметить, что с увеличением возраста у всех пород наблюдается более темный тон изображения. По мере роста и развития древостоя и по причине отпада усыхающих деревьев размеры крон увеличиваются, а густота уменьшается, полог изреживается и приобретает точечную структуру, увеличивается просматриваемость полога в глубину. Кроны становятся более округлыми, на снимках выпуклыми, их протяженность уменьшается. К возрасту спелости у большинства древесных видов кроны разделяются, между ними наблюдаются довольно значительные промежутки, усиливается дифференциация в размерах крон.

Измерения высоты значительно повышают надежность определения возраста древостоя. Использование лесотаксационных таблиц хода роста и классов бонитета позволяет определять возраст по взаимосвязям с другими таксационными показателями: высотой, классом бонитета, типом леса, густотой.

Полнота древостоя дешифрируется по степени сомкнутости полога с учетом возраста, бонитета, типа леса и других таксационных показателей, поэтому необходимо установить связь между ними.

При глазомерном дешифрировании оценка выполняется субъективно на основе анализа полога насаждения с учетом приобретенных в процессе таксационно-дешифровочных тренировок навыков и знаний. Контроль результатов производится с помощью различных лесотаксационных таблиц, при измерительном дешифрировании – через сомкнутость полога, по уравнениям, графикам, таблицам взаимосвязи между этими показателями. Относительная полнота может быть вычислена через средний диаметр и число деревьев, полученное по данным измерений на снимке.

Полнота и сомкнутость полога редко совпадают, однако практика дешифрирования при проведении лесоустроительных работ показывает, что при надлежащей наземной тренировке полнота насаждений по сравнению с другими таксационными показателями дешифрируется с наименьшими погрешностями.

Класс бонитета и тип леса. Дешифрирование класса бонитета и типа леса целесообразно выполнять одновременно, так как эти показатели тесно связаны между собой. При их дешифрировании используются как прямые, так и косвенные признаки, такие как цвет и тон полога древостоя, особенности рельефа, почвы, увлажнение,

густота крон, состав, тип сомкнутости полога, высота, возраст древостоя и др.

У насаждений V–Va классов бонитета тон изображения светлый, что связано с понижением густоты крон при ухудшении условий произрастания. Очертания и проекции крон на фоне земли выражены нечетко, собственные и падающие тени просматриваются плохо или не видны. Кроны деревьев большинства пород округлые и короткие, шаровидной или полушаровидной формы. Общий рисунок изображения насаждений V–Va классов бонитета отличается однотонностью, однородной зернистостью и равномерным распределением крон по площади.

С повышением класса бонитета густота крон деревьев увеличивается, повышается плотность изображения проекций крон, становится более заметным переход от освещенных частей к затененным, увеличивается контрастность в изображении крон и промежутков между ними, нарушается однородность в размерах проекций крон и промежутков. Для насаждений I класса бонитета характерны более высокая плотность изображения самих крон и теней деревьев, ясно выраженные собственные тени, а в спелых насаждениях теневыносливых пород большая дифференциация в размерах крон и четко выраженная разновысотность.

Для дешифрирования типа леса наряду с прямыми и косвенными дешифровочными признаками целесообразно использовать ландшафтное дешифрирование, основанное на районировании растительности, почвенных картах, рельефе, увлажнении, и лесотипологические таблицы, где указаны характерные условия для тех или иных типов леса. При дешифрировании класса бонитета необходимо учитывать возраст и среднюю высоту древостоя, применять лесотипологические и бонитировочные таблицы для взаимного контроля всех показателей.

Средний диаметр древостоя. Средний диаметр древостоя (d_m) невозможно измерить непосредственно на снимке, поэтому он определяется на основе взаимосвязей между таксационными показателями древостоя и дешифровочными показателями его полога. Регрессионные модели разрабатываются на основе натурных исследований на таксационно-дешифровочных пробных площадях и выделах. Наиболее тесные зависимости наблюдаются между

средним диаметром древостоя, средним диаметром крон и средней высотой.

Однако необходимо принимать во внимание и влияние других факторов: класса бонитета, полноты или сомкнутости полога. Эти зависимости выражаются в виде уравнений, а отображаются в виде графиков, номограмм и таблиц. Исследования, проведенные Г. Г. Самойловичем, С. В. Беловым, И. Д. Дмитриевым и др., показали, что наиболее тесная корреляционная зависимость наблюдается между диаметром d_m и высотой ствола дерева, диаметром кроны (коэффициенты корреляции 0,7–0,9).

Запас древостоя. Основой определения запаса древостоя (M) при измерительном дешифрировании аэрофотоснимков является его связь с таксационными показателями: средними диаметром, высотой, суммой площадей сечений, относительной полнотой. Для определения запаса применяются местные и региональные таблицы хода роста, стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов, регрессионные модели связи с таксационными и дешифровочными показателями, номограммы (рис. 5.20). В целом для определения запаса могут быть использованы известные в лесной таксации методы и таблицы с той разницей, что входные данные определяются не на выделе, а по результатам измерительного дешифрирования снимков.

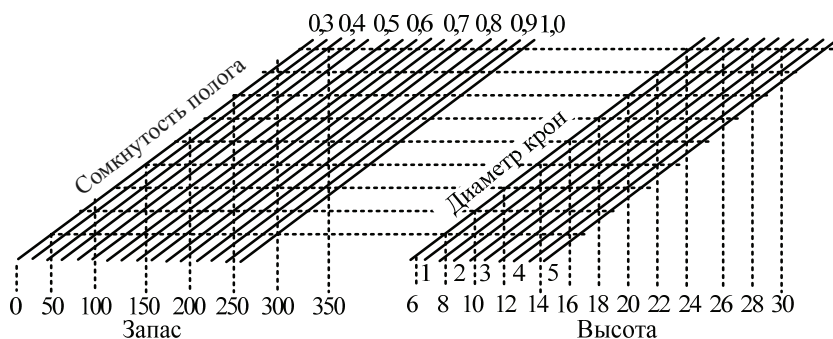


Рис. 5.20. Номограмма для определения запасов сосновых древостоев по средней высоте, диаметру крон и сомкнутости полога (по В. И. Березину)

Все методы определения запаса по снимкам можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, основанные на измерении показателей полога древостоя: средней высоты, сомкнутости полога, среднего диаметра, на основе которых по таблицам или моделям определяется запас. При дешифрировании снимков крупного и среднего масштабов для определения запаса лучшие результаты получают при использовании множественной регрессии запаса с высотой, средним диаметром крон и сомкнутостью полога, корреляционные связи между которыми являются наиболее тесными. Ко второй группе принадлежат методы, в основу которых положены таксационные показатели среднего дерева, густота древостоя, распределения деревьев по диаметрам и диаметрам крон.

Так, И. А. Трунов определял запас на основании распределения количества деревьев по ступеням толщины. С этой целью на аэро-снимках подсчитывалось количество деревьев, измерялись диаметры крон (d_k) и средние высоты древостоев элементов леса. Диаметр на высоте груди определялся по средним диаметрам крон. Затем на основе измеренной густоты древостоя и известных закономерностей строения получали распределение деревьев по ступеням толщины. Средняя высота ступени определялась в зависимости от разряда высот, а дальнейшее вычисление запаса выполнялось как и при обработке данных перечислительной таксации.

Для определения запаса М. К. Бочаров использовал произведение объема среднего дерева, вычисленного по средним высоте дерева и диаметру кроны, на густоту древостоя, полученную методом измерения среднего расстояния между деревьями.

Анализ точности различных методов, проведенный И. А. Труновым, показал, что наиболее трудоемким, но и наиболее точным является способ, основанный на использовании закономерностей распределения количества деревьев древостоя по ступеням толщины. Меньшую точность показывают методы определения запаса путем умножения объема среднего дерева на количество деревьев и номографический способ по высоте и полноте древостоя с применением стандартной таблицы сумм площадей сечений и запасов (по Г. Г. Самойловичу).

5.10. Измерительное дешифрирование полога древостоя на цифровых снимках

В настоящее время в практике лесного хозяйства широко используются цифровые снимки, поэтому методы таксационного дешифрирования цифровых снимков с использованием фотограмметрических станций и геоинформационных систем, поддерживающих работу с растровыми изображениями, вызывают повышенный интерес. Географические информационные системы имеют встроенные средства масштабирования, измерения линий и площадей, автоматизации процесса вычислений, что позволяет значительно повысить эффективность и точность как контурного, так и таксационного дешифрирования. Кроме того, в ГИС совмещаются процессы контурного дешифрирования и векторизации границ, что упрощает технологию производства лесных карт.

На цифровых аэро- и космических снимках высокого пространственного разрешения на изображении полога древостоя достаточно хорошо выделяются кроны отдельных деревьев, что позволяет выполнить автоматизированную оценку состава и густоты древостоя, размеров крон, сомкнутости полога, а на их основе с использованием регрессионных моделей взаимосвязей дешифровочных и таксационных показателей, закономерностей строения и роста – запаса древостоя.

Сегодня геоинформационные системы широко применяются в лесоустройстве для контурного дешифрирования выделов и векторизации, но они позволяют выполнять и измерительное лесотаксационное дешифрирование. С помощью средств ГИС можно в автоматизированном режиме выполнять измерение таких показателей, как густота, состав, диаметр крон деревьев, сомкнутость полога, средняя высота древостоя.

Для оценки таксационно-дешифровочных показателей на аналоговых снимках применяются палетки. При определении густоты и состава насаждений в ГИС можно использовать аналогичные методы, основанные на подсчете числа видимых в пологе крон древесных пород на единицу площади. Для этой цели создают площадной объект с известной площадью или линейные объекты, формирующие сетку квадратов (рис. 5.21, *а*). Каждый квадрат представляет собой учетную площадку, отобранную случайным образом. В зависимости

от текущего масштаба изображения площадь учетных площадок подбирают таким образом, чтобы на ней разместилось не менее 30 видимых крон, и подсчитывают их количество по породам. Подсчеты проводят несколько раз, смещая площадной объект, или в нескольких квадратах сетки с последующим вычислением средних показателей состава. Полученные результаты редуцируются на 1 га.

Густоту древостоя можно определить также по среднему расстоянию между деревьями (рис. 5.21, б). Для этого в нескольких местах выдела измеряются расстояния между расположенными вблизи деревьями и вычисляется среднее, по которому рассчитывается густота (число деревьев на 1 га).

$$N = \frac{10\,000}{l^2}, \quad (5.5)$$

где N – количество деревьев, шт./га; l – среднее расстояние между ними, м.

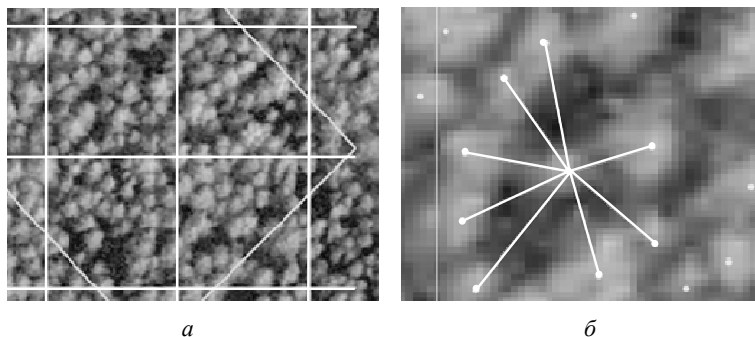


Рис. 5.21. Оценка густоты и состава древостоя:
 а – по числу деревьев на учетных площадках;
 б – по среднему расстоянию между деревьями

Сомкнутость полога древостоя можно определить с использованием точечного или линейного методов. В ГИС формируется точечный слой с систематическим размещением точек. Затем производится подсчет точек, попадающих на кроны, края крон и общее количество точек на выделе (рис. 5.22, а).

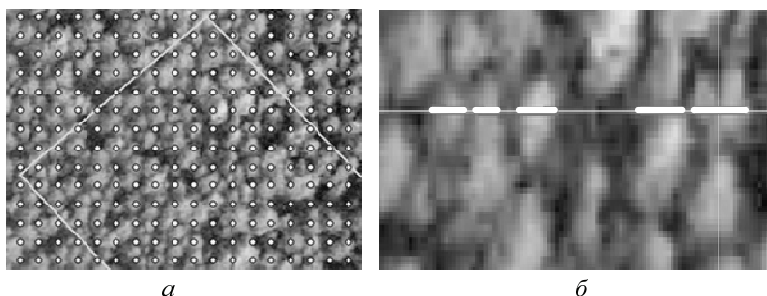


Рис. 5.22. Оценка сомкнутости полога:
а – точечным способом; *б* – линейным способом

Отношение суммы точек, попавших на кроны, и половины попавших на края крон к общему количеству точек на выделе дает сомкнутость полога. Следует отметить, что подсчеты необходимо проводить на том снимке, на котором дешифрируемый выдел расположен как можно ближе к центру.

Сомкнутость полога древостоя может быть измерена также линейным методом. Для этого необходимо провести несколько параллельных прямых линий в пределах дешифрируемого таксационного участка, затем вдоль линий измерить длины отрезков, приходящиеся на изображения крон, и общую длину линии (рис. 5.22, *б*).

Измерение расстояний между деревьями, диаметров крон деревьев в ГИС выполняется стандартными средствами измерения длин линий. Для вычисления площади проекции кроны отдельного дерева необходимо создать полигональный объект и вычислить его площадь.

Высоту отдельных деревьев или среднюю высоту древостоя в ГИС можно измерить по длине теней или смещению вершины дерева от основания. Однако необходимо помнить, что измерения по длине тени можно использовать только в равнинной местности, при сильно холмистом рельефе измерения будут выполнены с грубыми ошибками, вызываемыми рельефом. Эти способы можно применять только в насаждениях с низкой полнотой или на границе с открытыми участками (вырубками, прогалинами и др.).

Более широкие возможности измерений дает цифровая фотограмметрическая станция. С развитием цифровых технологий

широко применяются ЦФС PHOTOMOD, Талка и др. Эти специализированные программные комплексы позволяют выполнять полный спектр фотограмметрических работ от простейших измерений до создания сетей триангуляции, цифровых моделей рельефа и создания ортопланов.

В методическом аспекте измерительное лесотаксационное дешифрирование цифровой стереомодели древостоя не отличается от традиционного дешифрирования аэрофотоснимков с помощью стереоскопа. Отличие состоит лишь в том, что оно выполняется на мониторе, а использование цифровых технологий позволяет дешифровщику выполнять масштабирование, цветовые преобразования снимков и высокоточные измерения, что значительно повышает качество дешифрирования в целом.

6. ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Материалы аэро- и космической съемки широко используются при проведении лесоустройства. На их основе с применением методов контурного, лесотаксационного и ландшафтного дешифрирования, а также методов фотограмметрии составляются все лесоустроительные планово-картографические материалы. В Республике Беларусь инвентаризацией лесного фонда государственных лесохозяйственных учреждений и иных организаций занимается лесоустроительное республиканское унитарное предприятие «Белгослес».

До недавнего времени основными при проведении лесоустройства являлись материалы аэрофотосъемки, но с появлением космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения ситуация изменилась. Сейчас они находят все более широкое применение. Так, в Беларуси начиная с 2009 г. около 5–20% площади устраивается с использованием материалов космической съемки.

Лесоустройство – система инвентаризации и учета лесного фонда, проектирования мероприятий, направленных на обеспечение рационального комплексного использования лесного фонда, повышение эффективности ведения лесного хозяйства, сохранение средообразующих, водоохранных, защитных, санитарно-гигиенических, рекреационных и иных функций леса, эффективное воспроизводство, охрану и защиту леса, осуществление единой научно-технической политики в лесном хозяйстве [25, 59].

При проведении лесоустройства осуществляется:

- определение границ земель лесного фонда;
- его инвентаризация с определением структуры по видам земель, породного и возрастного состава лесов, их состояния, а также количественных и качественных характеристик лесных ресурсов;

- выявление участков, нуждающихся в проведении рубок главного и промежуточного пользования, прочих рубок, других лесохозяйственных мероприятий, а также определение способов их проведения;
- уточнение площадей, определение способов и методов лесовосстановления и лесоразведения;
- определение объемов побочного пользования, заготовок второстепенных лесных ресурсов, пользования для нужд охотничьего хозяйства и рекреации;
- уточнение групп и категорий защитности лесов;
- разработка проектов организации и ведения лесного хозяйства, составление планово-картографической документации;
- выполнение топографо-геодезических, лесобиологических и других обследований и изысканий;
- формирование выведельной и картографической баз данных и другие работы.

Основным документом лесоустройства является проект организации и ведения лесного хозяйства (лесоустроительный проект), в котором дается комплексная оценка хозяйственной деятельности и состояния государственного лесного фонда, разрабатываются основные положения организации и ведения лесного хозяйства, определяются объемы рубок главного пользования и промежуточного лесопользования, лесовосстановительных, противопожарных и других хозяйственных мероприятий на предстоящий ревизионный период.

Лесоустройство осуществляется по технологиям базового (периодически повторяемого) и непрерывного лесоустройства. Полный цикл базового лесоустройства продолжается, как правило, три года и состоит из подготовительных, полевых (лесоинвентаризационных) и камеральных (проектных) работ.

6.1. Подготовительные работы

Подготовительные работы проводятся лесоустроительной организацией за год до начала полевых работ с целью решения организационно-технических вопросов и выполнения части натурных работ.

В ходе подготовительных работ изучаются административные и экономические условия района расположения лесхоза, границы землепользования и административно-хозяйственная структура объекта лесоустройства. Проводится анализ деления территории лесхоза на группы и категории защитности лесов, составляется и согласовывается с заказчиком проект квартальной и визирной сети, оценивается состояние таксационных и планово-картографических материалов прежнего лесоустройства, качество внесения в них текущих изменений. Оценивается обеспеченность топокартами и геодезическими данными землеустройства, материалами аэрофото-съемки и при необходимости заключаются договоры на производство аэросъемочных работ или заказываются материалы космической съемки территории объекта лесоустройства, производится согласование границ землепользования с землеустроительной службой, составляются и заверяются лесоустроительные планшеты с границами кварталов.

Собираются сведения об интенсивности ведения лесного хозяйства, особенностях площадей лесного фонда, транспортной доступности, степени загрязнения радионуклидами, использовании расчетной лесосеки, объемах промежуточного и побочного лесопользования, заготовке второстепенных лесных ресурсов и др., определяются виды, методы и технологии проведения лесоустройства, подбираются нормативно-справочные лесотаксационные материалы, составляется проект наряда-задания на проведение лесоустроительных работ.

Во время подготовительных работ производится закладка пробных площадей, подготовка таксационных ходовых линий и других объектов для проведения таксационных тренировок перед началом полевых работ.

По окончании подготовительных работ составляется пояснительная записка, включающая проект наряда-задания по объемам предстоящих лесоустроительных работ, картографические и другие материалы, собранные в ходе подготовительных работ. Результаты выполнения подготовительных работ рассматриваются на техническом совещании и утверждаются областным органом лесного хозяйства.

6.2. Аэросъемка лесов

Аэрофотосъемка выполняется специализированными предприятиями, имеющими разрешение (лицензию) на производство аэрофотосъемочных работ на основании договора, заключенного с лесоустроительной организацией. Договором на выполнение аэрофотосъемочных работ определяются масштабы съемки и создаваемых планов и карт, тип и фокусное расстояние съемочной камеры (аэрофотоаппарата), необходимость применения специальных приборов (статоскопа, радиовысотомера и др.), календарные сроки производства аэрофотосъемки и сдачи продукции заказчику, время дня, условия облачности и состояние местности района работ (наличие снежного покрова, вегетативное состояние и высота растительности, уровень воды в реках и водоемах и др.) [4, 55, 63, 64]. Перед проведением аэросъемки в соответствии с договором, техническими условиями заказчика и действующими нормативами составляется технический проект, который является основным документом, определяющим технико-экономические показатели для планирования и выполнения аэросъемочных работ.

Аэрофотосъемка проводится за 1–2 года до начала полевых лесоустроительных работ, при невозможности проведения съемки в указанные сроки, как исключение допускается использование материалов аэрофотосъемки давностью более двух лет. Могут быть использованы также материалы космической съемки или аэрофотосъемки, имеющиеся у других организаций, если они соответствуют установленным требованиям.

Съемка выполняется на спектрозональных пленках, допускается многозональная съемка с последующим получением синтезированных цветных изображений. Однозональная монохроматическая съемка допускается лишь в тех случаях, когда иные виды съемки по техническим причинам неосуществимы или нецелесообразны.

Масштаб аэрофотосъемки для целей лесоустройства устанавливается 1:10 000–1:15 000. Допускается использование аэрофотоснимков других масштабов, если это обеспечивает необходимую точность дешифрирования и определения лесотаксационных показателей. Съемка плановая, допустимые углы наклона снимков не должны превышать 3°.

Объект аэрофотосъемки делится на наименьшие съемочные участки, границы которых должны совпадать с рамками трапеций топографических карт (планов). При аэрофотосъемке участка маршруты должны иметь направление «запад – восток» или «север – юг», быть непрерывными и параллельными границам участков [29, 63, 64]. Оси крайних маршрутов проектируются по границам съемочных участков. Однако аэросъемка объекта может выполняться и по линиям, нанесенным заказчиком на топографическую карту (фотосхему), которая прилагается к договору.

Для съемочного участка на основании фокусного расстояния объектива камеры, принятых масштаба съемки, продольных и поперечных перекрытий снимков и летно-технических характеристик летательных аппаратов рассчитываются основные показатели аэрофотосъемки:

– высота фотографирования (H , м):

$$H = f m_c, \quad (6.1)$$

где f – фокусное расстояние, м; m_c – знаменатель численного масштаба съемки;

– базис фотографирования (B , м) – расстояние на местности между главными точками двух смежных АФС:

$$B = l_1 m_c (100 - P_x) / 100, \quad (6.2)$$

где l_1 – длина снимка, м; P_x – процент продольного перекрытия, %;

– расстояние между маршрутами (L , м):

$$L = l_2 m_c (100 - P_y) / 100, \quad (6.3)$$

где l_2 – ширина снимка, м; P_y – процент поперечного перекрытия, %;

– число маршрутов (N_m , шт.):

$$N_m = C / L + 1, \quad (6.4)$$

где C – ширина снимаемого участка, м;

– число АФС в маршруте (N_c , шт.):

$$N_c = A / B + 3, \quad (6.5)$$

где A – длина снимаемого участка, м;

– общее число АФС (N_o , шт.):

$$N_o = N_m N_c K, \quad (6.6)$$

где K – коэффициент увеличения количества маршрутов съемки (в равнинной местности $K = 1,1$);

– максимально допустимая экспозиция (выдержка) в долях секунды ($t_{\max}$):

$$t_{\max} = B / (W m_c), \text{ или } t_{\max} = \sigma m_c / W, \quad (6.7)$$

где W – путевая скорость самолета, м/с; σ – допустимый линейный сдвиг (смаз) изображения (0,05 мм), м;

– интервал между экспозициями (t , с):

$$t = B / W. \quad (6.8)$$

Современные съемочные системы включают специализированное программное обеспечение (например, ASCOT), позволяющее выполнять планирование съемки в автоматическом режиме, а также контроль за полетом, управление камерой и гиросtabilизирующей платформой, регистрацию результатов измерений положения камеры.

Движение самолета во время проведения съемки не прямолинейно, из-за воздушных ям меняется высота полета, боковой ветер вызывает снос, изменение курса и т. д., что приводит к нарушению расчетных показателей и ухудшению качества съемки. Контроль за соблюдением этих требований производится как в процессе аэрофотосъемки, так и по ее завершению, при оценке качества полученных материалов.

После производства летно-съемочных работ, фотографической обработки экспонированных пленок, нумерации негативов пленок, на фотобумаге изготавливают контактные отпечатки (снимки) и составляют из них наглядный монтаж – фотографическое изображение местности, полученное путем совмещения перекрывающихся частей снимков.

Качество материалов аэрофотосъемки оценивается по фотографическим и фотограмметрическим показателям. При контроле фотографического качества на монохроматических снимках оцениваются такие показатели, как плотность, контрастность и вуаль,

на цветных снимках – качество цветопередачи и цветовой контраст. Проверяется также качество изображения координатных меток, часов и уровня, отсутствие механических повреждений эмульсии и т. д. [63].

Фотограмметрическое качество оценивается с целью определения соответствия параметров полученных снимков заданным параметрам фотографирования. По измерениям на накидном монтаже проверяют соответствие допустимым значениям перекрытий снимков, прямолинейности маршрутов аэрофотосъемки и параллельности базисов фотографирования сторонам снимка («елочки»). По измерениям снимков устанавливают также соответствие фактической высоты фотографирования заданному значению; оценивают предельные углы наклона снимков и выравнивание фильма в плоскость.

Методика оценки, а также качественные и количественные характеристики допустимых показателей излагаются в нормативных документах или в специальных технических условиях [63]. Основными показателями, характеризующими фотограмметрическое качество снимков, являются изменения высоты съемки (разномасштабность снимков), величина продольных и поперечных перекрытий, непараллельность сторон базису фотографирования, непрямолинейность маршрута.

Высота фотографирования – это расстояние, измеряемое отвесно от передней узловой точки объектива съемочной камеры до поверхности земли. Изменения высоты съемки приводят к изменению масштаба снимков и, соответственно, к их разномасштабности, которая затрудняет выполнение накидного монтажа, формирование фотосхем и фотопланов. При высоте фотографирования до 1000 м отклонения от расчетной высоты не должны превышать в равнинных районах 3%, в горных – 5% (что составляет – не более 30 м в равнинных районах и 50 м в горных).

Продольные и поперечные перекрытия снимков, выражаемые в процентах их размеров, обеспечивают возможность фототриангуляции и стереометрической обработки, поэтому требование их соответствия расчетным величинам является одним из основных.

Продольное перекрытие P_x должно быть в среднем 60% при минимальном 56%, что обеспечивает наличие 12%-й зоны тройного

продольного перекрытия. Зона тройного продольного перекрытия используется для установки связующих точек между смежными стереопарами при выполнении фототриангуляции. Поперечное перекрытие P_y должно быть не менее 20% при среднем 30–35%, оно используется для обеспечения связи между смежными маршрутами.

В результате наличия продольных и поперечных перекрытий между снимками измерения выполняются не на всей площади, а только в центральной части снимка, в которой искажения положения точек минимальны. Часть снимка, ограниченная линиями, проведенными по серединам зон продольного и поперечного перекрытий, называется рабочей площадью.

Прямолинейность маршрутов характеризуется отношением стрелки прогиба – расстояния между главной точкой снимка, наиболее удаленного от маршрута, к длине маршрута – расстоянию между главными точками первого и последнего снимков в маршруте. Прямолинейность выражается в процентах, а ее величина не должна превышать 2–3%.

Непараллельность сторон базису фотографирования затрудняет фотограмметрическую обработку снимков и не должна превышать 5–10° (в зависимости от фокусного расстояния съемочной камеры и высоты фотографирования).

Угол наклона аэроснимков оказывает влияние на фотограмметрические работы только при использовании приборов аналогового типа. Однако действующие нормативные документы, регламентирующие аэрофотосъемочные работы, устанавливают критерии ее оценки и по величине угла наклона, которая не должна превышать 1° при аэрофотосъемке с использованием средств стабилизации и 3° без них. Причем число снимков с максимальным углом наклона не должно превышать 10% от их общего числа [50].

В результате выполнения летно-съемочных работ получают негативы, контактные отпечатки, репродукции накидного монтажа и их негативы, результаты регистрации показаний приборов и составляют паспорт аэрофотосъемки. В паспорте указывают тип самолета, на котором установлена аппаратура, технические характеристики съемочной камеры, объектива и другого оборудования, основные показатели съемки и т. д. Особое значение для последующей

фотограмметрической обработки имеют фокусное расстояние, расстояние между координатными метками или координаты меток прикладной рамки, величина фотограмметрической дисторсии по осям и зонам, координаты главной точки снимка.

6.3. Полевые работы

В ходе полевых работ производится инвентаризация лесного фонда. На первом этапе выполняется организация территории объекта: проводится геодезическая съемка участков лесного фонда (при отсутствии материалов аэрофотосъемки и крупномасштабных топографических карт), установка и замена квартальных столбов, их нумерация.

Перед началом лесотаксационных работ в целях тренировки и проверки навыков инженерно-технических работников лесоустроительной организации в условиях конкретного объекта с близкими лесорастительными условиями проводится коллективная тренировка. По результатам коллективной тренировки составляется акт, согласно которому таксаторы допускаются к выполнению лесотаксационных работ или направляются на дополнительную индивидуальную тренировку.

При необходимости проводится тренировка техников в виде стажировки до трех дней при инженерах-таксаторах в целях приобретения навыков дешифрирования на аэроснимках ходовых линий, ведения абриса и пикетажного журнала при отсутствии аэроснимков, инструментального восстановления и съемки граничных линий и др.

По завершению тренировок начинаются лесотаксационные работы, в ходе которых каждый квартал в соответствии с установленными лесоустроительной инструкцией критериями делится на выделы, представляющие собой однородные участки лесного фонда, имеющие близкие таксационные характеристики насаждений и требующие проведения одинаковых хозяйственных мероприятий.

При проведении лесотаксационных работ используются аэро- или космические снимки, которые техник готовит до выхода инженера-таксатора в лес [77]. На аэроснимках проводится камеральное

опознавание окружающих границ объекта лесоустройства, квартальных просек и других видимых ходовых линий. Просматривающиеся просеки и граничные линии поднимаются на черно-белых аэроснимках тушью, а на цветных снимках цветной гуашью или цветной тушью редким пунктиром. Невидимые или нечетко изображенные квартальные просеки и визиры подлежат обязательному промеру и их точное положение определяется путем привязки к твердо опознанным ориентирам.

Все ориентиры фиксируются проколом с точностью $\pm 0,2$ мм и обводятся на обратной стороне снимка кружком, возле которого делается отметка о привязке измеряемой линии к ориентиру. Данные натурных промеров вновь прорубленных просек, таксационных визиров и других линий записываются на обратной стороне снимка или в пикетажном журнале при отсутствии аэрофотоснимков. Снимок, подготовленный для натурной таксации с нанесенными на лицевой и обратной сторонах границами кварталов, выделов, ориентирами, дорогами, реками, просеками, результатами промеров и другой ситуацией называется *фотоабрисом* (рис. 6.1). Фотоабрис составляется с учетом камерального и полевого дешифрирования снимка.

Масштаб фотоабриса определяется на основании промера в натуре не менее двух твердо опознанных разнонаправленных линий в центральной части снимка длиной не менее 20 мм каждая в изображении на аэрофотоснимках размером 180×180 мм и не менее 40 мм на аэрофотоснимках размером 300×300 мм. Средний масштаб снимка определяется как среднее арифметическое из масштабов, вычисленных для каждой линии. В отдельных случаях для условий равнинной или слабо холмистой, с недостаточным количеством ориентиров местности по двум-четырем аэрофотоснимкам или зафиксированным в паспорте аэрофотосъемки высоте съемки и фокусному расстоянию аэрофотоаппарата может быть определен средний масштаб для маршрута.

Подготовленный для таксации фотоабрис на лицевой стороне должен содержать: границы рабочей площади (сплошной тонкой линией цветной тушью); границы кварталов (удлиненным пунктиром); номера кварталов, расположенных на аэрофотоснимке; номера смежных аэрофотоснимков; границы категорий защитности лесов; на промеренных ходовых линиях номера четных пикетов; ручьи, реки, дороги, мелиоративные каналы, видимые только под стереоскопом, поднятые цветной тушью.

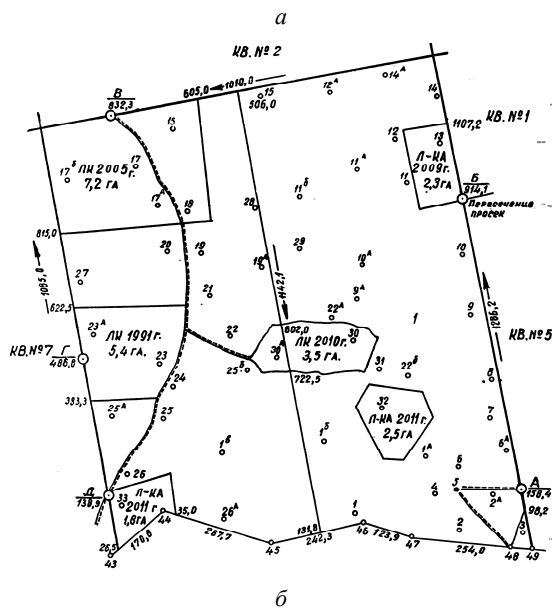


Рис. 6.1. Пример оформления лицевой (а) и обратной (б) сторон снимка

На обратной стороне аэрофотоснимка показываются просеки, визиры и граничные линии с указанием направления промера и длинами линий, где производился промер, твердо опознанные точки с указанием привязки ходовых линий, масштаб, наименование лесхоза, лесничества, дата изготовления абриса, подпись исполнителей.

До выхода в лес инженер-таксатор на каждом аэрофотоснимке производит камеральное стереоскопическое дешифрирование границ таксационных выделов, которые уточняются по данным натурной таксации с обязательным сопоставлением с границами выделов, установленных прежним лесоустройством. На фотоабрис наносятся контуры лесосек, участков лесных культур, подсочки и др., не нашедшие отображения на аэрофотоснимках, с отметкой на обратной стороне года производства.

При полевых таксационных работах для каждого отграниченного на фотоабрисе таксационного участка непосредственно в лесу определяется его таксационная характеристика и заполняется карточка таксации, уточняются установленные при камеральном дешифрировании границы выделов, назначаются необходимые хозяйственные мероприятия и выполняется оценка хозмероприятий, проведенных ранее. В соответствии с установленными нормативами точности применяются следующие методы таксации: глазомерно-измерительный, глазомерный и дешифровочный метод рационального сочетания наземной таксации с камеральным аналитико-измерительным дешифрированием аэрофотоснимков. Большая часть насаждений таксируется глазомерным методом. Глазомерно-измерительным методом таксируются насаждения, назначаемые на предстоящий ревизионный период в рубки главного пользования, рубки обновления, сплошные санитарные рубки, а также для проведения прореживаний.

В Беларуси метод рационального сочетания наземной таксации с камеральным дешифрированием аэрофотоснимков используется при устройстве лесов с уровнем радиоактивного загрязнения более 15 Ки/км^2 и для других объектов, не вовлекаемых в хозяйственное использование (по согласованию с заказчиком). Данный метод должен обеспечивать установленную лесоустроительной инструкцией точность, а также безопасность людей при проведении полевых лесоустроительных работ.

Отнесение кварталов леса к зонам радиоактивного загрязнения осуществляется по средней плотности загрязнения на его территории согласно таблице.

Зоны и подзоны радиоактивного загрязнения лесов

Зоны и подзоны радиоактивного загрязнения лесов	Плотность загрязнения почв цезием 137, Ки/км ²	Наименование зоны
Зона I	1–5 (0,95–4,94)	Зона проживания с периодическим радиационным контролем
Подзона IA	1–2 (0,95–1,94)	
Подзона IB	2–5 (1,95–4,94)	
Зона II	5–15 (4,95–14,94)	Зона с правом на отселение
Зона III	15–40 (14,95–39,94)	Зона последующего отселения
Зона IV	40 (39,95) и более	Зона первоочередного отселения

В зонах с плотностью загрязнения почв цезием 137 до 15 Ки/км² инвентаризация лесов проводится в соответствии с действующими правилами и инструкциями. Применяются как глазомерный, так и глазомерно-измерительный методы натурной таксации.

В III зоне (15–40 Ки/км²) глазомерным методом таксируются только участки спелого леса с закладкой при необходимости единичных реласкопических площадок в наиболее характерных местах и участки, где проектируются хозяйственные мероприятия. Все остальные выделы таксируются камеральным дешифрированием снимков без натурного посещения лесотаксационных участков.

В IV зоне (40 Ки/км² и более) и в зоне эвакуации (отчуждения) инвентаризация лесов проводится только методом камерального аналитико-измерительного дешифрирования снимков с использованием, в обязательном порядке, актуализированных данных прежнего лесоустройства. Границы кварталов и выделов не должны меняться без достаточных оснований. При дешифрировании выявляются четко видимые изменения в лесном фонде (вырубки, гари, участки лесных культур, возобновившиеся не покрытые лесом земли); для характеристики выделов, не имеющих существенных изменений, используются актуализированные данные предыдущего лесоустройства.

Для определения закономерностей строения полога древостоев, взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями подбираются эталоны – участки с характерными дешифровочными

признаками, где проводится натурная таксация, а таксационные характеристики впоследствии идентифицируются с участками, расположенными в зонах загрязнения со сходными дешифровочными признаками насаждений.

6.4. Инвентаризация лесов на основе рационального сочетания наземной таксации с камеральным дешифрированием снимков

Инвентаризация лесов выполняется в соответствии с техническими указаниями по лесоинвентаризации на основе рационального сочетания наземной таксации с камеральным дешифрированием аэрофотоснимков. В основу данного метода положены закономерности строения полога древостоя и взаимосвязи между таксационными и дешифровочными признаками насаждений [83].

Работы проводятся в несколько этапов: сбор информации об объекте лесоустройства и лесном фонде, изучение строения типичных насаждений и выявление взаимосвязей между таксационными и дешифровочными показателями, закладка таксационно-дешифровочных пробных площадей, проведение тренировок, дешифрирование снимков.

Сбор информации об объекте. На первом этапе в период проведения подготовительных работ по материалам прошлого лесоустройства, картографическим материалам, литературным источникам изучают географические, почвенные, гидрологические и лесорастительные условия территории объекта лесоустройства, типы условий местопроизрастания и типы леса, подбирают существующие нормативные материалы и таблицы (модели), отражающие взаимосвязи между таксационными и дешифровочными показателями. На основании собранной информации территория устраиваемого объекта делится на однородные части (ландшафтные участки, местности, урочища, фации), составляются таблицы распределения насаждений по преобладающей породе, составу, возрасту, классам бонитета, полнотам, типам леса, по которым можно судить о том, какие насаждения являются наиболее распространенными, а также об изменчивости показателей. В результате изучения структуры лесов объекта на ос-

нове изменчивости таксационных показателей определяется необходимый объем выборки – количество пробных площадей и типичных выделов [75].

Изучение закономерностей строения полога древостоев и взаимосвязей между показателями. Изучение закономерностей строения полога древостоев и взаимосвязей между показателями проводится на таксационно-дешифровочных пробных площадях или типичных выделах, заложенных в наиболее характерных для объекта лесоустройства насаждениях. На пробных площадях выполняется перечислительная таксация древостоя, для таксации насаждений на таксационно-дешифровочных выделах применяются выборочные или глазомерно-измерительные методы таксации с закладкой круговых пробных площадок постоянного радиуса. Площадь и число круговых площадок должны обеспечивать общий объем выборки на выделе не меньше 0,5 га при наличии не менее 200 деревьев основного элемента леса. В среднем закладывают 10–17 площадок в зависимости от выбранного радиуса и площади выдела. В расстроенных насаждениях площадок требуется на 20% больше. Перечетные площадки размещают по выделу равномерно (систематической выборкой). На каждой круговой площадке определяют точечным (статистическим) способом сомкнутость полога. Измеряют по двум взаимно перпендикулярным диаметрам строго через 5 м путем визирования вверх на крону. Данные перечета деревьев в каждом выделе объединяют и обрабатывают общепринятыми в лесной таксации методами.

На снимках для участков с заложенными пробными площадями и типичными выделами определяют сомкнутость полога, дешифровочный состав, густоту древостоя, форму, размеры, густоту крон отдельных древесных пород, их участие в формировании полога, его горизонтальной проекции, структуру изображения, тон, цвет изображения крон составляющих пород и другие показатели, заполняют карточку анализа дешифровочных признаков [22, 75].

Результаты натурной таксации и камерального измерительного дешифрирования полога древостоев обрабатываются математико-статистическими методами, проводится корреляционный анализ, на основе которого разрабатываются регрессионные модели и таблицы взаимосвязей между таксационными и дешифровочными

показателями: общим количеством и числом видимых на аэрофотоснимках деревьев, фактическим и дешифровочным составами, средними диаметрами деревьев и крон, относительной полнотой и степенью сомкнутости полога и т. д. Точность полученных моделей и таблиц проверяют в натуре на контрольных выделах, протаксированных глазомерно-измерительным методом. В районах, где зависимости между таксационно-дешифровочными показателями древостоев изучены, пробные площади и типичные выделы закладывают в меньшем объеме для тренировки.

Таксационно-дешифровочные тренировки. Таксационно-дешифровочные тренировки подразделяют на коллективную полевую, индивидуальные полевую и камеральную, камеральную контрольную.

Коллективную полевую тренировку проводят со всеми исполнителями в начале полевого периода на 20–30 таксационно-дешифровочных пробных площадях и таксационном ходе с 20–30 типичными выделами, представляющими наиболее распространенные категории насаждений, установленные по таблице встречаемости. Такую тренировку проводят в два этапа.

На первом этапе в пределах пяти пробных площадей исполнители в натуре изучают особенности насаждений, измеряют таксационно-дешифровочные показатели древостоев и отдельных деревьев, знакомятся со способами привязки аэрофотоснимков, анализируют ландшафтные и морфологические признаки участков местности и насаждений. Каждый исполнитель таксирует насаждение, отмечая все особенности его таксационного строения и дешифровочные характеристики, и заполняет карточку анализа признаков дешифрирования. Затем пробные площади, протаксированные в натуре, дешифрируют в полекамеральных условиях при стереоскопическом просмотре аэрофотоснимков и в карточке анализа заполняются дешифровочные признаки, видимые на аэрофотоснимках. В результате приобретаются навыки натурной таксации и дешифрирования снимков.

На втором этапе коллективной тренировки исполнители дешифрируют насаждения на оставшихся пробных площадях и типичных выделах, а затем проводят их натурную таксацию. На основе анализа результатов таксации и ошибок, допущенных при определении таксационных и дешифровочных показателей насаждений,

делается предварительная оценка качества дешифрирования и даются рекомендации по индивидуальной тренировке дешифровщика. Решение о допуске таксаторов-дешифровщиков к аналитико-измерительному лесотаксационному дешифрированию АФС принимается на заключительном этапе по результатам контрольной камеральной таксационно-дешифровочной тренировки.

Навыки определения таксационных показателей насаждений методом аналитико-измерительного дешифрирования каждый таксатор-дешифровщик закрепляет при *индивидуальной тренировке* на 3–5 таксационно-дешифровочных пробных площадях и 20–30 типичных выделах, протаксированных выборочным измерительно-перечислительным методом и представляющих по возможности все группы и категории насаждений, которые распространены на данном участке.

Аэрофотоснимки с опознанными и нанесенными на них таксационно-дешифровочными пробными площадями и типичными выделами являются основой для формирования фототеки типичных насаждений, необходимых для камеральной тренировки.

На завершающем этапе индивидуальной тренировки выполняется камеральное дешифрирование насаждений с последующей натурной таксацией, устанавливаются выделы, в которых наблюдаются значительные расхождения в полученных результатах, проводится анализ и коррекция расхождений.

После проведения всех натурных таксационных работ в начале камерального периода с исполнителями проводится *камеральная контрольная таксационно-дешифровочная тренировка*, при этом используют данные выборочной измерительно-перечислительной таксации выделов смежных таксаторских участков. По результатам тренировки таксаторы-дешифровщики допускаются к производственному дешифрированию. В процессе выполнения дешифровочных работ через каждые 1,5–2 месяца проводят камеральные таксационно-дешифровочные тренировки по материалам таксации пробных площадей и типичных выделов, заложенных другими таксаторами.

Натурные лесоинвентаризационные работы. Наземную таксацию в сочетании с измерительными методами выполняют только на участках спелого леса с закладкой при необходимости единичных реласкопических площадок в наиболее характерных местах и участках,

где проектируются хозяйственные мероприятия. Таксатор-дешифровщик намечает таксационные маршруты с таким расчетом, чтобы при минимальной их протяженности таксацией были охвачены все участки для натурной таксации. Значительные объемы перечислительной таксации выполняют с целью обеспечения контроля за точностью дешифрирования.

Дешифрирование аэрофотоснимков. Камеральное лесотаксационное дешифрирование аэрофотоснимков использует методы фотограмметрических измерений, выборочные математико-статистические методы и глазомерные методы определения различных таксационно-дешифровочных показателей насаждений, описанные в разд. 3 и 5.

Аналитико-измерительное дешифрирование выполняется с обязательным применением стереоскопических приборов с оптическим увеличением не менее 3,5–5,0 крат, снабженных устройствами для измерения продольных параллаксов и измерительными палетками для определения размеров видимых крон деревьев, сомкнутости верхнего полога, состава и густоты древостоя.

При дешифрировании аэрофотоснимков с заданной нормативной точностью должны быть определены контуры лесотаксационных выделов, породный состав лесных насаждений, класс возраста, средняя высота и диаметр древостоя, группа типов леса, класс бонитета, полнота и запас древесины лесных насаждений, категории и состояние не покрытых лесом, лесных и нелесных площадей. Полученные характеристики сопоставляются с материалами предыдущего лесоустройства с тем, чтобы не допустить необоснованных изменений контуров таксационных выделов, проанализировать преемственность ранее установленных таксационных характеристик насаждений, причины выявленных расхождений. При необходимости производится корректировка данных. Результаты дешифрирования записываются в карточку таксации.

Дешифрирование снимков, получаемых в цифровом виде или преобразованных в цифровой вид, производится с использованием специализированных программ для фотограмметрических измерений (цифровой фотограмметрической станции) и автоматизированных (интерактивных) методов и ГИС-технологий, обеспечивающих как выполнение традиционного аналитико-измерительного

дешифрирования в интерактивном режиме, так и автоматизированную классификацию изображений, совместную обработку разновременных снимков и карт и выявление по ним изменений, произошедших в результате рубок, пожаров и других природных или антропогенных воздействий. По результатам классификации проводится уточнение деления территории лесов на лесотаксационные выделы.

6.5. Производство лесоустроительных планово-картографических материалов

За последнее десятилетие технология производства лесоустроительных планово-картографических материалов в корне изменилась [28]. Современное лесоустройство в Республике Беларусь на всех стадиях лесоустроительного проектирования и производства планово-картографических материалов широко использует компьютерные средства и геоинформационные системы [5, 16]. В 2001–2002 гг. специалистами отдела картографии информационно-вычислительного центра РУП «Белгослес» и РУП «Белгеодезия» разработана технология автоматизированного формирования планово-картографических лесоустроительных материалов, основой которой являются специализированные программные продукты Formod, Geographic Transformer, Easy Trace, PHOTOMOD и др. Начиная с 2003 г. данная технология внедрена и успешно используется РУП «Белгослес». В настоящее время цифровые планово-картографические материалы имеются на все лесхозы Беларуси.

Основным достоинством современных цифровых технологий является возможность формирования планово-картографических материалов на основе данных, получаемых из различных источников. Такими источниками являются:

- материалы съемки с воздушных летательных аппаратов;
- материалы съемки с космических летательных аппаратов;
- данные натурной съемки с использованием GPS-приемника;
- данные актуализации;
- вторичные данные (картографическая и повыделная базы данных прошлых лет).

6.5.1. Формирование планового геодезического обоснования

Геодезической основой для привязки снимков и составления карт служит сеть твердо опознанных на аэрофотоснимках опорных точек, называемых *опознаками*. Опознаки, у которых определены только плоскостные координаты X и Y , называют плановыми, если известна координата Z – высотными, если известны все три координаты – планово-высотными. Высотные опознаки необходимы для стереофотограмметрической обработки и формирования цифровой модели рельефа местности. На современном этапе в условиях равнинной местности Беларуси лесоустройство не делает высотного обоснования планов и карт, хотя для рационального ведения лесного хозяйства в лесах I и II групп, а также в условиях холмистого рельефа планового обоснования бывает недостаточно.

Плановыми опознаками служат твердо опознанные точки пересечения дорог, просек, углы пашен и другие ориентиры, расположенные на аэрофотоснимках в зоне тройного продольного и поперечного перекрытий. В качестве геодезической основы используются топографические карты масштаба 1:10 000, а также опорные точки, полученные с топокарт или заложенные в натуре, к которым выполняется привязка квартальной сети, поскольку она хорошо просматривается на снимках. К ней привязывается вся остальная ситуация (границы выделов, дороги и т. д.).

С развитием систем глобального позиционирования координаты привязочных (опорных) точек можно получать с помощью GPS-приемника. В настоящее время существуют три независимые спутниковые системы позиционирования и навигации: американская GPS (Global Positioning System), российская ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) и европейская Galileo. Структура и принципы работы всех названных систем схожи, поэтому рассмотрим ее на примере американской системы GPS, которая была введена в эксплуатацию первой и сейчас имеет наибольшее количество потребителей.

Инициаторами разработки и реализации системы GPS были военные. Спутниковая сеть для определения координат в любой точке земного шара была названа Navstar (Navigation System with Timing and Ranging – навигационная система определения времени и дальности). Аббревиатура GPS появилась позднее, когда система стала использоваться также и в гражданских целях.

Первоначально использовать систему GPS предполагалось только в навигационных целях, но исследования, проведенные учеными Массачусетского технологического института в 1976–1978 г., показали, что измерения можно выполнять с миллиметровой точностью, и с того времени началось использование системы для проведения геодезических измерений. С 1983 г. система была открыта для использования в гражданских целях, а с 1991 г. сняты ограничения на продажу GPS-оборудования в страны бывшего СССР.

Переломным моментом в истории применения GPS стало решение об отмене с 1 мая 2000 г. режима селективного доступа (SA – Selective Availability) – искусственно вносимой в спутниковые сигналы погрешности для неточной работы гражданских GPS-приемников. После исключения вносимых ошибок с помощью недорогих приемников стало возможным определять координаты с точностью в несколько метров (ранее погрешность составляла десятки метров), что привело к широкому использованию GPS во многих сферах деятельности человека.

Структурно система глобального позиционирования состоит из трех сегментов: космического сегмента – системы искусственных спутников Земли; сегмента управления – сети наземных станций слежения и управления; аппаратуры потребителей – GPS-приемников.

Космический сегмент состоит из 24 спутников, вращающихся на шести орбитах (рис. 6.2). Плоскости орбит наклонены на угол около 55° к плоскости экватора и сдвинуты между собой на 60° по долготе. Радиусы орбит – около 20 200 км, а период обращения – половина звездных суток (примерно 11 ч 58 мин). На борту каждого спутника находятся: приемо-передающая аппаратура, четыре атомных стандарта частоты (два цезиевых и два рубидиевых – резерв), солнечные батареи, двигатели корректировки орбит, компьютер.



Рис. 6.2. Космический сегмент

Параметры орбит спутников периодически контролируются сетью наземных станций слежения, с помощью которых (не реже 1–2 раз в сутки) вычисляются баллистические характеристики, регистрируются отклонения спутников от расчетных траекторий движения, определяется время бортовых часов спутников, осуществляется мониторинг исправности навигационной аппаратуры.

Аппаратурой потребителей являются GPS-приемники. Принимаемый сигнал декодируется, т. е. из него выделяются кодовые последовательности C/A либо C/A и P, а также служебная информация. Полученный код сравнивается с аналогичным кодом, который генерирует сам GPS-приемник, что позволяет определить задержку распространения сигнала от спутника и таким образом вычислить дальность.

Для определения трехмерных координат GPS-приемника необходимо наличие в зоне приема не менее четырех спутников. Получив от них сигнал, GPS-приемник ищет точку пересечения сфер, образованных вокруг спутников на расстоянии, вычисленном по времени прохождения сигнала от спутника до приемника. Если такой точки нет, процессор GPS-приемника методом последовательных приближений корректирует данные, пока не добьется пересечения всех сфер в одной точке, и рассчитывает ее координаты.

Современным направлением развития систем глобального позиционирования и навигации является возможность их совместного использования, что вследствие большого количества видимых КА и их хорошего взаимного расположения позволяет значительно повысить стабильность и точность позиционирования.

6.5.2. Основные этапы производства лесных планов и карт

Можно выделить следующие основные этапы производства планово-картографических лесоустроительных материалов: аэрофотосъемка и проявка негативов, печать аналоговых аэрофотоснимков, контурное дешифрирование и подготовка их к таксации, таксация насаждений и корректировка отдешифрированных аэрофотоснимков, оцифровка, подготовка планового геодезического обоснования, трансформирование и привязка к топооснове цифровых снимков, векторизация изображения, экспорт данных в ГИС, печать планово-картографических материалов (рис. 6.3).

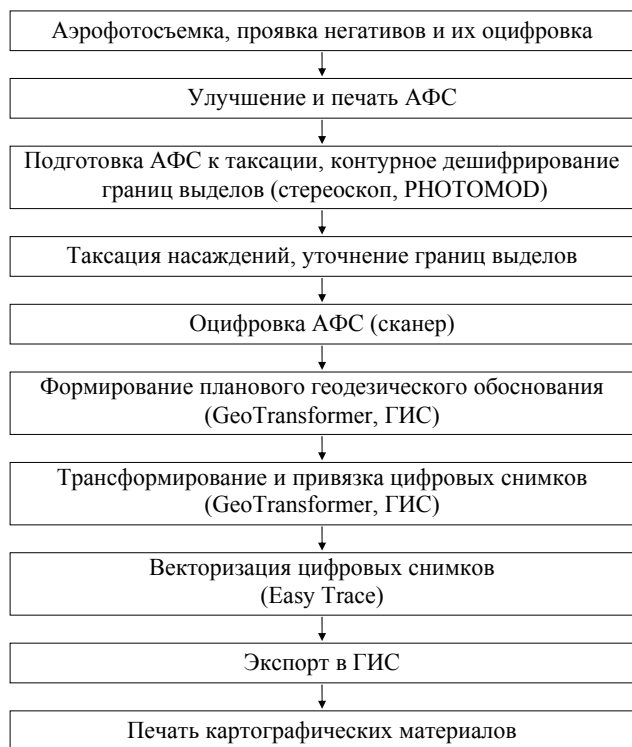


Рис. 6.3. Основные этапы производства лесоустроительных планово-картографических материалов

Аэрофотосъемка проводится, как правило, за год до лесоустройства с использованием спектрозональных фотопленок и фотобумаг. Для дешифрирования снимков в стереорежиме съемка выполняется с перекрытиями (продольными – 65% и более, поперечными – 25% и более). В последние годы для уменьшения затрат используются фотонегативы предельно допустимого масштаба – 1:15 000, которые оцифровываются на фотограмметрическом сканере. Полученные таким образом цифровые снимки увеличиваются до масштаба 1:10 000, производится улучшение их дешифровочных качеств и печать на фотопринтере. Улучшение дешифровочных свойств

цифровых снимков выполняется путем цветовых и яркостных преобразований, повышающих визуальные различия объектов (см. рис. XXIII).

Подготовка снимка к таксации и контурное дешифрирование выделов проводится в рабочей области одного из снимков с помощью стереоскопа. При этом на снимки наносятся границы землепользователей, кварталов, выделов, водоемов, дороги, линии электропередач, каналы, реки и т. д. В условиях холмистого рельефа для контурного дешифрирования границ выделов может использоваться цифровая фотограмметрическая станция PHOTOMOD, позволяющая выполнять ортотрансформирование и таким образом получать картографические материалы без проективных искажений на рельеф.

В полевых условиях выполняется таксация насаждений, в ходе которой наряду с натурной оценкой выполняется визуальное дешифрирование основных таксационных показателей на снимке: густоты, сомкнутости полога и полноты, размера крон, породного состава (т. е. лесотаксационное дешифрирование), а также корректировка границ выделов. После натурной таксации насаждений в камеральный период проводится сканирование аналоговых и получение цифровых снимков, их трансформирование, привязка и векторизация ситуации. Операции трансформирования привязки и векторизации выполняются с использованием современных вычислительных средств и программного обеспечения.

Особую роль играет этап формирования квартальной сети и ее привязки к топографической основе (системе координат). В настоящее время для привязки используются существующие топокарты масштаба 1:10 000. Они оцифровываются, трансформируются и накладываются на систему координат, а оцифрованные аэрофотоснимки, в свою очередь, привязываются к топокартам (рис. 6.4).

В качестве основы используются также геопривязанные космические снимки, на которых можно дешифрировать квартальную сеть и опорные точки, материалы прошлого лесоустройства, данные GPS-съемки. Использование материалов GPS-съемки, полученных в ходе подготовительных работ, позволяет значительно повысить точность привязки и минимизировать ошибки, имеющиеся на существующих топокартах. Это создаст предпосылки для внедрения и использования в лесном хозяйстве современных GPS-приемников и системы спутникового позиционирования при проведении различных хозмероприятий.

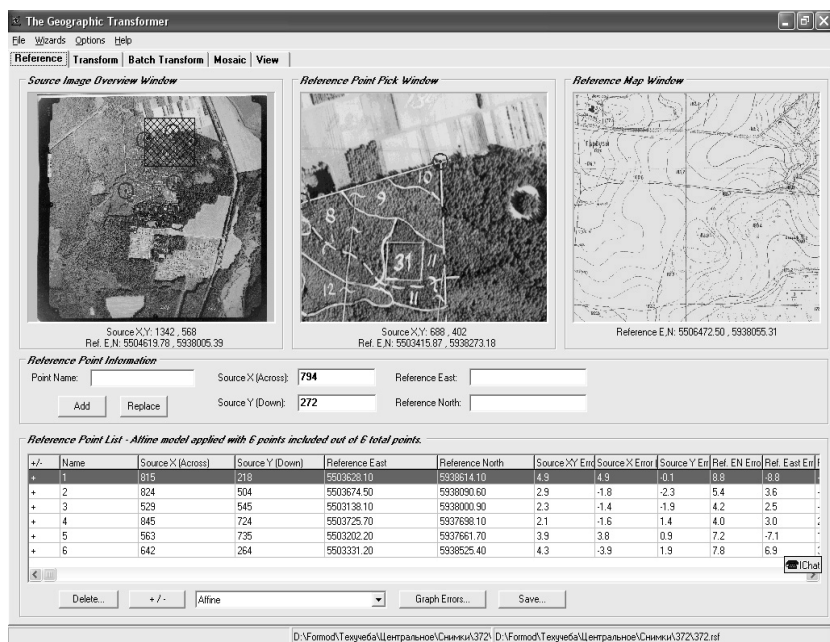


Рис. 6.4. Процесс привязки снимка к топокарте с использованием GeoTransformer

Трансформирование и привязка цифровых снимков выполняется различными средствами в зависимости от требуемой точности. Если используются стереоснимки, в условиях холмистой местности целесообразно применение цифровой фотограмметрической станции ЦФС PHOTOMOD, для равнинной местности трансформирование и привязка снимков может выполняться с использованием GeoTransformer или непосредственно в ГИС, если она имеет средства трансформирования и привязки растровых данных. Привязка снимков производится к квартальной сети и опорным точкам, сформированным на предыдущем этапе. Контурное дешифрирование и векторизация цифровых снимков в условиях равнинной местности выполняются с помощью векторизатора Easy Trace либо в ГИС, если она поддерживает работу с растровыми данными (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Векторизация выделов в Easy Trace

В условиях сильно холмистой или горной местности для векторизации используют цифровую фотограмметрическую станцию ЦФС PHOTOMOD. Применение в процессе дешифрирования и векторизации современных компьютерных технологий позволяет значительно повысить качество работ, так как дешифровщик получает возможность масштабирования и цветовой коррекции цифровых снимков.

Дальнейшая обработка информации осуществляется в геоинформационной системе Formod, разработанной на основе Mapinfo. Здесь формируются лесоустроительные планшеты масштаба 1:10 000; планы лесничеств масштаба 1:25 000, окрашенных по преобладающим породам и группам возраста, проектируемым хозмероприятиям и т. п.; карты лесхозов масштаба 1:100 000–1:200 000 и другие материалы.

Все плано-картографические материалы оформляются в соответствии с действующими нормативными документами. Цифровые издательские оригиналы распечатываются в заданном масштабе целиком или с разбивкой на клапаны (рис. 6.6).

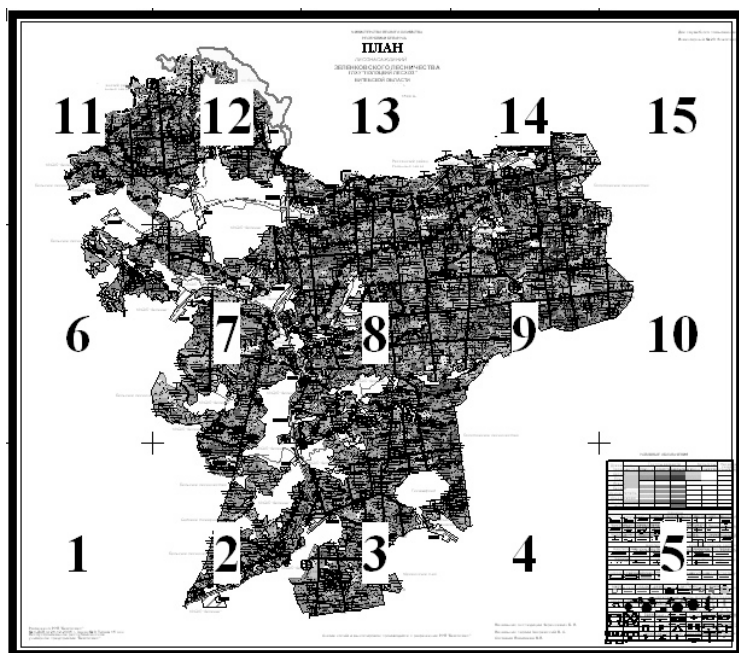


Рис. 6.6. План лесонасаждений с разбивкой на клапаны

При формировании цифровых издательских оригиналов карт-схем лесхозов выполняются операции по объединению карт входящих в их состав лесничеств и заполнению участков между ними элементами топографической основы соответствующего масштаба.

Технология производства лесных карт в РУП «Белгослес» достаточно современна, базируется на цифровых методах обработки информации, постоянно развивается, имеет хорошие возможности модернизации и может быть легко адаптирована к использованию в технологическом процессе цифровых аэро- и космических снимков.

7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СНИМКОВ

7.1. Понятие о цифровых снимках

Аэро- и космические снимки можно получать в различной форме: аналоговой, например фотоснимки на пленке или бумаге, и цифровой – в виде двоичных данных на различных носителях. В первом случае изображение, сформированное объективом, попадает на фотопленку, во втором – на регистрирующее устройство – светочувствительные датчики. Излучение принимается датчиками, и каждый из них в зависимости от интенсивности излучения формирует электрический заряд, который и преобразуется в цифровой код. Конечно потребителю данные могут предоставляться как в аналоговом, так и цифровом виде, но вся обработка цифровых снимков выполняется на компьютерах, поэтому важно знать, как формируются цифровые снимки и что они собой представляют.

7.1.1. Формирование изображения

В настоящее время цифровые изображения получают либо при съемке объектов цифровыми камерами, либо путем сканирования фотонегативов или самих снимков. Регистрация изображения выполняется на светочувствительный элемент, например фотодиод, изготовленный из полупроводникового материала, напряжение выходного сигнала которого пропорционально освещенности.

Формирование двумерного изображения с помощью одиночного сенсора связано с определенными сложностями, так как необходимо обеспечить его перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях относительно регистрируемой области, что требует больших затрат времени. Такой способ может быть использован при сканировании аналоговых снимков, но не подходит для

выполнения съемки, поэтому в съемочных камерах используются линейка или матрица сенсоров.

Линейки сенсоров применяются в сканирующих системах. В камере они расположены перпендикулярно движению, что обеспечивает одновременную регистрацию части изображения в виде линии (строки), а перемещение камеры вместе с летательным аппаратом позволяет получить множество линий – все строки изображения (рис. 7.1).

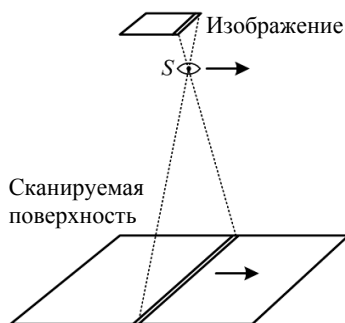


Рис. 7.1. Схема съемки методом сканирования

Большинство современных камер для регистрации изображения используют матрицы сенсоров, которые изготавливаются в одном корпусе, объединяющем множество элементов, работающих в широком диапазоне чувствительности. Ответная реакция каждого элемента пропорциональна интегралу световой энергии, попадающей на поверхность этого элемента, что позволяет, увеличивая время экспозиции, получать изображения с низким уровнем шума.

Преимущество двумерной матрицы заключается в том, что все изображение можно получить единовременно, за одну экспозицию (кадр), и нет необходимости в механическом перемещении сенсоров (рис. 7.2).

С математической точки зрения изображение можно рассматривать как двумерную функцию $f(x, y)$, где x и y – пространственные координаты точки на снимке. Значение функции f в точке с пространственными координатами x и y зависит от количества отраженной от объекта энергии, излучаемой каким-либо источником [17].

Функцию $f(x, y)$ можно охарактеризовать двумя критериями: энергией светового потока, который падает на наблюдаемую сцену от источника излучения, и альбедо – долей светового потока, отраженного от объектов сцены. Произведение этих составляющих дает функцию изображения для точки с координатами x, y :

$$f(x, y) = A(x, y)E_I(x, y), \quad (7.1)$$

где $A(x, y)$ – альбедо; $E_I(x, y)$ – энергия падающего излучения.

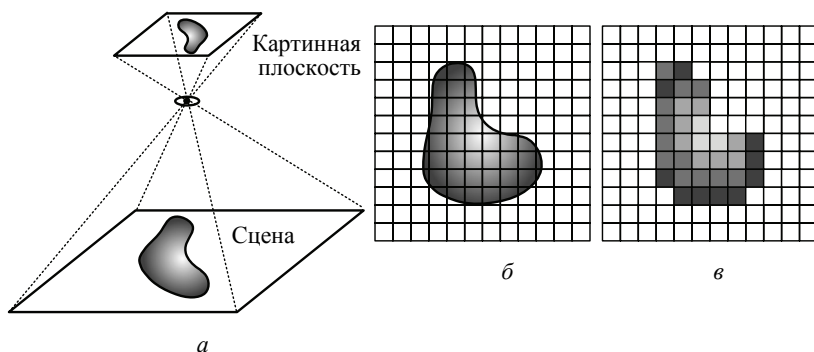


Рис. 7.2. Регистрация изображения на матрицу сенсоров:
a – схема съемки; *б* – изображение в картинной плоскости (на матрице);
в – цифровое изображение

Альбедо может изменять значения от 0 (полное поглощение) до 1 (полное отражение), поэтому можно записать:

$$0 < A(x, y) < 1; \quad (7.2)$$

$$0 < E_I(x, y) < \infty; \quad (7.3)$$

$$0 < f(x, y) < \infty. \quad (7.4)$$

Энергия электромагнитного излучения зависит, прежде всего, от источника излучения, в то время как альбедо определяется отражающими свойствами объекта. Изображение, формируемое линейкой или матрицей сенсоров, является монохромным, а значения, регистрируемые каждым сенсором, пропорциональны энергии источника излучения и находятся в некотором диапазоне. Фактически, значение функции $f(x, y)$ можно назвать яркостью для данной точки изображения $B(x, y)$, а интервал значений $B_{\min} < B < B_{\max}$ – диапазоном яркостей. На практике его обычно сдвигают по числовой оси, получая интервал от 0 до 1, края которого принимаются за уровень черного ($B_{\min} = 0$) и уровень белого ($B_{\max} = 1$). Все промежуточные значения в этом интервале соответствуют некоторым оттенкам серого.

Выходной сигнал, поступающий от большинства сенсоров, является аналоговым (непрерывно изменяющееся напряжение на сенсоре), а его форма и амплитуда связаны с величиной отраженной

объектом энергии излучения. Чтобы получить цифровое изображение, аналоговый сигнал необходимо преобразовать в цифровую форму. Эта операция включает в себя два процесса – дискретизацию и квантование, которые представлены на рис. 7.3.

Здесь показано исходное изображение, которое нужно преобразовать в цифровую форму (рис. 7.3, *а*). Изображение непрерывно по координатам x и y и функция $f(x, y)$ также непрерывна. Чтобы преобразовать аналоговое изображение в цифровую форму, необходимо координаты и значения (амплитуду) функции представить в виде конечных множеств. Представление координат в виде конечного множества отсчетов называется дискретизацией, а амплитуды – квантованием.

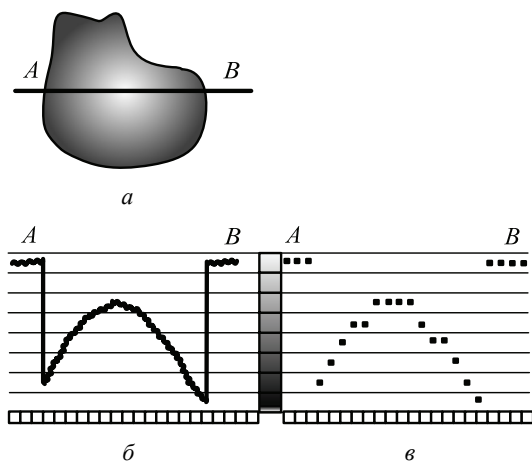


Рис. 7.3. Получение цифрового представления аналогового сигнала:
а – изображение; *б* – аналоговый сигнал по линии сканирования
 между точками A и B ; *в* – цифровое представление сигнала

Изображенный на рис. 7.3, *б* график – одномерная функция, представляющая собой изменения значений яркости непрерывного изображения вдоль отрезка AB . Случайные отклонения на графике вызваны наличием в изображении шумов. Для выполнения дискретизации необходимо отрезок AB разбить на равные интервалы (интервалы показаны квадратиками по горизонтали); таким образом, отрезок AB

будет разделен на конечное число дискретных значений. Чтобы представить график функции $f(x, y)$ на отрезке AB , диапазон яркостей также необходимо преобразовать в дискретные величины (выполнить квантование). Квантование непрерывных значений яркости в точках дискретизации осуществляется простым сопоставлением каждого отсчета с одним из дискретных уровней – тем, к которому ближе найденное значение яркости.

В результате совместных операций дискретизации и квантования получается набор отсчетов для одной строки (рис. 7.3, *в*), а выполнение такой процедуры построчно с верхней до нижней позволит сформировать двумерное цифровое изображение. Количество уровней квантования определяется размером ячейки памяти, отводимой для хранения двоичного числа (рис. 7.4).

На практике способ оцифровки определяется конструкцией сенсорного устройства. Если изображение формируется одиночным сенсором, то величина дискретизации определяется его механическим перемещением. Если для формирования изображения используется линейка сенсоров, то величина дискретизации в одном направлении определяется количеством сенсоров в линейке, а в другом – механическим перемещением самой линейки.

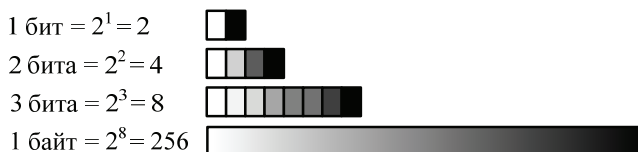


Рис. 7.4. Количество уровней квантования в зависимости от размера ячейки памяти

В случае регистрации изображения с помощью матрицы сенсоров пределы дискретизации изображения в обоих направлениях определяются числом сенсоров в матрице. На основе вышесказанного ясно, что качество получаемого цифрового снимка напрямую зависит от количества сенсоров в матрице и числа уровней квантования.

Цифровой монохромный снимок с глубиной цвета 1 байт (значения яркости от 0 до 255) наглядно можно представить в виде матрицы, в каждой ячейке которой находится целое число, характеризующее

среднюю яркость части изображения, приходящейся на одну ячейку данной матрицы (рис. 7.5).

Дискретизация является главным фактором, определяющим пространственное разрешение изображения – размер мельчайших объектов или деталей, различимых на изображении. Квантование определяет яркостное или радиометрическое разрешение – мельчайшее различимое изменение яркости объекта. Наиболее часто используется 8-битовое представление уровня яркости, но в некоторых случаях оно может быть увеличено до 11, 12 или 16 бит.

Цифровой код значения яркости одного элемента матрицы представляет собой один пиксель изображения. Каждый пиксель на снимке соответствует наименьшему отображаемому элементу земной поверхности, но в отличие от пространственного разрешения, характеризующего съемочную систему, понятие «пиксель» относится к изображению, которое формируется отдельным элементом матрицы.

Пиксели можно подразделить на чистые и смешанные [85]. Чистые пиксели содержат однородную информацию и изображают объекты или их части, имеющие размеры больше, чем пространственное разрешение снимка, а их числовые значения характеризуют усредненное значение яркости объекта (или части объекта). Если объекты по размерам меньше, чем разрешение снимка, то в одном пикселе содержится информация о нескольких объектах. Такие пиксели называют смешанными, а числовое значение яркости пикселя может не соответствовать ни одному из классов объектов, что может привести к ошибкам дешифрирования. Количество смешанных пикселей возрастает по мере снижения пространственного разрешения.

255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	124	76	255	255	255	255	255	255
255	255	76	124	124	255	255	255	255	255
255	255	14	173	173	255	255	255	255	255
255	255	124	173	210	255	255	255	255	255
255	255	124	173	210	210	173	76	255	255
255	255	124	124	173	173	173	76	255	255
255	255	76	124	124	124	124	76	255	255
255	255	255	76	76	76	76	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Рис. 7.5. Схематичное представление монохромного цифрового снимка

7.1.2. Формирование цвета

Монохромный снимок позволяет передавать некоторое количество тонов или оттенков серого цвета, определенное размером двоичного числа, в котором хранится информация о яркости. Такое изображение называется полутоновым. Из полутонового изображения можно получить псевдоцветное, если заменить каждое значение яркости условным цветом, однако такое изображение будет иметь искусственные цвета и не улучшит визуальное восприятие снимка. Монохромные и псевдоцветные изображения воспринимаются человеком хуже, поэтому при дешифрировании цветные снимки имеют значительные преимущества.

В настоящее время существуют различные цветовые модели, связанные с методами получения цветных изображений: на экране монитора или телевизора мы видим цвет, излучаемый экраном, на бумаге – цвет, отраженный поверхностью листа [17]. Наиболее распространенными являются модели RGB (Red, Green, Blue – красный, синий, зеленый), CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, blaK – голубой, пурпурный, желтый, черный), HSB (Hue, Saturation, Brightness – тон, насыщенность, яркость). Как видно, названия моделей складываются из первых букв цветов или показателей, на которых модель основана. Цветовой моделью называется совокупность параметров цвета, которые позволяют однозначно описать его в используемом цветовом пространстве. Кроме того, существует и универсальная модель Lab, которая связывает ранее названные модели.

Модель RGB. Модель RGB является аддитивной, т. е. основана на добавлении базовых цветов – красного, зеленого и синего к черному, и используется при формировании цветного изображения экранами телевизоров и мониторов. Экран телевизора или монитора представляет собой множество ячеек (пикселей), каждая из которых формирует свой цвет тремя излучателями (см. рис. XXV). Яркость свечения излучателя определяется значением яркости монохромного изображения, соответствующего данному цвету.

Любой цвет в модели RGB образуется путем смешения в различных пропорциях этих трех базовых цветов. При глубине цвета 24 бита цвет в данной модели описывается тремя цифровыми значениями от 0 до 255. Каждое цифровое значение определяет количество базового цвета в конечном цвете. Эти значения записываются

в порядке, соответствующем названию модели: красный, зеленый и синий. Для чистого черного цвета яркость свечения всех трех излучателей равна 0 (ни один из цветов не излучается), белый цвет соответствует максимуму излучения (255, 255, 255). Чистый красный цвет в модели RGB представляется как 255, 0, 0 (красная составляющая является максимальной, зеленая и синяя отсутствуют), зеленый цвет – как 0, 255, 0, синий – как 0, 0, 255.

В трехмерной системе координат, оси которой соответствуют трем основным цветам, цветовую модель RGB можно представить в виде цветового куба (рис. 7.6).

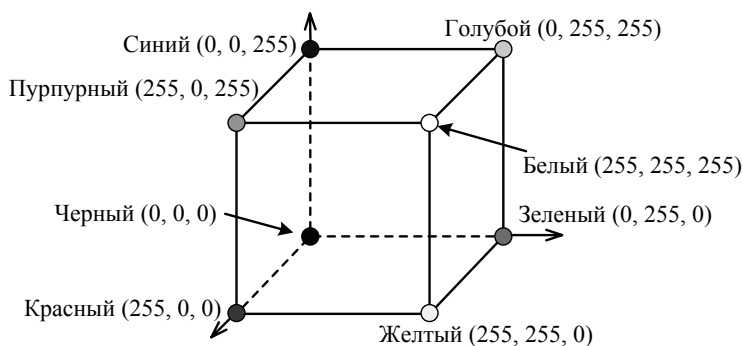


Рис. 7.6. Представление цветовой модели RGB

Модель CMYK. В отличие от модели RGB модель CMY является субтрактивной, описывает цвета, полученные в результате вычитания базовых цветов голубого (cyan), пурпурного (magenta), желтого (yellow) из белого, т. е. полностью противоположна предыдущей. Перечисленные цвета составляют так называемую полиграфическую триаду (process colors).

В цветовой модели CMY уровень составляющих задается значениями в диапазоне от 0 до 100% (величина 100% в этой модели соответствует 255 единицам модели RGB). Поскольку цветовая модель CMY является противоположностью модели RGB, то при смешивании двух субтрактивных цветов результирующий цвет оказывается более темным, чем исходные, а при смешивании трех – черным. Полное отсутствие краски соответствует белому цвету – значения всех

базовых цветов равны 0. В трехмерной системе координат цветовую модель СМУ также можно представить в виде куба.

Теоретически смесь трех базовых красок должна давать черный цвет, но в реальности так не получается, поскольку при смешивании данных трех красок образуется не черный, а грязно-коричневый цвет. Для устранения этого недостатка к трем краскам добавили четвертую, черную (black), и цветовая модель получила название СМУК. В аббревиатуре используется не первая, а последняя буква слова black, чтобы не путать с цветом blue модели RGB. Таким образом, черный цвет в модели СМУК образуется с помощью только одной четвертой составляющей – черной (0, 0, 0, 100). Область применения цветовой модели СМУК – полноцветная печать, и именно с ней работает большинство печатных устройств.

Модель HSB. Цвет в модели HSB описывается при помощи трех параметров: тона, насыщенности и яркости. Тон – это конкретный оттенок цвета. Насыщенность характеризует его интенсивность, или чистоту. Яркость же зависит от количества черной краски, добавленной к данному цвету.

Эту модель для наглядности можно представить в виде цилиндра (рис. 7.7), где перемещение по периметру окружности определяет тон, расстояние от центра – насыщенность, а высота цилиндра – изменение яркости.

Значение цвета задается вектором, выходящим из центра окружности. Точка в центре соответствует белому цвету, а точки на границе окружности – чистым цветам. Направление вектора определяет цветовой оттенок и указывается в угловых градусах. Длина вектора определяет насыщенность цвета. Яркость цвета задается на вертикальной оси.

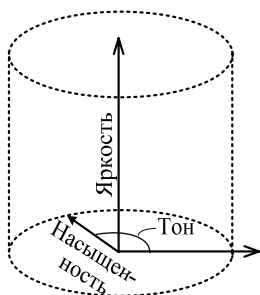


Рис. 7.7. Представление цветовой модели HSB

Таким образом, значение тона измеряется в градусах от 0 до 360, а значения насыщенности и яркости – в процентах от 0 до 100. Эта модель более удобна, чем другие, так как она хорошо согласуется с принципом восприятия цвета человеком и наиболее проста для понимания: сначала

можно определить цветовой тон, а затем задать ему насыщенность и яркость. К сожалению, эта модель на практике применяется меньше, чем вышеописанные, но вместе с тем во многих редакторах растровой графики она используется.

Модель Lab. Цветовая модель Lab была разработана Международной комиссией по освещению (CIE) для устранения недостатков вышеописанных цветовых моделей. Она создавалась как аппаратно-независимая модель, определяющая цвета для любого типа устройства визуализации (монитора, принтера и т. п.).

Цвет в данной модели определяется тремя параметрами. Это освещенность (L) и два хроматических компонента: a – параметр, который изменяется от пурпурного до зеленого, и b – параметр, изменяющийся от синего до желтого. Значения параметров a и b задаются числами, находящимися в пределах от -128 до 127 . Освещенность изменяется в диапазоне от 0 до 100% . Максимальное значение освещенности соответствует максимальной яркости цвета.

Данная цветовая модель используется во многих программах как промежуточное звено при переходе из одной цветовой модели в другую, поскольку модель Lab имеет наибольший цветовой охват по сравнению с моделями RGB, CMYK, HSB.

7.1.3. Форматы растровых данных

Цифровое изображение одного спектрального диапазона можно изобразить в виде двумерной матрицы (таблицы) чисел $I(i, j)$, каждое из которых представляет интенсивность излучения, принятого датчиком от участка поверхности земли, которому соответствует один пиксель изображения (рис. 7.8). Изображение состоит из $n \times m$ пикселей, каждый пиксель имеет координаты (i, j) – номер строки и номер колонки [79].

Число $I(i, j)$ – целое и называется уровнем (или спектральной яркостью) серого пикселя (i, j) . Если изображение получено в нескольких

$B(1, 1)$	$B(2, 1)$	...	$B(m, 1)$
$B(1, 2)$	$B(2, 2)$		$B(m, 2)$
...			...
...			...
$B(1, n)$			$B(m, n)$

Рис. 7.8. Структура цифрового изображения одного спектрального диапазона

диапазонах электромагнитного спектра, то его представляет трехмерная структура, состоящая из чисел $I(i, j, k)$, где k – номер спектрального канала. С математической точки зрения, цифровые данные, полученные в таком виде, нетрудно обработать, так как они представляют собой массивы целых чисел.

В настоящее время разработано и используется большое количество форматов хранения цифровых графических изображений, которые можно подразделить на векторные и растровые. Данные дистанционного зондирования являются растровыми, а используемые в ГИС – векторными, поэтому одной из задач считается преобразование растровых данных в векторные.

Большинство форматов растровых данных, предназначенные для отображения графики на экране монитора или печати, позволяют хранить цифровые изображения, содержащие три спектральных канала – синий, зеленый, красный, соответствующие аддитивной или субтрактивной цветовой моделям. Наиболее известными из них являются форматы BMP, PCX, GIF, PNG, JPEG и др., но они не всегда подходят для хранения ДДЗ [31, 61]. Рассмотрим некоторые из них.

Формат BMP. Формат файла BMP (сокращенно от BitMaP) – это формат, который соответствует внутреннему формату Windows. Несжатые файлы имеют расширение *.bmp, сжатые – расширение *.rle (run length encoding). Информация о цвете каждого пикселя кодируется 1, 4, 8, 16 или 24 битами, которые определяют максимальное число цветов – так называемую глубину цвета (например, 24-битное изображение имеет более 16 млн. различных цветов). Структурно файл состоит из нескольких разделов: заголовка – содержащего информацию о файле; заголовка растрового массива – содержащего информацию об изображении (размере, цвете, методе сжатия, разрешении и т. п.); таблицы цветов; массива данных самого изображения. Формат массива данных растрового изображения в файле BMP зависит от числа бит, используемых для кодирования данных о цвете каждого пикселя. При 256-тоновом изображении каждый пиксель описывается одним байтом (8 бит), значение которого служит указателем на значение из таблицы цветов. Некоторые файлы BMP с глубиной 16 и 24 бит/пиксель не имеют таблиц цветов; также могут различаться внутренние форматы хранения отдельных разделов файла.

Формат PCX. PCX стал первым стандартным форматом графических файлов для хранения файлов растровой графики в компьютерах IBM PC. Файлы PCX включают: заголовок, данные растрового массива и таблицу цветов. Заголовок содержит несколько полей, в том числе поля размера изображения и числа бит для кодирования информации о цвете каждого пикселя. Информация растрового массива сжимается с использованием метода сжатия RLE; таблица цветов содержит 256 значений цветов RGB. Формат PCX первоначально был разработан для адаптеров CGA- и EGA-дисплеев, а в дальнейшем модифицирован для использования в адаптерах VGA и SVGA. Кодирование цвета каждого пикселя может производиться с глубиной 1, 4, 8 или 24 бита.

Формат TIFF. Файлы формата TIFF (Tagged Image File Format) имеют расширения *.tif, *.tiff. Это один из самых сложных форматов растровой графики. Каждый файл начинается 8-байтовым заголовком файла изображения (IFH), важнейший элемент которого – каталог файла изображения (Image File Directory, IFD) – служит указателем на структуру данных. IFD представляет собой таблицу для идентификации одного или нескольких блоков данных переменной длины, называемых тегами. В спецификации формата определено более 70 различных типов тегов. Например, тег одного типа хранит информацию о ширине изображения в пикселях, другого – информацию о его высоте, третьего – о таблице цветов и т. д. Формат TIFF легко расширяется, позволяет определять дополнительные типы тегов.

Файл TIFF может содержать несколько изображений, каждому из которых сопутствуют собственный IFD и набор тегов, а также позволяет выполнять сжатие массива данных различными методами (RLE, LZW и др.). Несмотря на свою сложность, файловый формат TIFF является одним из лучших для передачи растровых массивов с одной платформы на другую благодаря своей универсальности, позволяющей кодировать в двоичном виде практически любое изображение без потери его визуальных или каких-либо иных атрибутов.

На основе формата TIFF разработан формат GEO/TIFF, позволяющий включать теги, содержащие информацию о пространственной привязке изображений, и хранить в одном файле более трех каналов изображений, что стало причиной его широкого использования для хранения ДДЗ.

Формат JPEG. Формат файла JPEG (Joint Photographic Experts Group, расширение *.jpg) был разработан компанией C-Cube Microsystems как эффективный метод хранения изображений с большой глубиной цвета, например получаемых при сканировании фотографий с многочисленными оттенками цвета. Самое большое отличие формата JPEG от других форматов, рассмотренных здесь, состоит в том, что JPEG позволяет использовать алгоритмы сжатия как без потерь, так и с потерями информации. Алгоритм сжатия без потерь после восстановления дает изображение, в точности соответствующее оригиналу. При сжатии с потерями, чтобы достичь большего коэффициента сжатия, часть информации безвозвратно теряется.

При формировании изображения JPEG пользователь может устанавливать показатель качества, величина которого определяет уровень сжатия и соответственно потери информации. Формат JPEG не рекомендуется к использованию в случаях, когда даже минимальные потери информации недопустимы.

Форматы файлов ДДЗ. ДДЗ получают не в одном, а в нескольких, как правило, четырех и более спектральных диапазонах, поэтому для их хранения и обработки используются специальные форматы растровой графики: BIP (Band Interleaved by Pixel); BIL (Band Interleaved by Line); BSQ (Band SeQuential) [80].

Формат BIP является одним из первых форматов ДДЗ. В нем значения яркости пикселей каждого канала записываются последовательно для первого пикселя, второго, третьего и т. д. Таким образом, в одном блоке данных оказываются значения, соответствующие пикселям с одинаковым номером из разных спектральных каналов, что затрудняет отображение отдельного канала, но ускоряет операции попиксельной обработки многозональных снимков.

В формате BIL отдельным блоком данных является одна строка изображения. Информация о яркости пикселей записывается построчно, с чередованием по спектральным каналам. Таким образом, в записи последовательно располагаются строки изображения, соответствующие разным каналам, но имеющие один и тот же номер: 1-я строка 1-го канала, 1-я строка 2-го канала, ..., 1-я строка k -го канала; 2-я строка 1-го канала, 2-я строка 2-го канала, ..., 2-я строка k -го канала и т. д. Такая запись удобна, когда выполняется анализ одновременно всех каналов изображения.

В формате BSQ данные каждого спектрального канала записываются в отдельные блоки или файлы, т. е. за единицу хранения данных принят спектральный канал (диапазон). Этот формат широко применяется на практике, поскольку способ размещения данных ближе всего отвечает задачам их просмотра и анализа. Его недостатки проявляются, если необходимо проанализировать не всю, а лишь небольшую часть снимка.

Выбор оптимального формата зависит от решаемых задач. Если анализируется вся сцена во всех спектральных диапазонах съемки, удобнее использовать форматы BSQ и BIL, если небольшой участок – формат BIP.

Файлы изображений дополняются заголовочными или информационными файлами, содержащими описание файла данных (формат, число строк и столбцов, разрешение и т. д.), статистические показатели распределений яркостей (минимальное, максимальное и среднее значения, дисперсия и т. д.), данные о картографической проекции.

7.2. Предварительная обработка цифровых снимков

7.2.1. Основные этапы обработки снимков

После того как данные в исходном формате поступают на наземную станцию, выполняется их обработка, в результате которой устраняются систематические ошибки и геометрические искажения, а также искажения, связанные с влиянием атмосферы. Затем данные экспортируются в один из стандартных форматов хранения растровых данных, записываются на носитель информации и хранятся в архивах, организованных, как правило, на наземных станциях приема.

В целом обработка цифровых данных ДЗ Земли состоит из нескольких этапов: статистический анализ, коррекция и восстановление снимков; улучшение изображений и преобразования снимков; классификация данных; тематическая обработка и интеграция в ГИС [18, 19, 31, 35, 37]. Некоторые авторы коррекцию, восстановление и улучшение изображения снимков объединяют в один этап, называемый предварительной обработкой ДДЗ.

Статистический анализ используется для быстрой оценки качества ДДЗ. Для каждой спектральной зоны рассчитывают минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение и дисперсию. Зависимость между данными в различных спектральных диапазонах определяют с помощью ковариационной и корреляционной матриц. Для наглядного представления данных служат гistogramмы и диаграммы рассеяния.

Коррекция применяется к исходным данным для устранения различных искажений, при сильных искажениях требуется восстановление снимков. К коррекции относятся такие операции, как устранение геометрических искажений, связанных с сенсором, внесение поправок на форму земной поверхности, трансформирование снимка к определенной проекции, радиометрическая калибровка и устранение шума.

Улучшение визуального восприятия снимков служит для облегчения их дешифрирования и анализа. Как правило, для улучшения снимков используют методы, увеличивающие видимые различия между объектами. Например, для подчеркивания тоновых различий используют методы увеличения контрастности, а для подавления определенных пространственных структур – пространственную фильтрацию.

Преобразование снимков в отличие от операции улучшения выполняется на основе нескольких спектральных диапазонов. Новые изображения получают путем сложения, вычитания, умножения или деления спектральных яркостей из разных диапазонов так, чтобы выделить или подчеркнуть определенные характеристики изображения. Еще одной задачей преобразования является устранение избыточности данных, которая решается методом главных компонент.

Классификация данных заключается в использовании автоматизированных методов идентификации объектов, когда на основании определенных статистических критериев все пиксели цифрового изображения группируются в отдельные классы пространственных объектов. Если классифицирующим признаком служит спектральная яркость, процесс классификации называют распознаванием спектральных образов, если геометрическая форма, размеры и структура изображения – распознаванием пространственных образов.

Результаты классификации можно использовать для создания тематических карт и статистических отчетов для территорий различного типа.

Объединение данных и их интеграция в ГИС выполняется геокодированием – привязкой снимка к географической системе координат. Это позволяет объединять данные, полученные в разное время с одного и того же спутника, или данные, полученные разными системами дистанционного зондирования, а также существующие векторные картографические данные. Для объединения данных ДЗ с данными из других источников используют ГИС.

7.2.2. Коррекция и восстановление снимков

Данные космической съемки в том виде, в котором они поступают на приемную станцию, непригодны для использования потребителями. Это обусловлено различными причинами: дефектами и износом съемочного оборудования, неровностью земной поверхности, помехами при приеме радиосигнала, шумами, состоянием атмосферы и др., поэтому после приема ДДЗ подвергаются радиометрической, геометрической и атмосферной коррекции, восстановлению пропущенных пикселей и строк.

По степени сложности различаются следующие уровни обработки КС, предоставляемых конечным пользователям [80]:

1А – радиометрическая коррекция искажений, вызванных разницей в чувствительности отдельных датчиков;

1В – радиометрическая коррекция на уровне обработки 1А и геометрическая коррекция систематических искажений сенсора, включая панорамные искажения, искажения, вызванные вращением и кривизной Земли, колебанием высоты орбиты спутника;

2А – коррекция изображения на уровне 1В и коррекция в соответствии с заданной геометрической проекцией без использования наземных контрольных точек. Для геометрической коррекции используется глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР, DEM) с шагом на местности 1 км. Используемая геометрическая коррекция устраняет систематические искажения сенсора и проектирует изображение в стандартную проекцию (UTM WGS-84) с использованием известных параметров (спутниковые эфемеридные данные, пространственное положение и т. д.);

2В – коррекция изображения на уровне 1В и коррекция в соответствии с заданной геометрической проекцией с использованием контрольных наземных точек;

3 – коррекция изображения на уровне 2В плюс коррекция с использованием ЦМР местности (ортотрансформирование);

S – коррекция изображения с использованием контрольного изображения.

Как правило, конечными потребителями наиболее востребованы снимки с уровнем обработки 2А.

7.2.2.1. Радиометрическая коррекция данных дистанционного зондирования. Сенсоры съемочной камеры тщательно проверяются и калибруются перед запуском спутника, а информация со спутника в течение некоторого времени после его запуска (до нескольких месяцев) проходит проверку, поэтому она имеет высокую точность. Однако с течением времени чувствительность сенсоров снижается, под воздействием неблагоприятных факторов космического пространства ухудшаются свойства оптической системы, поэтому данные необходимо подвергать радиометрической коррекции [31]. Основными причинами появления радиометрических искажений являются: неоднородность отклика детекторов и их различных элементов; неисправность элементов детектора; потеря данных при их передаче, архивировании или извлечении из архива; узкий динамический диапазон; непостоянство параметров. Такие искажения проявляются в различной яркости и контрастности изображений, появлении сбойных пикселей, выпадении отдельных строк, возникновении полос разной яркости и т. д.

Радиометрическая коррекция выполняется, как правило, на станции приема и позволяет исправить искажения значений яркости пикселей изображения, вызванные сенсором и средой прохождения излучения (атмосферой). Она выполняется в основном двумя методами: с использованием известных параметров и настроек сенсора или статистически. В первом случае отклики всех элементов сенсора нормализуются с помощью специальной таблицы соответствия (LUT, Look-Up-Table), при построении которой опорным значением служит наименьшая интенсивность сигнала на снимке. Это же значение можно использовать и для обратного

преобразования нормализованных данных в исходные абсолютные единицы.

Во втором случае улучшение выполняется путем выявления дефекта и его характеристик непосредственно из подлежащего улучшению изображения. Для каждого канала мультиспектрального изображения радиометрическая коррекция выполняется отдельно. Качество улучшения в первом случае выше, чем при статистическом методе, так как при этом учитываются особенности сенсора [35]. Пропуски в строках снимка устраняются путем усреднения значений соседних пикселей в той же строке [85].

7.2.2.2. Геометрическая коррекция. Снимки, полученные кадровыми или сканирующими камерами, содержат геометрические искажения, связанные с дисторсией объектива, кривизной поверхности Земли, углами наклона оптической оси камеры, движением Земли и спутника, ошибками калибровки камеры и др. Это вызывает ошибки в определении по снимкам местоположения объектов, расстояний и направлений (рис. 7.9).

Геометрическая коррекция используется для устранения геометрических искажений, существующих между изображениями (чтобы облегчить их совместный пространственный анализ) или изображением и картой (чтобы оно точно отражало геометрические особенности поверхности Земли).

Проведение геометрической коррекции изображения требуется в случаях: необходимости приведения КС к общей картографической проекции и пространственному разрешению; идентификации обучающих образцов в координатах требуемой картографической проекции до выполнения классификации; совместного использования изображений и векторных данных; точного измерения

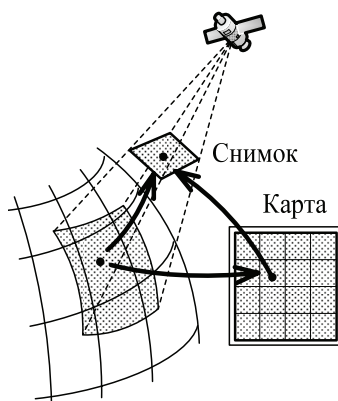


Рис. 7.9. Геометрическая коррекция изображения

расстояний, направлений и площадей; составления мозаики из множества изображений; построения ортопланов [35].

Суть геометрической коррекции состоит в том, что координаты всех пикселей снимка и их значения трансформируются из прямоугольной системы координат, определяющей положение пикселя номером строки и столбца, в географическую (широта, долгота). В результате трансформирования формируется новый растр, имеющий свойства карты (плана). Для выполнения геометрической коррекции в зависимости от требуемой точности используются элементы внешнего ориентирования снимка или опорные точки. Геометрическую коррекцию часто называют геокодированием. Процедура геокодирования заключается в построении модели, устанавливающей связь между координатами каждой точки изображения и координатами соответствующей точки на местности.

Наиболее часто для выполнения трансформирования снимков применяются методы аффинных, проективных и полиномиальных преобразований.

Метод аффинных преобразований. Метод используется для выполнения операций параллельного переноса, изменения масштаба, поворота, зеркального отражения или их комбинаций (рис. 7.10), а также для проектирования исходных изображений в картографическую проекцию и преобразования картографических проекций.

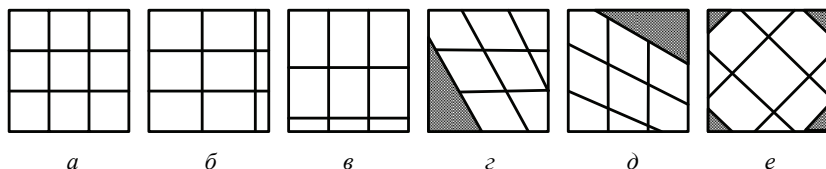


Рис. 7.10. Аффинные преобразования:

a – исходное изображение; *б*, *в* – масштабирование; *г*, *д* – наклон; *е* – вращение

Аффинные преобразования выполняют с помощью полиномов первой степени:

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1x + a_2y, \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y, \end{cases} \quad (7.5)$$

где x', y' – координаты точки после преобразования; $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты; x, y – координаты точки в исходной системе координат.

Согласно системе уравнений (7.5), метод аффинных преобразований требует минимум трех опорных точек, не лежащих на одной прямой линии.

Метод аффинных преобразований также показывает удовлетворительные результаты при геометрической коррекции плановых снимков (главная оптическая ось близка к линии надира) небольшого участка равнинной местности (поверхность приближается к плоскости и смещения на рельеф незначительные или отсутствуют).

Метод проективных преобразований. Метод проективных преобразований основан на перспективном проецировании: связка проецирующих лучей исходит из одной точки – центра проекции (рис. 7.11).

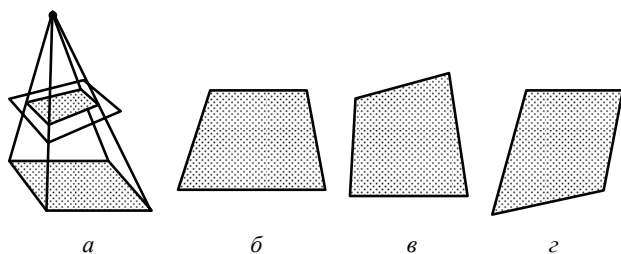


Рис. 7.11. Схема (а) и результаты (б, в, з) трансформирования методом проективных преобразований

Проективные преобразования задаются системой уравнений (7.6):

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{a_0 + a_1x + a_2y}{c_0 + c_1x + c_2y}, \\ y' &= \frac{b_0 + b_1x + b_2y}{c_0 + c_1x + c_2y}. \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

Метод проективных преобразований используется для геометрической коррекции наклонных снимков небольших участков местности, сделанных кадровой камерой. Так как снимок, полученный

кадровой камерой, является перспективой (центральной проекцией) местности, метод используется для преобразования наклонных снимков в горизонтальные для упрощения дальнейших фотограмметрических преобразований и показывает хорошие результаты.

Метод проективных преобразований плохо применим для аэро- и космических снимков, полученных сканирующими системами.

Метод полиномиальных преобразований. Метод полиномиальных преобразований позволяет исправить не только линейные, но и нелинейные геометрические искажения (рис. 7.12), поэтому он эффективно используется для преобразования географических координат в прямоугольные, привязки отсканированных деформированных карт, трансформирования изображений больших территорий, так как позволяет учитывать искажения, возникающие из-за кривизны земной поверхности, дисторсии объектива и пр.

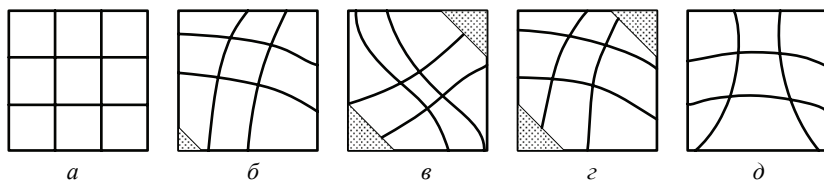


Рис. 7.12. Геометрическая коррекция методом полиномиальных преобразований:
а – исходное изображение; б–д – возможные результаты трансформирования

Как правило, применяются полиномы 2-го и 3-го порядков. Например, полиномиальные уравнения 2-й степени для выполнения квадратичного преобразования имеют вид

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2, \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2. \end{cases} \quad (7.7)$$

Число коэффициентов полиномов k , используемых для пересчета двух координат, связано со степенью полиномов соотношением $k = (n + 1)(n + 2)$, где n – степень полинома.

Основным недостатком полиномиальных преобразований, особенно старших порядков, является непредсказуемое искривление

линий, резко усиливающееся по мере удаления от опорных точек, по которым выполняется трансформирование.

При полиномиальном трансформировании изображений для вычисления значений коэффициентов используют опорные точки (ОТ), т. е. пары соответственных точек с известными координатами (на снимке и на местности), которые могут быть заданы по двум изображениям: эталонному, имеющему геопривязку, и трансформируемому. Геокоординаты опорных точек трансформирования можно также определить путем их измерения на местности (например, с использованием GPS-приемника).

Минимальное число опорных точек определяется по соотношению $N = k / 2 = (n + 1)(n + 2) / 2$ (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Необходимое и рекомендуемое количество пар опорных точек

Полиномиальное преобразование	Количество пар опорных точек	
	минимальное	рекомендуемое
2-й степени	6	12
3-й степени	10	20

Опорные точки выбираются в местах, которые можно четко опознать на местности, картах, аэро- и космических снимках (на перекрестках дорог, квартальных просек, пересечении мелиоративных канав, в устьях рек, ручьев и т. д.), равномерно по всей площади изображения, включая граничные области, что снижает вероятность грубых ошибок трансформирования.

Ортокоррекция. Для коррекции перспективных искажений, вызванных рельефом местности, применяют операцию, называемую ортотрансформированием – преобразованием изображения из центральной проекции в ортогональную. В основу ортотрансформирования положены методы цифровой фотограмметрии, базирующиеся на строгих уравнениях взаимосвязей между пространственными координатами снимка и местности. Созданное в результате ортотрансформирования изображение имеет подобную карте геометрию.

При проведении ортотрансформирования требуется информация о положении и ориентации камеры в момент съемки (т. е. элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка), а также

цифровая модель рельефа, которая может быть получена в виде: растровых файлов в форматах DTM, DEM и др., содержащих информацию об аппликатах; векторных моделей в виде изолиний (горизонталей) или структурных линий; векторной модели TIN – триангуляционной нерегулярной сети (рис. 7.13); векторной точечной модели, полученной методами автоматической корреляции изображений снимков или лазерной локации. При ортотрансформировании для каждого пикселя по ЦМР определяются отметки (z -координаты), в соответствии с которыми пересчитываются плановые координаты пикселей.

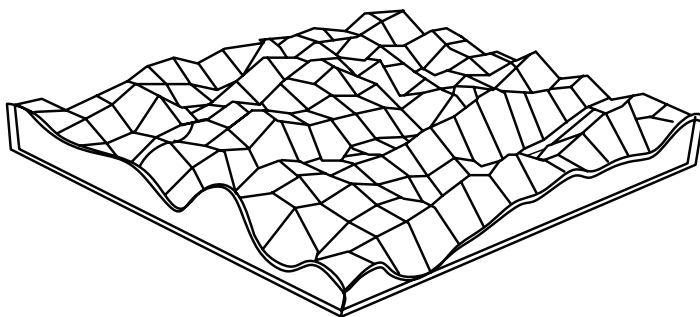


Рис. 7.13. Векторная цифровая модель рельефа TIN

Алгоритмы, построенные на фотограмметрических методах и используемые для решения задач триангуляции и ортотрансформирования с учетом элементов внутреннего и внешнего ориентирования, позволяют достичь субтрипиксельной геометрической точности.

Передискретизация изображений. После выполнения операций трансформирования снимков производится передискретизация изображения, так как местоположение пикселей изменяется и необходимо повторно вычислить значения яркостей для каждого пикселя в соответствии с его новыми координатами (рис. 7.14).

Для этого создается «чистое» изображение необходимого размера, координаты пикселей которого приведены в соответствие с координатами исходного изображения (выполнено совмещение), а затем определяется значение яркости каждого пикселя трансформируемого изображения. Пиксель результирующего изображения

может быть больше или меньше исходного, поэтому вычисление значений яркостей производится в соответствии с определенным алгоритмом. Наиболее распространенными алгоритмами передискретизации являются методы ближайшего соседа, билинейной и кубической интерполяции и др. [35, 80].

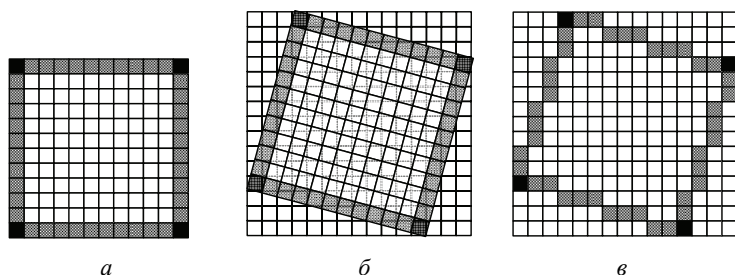


Рис. 7.14. Передискретизация изображения:
а – исходное изображение; *б* – совмещение изображений;
в – конечное изображение

При использовании метода ближайшего соседа значение яркости $B'(x', y')$ преобразованного пикселя принимается равным значению яркости $B(x', y')$ пикселя исходного изображения, центр которого находится на наименьшем расстоянии от координат исходного пикселя. Этот метод наиболее пригоден для предварительной обработки изображений, используемых в дальнейшем в классификации, так как значения пикселей при преобразовании не модифицируются. Также этот метод используется для преобразования мультиспектральных изображений, поскольку он не приводит к нарушению межканальных связей в мультиспектральном изображении. К недостаткам метода можно отнести появление эффекта ступенчатости на преобразованном изображении.

При билинейной интерполяции для вычисления яркости пикселя конечного изображения $B'(x', y')$ используются 4 соседних пикселя исходного. Билинейная интерполяция позволяет получать более сглаженное конечное изображение без эффекта ступенчатости, но приводит к нарушению яркостных соответствий между отдельными каналами, так как значения яркостей пикселей исходного изображения меняются в процессе обработки.

Метод кубической свертки наиболее сложен, потому что для расчета значения яркости пикселя $B'(x', y')$ используются значения 16 ближайших пикселей. У обработанного изображения повышается контрастность, однако, как и в случае билинейной интерполяции, значения яркостей меняются в процессе обработки, что ведет к нарушению межканальных связей в мультиспектральном изображении.

С учетом того, что при трансформировании цифровых изображений исходные значения яркости пикселей преобразуются в некоторые производные значения, которые могут искажать спектральные характеристики земной поверхности, рекомендуется проводить классификацию по исходным снимкам, а трансформировать изображение, созданное в результате классификации.

7.2.2.3. Атмосферная коррекция. Прежде чем солнечное излучение будет зарегистрировано установленными на спутнике датчиками, оно должно дважды пройти через атмосферу Земли, поэтому ДЗ Земли включают не только информацию о спектральных яркостях объектов, но и о состоянии атмосферы. Устранение или минимизация составляющей влияния атмосферы в ДДЗ является важным шагом предварительной обработки.

Для устранения влияния атмосферы необходимо знать ее состав, но поскольку прямое измерение состава не всегда возможно, разрабатываются специальные методы и корректирующие модели, требующие различных входных параметров и имеющие различную точность.

Например, модели, заложенные в модуле FLAASH (Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), разработанном корпорацией Spectral Sciences в сотрудничестве с Американской научно-исследовательской лабораторией воздушных сил (AFRL) и Центром прикладных технологий спектральной информации (SITAC) и включенном в программное обеспечение ENVI, обеспечивают атмосферную коррекцию изображений, полученных мультиспектральным или гиперспектральным датчиками в видимом и ближнем ИК диапазонах. Модуль MODTRAN (MODerate resolution Atmospheric Radiance and TRANsmittance model) используется для устранения влияния различных атмосферных явлений (водяного пара, кислорода,

углекислого газа, метана, озона, рассеивания молекулами аэрозолей и частицами пыли). В MODTRAN реализовано несколько моделей состояния атмосферы (лето в средних широтах, зима в средних широтах) и состава аэрозолей (для сельской местности, города, морских территорий), по которым рассчитывается уникальное решение для каждого снимка [80].

7.2.3. Улучшение цифровых изображений

Улучшение изображений, а значит и их дешифровочных качеств, производится путем повышения визуальных различий между отдельными объектами на снимке (детализации, яркости, контраста или цветового контраста). Необходимость улучшения визуальных различий может возникнуть при низком пространственном разрешении, малых или больших значениях варьирования спектральной яркости, обусловленных малым диапазоном чувствительности сенсора или, наоборот, большой разнородностью объектов съемки (лесной покров, пустыня, снежный покров, водная поверхность и т. д.), когда оптимальный диапазон яркости и контрастности для всех объектов установить невозможно.

Для анализа и визуальной оценки распределения спектральных яркостей используются основные статистические показатели и гистограмма распределения, по оси x которой отложены значения яркости, а по оси y – частота встречаемости. Гистограмма распределения значений яркостей необработанного изображения занимает, как правило, только небольшую часть возможного диапазона, поэтому изображение выглядит однотонными и практически одноцветным. Преобразование формы и размаха кривой распределения спектральных яркостей (гистограммы) позволяет улучшить визуальное восприятие снимка.

Улучшения дешифровочных свойств снимков производится различными методами, которые можно разделить на несколько категорий:

- методы повышения пространственного разрешения;
- методы повышения контраста;
- методы пространственных преобразований;
- методы частотных преобразований;
- методы спектральных преобразований.

7.2.3.1. Методы повышения пространственного разрешения.

Улучшение пространственного разрешения мультиспектральных снимков позволяет усилить их дешифровочные качества за счет повышения уровня детализации изображения, появлению объектов, дешифрирование которых на снимках более низкого разрешения было затруднено или невозможно. Пространственное и спектральное разрешения связаны между собой. Панхроматическое изображение охватывает широкую область спектра, в то время как область спектра одного канала мультиспектрального изображения достаточно узкая, поэтому для получения одинакового количества энергии отраженного излучения размер панхроматического сенсора может быть меньше, чем размер мультиспектрального сенсора.

Таким образом, при постоянстве других факторов более узкий спектральный диапазон (большее спектральное разрешение) требует большего размера регистрирующего элемента сенсора, что приводит к снижению пространственного разрешения. И наоборот: расширение спектрального диапазона позволяет увеличить пространственное разрешение. Именно поэтому большинство современных спутниковых и авиационных съемочных систем оснащены панхроматическими камерами высокого разрешения и мультиспектральными камерами более низкого пространственного разрешения [35].

Хотя мультиспектральные снимки имеют более низкое разрешение, на их основе можно получать синтезированные цветные изображения, обладающие хорошими дешифровочными качествами, поэтому были разработаны методы улучшения их пространственного разрешения, из которых наиболее часто используются методы взвешенного усреднения, RGB–HSB-преобразований, главных компонент (PCA – Principal Component Analysis) и вейвлет-преобразований.

Метод взвешенного усреднения является одним из самых простых методов и представляет собой попиксельное наложение изображений с учетом весовых коэффициентов. Данный процесс описывается формулой

$$B'(x, y) = w_1 B_1(x, y) + w_2 B_2(x, y) + \dots + w_k B_k(x, y), \quad (7.8)$$

где $B'(x, y)$ – пиксель результирующего изображения; w_k – весовой коэффициент, определяющий долю участия канала исходного

изображения в результирующем; $B_k(x, y)$ – пиксели каналов исходного изображения.

Метод преобразования RGB–HSB переводит многоспектральное изображение из цветовой модели RGB в цветовую модель HSB. При этом создаются три отдельных канала, соответствующих интенсивности, насыщенности и цветовому тону. Канал интенсивности подобен панхроматическому изображению, поэтому для улучшения пространственного разрешения этот канал заменяется панхроматическим изображением с более высоким пространственным разрешением. Затем следует выполнить увеличение разрешения мультиспектрального (MS) канала до разрешения панхроматического (Pan) канала и обратное преобразование HSB–RGB панхроматического изображения совместно с каналами насыщенности и цветового тона.

Метод главных компонент предполагает, что первая главная компонента эквивалентна панхроматическому изображению, а вся спектральная информация содержится в остальных главных компонентах. Первая главная компонента удаляется и определяется диапазон ее значений (минимум-максимум). Затем панхроматическое изображение с высоким пространственным разрешением преобразуется так, чтобы форма его гистограммы осталась неизменной, а значения находились в том же диапазоне, что и у первой главной компоненты. Полученным изображением заменяют первую главную компоненту, и таким образом формируется мультиспектральное изображение с улучшенным пространственным разрешением (см. рис. XXVI).

Метод вейвлет-преобразования предполагает разложение панхроматического изображения с высоким пространственным разрешением в ряд изображений с более низким разрешением с соответствующими вейвлет-коэффициентами для каждого уровня. Затем отдельные каналы многоспектрального изображения заменяют панхроматическое изображение низкого пространственного разрешения, равного пространственному разрешению исходного многоспектрального изображения. Детали высокого пространственного разрешения вводятся в каждый спектральный канал посредством выполнения обратного вейвлет-преобразования.

Любой из перечисленных методов имеет свои недостатки, связанные с искажением цвета, поэтому в каждом случае

следует анализировать результаты, полученные различными методами, выбирая наиболее пригодный для решения конкретной задачи.

7.2.3.2. Методы повышения контраста. При использовании 8-битового формата записи данных весь диапазон значений яркости представлен 256 оттенками серого цвета от 0 до 255, при этом 0 соответствует черному цвету, а 255 – белому. Очевидно, что если гистограмма исходного снимка занимает только часть указанного диапазона, качество изображения будет не очень высоким. Основу всех методов увеличения контрастности составляет расширение диапазона гистограммы распределения или ее части так, чтобы он охватывал весь диапазон радиометрического разрешения. Эта процедура выполняется линейными, кусочно-линейными и нелинейными методами.

Линейные методы увеличения контраста. Одним из простейших методов повышения контрастности является линейное растяжение всей гистограммы, которое заключается в том, что левый и правый края кривой распределения сдвигают к соответствующим границам полного диапазона, т. е. левому краю гистограммы присваивается значение 0, а правому – 255 (рис. 7.15).

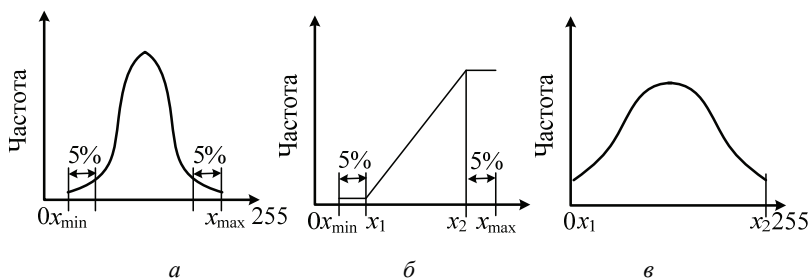


Рис. 7.15. Процентильное растяжение гистограммы:

а – исходная гистограмма; *б* – метод растяжения;

в – конечная гистограмма

Промежуточные значения яркостей каждого пикселя пересчитывают в соответствии с линейной формулой (7.9):

$$B' = \frac{R (B_i - B_{\min})}{B_{\max} - B_{\min}}. \quad (7.9)$$

где B' – вычисленное значение яркости; R – максимальное значение радиометрического разрешения (шкала яркостей 0–255 для 8-битового формата); B_i – исходное значение яркости пикселя; $B_{\min}$ – минимальное значение яркости; $B_{\max}$ – максимальное значение яркости пикселя.

Иногда размах кривой гистограммы распределения охватывает весь возможный диапазон, но большинство значений сосредоточено в центре и лишь незначительная часть по краям. В этом случае исключают 1, 2 или 5% мало представленных данных, а оставшуюся часть гистограммы растягивают. Оба метода применяются, если кривая распределения имеет один максимум, а ее форма близка к кривой Гаусса.

Кусочно-линейное повышение контраста позволяет улучшить определенную часть данных путем разделения графика преобразования на три части, соответствующие низкому, среднему и высокому изменению контраста. Для этого создают ряд прямолинейных сегментов, которые моделируют кривую преобразования. Таким способом можно увеличить контраст или яркость любого участка гистограммы для каждой из зон спектра. Эта процедура применяется для улучшения изображения затененных или других областей низкого контраста на снимке. Функция кусочно-линейного повышения контраста строится таким образом, чтобы в каждой зоне снимка значения пикселей изменялись от 0 до 255 [42, 85].

Нелинейные методы увеличения контраста. При наличии нескольких максимумов к различным частям гистограммы следует применять отдельные процедуры линейного растяжения.

Одним из распространенных и достаточно простых является метод эквализации – выравнивания гистограммы, основная идея которого состоит в том, чтобы перераспределить значения яркости так, чтобы каждому из них соответствовало примерно равное количество пикселей. В качестве функции преобразования используется кумюлята распределения яркостей изображения, а после преобразования количество пикселей для всех значений яркостей будет одинаковым.

Применение этого метода приводит к увеличению контрастности в зонах максимальных частот кривой распределения, на модах (или «пиках») гистограммы для наиболее часто встречающихся значений, и к ее уменьшению на участках изображения, соответствующих минимумам. При снижении глубины цвета изображения эквализация позволяет получить визуальный эффект грубой классификации.

Другим известным методом является гауссово растяжение (см. рис. XXVIII), суть которого заключается в преобразовании формы кривой распределения яркостей исходной гистограммы к кривой нормального распределения (Гаусса) в области шириной ± 3 стандартных отклонения. Как правило, такое преобразование приводит к увеличению контрастности частей изображения, яркость которых соответствует минимумам и хвостам гистограммы. Кроме кривой нормального распределения используются также различные логарифмические и экспоненциальные кривые.

7.2.3.3. Методы пространственных преобразований. Пространственные методы позволяют подчеркивать или подавлять особенности изображения на основании информации об его текстуре (структуре). Текстура с резкой сменой тонов на малой площади соответствует высокой пространственной частоте, плавные изменения тона – низкой. Пространственная частота определяет величину изменения значений яркости данных на единицу расстояния.

Процедура пространственных преобразований состоит в следующем. По изображению, например, слева направо и сверху вниз перемещается окно размером в несколько пикселей (3×3 , 5×5 , 7×7 и т. д.), и в каждом положении окна рассчитывается новое значение яркости центрального пикселя. Затем окно сдвигается на один пиксель вдоль строки изображения до достижения ее конца, после чего оно смещается на одну строку вниз. Вычисление нового значения яркости выполняется по определенному алгоритму на основе яркостей соседних пикселей. В зависимости от принятого алгоритма происходит усиление или подавление текстур разной частоты.

Такая операция называется сверткой (convolution), скользящее окно (матрица) – ядром свертки (kernel of convolution). Изменение пространственных и спектральных (пространственно-частотных)

характеристик изображений объектов называют фильтрацией, а матричную функцию, применяемую в скользящем окне – фильтром [35].

В различных пакетах для обработки растровой графики используют следующие фильтры: среднеарифметический (Mean); медианный (Median); адаптивный (Adaptive Box); модальный (Mode); высокочастотный (High Pass); оператор Лапласа (Laplacian); оператор Собеля (Sobell Edge Detector); фильтр, определяемый пользователем (User Defined) и др.

Пространственные фильтры могут быть разделены на несколько категорий: фильтры низкой частоты (ФНЧ) – подчеркивают детали низкой частоты, чтобы сгладить шум и уменьшить ступенчатость изображения (сглаживающие, усредняющие фильтры); фильтры высокой частоты (ФВЧ) – подчеркивают детали высокой частоты, выделяют текстуру без воздействия на элементы низкой частоты (фильтры резкости).

Фильтры низкой частоты (сглаживающие фильтры) применяются для удаления мелких деталей изображения и подавления шумов. Среднеарифметический фильтр – самый простой линейный сглаживающий низкочастотный фильтр. Значения центрального пикселя заменяются средним арифметическим всех значений в пределах окна. Замена исходных значений изображения на средние значения по маске фильтра приводит к уменьшению резких переходов уровней яркости, поэтому негативной стороной его применения является расфокусировка границ объектов. Главное направление использования ФНЧ – подавление деталей на изображении, размеры которых малы по сравнению с маской фильтра.

Таким образом, низкочастотные фильтры дают эффект устранения шумов, но приводят к размытости изображения, резкие края сглаживаются, контрастность между темными и светлыми участками уменьшается.

Фильтры, основанные на порядковых статистиках (медианный, адаптивный, модальный и др.), относят к нелинейным сглаживающим фильтрам. При этом матрица фильтра не создается. Значение пикселя в центре окна заменяется числом, определяемым путем анализа распределения значений в окне. Использование указанных фильтров приводит к подавлению шумов при незначительном сглаживании

границ объектов. Наиболее часто применяется медианный фильтр, в котором значение центрального пикселя заменяется на значение медианы распределения яркостей всех пикселей в окне. Основная функция медианного фильтра заключается в замене отличающегося от фона значения на другое, более близкое к фону, таким образом изолированные темные или светлые пиксели размером в половину площади маски фильтра будут удалены.

При использовании адаптивного фильтра определяется стандартное отклонение значений яркости от значения в центральном пикселе. Яркость центрального пикселя изменяется на нуль, если стандартное отклонение меньше заданного пользователем порога, и средним из значений остальных пикселей, если стандартное отклонение выше; таким образом удаляются однотонные участки изображения.

В результате использования модального фильтра значение центрального пикселя заменяется значением яркости, наиболее часто встречающимся в окне.

Фильтры высокой частоты (повышения резкости) применяют, чтобы удалить медленно меняющиеся значения и подчеркнуть высокочастотные локальные изменения, выделить области резких переходов на фоне постепенных изменений. ФВЧ увеличивают резкость изображений, недостатком является увеличение шумов. При использовании ФВЧ увеличивается контрастность между отдельными пикселями и фоном. Для подчеркивания граничных перепадов увеличивают значение в центре маски.

Высокочастотные фильтры подчеркивают или выделяют контуры, не исключая значения других пикселей объектов. При применении такого фильтра к набору пикселей с относительно низким значением (в окружении более высоких) оно становится еще ниже; если высокое значение находится в окружении низких значений, то оно становится еще выше. Пространственная частота при этом повышается в обоих случаях.

ФВЧ широко используются для увеличения четкости границ объектов. Алгоритмы выделения границ рассматривают изменение яркости как некоторую непрерывную функцию и используют операции с первой и второй производными. Если функция в некоторой точке имеет скачок, то первая производная в этой точке равна мак-

симуму по абсолютной величине. Если функция имеет экстремум, то первая производная равна нулю, а вторая равна максимуму. Для дискретных снимков значение производных вдоль строк и столбцов – это разности или разности разностей изменения яркости двух соседних пикселей.

Фильтры, отклик которых не зависит от направления изображений границ, называются изотропными. Изотропные фильтры являются инвариантными к повороту, т. е. поворот изображения и последующее применение фильтра дает тот же результат, что и применение фильтра к первоначальному изображению с последующим поворотом. Анизотропные фильтры определяют контур только в определенных направлениях. Примерами таких фильтров служат фильтры Робертса и Собеля.

7.2.3.4. Методы частотных преобразований. Не все задачи по улучшению изображений можно решить методами пространственных преобразований, поэтому были разработаны методы преобразований в частотной области, которые часто оказываются более наглядными. Так, например, в частотной области легко удалять на изображениях периодический шум (например, полосатость), вызванный аномалиями сенсора. Для перевода изображения из пространственной области в частотную используется преобразование Фурье, а после его коррекции – обратное преобразование.

Суть преобразований состоит в том, что любая функция, периодически воспроизводящая свои значения, может быть представлена в виде суммы синусов и косинусов различных частот, умноженных на некоторые коэффициенты, т. е. ряда Фурье, и сложность поведения функции при этом не имеет значения (рис. 7.16).

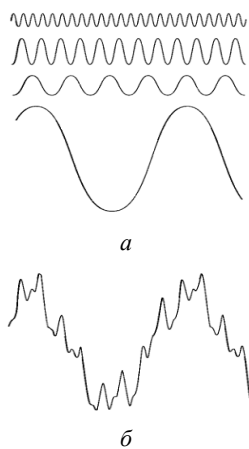


Рис. 7.16. Представление периодических функций в виде линейной комбинации гармоник:
а – 1–4 гармоники;
б – результирующая функция

Если же функция не является периодической (но площадь под ее кривой конечна), она может быть выражена в виде интеграла от синусов или косинусов, умноженных на некоторую весовую функцию. В таком случае мы имеем дело с преобразованием Фурье. Функция, заданная как рядом, так и преобразованием Фурье, может быть полностью восстановлена без потери информации при помощи процедуры обращения. Эти свойства являются основополагающими, поскольку они позволяют работать в частотной области, а затем вернуться в пространственную область без потери информации.

Ослабление низких или высоких частот в частотной области может быть выполнено при использовании следующих фильтров [35]: идеального, Баттерворта, Гаусса и др. Они охватывают диапазон передаточной функции от очень резкой (идеальный) до очень гладкой (Гаусса).

7.2.3.5. Методы спектральных преобразований. Для преобразования снимков используются данные из нескольких спектральных диапазонов, причем эти данные могут соответствовать даже различным датам проведения съемки (многовременные данные). В результате преобразования формируются новые снимки, на которых гораздо четче выделяются определенные объекты и области интереса.

К простейшим преобразованиям относятся операции попиксельного сложения, вычитания, умножения и деления [42]. Например, операция вычитания состоит в том, что из значения яркости каждого пикселя одного снимка вычитается значение яркости соответствующего пикселя другого снимка. Результирующий снимок называется разностным. Объекты, отражательная способность которых изменилась незначительно за время между двумя съемками, будут окрашены на разностном снимке в светло-серые тона, а темные и яркие области снимка будут соответствовать значительным изменениям отражательной способности.

Сложение изображений является усредняющей операцией, позволяющей снизить уровень шума на снимке. Эту операцию широко используют при пространственной фильтрации для выделения объектов определенного масштаба. Операция умножения снимков при обработке данных ДЗ применяется крайне редко. В отличие от нее

операция деления, на которой основано вычисление многих спектральных признаков, является одним из наиболее часто используемых преобразований. Эта операция позволяет подчеркивать малейшие изменения в спектральной отражательной способности различных земных покровов. Отношение величин из разных спектральных диапазонов дает важную информацию об объектах. В частности, зеленая растительность обладает большой отражательной способностью в ближней инфракрасной области спектра и хорошо поглощает излучение в красном диапазоне. В то же время отражательная способность почв и водоемов в этих диапазонах остается практически одинаковой. Таким образом, если разделить данные в ближней инфракрасной области (0,8–1,1 мкм) на данные в красном диапазоне (0,6–0,7), то на результирующем снимке растительному покрову будет соответствовать область со значением отношения существенно больше 1,0, а почвам и водоемам – область со значением отношения существенно меньшим 1,0. Результат указанной операции деления называют вегетационным индексом.

Используются различные вегетационные индексы: разностный (Difference Vegetation Index, DVI), нормализованный разностный (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), перпендикулярный (Perpendicular Vegetation Index PVI), инфракрасный (Infrared Percentage Vegetation Index, IPVI) и др.

Так, разностный вегетационный индекс (DVI) определяется по формуле

$$DVI = NIR - RED. \quad (7.10)$$

Индекс NDVI определяется как нормализованная разность между значениями в ближней инфракрасной области (NIR) и в красном диапазоне видимого спектра (VR) по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - VR}{NIR + VR}. \quad (7.11)$$

Значения индекса NDVI изменяются в диапазоне от –1 до +1. Для растительного покрова значение индекса больше единицы, для почв – близко к единице, а для водных поверхностей – меньше единицы.

Инфракрасный вегетационный индекс (IPVI) вычисляется по формуле

$$IPVI = \frac{NIR}{NIR + RED} = \frac{NDVI + 1}{2}. \quad (7.12)$$

Индекс может принимать значения от 0 до 1. Функционально IPVI и NDVI эквивалентны.

Перпендикулярный вегетационный индекс (PVI):

$$PVI = \sin \alpha \cdot NIR - \cos \alpha \cdot RED, \quad (7.13)$$

где α – угол между почвенной линией и осью NIR. PVI чувствителен к влиянию атмосферы, поэтому для сравнение значений PVI для различных снимков необходимо проводить атмосферную коррекцию данных.

Преимущество операции деления состоит также в том, что результирующий набор данных содержит относительные, а не абсолютные значения яркости. Благодаря этому анализ данных в гораздо меньшей степени зависит от побочных факторов. Так, например, абсолютная отражательная способность лесного покрова на склоне горы будет зависеть от положения Солнца, однако относительная отражательная способность, рассчитанная по двум спектральным диапазонам, будет практически постоянной.

Данные в различных спектральных диапазонах часто коррелируют между собой, так как в них содержится близкая информация. Например, снимки Landsat MSS в зеленом и красном диапазонах выглядят почти одинаково. Чтобы устранить избыточность информации и уменьшить количество анализируемых спектральных диапазонов, используется преобразование, которое основано на методе главных компонент (англ. Principal Component Analysis, PCA).

Процедура преобразования состоит в том, чтобы выделить минимальное количество спектральных диапазонов, содержащих максимальное количество спектральной информации. Например, данные семи спектральных диапазонов сенсора TM (Thematic Mapper) можно преобразовать так, что 90% всей исходной информации будет содержаться в трех первых главных компонентах. Такой набор данных существенно проще анализировать и интерпретировать.

Процедуру можно пояснить графически на примере двух спектральных зон (рис. 7.17, а). Если распределение значений яркости в каждой зоне близкое к нормальному, то оно имеет вид облака, называемого эллипсом рассеяния (в n -мерном пространстве это будет гиперэллипсоид).

Преобразование выполняется поворотом осей спектрального пространства так, чтобы новые оси стали параллельны осям эллипса рассеяния. Тогда первая главная компонента (ГК1) соответствует большей оси эллипса – направлению наибольшего разброса значений яркости (рис. 7.17, б). Точки в пределах эллипса рассеяния получают новые координаты, соответствующие новым осям. Так как в спектральном пространстве координаты точек являются значениями яркости пикселей, то в процессе преобразования определяются их новые значения, которые хранятся в создаваемом файле первой главной компоненты.

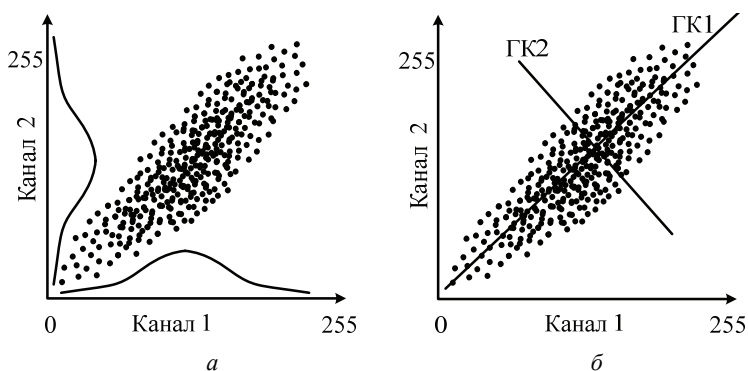


Рис. 7.17. Преобразование спектрального пространства методом главных компонент:

а – эллипс рассеяния для двух каналов 1 и 2; б – положение осей, соответствующее двум главным компонентам ГК1 и ГК2

Вторая главная компонента (ГК2) соответствует наибольшему поперечному сечению эллипса, ортогональному к первой главной компоненте, и отражает наибольшие значения вариации данных, которые еще не охвачены первой главной компонентой. При двумерном распределении ГК2 соответствует малой оси эллипса рассеяния.

Каждая последующая главная компонента является одним из поперечных сечений эллипса рассеяния (гиперэллипсоида), ортогональным к предыдущим компонентам, и характеризует снижающееся значение вариаций в данных, еще не учтенных предыдущими главными компонентами.

Хотя количество главных компонент равно количеству каналов, только первые из них отражают наибольшую долю дисперсии признака, в большинстве случаев достигающую почти 100%. Поэтому метод используется также для сжатия данных в меньшее число изображений (каналов) по сравнению с исходными.

По изображениям первых трех главных компонент часто формируют синтезированные изображения, содержащие больше информации, чем любые комбинации трех исходных спектральных зон. В зависимости от исходных значений яркости и их дисперсии в разных зонах снимка диапазоны значений главных компонент могут быть меньше максимально возможного радиометрического разрешения, поэтому для улучшения визуального восприятия изображения применяют контрастирование.

7.3. Классификация изображений

Огромным преимуществом цифровых снимков является возможность их автоматизированного дешифрирования с использованием вычислительной техники, что позволяет значительно ускорить процесс и повысить объективность результатов дешифрирования. Автоматизированная классификация основывается на том, что любой объект имеет в спектральном пространстве характерные количественные показатели, определяющие его изображение на снимке, так называемый *образ*, или *сигнатуру*. *Спектральным пространством* изображения является совокупность всех спектральных каналов, а размерность спектрального пространства определяется их количеством. Например, изображение с четырьмя каналами имеет четырехмерное спектральное пространство признаков и т. д.

Задача состоит в разделении пространства спектральных признаков на локальные области, соответствующие одному объекту или классу объектов. Процесс выделения отдельных участков спектрального пространства, соответствующих одинаковым объектам, имеющих сходные спектральные и текстурные параметры, называют *классификацией*. Преобразование изображений таким образом, чтобы одинаковые объекты (классы объектов) были выделены одним и тем же цветом, в результате чего они разделяются между

собой, можно определить их число, местоположение и размеры, называется *сегментацией*.

При проведении классификации различают спектральные и информационные классы. *Спектральный класс* – это группа пикселей, обладающих приблизительно одинаковой яркостью в некотором спектральном диапазоне. *Информационные классы* – это реальные объекты, которые необходимо распознать на снимке: различные виды растительности, водные поверхности, определенные геологические структуры, виды земель и т. д. Основная цель классификации состоит в том, чтобы сопоставить спектральные классы с информационными. Полное однозначное взаимное соответствие между спектральными и информационными классами наблюдается очень редко, чаще одному информационному классу соответствуют несколько спектральных (или наоборот), а некоторые спектральные классы могут не соответствовать никаким объектам [80].

В настоящее время можно выделить два подхода к классификации. Больше распространены *пиксель-ориентированные методы* классификации, основывающиеся на спектральных признаках отдельных пикселей изображения. *Объекто-ориентированные методы* лишь начинают развиваться. Они позволяют одновременно учитывать множество сведений об объекте: оттенки, форму, текстуру, площадь, а также информацию из других слоев классификации и векторных слоев ГИС.

Различают абсолютную и относительную классификации [35]. Основой *абсолютной классификации* являются данные о спектральных характеристиках объектов, собранные в ходе полевых исследований, по которым формируются так называемые спектральные библиотеки. Такой подход требует надежных методов атмосферной коррекции и может быть использован при классификации гиперспектральных снимков, обладающих достаточным количеством каналов для сопоставления с кривой спектральной яркости объекта. Однако пространственное разрешение гиперспектральных снимков пока невысокое, снимки высокого пространственного разрешения имеют, как правило, лишь четыре спектральных канала.

Относительная классификация построена на алгоритмах группировки отдельных пикселей изображения по сходству значений яркостей в различных спектральных каналах, т. е. близко расположенных

в пространстве спектральных признаков объектов. Для определения соответствия между группами пикселей и классами объектов поверхности Земли также необходимы данные выборочных полевых измерений. Сопоставление участков изображения реальным объектам носит вероятностный характер, поэтому для повышения ее достоверности необходимо использовать максимально возможное число признаков: большее количество спектральных каналов, разновременные снимки, текстурные показатели и т. д.

В зависимости от того, на каком этапе выполняется сопоставление спектральных и информационных классов, методы классификации делятся на две группы:

- классификация без обучения (неконтролируемая классификация);
- классификация с обучением (контролируемая классификация).

Неконтролируемая классификация требует минимальных начальных данных и проводится путем группировки пикселей со схожими значениями спектральных признаков. На первом этапе формируются спектральные классы, число которых выделяется больше, чем количество информационных классов подлежащих идентификации. Затем выполняется объединение спектральных классов (сегментов изображения) и их сопоставление с информационными (объектами). Классификация без обучения полезна, например, для создания исходного множества классов и последующей контролируемой классификации с целью их уточнения [35]. Наиболее известны методы неконтролируемой классификации К-средних и ISODATA.

Контролируемая классификация является более трудоемкой, но и более точной. Она выполняется на основе спектральных яркостей пикселей, так называемых эталонных участков, для которых было выполнено полевое дешифрирование. На первом этапе формируются обучающие выборки – эталонные фрагменты изображения, принадлежащие различным классам, затем оценивается их разделимость, в случае необходимости выполняется коррекция путем уточнения границ спектральных областей, и наконец, классификация всего изображения. В настоящее время разработано большое число методов и алгоритмов контролируемой классификации, наибольшее распространение из которых нашли следующие: алгоритм параллелепипеда, минимальных расстояний, максимума правдоподобия и др.

Полевые данные нужны для проведения как контролируемой, так и неконтролируемой классификации; чем выше требуемая точность классификации, тем больше должен быть их объем.

7.3.1. Неконтролируемая классификация

Алгоритмы неконтролируемой классификации основаны на кластерном анализе спектральных признаков, в основе которых лежит объединение пикселей в группы, называемые кластерами, в зависимости от установленного дешифровщиком порога близости их характеристик. Алгоритмы неконтролируемой классификации К-средних и ISODATA реализованы во многих программных пакетах, предназначенных для обработки растровых изображений (см. рис. XXVII).

Алгоритм **К-средних** является самым быстрым. Его суть заключается в установлении фиксированного количества кластеров и в последовательном (с каждой итерацией) перераспределении пикселей между ними по заданным критериям. Вначале выполняется анализ изображения и определение начального местоположения центров кластеров [35, 42, 80]. На каждой итерации пиксели распределяются в кластеры с самыми близкими центрами и вычисляются новые центры кластеров. Новый центр – точка, минимизирующая сумму квадратов расстояний между ней и пикселями в кластере. Процесс повторяется, пока изменения местоположения центров не станут меньше допустимого значения или не будет достигнут предел количества итераций. На этапе инициализации задаются следующие начальные параметры: количество кластеров, минимальное расстояние между центрами кластеров, максимально допустимое среднеквадратическое отклонение, максимальное количество итераций. Для получения удовлетворительных результатов целесообразно исследовать различное количество кластеров.

В алгоритме **ISODATA** (от англ. Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных) начальными данными являются количество кластеров, порог сходимости, максимальное среднеквадратическое отклонение признака, минимальное расстояние между классами, минимальное количество пикселей, максимальное количество итераций.

На каждой итерации на основе значений спектральных признаков пикселей, отнесенных к одному кластеру, вычисляются средние значения признаков для кластера, которые, в свою очередь, используются для повторного перераспределения пикселей на кластеры, после чего операция повторяется вновь. Для определения принадлежности пикселя к кластеру рассчитывается расстояние между значениями его признаков и средними значениями признаков каждого кластера. Пиксель приписывается к кластеру с самыми близкими средними значениями признаков. После итерации вычисляется процент пикселей, принадлежность которых к кластеру осталась неизменной. Когда будет достигнуто значение порога сходимости, кластеризация заканчивается; если порог сходимости достигнуть нельзя, итерации выполняются заданное на этапе инициализации количество раз.

Алгоритм кластеризации изображения ISODATA схож с алгоритмом К-средних по принципу разделений пикселей на кластеры с самыми близкими центрами и повторного вычисления центров кластеров. Различие заключается в том, что количество кластеров не фиксировано и может изменяться на любой итерации путем их удаления, объединения или разделения [35]. Кластеры с небольшим количеством пикселей удаляются, кластеры, центры которых очень близки друг к другу, объединяются, а кластеры с большим количеством пикселей разделяются на два. Разработано несколько вариантов алгоритма ISODATA, но его основные особенности остаются неизменными.

7.3.2. Контролируемая классификация

Если необходимо идентифицировать с более высокой точностью относительно небольшое количество классов, используется метод контролируемой классификации. Каждый пиксель изображения классифицируется отдельно в соответствии с некоторым решающим правилом, в зависимости от его спектральных показателей и средних показателей классов. Решающее правило – это математический алгоритм, по которому определяется принадлежность пикселя тому или иному классу. Контролируемая классификация выполняется в несколько этапов: формирование обучающих выборок (эталонов), оценка разделимости эталонов, коррекция эталонов,

классификация, постклассификационная обработка, оценка точности классификации.

Классификация может проводиться с использованием как параметрических признаков, если закон распределения признаков известен, так и непараметрических, если закон распределения не известен. Параметрические признаки основаны на статистических параметрах пикселей обучающих образцов [35]:

- количество каналов исходного изображения;
- минимальное и максимальное значения пикселей обучающего образца (обучающих образцов) в каждом канале для каждого класса;
- среднее значение пикселей обучающего образца (обучающих образцов) каждого канала для каждого класса;
- матрица ковариации для каждого класса;
- количество пикселей в обучающем образце (обучающих образцах) каждого класса.

Непараметрические признаки получают на основе анализа эталонов – выделенных на изображении участков, соответствующих информационным классам. К параметрическим относятся решающие правила минимального расстояния, расстояния Махаланобиса, максимального правдоподобия, Байеса, к непараметрическим – решающие правила параллелепипеда и пространства признаков [35].

Размерность признаков определяется количеством каналов исходного изображения. Ее можно увеличить, включив в классификацию дополнительные изображения: вегетационные индексы, индексы минералов, цифровую модель рельефа местности и т. д. Хотя изображение может содержать неограниченное число каналов, для классификации целесообразно использовать лишь те из них, которые отвечают целям классификации. Избыточные малоинформативные каналы необходимо исключить, так как они приводят к дополнительным вычислительным затратам и искажению результатов классификации.

7.3.2.1. Выбор эталона. Обучающие выборки – наборы пикселей, представляющие спектральную сигнатуру информационного класса. Это один или несколько участков на снимке, идентифицированные на основе данных, полученных в ходе полевого дешифрирования,

аэросъемки, с топокарт и планов, в результате визуального дешифрования изображения, в виде векторных слоев ГИС. Наиболее точные данные об области исследования – наземные, собранные одновременно со съемкой.

Основными требованиями, предъявляемыми к обучающим выборкам, являются репрезентативность и соответствие одному классу природных объектов. Репрезентативность характеризует, насколько полно выборка описывает спектральную сигнатуру класса, т. е. насколько точно можно оценить спектральные параметры этого класса. В спектральном пространстве репрезентативность обучающей выборки определяют: одномодальность гистограммы распределения спектральных яркостей, характеризующая близость распределения к нормальному; величина дисперсии, характеризующая однородность данных; делимость в спектральном пространстве с другими выборками.

Обучающие эталоны могут быть представлены в виде статистических показателей, например минимального, максимального и среднего значений яркости, дисперсии, среднеквадратического отклонения, вычисленных по значениям пикселей в полигоне обучающей выборки для отдельных каналов изображения. Для этого дешифровщик в пределах идентифицированных эталонных объектов создает векторный полигон (чаще многоугольник) по значениям яркости пикселей которого вычисляются параметры обучающей выборки. Предполагается, что распределение данных нормальное, а такие эталоны называются *параметрическими*.

Выборки, основанные на дискретных объектах: полигонах или прямоугольниках, выделяемых на изображении, называют *непараметрическими*, которые могут иметь распределение, отличающееся от нормального.

Качество контролируемой классификации во многом зависит от обучающей выборки, поэтому при выборе эталонных областей необходимо придерживаться следующих положений:

- в обучающей выборке для каждого информационного класса должно содержаться достаточно большое количество пикселей;
- размер области следует выбирать так, чтобы соответствующая выборка содержала точную и надежную информацию об информационном классе, вместе с тем размер области не должен быть

слишком большим, так как возрастает вероятность нежелательных вариаций;

- форма области не важна, чаще это многоугольник;
- как правило, спектральные характеристики изображения в пределах одного информационного класса изменяются незначительно, поэтому изображение эталонной области не должно находиться на границе или выходить за границы класса;

- количество эталонных областей для каждого класса должно составлять 5–10, этого бывает достаточно, чтобы учесть пространственную и спектральную изменчивость свойств объектов внутри каждого класса. Формировать несколько выборок полезно еще и потому, что некоторые из них впоследствии могут быть исключены. Лучше использовать большее число эталонных областей малого размера, чем небольшое число крупных эталонных областей;

- обучающая выборка должна содержать только однородную информацию, т. е. гистограмма должна быть одновершинной и близкой к кривой нормального распределения. Многовершинность означает, что обучающая выборка содержит разнородную информацию и ее нельзя использовать для классификации объектов.

7.3.2.2. Оценка качества эталонов. После выделения на снимке эталонных участков выполняется вычисление их статистических показателей, оценка их делимости. Если спектральные области эталонов перекрываются, будет происходить перепутывание классов, что приведет в конечном итоге к некачественной классификации. Формирование эталонов – итерационный процесс. Часто приходится неоднократно выделять и оценивать эталонные участки, объединять их полностью или частично, удалять или добавлять отдельные фрагменты изображений. Для оценки качества сформированных обучающих выборок используются методы визуального анализа и методы, основанные на анализе статистических показателей распределений спектральных яркостей. Для визуального анализа обучающих выборок используются графики распределения признаков пикселей эталонных участков в многомерном спектральном пространстве. Такая возможность реализована, например, в программном комплексе ENVI. Здесь можно не только визуально оценить пространственное

распределение, но и интерактивно «вырезать» перекрывающиеся области или области с отличающимися спектральными показателями (см. рис. XXIX).

Основным показателем качества обучающих выборок является их разделимость в спектральном пространстве признаков. Разделимость основана на оценке статистического расстояния между двумя выборками. Чаще всего это евклидово расстояние – спектральное расстояние между векторами средних значений каждой пары выборок в пространстве признаков. Если это расстояние незначительно для любой пары зон, то выборки недостаточно различимы для проведения успешной классификации.

Кроме евклидова расстояния широко применяют математические соотношения, такие как дивергенция (трансформированная дивергенция) и расстояние Джеффриса – Матусита, учитывающие еще и значения дисперсии (ковариации) в пределах выборок.

Дивергенция будет равна нулю, если распределение данных идентично, и будет равна бесконечности для распределения данных, которые совсем не перекрывают друг друга. Для классификации используют только те зоны, для которых дивергенция максимальна. Трансформированная (преобразованная) дивергенция будет равна нулю для идентичного распределения данных и равна двум для распределения данных, которые не перекрываются [80].

Расстояние Джеффриса – Матусита ($J - M$), подобно дивергенции, является мерой статистической разделимости пар классов и представляет собой удвоенную вероятность ошибки того, что пиксель, приписанный классу ω_i , фактически принадлежит классу ω_j .

Для оценки качества эталонов вычисленные значения дивергенции и расстояния $J - M$ сопоставляются с пороговыми значениями, на основе чего принимается решение о разделимости обучающих выборок. Часто при оценке обучающих выборок применяют весовые коэффициенты. Например, если известно, что классу ω_i должно быть приписано вдвое больше пикселей, чем классу ω_j , класс ω_i получит вдвое больший весовой коэффициент. Это позволяет оценить вероятность ошибки классификации. Формирование и оценка разделимости обучающих выборок выполняются несколько раз, прежде чем они будут использованы для классификации.

7.3.2.3. Решающее правило параллелепипеда. Решающее правило параллелепипеда имеет наиболее простой алгоритм, согласно которому каждый класс ограничен в спектральном пространстве признаков замкнутой областью, размерность которой равна числу зон многозонального снимка: это прямоугольник для двух зон, параллелепипед для трех и более зон. Выделение интервалов изменения яркости для класса выполняется по объектам, выбранным в качестве эталонных, путем анализа их гистограмм в двух зонах снимка. Границы параллелепипеда определяют как минимальные и максимальные значения яркости в каждой зоне в пределах эталонного объекта на снимке; среднее значение яркости в каждой зоне плюс-минус заданное число стандартных отклонений; любые определяемые пользователем границы на основании данных статистической обработки снимка и эталонов.

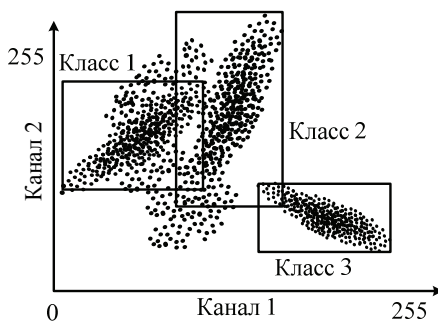


Рис. 7.18. Схема классификации методом параллелепипеда

После построения параллелепипедов пиксели, принадлежащие тому или иному классу, оказываются отграниченными сторонами параллелепипеда (рис. 7.18). В тех случаях когда пиксель попадает в область перекрытия двух и более параллелепипедов, необходимо дополнительно определить правило, по которому пиксель будет классифицирован.

Преимущество алгоритма параллелепипеда заключается в том, что он позволяет быстро разделить значения яркостей пикселей и выполняет классификацию за один проход, не требуя нормального распределения данных. Однако пиксели, находящиеся в углах параллелепипеда, имеют спектральные показатели, значительно отличающиеся от таковых у остальных пикселей и от средних значений спектральных яркостей эталонной выборки, что приводит к ошибкам классификации и является существенным недостатком алгоритма.

7.3.2.4. Алгоритмы классификации по минимальному расстоянию. Решающее правило минимального расстояния рассчитывает спектральное расстояние между вектором значений яркости пикселя и вектором средних значений каждого эталона (класса). На рис. 7.19, *а* спектральное расстояние проиллюстрировано линиями, проведенными от классифицируемого пикселя к серединам (средним значениям) трех эталонов. Пиксель приписывается к классу с ближайшим средним значением.

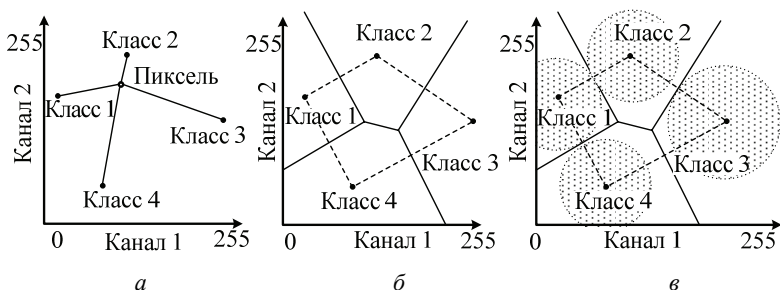


Рис. 7.19. Решающее правило минимального расстояния:

а – оценка принадлежности пикселя к классу;

б – формирование границ между классами;

в – ограничение класса пороговым уровнем

Метод классификации по минимальному расстоянию основан на евклидовой метрике и может применяться к распределениям, отличающимся от нормального. Разделяющие поверхности (границы) между классами представляют собой перпендикуляры, проведенные через середины отрезков, соединяющих средние значения отдельных классов (рис. 7.19, *б*) в пространстве признаков. В двумерном спектральном пространстве это будет линия, в трехмерном – плоскость, при большем количестве размерностей – гиперплоскость.

Таким образом, при классификации пикселей изображения решение о том, к какому классу относится пиксель, принимается на основании сравнения расстояний между значениями спектральных яркостей пикселей и средними значениями спектральных яркостей классов. Неклассифицированных пикселей при использовании алгоритма минимального расстояния нет. Все пиксели, даже те, которые не являются спектрально близкими к среднему значению какой-либо выборки, клас-

сифицируются. Но так как границы части n -мерного пространства находятся на различном расстоянии от средних значений спектральных яркостей класса, часть пикселей, расстояние до спектральных яркостей которых превышает минимальное расстояние от середины класса до границы, целесообразно считать неклассифицированными. С этой целью вводится пороговое значение, и пиксель приписывается к классу с самым близким центром только в том случае, если расстояние до него не превышает заданный пороговый уровень, определяющий некоторое сферическое пространство вокруг среднего (рис. 7.19, в).

Использование решающего правила минимального расстояния наиболее целесообразно, если значения признаков пикселей каждого класса имеют близкие показатели дисперсии. В противном случае следует применять другие алгоритмы классификации.

Кроме евклидова расстояния в качестве критерия классификации пикселей часто используется расстояние Махаланобиса (см. рис. XXX, а). При этом предполагается, что значения пикселей классов подчиняются закону нормального распределения. Разделяющие поверхности (границы) между классами проводятся не через середины отрезков, соединяющих средние значения отдельных классов в пространстве признаков, а с учетом дисперсии значений спектральных яркостей пикселей в классе (рис. 7.20).

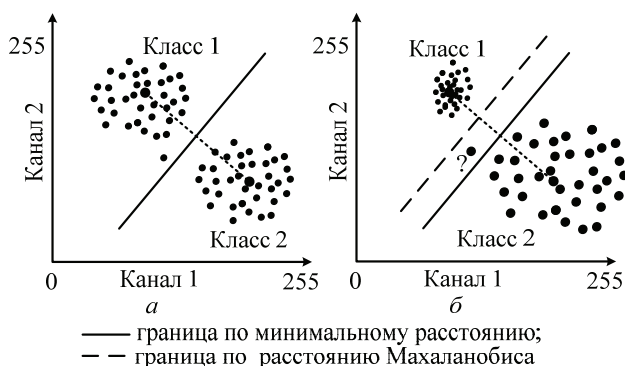


Рис. 7.20. Формирование границ между классами при одинаковой (а) и различных (б) значениях дисперсии методами минимального расстояния и расстояния Махаланобиса

7.3.2.5. Алгоритм классификации по максимуму вероятности (правдоподобия). В основе данного алгоритма лежит статистический подход к решению задачи и предположение, что появление на снимке объекта, относящегося к i -му классу, является случайным событием. По умолчанию предполагается, что априорные вероятности принадлежности пикселя к любому классу равны и значения признаков пикселей классов распределены по нормальному закону [35]. Если имеется априорная информация, что вероятности для классов не равны, то задаются весовые коэффициенты. Например, если известно, что вдвое больше пикселей изображения должно быть назначено в класс A относительно класса B , то весовой коэффициент для класса A должен быть вдвое большим.

Априорная информация может быть получена из вторичных источников: карт, планов, результатов предыдущих классификаций, визуального дешифрирования и т. д. Если априорная информация относительно вероятностей классов отсутствует, то весовые коэффициенты принимаются равной величины.

Для каждого класса в соответствии с алгоритмом вычисляются средние значения признаков по каждому каналу, а также матрица ковариации, на основе которых для каждого пикселя рассчитываются вероятности принадлежности различным классам. Пиксель относится к классу, для которого вычисленная вероятность является наибольшей. Если на значение вероятности вводится пороговое ограничение, формируется отдельный класс неклассифицированных пикселей.

Алгоритм максимального правдоподобия (Байеса) учитывает большое количество статистических параметров и обеспечивает достаточно точную в сравнении с другими алгоритмами классификацию, однако требует больших вычислительных затрат.

7.3.2.6. Анализ гиперспектральных снимков. Гиперспектральные сенсоры схожи с мультиспектральными, они содержат призму или дифракционную решетку, разлагающую поступающее излучение на спектральные диапазоны, а энергия излучения в каждой из областей спектра измеряется датчиком. Сенсор состоит из сотен датчиков (200 и более), что позволяет измерить спектральную яркость

объекта в узких полосах (шириной 10 нм) спектрального диапазона от 0,4 до 2,4 мкм.

Таким образом, гиперспектральные снимки в отличие от мультиспектральных содержат сотни монохроматических изображений в очень узких спектральных каналах. В результате спектр одного пикселя гиперспектрального изображения фактически представляет собой кривую спектральной яркости объекта поверхности Земли, по которой, зная спектральные кривые различных природных образований, можно идентифицировать и сам объект.

С целью анализа гиперспектральных изображений были созданы базы данных спектров наиболее распространенных материалов, названные спектральными библиотеками. Они содержат спектры минералов, почв, жидкостей, искусственных и смешанных материалов, различных видов растительности и т. д. В библиотеки включены спектры, полученные лабораторными спектрометрами при строго контролируемых условиях, переносными спектрометрами в полевых условиях и спектры, выделенные из гиперспектральных снимков. Многие из созданных библиотек спектров опубликованы на сайтах.

Однако в лабораторных условиях спектр материала измеряется при строго контролируемых условиях, позволяющих исключить влияние окружающей среды. Спектральные кривые гиперспектрального снимка отличаются от полученных при лабораторных исследованиях, так как при прохождении отраженного излучения через атмосферу происходит его частичное поглощение и рассеивание. Поэтому форма спектральной кривой объекта меняется и для достоверного дешифрирования гиперспектральных изображений особое значение имеет этап атмосферной коррекции. В настоящее время уже разработаны и продолжают разрабатываться спектральные библиотеки для самых различных объектов Земли как естественного, так и искусственного происхождения.

USGS Digital Spectral Library. Библиотека создана в USGS Spectroscopy Lab's (текущая версия splib06a – сентябрь, 2007). Содержит данные о спектральной отражательной способности минералов, горных пород, грунтов, жидкостей, летучих соединений, замороженных летучих соединений, растительности (рис. 7.21), искусственных материалов в диапазоне от 0,2 до 150 мкм. Всего в ней насчитывается более 1300 спектральных кривых. Библиотека находится в свободном

доступе по адресам: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html> – подробное описание библиотеки, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/> – сама библиотека.

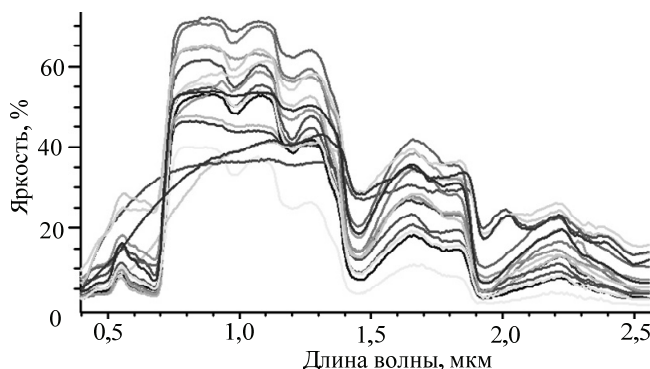


Рис. 7.21. Фрагмент спектральной библиотеки USGS.
Кривые спектральной яркости растительности

JPL (Jet Propulsion Lab) Spectral Library. Библиотека включает в себя кривые спектральной отражательной способности для 160 минералов в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм. Для 135 минералов выполнены измерения при разных размерах зерна минерала (размер частиц минерала) – 125–500 мкм, 45–125 мкм и <45 мкм. Основное назначение библиотеки – показать влияние размера зерна на спектрально отражательную способность минералов. Описание библиотеки находится по адресу http://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jpl_desc.

Johns Hopkins University Spectral Library. Была создана в университете Джона Хопкинса. Библиотека включает в себя кривые спектральной отражательной способности для минералов, горных пород, почв, метеоритов, лунного грунта, искусственных материалов, снега, льда, растительности в диапазоне от 0,4 до 14 мкм. Описание библиотеки находится по адресу http://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc.

ASTER Spectral Library. Была создана для поддержки использования снимков Terra/ASTER (текущая версия 2.0 – декабрь, 2008). Содержит данные из перечисленных выше спектральных библиотек. Всего в ней насчитывается более 2400 спектральных кривых естественных и искусственных материалов в диапазоне от 0,4 до 15,4 мкм.

Библиотека находится по адресу <http://speclib.jpl.nasa.gov/search-1>, ее описание – http://speclib.jpl.nasa.gov/downloads/RSE_D_08_00553.pdf.

IGCP 264 Spectral Library. Спектральная библиотека была создана в 1990 г. в рамках проекта IGCP 264. Она включает в себя измерения пяти различных спектрометров для 27 хорошо изученных минералов. Основное назначение библиотеки – показать влияние спектрального разрешения и спектрального диапазона на форму спектральной кривой.

Все вышеназванные библиотеки частично или полностью включены в поставку ENVI и других программных продуктов для обработки ДДЗ (по данным <http://gis-lab.info/qa/spectrum-lib.html>).

Для классификации гиперспектральных снимков используются различные методы, основывающиеся на сравнительной оценке спектра отдельного пикселя со спектрами природных объектов. Если изображение содержит обширные области чистых пикселей, для которых имеются спектры в библиотеке спектров, можно получить хорошие результаты классификации. Однако на изображениях преобладают смешанные пиксели, которые в той или иной степени включают спектры различных объектов и не всегда могут быть классифицированы.

Одним из методов классификации гиперспектральных снимков является метод спектрального угла. В соответствии с данным методом сравниваются спектральные показатели пикселя и материалов из спектральных библиотек или из других источников. Алгоритм определяет подобие между спектрами, вычисляя «угол отклонения» между ними, при этом обрабатывая их как векторы в пространстве с размерностью, равной числу спектральных зон. Поскольку этот метод использует только направление «спектральных векторов», а не их длину, то нельзя отличить объекты, которые имеют похожую форму спектральной кривой, отличающуюся лишь интенсивностью. Метод хорошо подходит для классификации различных типов растительности, спектральные кривые которой существенно отличаются от кривых остальных объектов, а также между собой.

7.3.2.7. Оценка качества классификации. На завершающем этапе интерпретации изображений снимков выполняется оценка точности классификации – совпадения полученных информационных классов и классов объектов (категорий земель, древесных,

кустарниковых и травянистых видов, почв и т. д.). Для оценки качества классификации могут быть использованы визуальный экспертный анализ с привлечением известных данных вторичных источников; проверка по контрольным геопривязанным участкам, не использованным в качестве обучающих выборок; сравнительный анализ статистических показателей выборок и итоговых классов. Визуальный экспертный анализ выполняется на всех стадиях оценки результатов классификации. Наиболее точным является способ оценки по контрольным участкам (пикселям), для которых известны фактическая принадлежность к тому или иному классу. Контрольные участки по координатам накладываются на снимок, и имеющиеся полевые данные сопоставляются с результатами классификации. Точность оценки определяет в конечном итоге количество имеющихся контрольных пикселей – чем их больше, тем выше точность оценки результатов классификации.

Оценка статистических показателей включает определение пороговых значений для отделения ошибочно классифицированных пикселей, оценку точности и достоверности на основе сравнения результатов классификации с истинными данными о земной поверхности или другими данными.

Отделение ошибочно классифицированных пикселей выполняется, как правило, по заданным пороговым значениям. При выполнении классификации по принципу минимального расстояния, расстояния Махаланобиса или максимального правдоподобия можно получить файл, в котором в качестве значений яркостей пикселей задано спектральное расстояние в соответствии с используемым решающим правилом. Например, при классификации по принципу минимального расстояния каждое значение является евклидовым спектральным расстоянием между вектором измерения пикселя и средним вектором его класса.

В результате светлые пиксели изображения расстояний (более высокие значения) расположены спектрально дальше от средних значений выборки класса, к которому они были приписаны, и, следовательно, более вероятно, что они классифицированы ошибочно. Темные пиксели расположены спектрально ближе, и более вероятно, что они классифицированы верно. При использовании методов контролируемой классификации наиболее темные пиксели обычно принадлежат к обучающим эталонам.

На гистограмме распределения спектральных расстояний пиксели (рис. 7.22), которые, вероятнее всего, классифицированы ошибочно (имеют более высокие значения), располагаются на конце этой гистограммы и могут быть отсечены на некотором пороговом уровне.

Для объектов, выделяемых в результате классификации, оценка точности основана на сравнении контрольного и классифицированного изображений и построении так называемой матрицы классификации, или матрицы ошибок, которая характеризует ошибки классификации. Матрица классификации состоит из столбцов и строк, число которых равно числу классов (табл. 7.2). Строки матрицы – это достоверно известные классы, представленные на контрольном изображении, а столбцы – классы, выделенные на анализируемом снимке. В последнем столбце представлено количество контрольных точек (пикселей) в каждом информационном классе контрольного изображения, а в последней строке матрицы – количество точек соответствующих классов на классифицированном снимке. Диагональные элементы матрицы – это количество правильно классифицированных точек, принадлежащих одинаковым классам на обоих изображениях. Информация о ложной классификации или пропусках классификации содержится выше и ниже диагонали матрицы.

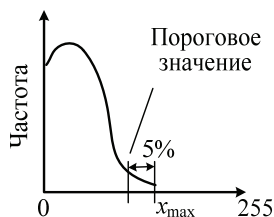


Рис. 7.22. Интерактивное определение порогового уровня ошибочно классифицированных пикселей

Таблица 7.2

Матрица классификации

Истинные классы	Результаты классификации					
	Сельскохозяйственные угодья	Промзоны	Леса	Болота	Водоемы	Всего
Сельскохозяйственные угодья	70	5	13	0	0	88
Промзоны	3	55	0	0	0	58
Леса	0	0	37	4	0	41
Болота	0	0	0	99	0	99
Водоемы	0	0	0	0	121	121
Всего	73	60	50	103	121	407

Полное значение точности вычисляется делением общего количества правильно классифицированных пикселей (суммы значений элементов основной диагонали матрицы ошибок) на общее количество контрольных пикселей. Полученное число является случайным, и чтобы это учесть, используется индекс Каппа, характеризующий уменьшение ошибок классификации данным методом по сравнению с полностью случайной классификацией. Для абсолютно точной классификации индекс Каппа равен единице (все недиагональные элементы матрицы ошибок равны нулю), а при абсолютно случайной – нулю [35].

7.4. Выявление изменений по данным дистанционного зондирования

Большинство методов выявления изменений по данным ДЗ базируется на сопоставлении разновременных космических снимков и карт, где зафиксировано состояние исследуемого объекта на разные даты. Важной составляющей для реализации этих методов является обеспечение точной пространственной привязки материалов и сопоставимого пространственного разрешения, без которых извлечение информации о динамике происходящих процессов и явлений невозможно. Для оценки и картографирования изменений используют различные алгоритмы, основывающиеся на синтезе изображений, спектральных преобразованиях, классификации, статистическом анализе и т. п.

Наиболее простым и высокоточным является метод *интерактивного дешифрирования*, который основывается на визуальной интерпретации изменений на поверхности Земли по разновременным снимкам. Достоинство данного метода заключается в использовании опыта дешифровщика, что позволяет, как правило, выделять объекты лучше, чем какое-либо решающее правило. Недостаток данного метода заключается в низкой автоматизации и большой трудоемкости работ. Хорошие результаты при интерактивном дешифрировании дает также достаточно простой метод формирования синтезированного цветного изображения из разновременных снимков. Для этого монохроматические изображения одной и той же спектральной зоны снимков, сделанных в разное время, помещаются в два канала

RGB-модели, например в синий и красный, а зеленый канал отключается. В результате участки, где произошли изменения, будут отображаться другим цветом.

Простым, надежным и широко используемым в разнообразных приложениях методом обнаружения изменений является метод, основывающийся на *спектральных преобразованиях снимков*, например на вычислении разности или отношения спектральных яркостей одинаковых каналов по следующим формулам:

$$I_{(x,y)}^{\text{new}} = I_{(x,y)}^{t_1} - I_{(x,y)}^{t_2}; \quad (7.14)$$

$$I_{(x,y)}^{\text{new}} = \frac{I_{(x,y)}^{t_1}}{I_{(x,y)}^{t_2}}, \quad (7.15)$$

где $I_{(x,y)}^{\text{new}}$ – вычисленное значение яркости пикселя с координатами (x, y) ; $I_{(x,y)}^{t_1}$ – значение яркости пикселя на дату t_1 ; $I_{(x,y)}^{t_2}$ – значение яркости пикселя на дату t_2 .

Результат вычитания содержит как положительные, так и отрицательные значения. Вычисленные значения яркости пикселей, где произошли существенные изменения, значительно превышают таковые на остальной части снимка. Вычисленные отношения яркостей при отсутствии изменений будут близки к единице, в противном случае полученное значение соответствующих пикселей будет или значительно больше, или меньше единицы в зависимости от направления изменения. Оба метода, как правило, применяются к одному спектральному каналу, хотя могут быть использованы и для нескольких.

Метод отношений менее чувствителен к изменениям атмосферных условий, угла солнцестояния, к шумам изображения, поэтому имеет некоторое преимущество перед методом разностей.

Еще одним часто используемым методом является метод разности вегетационных индексов, где яркость пикселя рассчитывается по формуле

$$I_{(x,y)}^{\text{new}} = \text{NDVI}_{(x,y)}^{t_1} - \text{NDVI}_{(x,y)}^{t_2}, \quad (7.16)$$

где $\text{NDVI}_{(x,y)}^{t_1}$, $\text{NDVI}_{(x,y)}^{t_2}$ – значения вегетационного индекса для пикселя (x, y) изображений на даты t_1 и t_2 соответственно.

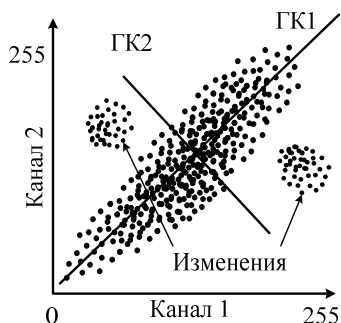


Рис. 7.23. Обнаружение изменений методом главных компонент:

ГК1 – первая главная компонента;
ГК2 – вторая главная компонента

Однако метод разности вегетационных индексов не обеспечивает информацию относительно классов изменений и чувствителен к изменениям, не связанным с поверхностью Земли.

Метод *постклассификационного сравнения* основан на независимой классификации (методами с обучением или без него) каждого из разновременных изображений с последующим сравнением классов соответствующих пикселей или кластеров. Основным недостатком метода является его высокая трудо-

емкость и необходимость наличия эталонных и контрольных участков для уменьшения ошибок. К достоинствам метода относятся возможность определения класса изменений.

Метод *классификации синтезированных разновременных снимков* основан на том, что разновременные изображения объединяются в одно, которое затем классифицируется [42]. Достоинством метода является непосредственное создание классов изменений, что значительно уменьшает ошибки обнаружения изменений по сравнению с методом постклассификационного сравнения. Метод является сложным из-за увеличения размерности анализируемого изображения.

Метод *разности главных компонент* использует соответствующие спектральные каналы разновременных изображений и предполагает, что существует высокая корреляция между значениями яркости пикселей для участков изображения, которые изменились незначительно, и низкая корреляция для участков, на которых произошли изменения. Поэтому основная часть значений яркости пикселей будет располагаться на графике в виде узкого эллипса рассеяния, а значения яркостей пикселей, где произошли изменения, будут лежать за пределами эллипса, т. е. изменения определяются значением второй главной компоненты (рис. 7.23). Однако без визуального анализа самих разновременных изображений сложно установить класс обнаруженных изменений.

Вышеизложенные методы регистрации изменений имеют свои достоинства и недостатки, поэтому могут применяться их комбинации. В настоящее время для решения задач мониторинга различными исследователями предпринимаются попытки разработки экспертных систем оценки изменений, основывающихся на базах знаний и работающих с минимальным участием человека.

7.5. Программное обеспечение для автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования

Использование современных компьютерных и информационных технологий, доступность космических снимков повлекли за собой и интенсивное развитие программного обеспечения для обработки ДДЗ. Многие компании создают автоматизированные системы обработки и интерпретации данных, картографирования и ввода данных в ГИС. Среди наиболее известных можно отметить ERDAS, Leica Geosystems, Research Systems Inc. и др.

Компания ERDAS специализируется на разработке программного обеспечения для обработки изображений космических и аэроснимков. Основной продукт компании – система обработки изображений ERDAS IMAGINE, которая в настоящее время является наиболее развитым коммерческим продуктом, доступным широкому кругу пользователей. Последняя версия ERDAS IMAGINE содержит усовершенствованные инструменты обработки изображений, новые инструменты импорта, экспорта, монтажа и трехмерной визуализации изображений. ERDAS IMAGINE предлагается потребителям в трех комплектациях – Essentials, Advantage, Professional, отличающихся стоимостью и функциональными возможностями (табл. 7.3).

Одним из наиболее удачных и доступных программных продуктов для визуализации и обработки данных дистанционного зондирования является программный комплекс ENVI (the Environment for Visualizing Images), который разработан американской компанией RSI (Research Systems Inc.). В отличие от других пакетов по обработке снимков, в ENVI встроен язык программирования IDL (Interactive Data Language), позволяющий расширять функциональные

возможности ENVI или создавать собственные подпрограммы. Современный ENVI обеспечивает поддержку новых типов снимков, новых методов получения информации, удобный способ отображения на экране как растровых, так и векторных данных, а также имеет наиболее развитый на сегодняшний день набор функций обработки данных дистанционного зондирования и их интеграции с данными ГИС.

Таблица 7.3

Основные функциональные возможности ERDAS IMAGINE

Функциональные возможности	ERDAS IMAGINE		
	Essentials	Advantage	Professional
Просмотр файлов, баз данных или онлайн сервисов	Да	Да	Да
Создание данных в форматах GeoTIFF, JPEG, MrSID, ECW, JPEG2000, NITF, BigTIFF, IMAGINE, Shapefile, Arc Coverage и др. (более 100 форматов)	Да	Да	Да
Создание компоновок карт	Да	Да	Да
Привязка и перепроецирование растровых данных	Да	Да	Да
Пакетная обработка данных	Да	Да	Да
Ортотрасформирование	–	Да	Да
Выполнение классификации изображений и преобразование раstra в вектор	–	Да	Да
Создание мозаик изображений	–	Да	Да
Улучшение разрешения снимков	–	Да	Да
Анализ данных в файлах, базах данных и онлайн сервисах	–	Да	Да
Преобразование данных LiDAR в ЦММ	–	Да	Да
Параллельная пакетная обработка данных	–	Да	Да
Расширенная классификация изображений и обработка гиперспектральных данных	–	–	Да
Расширенные функции обработки изображений и данных ГИС, пространственное моделирование	–	–	Да
Экспертные системы и субпиксельная классификация изображений	–	–	Да
Обработка данных в ER Mapper	–	–	Да

Перечисленные программные продукты до недавнего времени использовали пиксель-ориентированные методы обработки данных дистанционного зондирования. Системы, созданные на их основе, зачастую были не в состоянии распознать элементы изображения, доступные человеческому восприятию. Причина заключается в том, что методы классификации снимков на основе пиксельного анализа используют спектральную информацию лишь отдельных пикселей изображения.

Чтобы преодолеть многочисленные ограничения и недостатки традиционных пиксель-ориентированных систем, в конце 2000 г. компанией Definiens Imaging GmbH был разработан программный продукт eCognition, который использует совершенно иной подход к классификации. Важная семантическая информация, необходимая для интерпретации изображения, представляется не в виде отдельных пикселей, а в виде целостных объектов и связей между ними. Система eCognition не подразделяет на классы отдельные пиксели, а выделяет и классифицирует сложные объекты, полученные на предыдущих этапах сегментации снимка (см. рис. XXXI).

При этом принимаются во внимание дополнительные данные об объекте: оттенки, форма, текстура, площадь, контекстная информация и данные из других слоев классификации. Концепция системы заимствована из методики Fractal Net Evolution, в которой сложный предмет представляется посредством семантических сетей.

Полное описание программы, лежащей в основе системы, находится в Baatz & Schape (1999, 2000) и в Интерактивном руководстве пользователя (Online User Guide). Недостатком eCognition является то, что система позволяет выполнять только классификацию изображения. Все операции по обработке изображения до классификации проводятся отдельно от eCognition с использованием других программных продуктов.

В настоящее время программные комплексы ERDAS IMAGINE и ENVI также имеют объектно-ориентированные методы классификации. Однако несмотря на мощные средства классификации и анализа, они не позволяют выполнять с достаточной для целей лесного хозяйства точностью интерпретацию количественных и качественных показателей насаждений. При анализе существующих специализированных программных продуктов и разработок, предназначенных

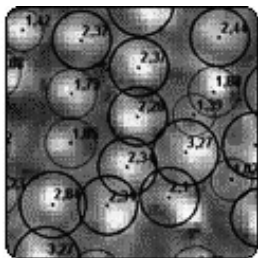


Рис. 7.24. Автоматическое измерение диаметров крон и густоты древостоя в eCognition Forester

для интерпретации данных дистанционного зондирования лесов, можно выделить еще одно направление.

Компания Definiens Imaging GmbH разработала программный продукт eCognition Forester, позволяющий выполнять измерения крон отдельных деревьев, на основе которых становится возможным определение таксационных показателей древостоев. Система работает в автоматизированном режиме, позволяет идентифицировать на снимке отдельные деревья и измерять размеры их крон (рис. 7.24).

Выделенные таким образом контуры крон деревьев преобразовываются в векторный формат и экспортируются в ГИС. Фактически при наличии в ГИС информации об условиях местопроизрастания насаждений, производительности (классе бонитета) и возрасте, моделей взаимосвязи данных параметров, размеров кроны и густоты с другими таксационными показателями можно создавать автоматизированную систему таксации древостоев на основе ДДЗ.

Подобная система моделирования роста древостоя на базе автоматизированных измерений на аэрофотоснимках с использованием ГИС была разработана в 1995 г. Ronghua Ye. С нее были получены данные распределения запаса насаждений по породам, классам возраста, ступеням толщины (выбраны 5- и 10-сантиметровые ступени толщины). Для сравнения использовались данные выборочной инвентаризации 1984 и 1994 гг. Система показала достаточно высокую точность в оценке распределения запаса по породам (ошибка не более 5%) и по ступеням толщины (не более 3%). Распределение запасов древостоев по классам возраста было оценено с ошибкой около 10%. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой точности работы системы и возможности ее использования для оценки распределения древостоев по отдельным таксационным показателям (породам, группам возраста и др.).



Рис. 1. Исходное (*а*) и ректифицированное (*б*) изображения, полученные сканирующей камерой 3-DAS

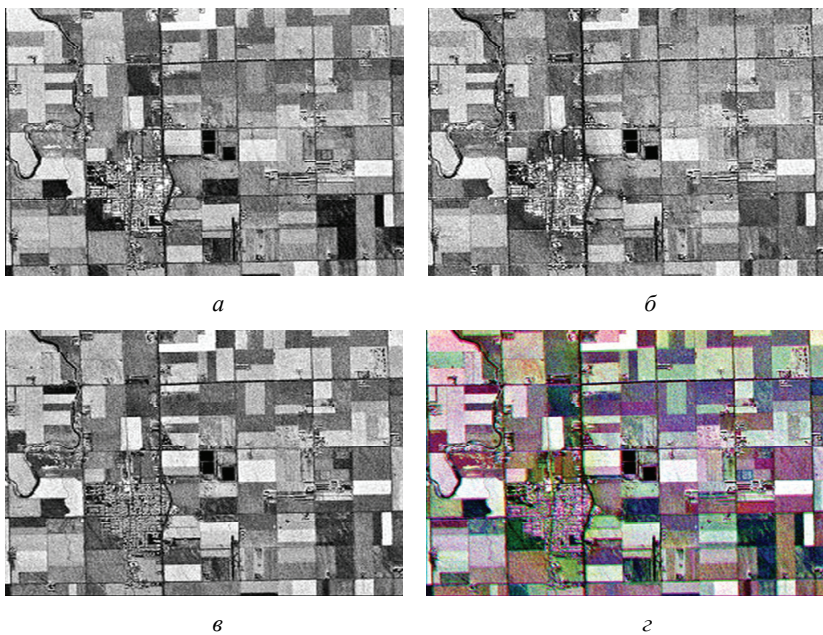


Рис. 2. Цифровые радиолокационные снимки различной поляризации (*а* – HH; *б* – VV; *в* – HV) и синтезированный цветной снимок (*г*)

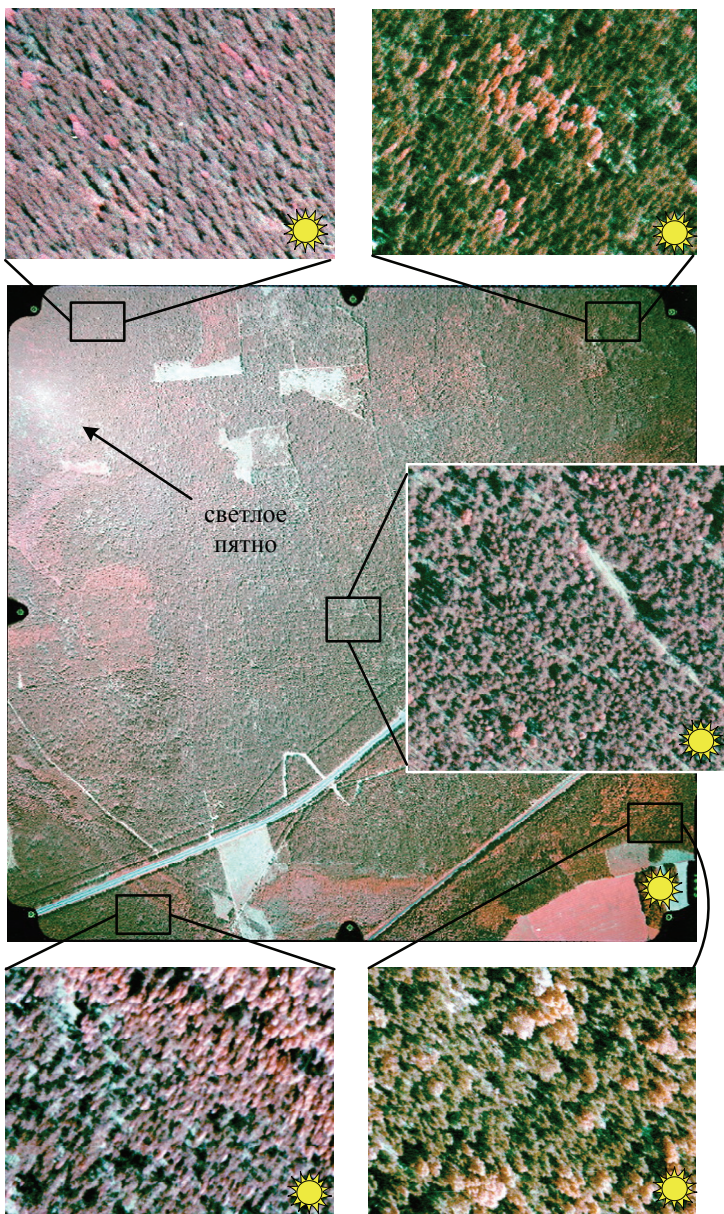


Рис. III. Изображения крон деревьев в разных частях снимка

М 1:5000					
М 1:10 000					 10С (39), $D - 16$ см, $H - 17$ м, $P - 0,9$
		10С (55), $D - 20$ см, $H - 17$ м, $P - 0,7$	10С (70), $D - 26$ см, $H - 24$ м, $P - 0,8$	10С (80), $D - 26$ см, $H - 27$ м, $P - 0,7$	10С (105), $D - 32$ см, $H - 27$ м, $P - 0,6$

Рис. IV. Сосна, полог древостоя, АФС

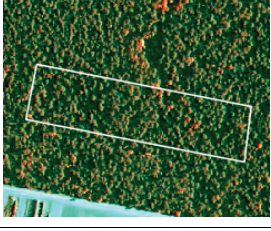
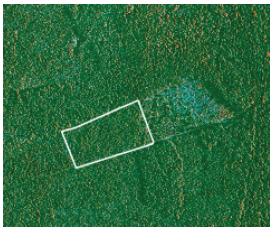
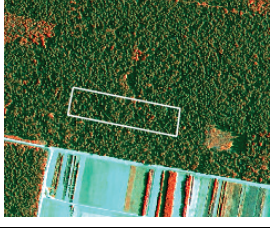
M 1:5000					
M 1:10 000					
	10С (35), $D - 12$ см, $H - 13$ м, $P - 0,9$	10С (45), $D - 16$ см, $H - 18$ м, $P - 0,9$	10С (75), $D - 30$ см, $H - 24$ м, $P - 0,6$	10С (85), $D - 28$ см, $H - 25$ м, $P - 0,5$	10С (110), $D - 36$ см, $H - 29$ м, $P - 0,7$

Рис. V. Сосна, полог древостоя, КС*

	 10Е (95), $D - 32$ см, $H - 29$ м, $P - 0,5$
	 8Е2С (70), $D - 28$ см, $H - 24$ м, $P - 0,6$
	 9Е1Б (60), $D - 26$ см, $H - 20$ м, $P - 0,6$
	 10Е (55), $D - 24$ см, $H - 21$ м, $P - 0,7$
	 10Е (23), $D - 8$ см, $H - 8$ м, $P - 0,9$
М 1:5000	М 1:10 000

Рис. VI. Ель, полог древостоя, АФС

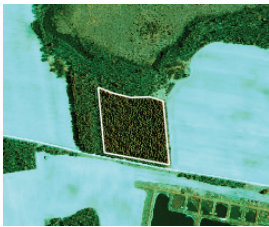
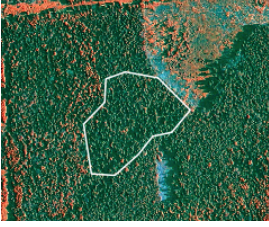
M 1:5000 				
M 1:10 000 				 7Е2С1В (110), $D - 32$ см, $H - 28$ м, $P - 0,7$

Рис. VII. Ель, полог древостоя, КС*

	 8Б2С (75), $D - 28$ см, $H - 28$ м, $P - 0,7$
	 8Б2Е (60), $D - 20$ см, $H - 24$ м, $P - 0,8$
	 9Б1С (46), $D - 18$ см, $H - 22$ м, $P - 0,9$
	 10Б (19), $D - 8$ см, $H - 12$ м, $P - 0,8$
М 1:5000	М 1:10 000

Рис. VIII. Береза, полог древостоя, АФС

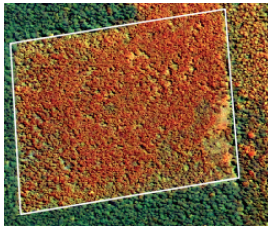
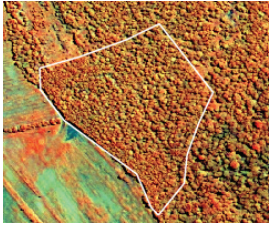
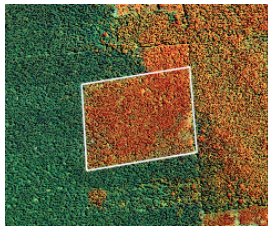
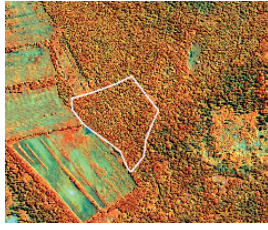
М 1:5000					
М 1:10 000					 10Б (20), $D - 8$ см, $H - 10$ м, $P - 0,7$ 10Б (40), $D - 14$ см, $H - 15$ м, $P - 0,7$ 9БЮлч (50), $D - 22$ см, $H - 18$ м, $P - 0,7$ 9Б1Е (65), $D - 24$ см, $H - 25$ м, $P - 0,8$ 10Б (75), $D - 20$ см, $H - 18$ м, $P - 0,5$

Рис. IX. Береза, полог древостоя, КС*

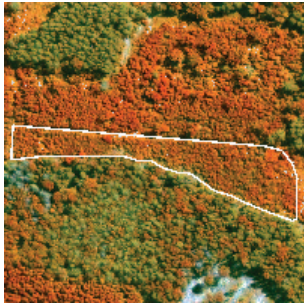
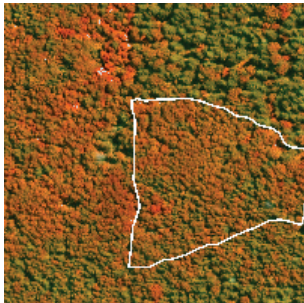
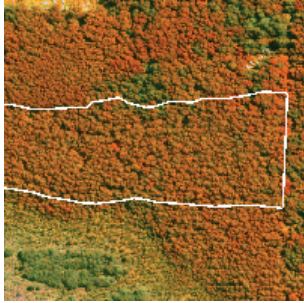
M 1:5000			
M 1:10 000	 90с1Б (25), $D - 12$ см, $H - 11$ м, $P - 0,8$	 70с2Б1Е (35), $D - 18$ см, $H - 18$ м, $P - 0,7$	 80с2Б (60), $D - 28$ см, $H - 26$ м, $P - 0,7$

Рис. X. Осина, полог древостоя, КС*

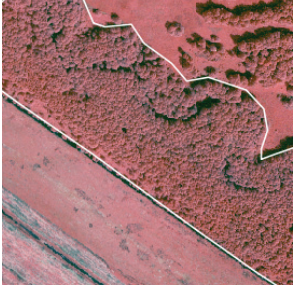
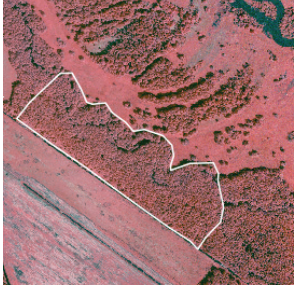
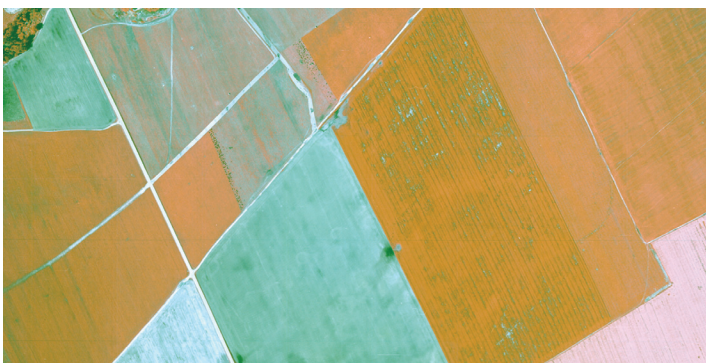
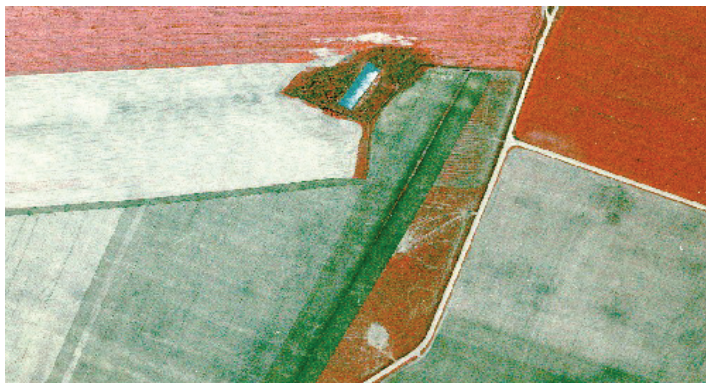
М 1:5000				
М 1:10 000				 9Олч1Б (60), $D - 24$ см, $H - 24$ м, $P - 0,7$

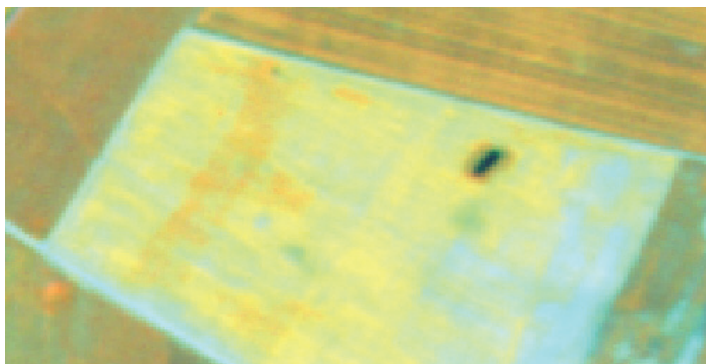
Рис. XI. Оляха черная, полог древостоя, АФС

М 1:5000				
М 1:10 000				
	100Лч (15), $D - 8$ см, $H - 9$ м, $P - 0,7$	90Лч1Б(25), $D - 12$ см, $H - 11$ м, $P - 0,6$	100Лч (40), $D - 16$ см, $H - 18$ м, $P - 0,6$	100Лч (70), $D - 32$ см, $H - 22$ м, $P - 0,4$

Рис. XII. Ольха черная, полог древостоя, АФС



АФС



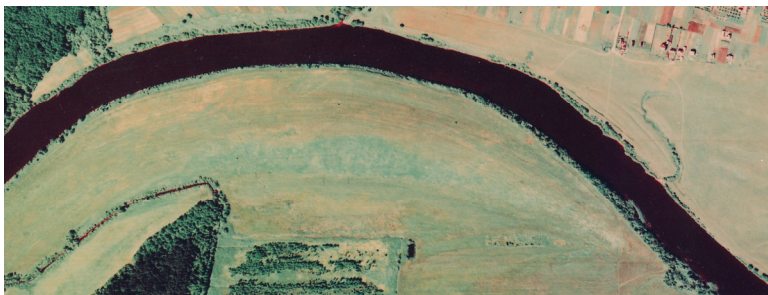
КС**

Рис. XIII. Пашни, сельскохозяйственные угодья

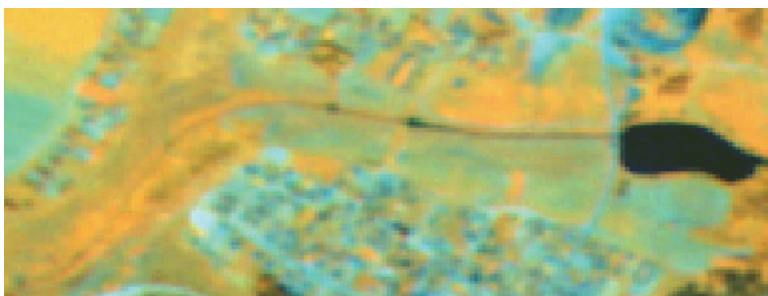


КС**

Рис. XIV. Болота, заболоченные участки



АФС

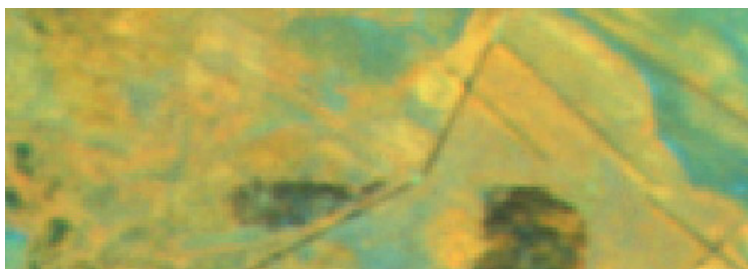


КС**

Рис. XV. Луга, сенокосы, реки, пруды (озера)



АФС

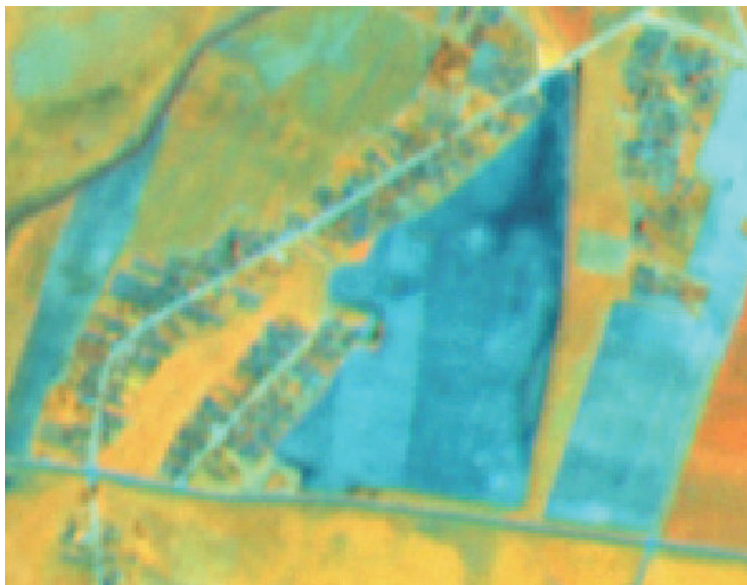


КС**

Рис. XVI. Мелиоративные каналы



АФС

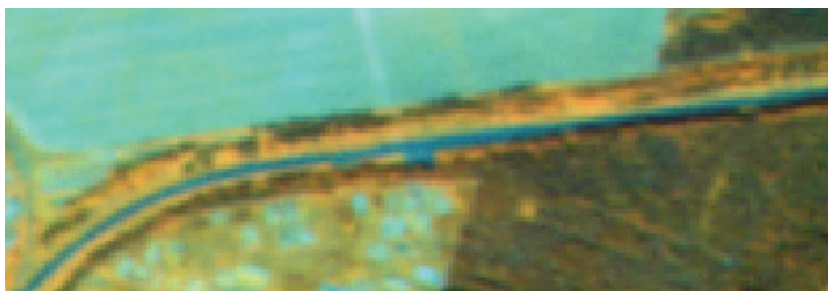


КС**

Рис. XVII. Населенные пункты, грунтовые и асфальтированные дороги

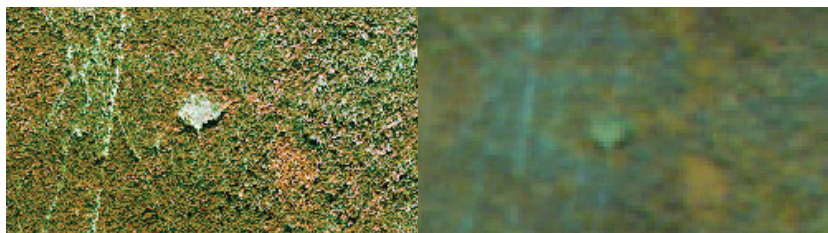


АФС



КС**

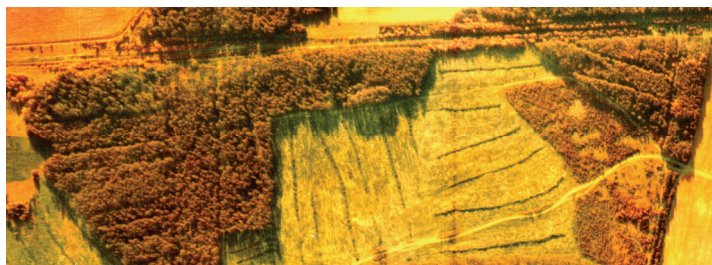
Рис. XVIII. Железные дороги



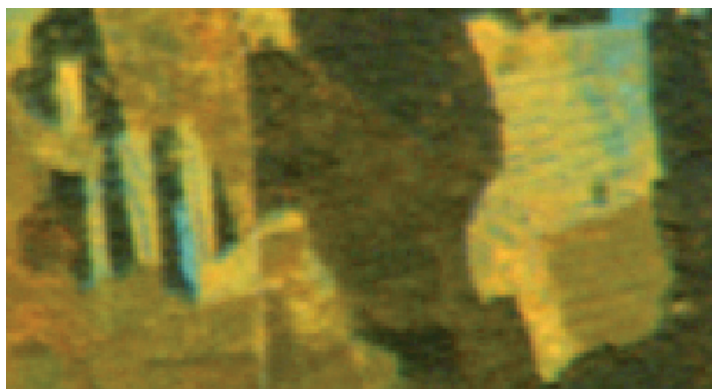
АФС

КС**

Рис. XIX. Прогалины



АФС



КС**

Рис. XX. Сплошные вырубki

Примечание. АФС – цифровые аэроснимки 2009 г., полученные методом сканирования негативов масштаба 1:15 000 с разрешением 56 мкм и глубиной цвета 24 бит; КС* – цифровой космический снимок Quickbird, 2007 г., пространственное разрешение 0,6 м, каналы: R, NIR, G; КС** – цифровой космический снимок ALOS, 2010 г., пространственное разрешение 10 м, каналы: R, NIR, G.



АФС

Рис. XXI. Гари



АФС



КС

Рис. XXII. Квартальные просеки

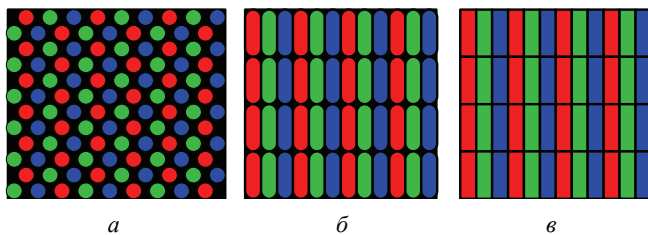


Рис. XXV. Структура экранов телевизора (*а*, *б*) и монитора (*в*)

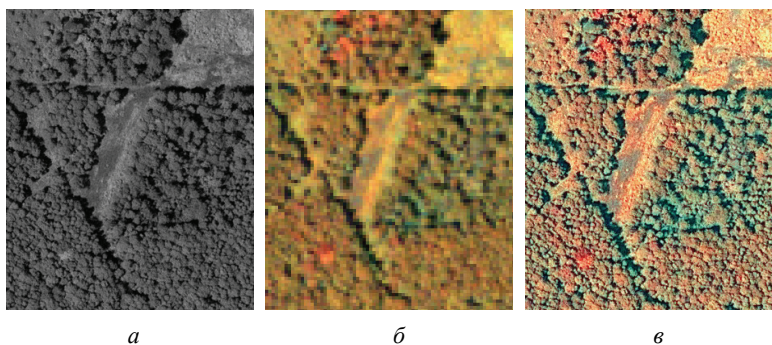


Рис. XXVI. Улучшение пространственного разрешения методом главных компонент (ГЛХУ «Старобинский лесхоз», GeoEye, 2010 г.):
а – панхроматическое изображение (ПР = 0,5 м); *б* – мультиспектральное изображение (ПР = 2 м); *в* – синтезированное изображение (ПР = 0,5 м)

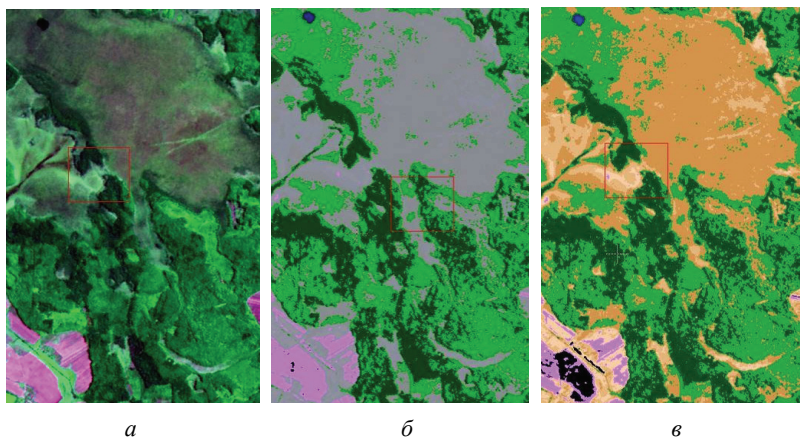
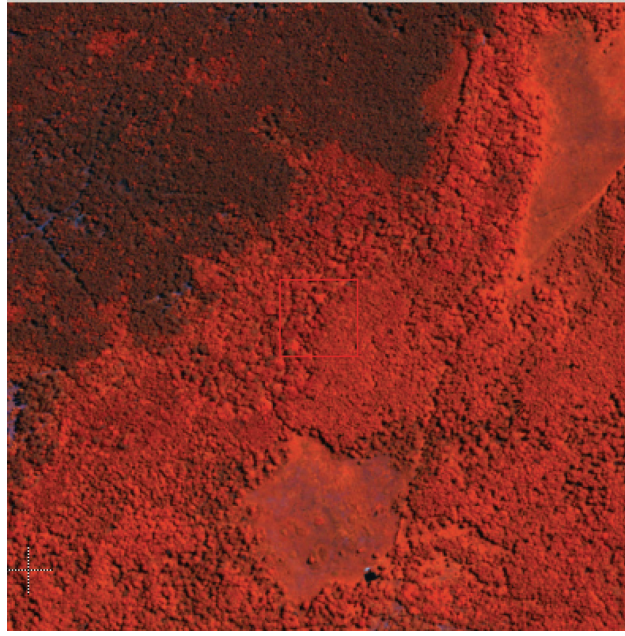
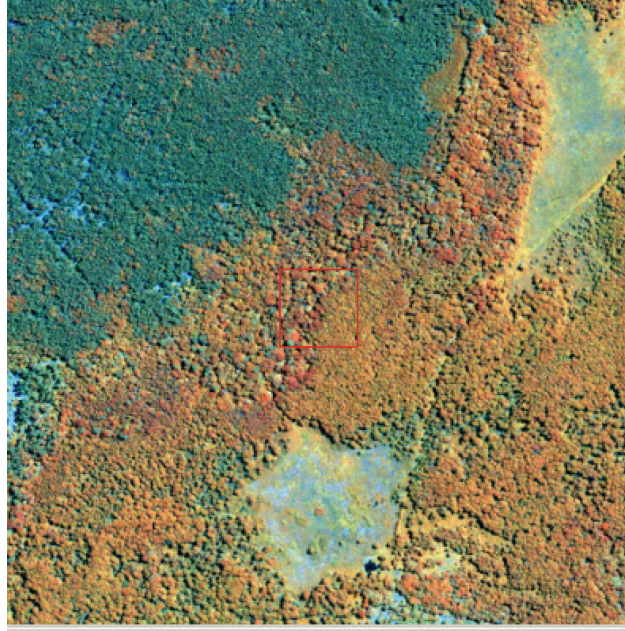


Рис. XXVII. Неконтролируемая классификация снимка ALOS (*а*) методами К-средних (*б*) и ISODATA (*в*)



a



б

Рис. XXVШ. Изображение снимка до (*a*) и после (*б*) контрастирования кривой Гаусса

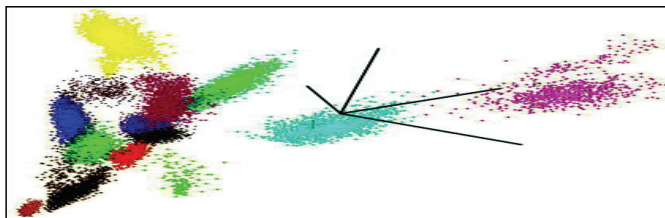


Рис. XXIX. Визуальная оценка разделимости обучающих выборок в многомерном визуализаторе программного комплекса ENVI

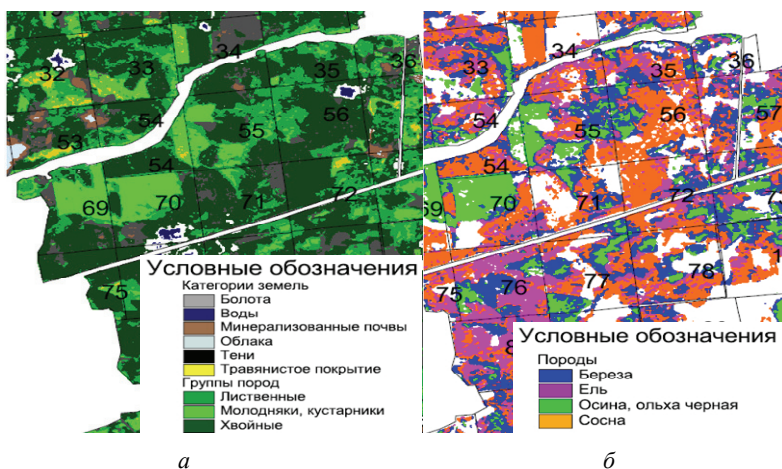


Рис. XXX. Результаты контролируемой классификации лесного фонда методами расстояния Махаланобиса (*a*) и максимальной вероятности (*б*) в программном комплексе ENVI

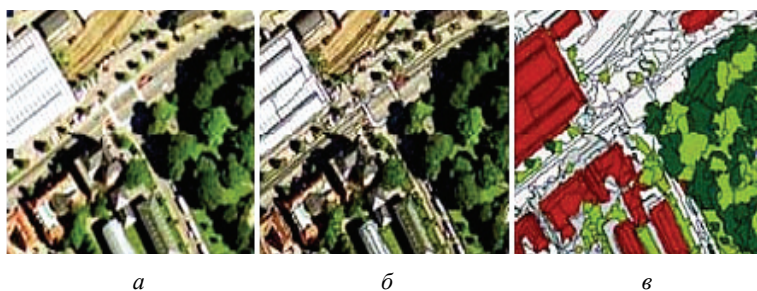


Рис. XXXI. Объектно-ориентированное сегментирование и классификация изображений в eCognition:
a – исходное изображение; *б* – сегментация; *в* – результаты классификации

ЛИТЕРАТУРА

1. Аванесов, Г. А. Цифровые аэросъемочные комплексы / Г. А. Аванесов, Ю. П. Киенко // Геопрофи. – 2004. – № 1. – С. 8–12.
2. Александров, М. Ю. Общие принципы и продукция радиолокационного комплекса TerraSAR-X* / М. Ю. Александров // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 51–55.
3. Алчинов, А. И. Обработка в автоматическом режиме аэроснимков с камеры DMC в ПО «ЦФС-ТАЛКА» / А. И. Алчинов, В. Б. Кекелидзе // Геопрофи. – 2009. – № 6. – С. 25–29.
4. Астахов, В. В. Аэрофототопографическая съемка: метод. пособие / В. В. Астахов; Ростов. гос. ун-т. – Ростов н/Д, 2001. – 15 с.
5. Атрощенко, О. А. Геоинформационные системы в лесном хозяйстве: учеб. пособие / О. А. Атрощенко, И. В. Толкач. – Минск: БГТУ, 2003. – 98 с.
6. Атрощенко, О. А. Дистанционное зондирование лесов и геоинформационные системы в лесном хозяйстве: монография / О. А. Атрощенко, И. В. Толкач. – Минск: БГТУ, 2003. – 375 с.
7. Атрощенко, О. А. Лесная таксация: учеб. пособие / О. А. Атрощенко. – Минск: БГТУ, 2008. – 495 с.
8. Атрощенко, О. А. Система аэрокосмического мониторинга лесов Республики Беларусь / О. А. Атрощенко, М. А. Ильючик // Аэрокосмические методы в лесном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2002. – С. 53–55.
9. Аэрофотосъемочные работы // Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь / БелПСХАГИ [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.belaerogis.by/technology/>. – Дата доступа: 19.10.2012.
10. Безменов, В. М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции: учеб.-метод. пособие / В. М. Безменов. – Казань: Изд-во КГУ, 2009. – 86 с.
11. Белов, С. В. Аэрофотосъемка и авиация в лесном хозяйстве: учеб. пособие / С. В. Белов, И. Д. Дмитриев, А. Е. Колосова; под ред. С. В. Белова. – Л., 1962. – 256 с.

12. Владимирова, Н. А. Возможности применения космических снимков для государственной инвентаризации лесов / Н. А. Владимирова // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 45–49.

13. Востокова, Е. А. Картографирование на основе космической информации / Е. А. Востокова, Л. А. Шевченко, В. А. Суценя. – М.: Недра, 1988. – 223 с.

14. Гамбарова, Е. М. Обучение нейронного классификатора для распознавания объектов на снимках, полученных со спутника IKONOS / Е. М. Гамбарова. – Баку: Нейроинформатика, 2008. – 24 с.

15. Гарбук, С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон. – М., 1997. – 296 с.

16. Географические информационные системы, дистанционное зондирование и их практическое использование // Итоги науки и техники: исследование Земли из космоса. – М.: ВИНТИ, 1989. – 212 с.

17. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений: монография / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

18. Данюлис, Е. П. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве / Е. П. Данюлис, В. М. Жирин, В. И. Сухих. – М.: Агропромиздат, 1989. – 223 с.

19. Дейвис, Ш. М. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш. М. Дейвис [и др.]; под ред. Ф. Х. Свейна, Ш. М. Дейвиса. – М.: Недра, 1983. – 415 с.

20. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков (методика и результаты) / Акад. наук СССР, Акад. наук ГДР; редкол.: Р. З. Сагдеев (отв. ред.) [и др.]. – Берлин: Академи-ферлаг, 1982. – 83 с.

21. Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии: материалы Всерос. совещания-семинара с междунар. участием, Красноярск, 28 сент. – 1 окт. 2005 г. / Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН; редкол.: А. С. Исаев [и др.]. – Красноярск, 2005. – 137 с.

22. Дмитриев, И. Д. Лесная авиация и аэрофотосъемка: учебник. – 2-е изд. / И. Д. Дмитриев, Е. С. Мурахтанов, В. И. Сухих. – М.: Агропромиздат, 1989. – 359 с.

23. Дмитриев, И. Д. Лесная аэрофотосъемка и авиация / И. Д. Дмитриев, Г. Г. Самойлович. – Л.: Наука, 1978. – 90 с.

24. Дудко, А. Ф. Применение ГИС для изучения пространственной структуры древостоев / А. Ф. Дудко, С. В. Зибцев, В. А. Слободян // Геопрофи. – 2011. – № 4. – С. 26–30.

25. Ермакоў, В. Я. Лесаўпарадкаванне: падручнік / В. Я. Ермакоў, А. А. Атрошчанка, М. П. Дзямід. – 4-е выд. – Мінск: БДТУ, 2002. – 499 с.

26. Зинченко, О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования / О. Н. Зинченко // Ракурс [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681>. – Дата доступа: 11.10.2012.

27. Зинченко, О. Н. Цифровые камеры для аэрофотосъемки. Обзор моделей / О. Н. Зинченко, А. Б. Елизаров // Ракурс [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=630>. – Дата доступа: 11.10.2012.

28. Инструкция о порядке создания и размножения лесоустроительных планово-картографических материалов: утв. М-вом лесного хоз-ва Респ. Беларусь 22.06.1999. – Минск, 1999. – 41 с.

29. Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:10 000 и 1:25 000. Полевые работы [Электронный ресурс]. – 1978. – Режим доступа: <http://www.complexdoc.ru/ntd/542736>. – Дата доступа: 24.10.2012.

30. Исаев, А. С. Аэрокосмический мониторинг лесов / А. С. Исаев, В. И. Сухих, Е. Н. Калашников. – М.: Наука, 1991. – 240 с.

31. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М.: Логос, 2001. – 264 с.

32. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцов, О. В. Тутубалина. – М.: Академия, 2004. – 336 с.

33. Козлова, И. В. Дешифрирование аэрофотоснимков при картографировании ландшафтов: учеб.-метод. пособие / И. В. Козлова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 38 с.

34. Корнилов, Ю. Н. Фотограмметрия: конспект лекций / Ю. Н. Корнилов // С.-петерб. техникум геодезии и картографии: файловый архив: фотограмметрия [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа: http://www.spbtgik.ru/arhiv/fgm_dat.htm. – Дата доступа: 21.06.2012.

35. Кравцов, С. Л. Обработка изображений дистанционного зондирования Земли (анализ методов) / С. Л. Кравцов. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 256 с.
36. Кринов, Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований / Е. Л. Кринов. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1947. – 273 с.
37. Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков: учеб. пособие / И. А. Лабутина. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
38. Лабутина, И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина; Всемир. фонд дикой природы (WWF России); Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона». – М., 2011. – 88 с.
39. Лавров, В. В. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения / В. В. Лавров // ГИС-ассоциация [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru/70148.html>. – Дата доступа: 24.10.2012.
40. Лесотаксационное дешифрирование аэроснимков. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1971. – 58 с.
41. Лобанов, А. Н. Фотограмметрия: учебник / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопевцев. – М.: Недра, 1987. – 305 с.
42. Лурье, И. К. Теория и практика цифровой обработки изображений. Дистанционное зондирование и географические информационные системы: учеб. пособие / И. К. Лурье, А. Г. Косиков; под ред. А. М. Берлянта. – М.: Научный мир, 2003. – 168 с.
43. Медведев, Е. М. Интегральные навигационные комплексы GPS/IMU / Е. М. Медведев // Геопрофи. – 2005. – № 3. – С. 39–40.
44. Медведев, Е. М. Интегральные навигационные комплексы GPS/IMU / Е. М. Медведев // Геопрофи. – 2005. – № 4. – С. 39–40.
45. Медведев, Е. М. Лазерная локация Земли и леса: учеб. пособие / Е. М. Медведев, И. М. Данилин, С. Р. Мельников. – 2-е изд. // Лазерная локация Земли и леса [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://laserlocation.ru/index.htm>. – Дата доступа: 10.05.2012.
46. Медведев, Е. М. С лазерным сканированием на вечные времена / Е. М. Медведев, А. В. Григорьев // Геопрофи. – 2003. – № 1. – С. 5–10.

-
47. Медведев, Е. М. Цифровой аэрофотоаппарат Twin mapper / Е. М. Медведев // Геопрофи. – 2007. – № 3. – С. 22–25.
48. Міхнюк, Д. У. Аэракасмичныя метады ў лясной гаспадарцы: метадаў, указанні / Д. У. Міхнюк. – Мінск : БДТУ, 1998. – 65 с.
49. Москаленко, И. В. Некоторые аспекты современного состояния и основных тенденций рынка данных ДЗЗ / И. В. Москаленко // Геопрофи. – 2012. – № 2. – С. 8–10.
50. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
51. Никольский, Д. Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли / Д. Б. Никольский // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 7–11.
52. Никольский, Д. Б. Сравнительный обзор современных радиолокационных систем / Д. Б. Никольский // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 11–18.
53. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилов. – М.: КолосС, 2006. – 334 с.
54. Олейник, С. В. Цифровые камеры для аэрофотосъемки / С. В. Олейник, В. Б. Гайда // Геопрофи. – 2006. – № 4. – С. 45–51.
55. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов: ГКИНП 09-32-80: утв. Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР 22.04.1980; М-вом гражд. авиации 25.04.1980. – М.: Недра, 1982. – 15 с.
56. Печатников, М. Я. Аэросъемка с АФК VISIONMAP АЗ / М. Я. Печатников, Ю. Г. Райзман // Геопрофи. – 2009. – № 1. – С. 44–47.
57. Печатников, М. Я. Общее назначение и технические характеристики АФК VISIONMAP АЗ / М. Я. Печатников, Ю. Г. Райзман // Геопрофи. – 2008. – № 3. – С. 28–31.
58. Об утверждении Положения о порядке авиационной охраны лесов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 16 марта 2006 г., № 362 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2006. – № 5/22047.
59. Правила проведения лесоустройства лесного фонда: ТКП 377–2012 (02080). Введ. 01.07.2012. – Минск: УП «Белгипролес», 2012. – 112 с.
-

60. Программное обеспечение ESRI: взгляд вперед // ArcReview [Электронный ресурс]. – 2002. – Режим доступа: http://dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=2451&SECTION_ID=62. – Дата доступа: 10.05.2012.
61. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений: в 2 кн. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 256 с.
62. Развитие фотограмметрии в Швейцарии / А. Шапуи [и др.] // Геопрофи [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.geoprofi.ru/default.aspx?mode=binary&id=973>. – Дата доступа: 19.10.2012.
63. Руководство по аэрофотосъемочным работам (вместе с «Типовым положением об АФСЭ эксплуатационного предприятия гражданской авиации», «Типовым положением о группе технического контроля в аэрофотосъемочном производстве эксплуатационных предприятий гражданской авиации»): утв. МГА СССР 30.06.1986 N 45/И // Консультант Плюс [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/>. – Дата доступа: 25.10.2012.
64. Руководство по дешифрированию аэроснимков при топографической съемке и обновлении планов масштабов 1:2000 и 1:5000: ГКИНП-02-121-79: утв. Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР 02.08.1979 г. – М.: ЦНИИГАиК, 1980. – 132 с.
65. Савиных, В. П. Аэрокосмическая фотосъемка / В. П. Савиных, А. С. Кучко, А. Ф. Стеценко. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 1997. – 378 с.
66. Савиных, В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с.
67. Самойлович, Г. Г. Методика изучения насаждений для лесного дешифрирования аэроснимков и аэротаксации лесов / Г. Г. Самойлович // Серия брошюр по итогам науч.-иссл. работ и обмену передовым опытом. – Л.: ЛТА, 1956. – Вып. 3. – 54 с.
68. Самойлович, Г. Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве: учебник / Г. Г. Самойлович. – 2-е изд. – М.: Лесная пром-сть, 1964. – 489 с.
69. Самолет М101-Т продолжит картографические работы // АвиаПорт.ru [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа:

<http://www.aviaport.ru/news/2011/01/26/209728.html>. – Дата доступа: 11.10.2012.

70. Сердюков, В. М. Фотограмметрия: учеб. пособие / В. М. Сердюков. – М.: Высш. шк., 1983. – 351 с.

71. СканЭкс // Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), космические снимки [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.scanex.ru/>. – Дата доступа: 02.11.2012.

72. Скоробогатко, Н. Д. Строение дешифровочных показателей полога модальных еловых древостоев в равнинной части Прикамья и сосновых насаждений Курской области для автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков / Н. Д. Скоробогатко // Брянск. гос. инженерно-технологическая академия [Электронный ресурс]. – 2000. – Режим доступа: http://science-bsea.bgita.ru/2004/leskomp_2004/skorobogatko.htm. – Дата доступа: 03.11.2012.

73. Совзонд // Космические снимки [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sovzond.ru/satellites/>. – Дата доступа: 19.10.2012.

74. Создание и обновление цифровых топографических карт и планов. Описание технологии / под ред. А. А. Каримовой. – М.: Панорама, 1991–2012. – 115 с.

75. Сухих, В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник / В. И. Сухих. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.

76. Тетеря, А. Н. Опыт использования цифровой камеры 3-DAS-1 / А. Н. Тетеря // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 26–30.

77. Технические требования по составлению фотоабрисов и дешифрированию аэрофотоснимков. – Минск: ЛРУП «Белгослес», 2002.

78. Тимофеев, Ю. М. Основы теоретической атмосферной оптики: учеб.-метод. пособие / Ю. М. Тимофеев, А. В. Васильев. – СПб.: СПбГУ, 2007. – 152 с.

79. Токарева, О. С. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие / О. С. Токарева. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2012. – 148 с.

80. Токарева, О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие / О. С. Токарева. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 140 с.

81. Тяшкевич, И. А. Методы обработки данных дистанционного зондирования для создания тематических лесных карт / И. А. Тяшкевич, М. А. Ильючик, Е. В. Котова // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во. – Минск, 2003. – Вып. XI. – С. 150–154.
82. Установка гиросtabilизирующая [Электронный ресурс] // Белорусское оптико-механическое объединение. – 2012. – Режим доступа: http://www.belomo.by/rus/1_9raz.htm. – Дата доступа: 15.10.2012.
83. Федосимов, А. Н. Методические указания по выборочной и дешифровочной инвентаризации лесов / А. Н. Федосимов. – М.: ВНИИЛМ, 1986. – 120 с.
84. Фотограмметрия. Государственный стандарт Российской Федерации. Термины и определения: ГОСТ Р 51833-2001. – Введ. 10.12.2001. – М.: Госстандарт России, 2002. – 8 с.
85. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование в географические информационные системы / А. М. Чандра. – М.: Атмосфера, 2008. – 312 с.
86. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners / J. Hyypä [et al.] // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: http://vis-www.cs.umass.edu/Aerial-Image/Forestry/wiki/lib/exe/fetch.php?id=tree_segmentation%3Areading_list&cache=cache&media=tree_segmentation:lidarsegmentation.pdf. – Data of access: 19.11.2012.
87. Hildebrandt, G. Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie / G. Hildebrandt. – Heidelberg: Wichmann, 1996. – 676 s.
88. Klaus, J. The Z/I DMC II. Imaging Revolution / J. Klaus. – Neumann, 2011. – С. 97–101.
89. Leica Geosystems [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>. – Дата доступа: 02.12.2012.
90. YE, R. Waldsimulation auf der Basis automatischer Luftbildmessung und unter Kontrolle von GIS / R. YE. – Freiburg i. Br., 1995. – 110 s.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	6
1.1. Определение и общая схема дистанционного зондирования	6
1.2. Электромагнитный спектр	8
1.3. Влияние атмосферы	11
1.3.1. Рассеивание излучения атмосферой	13
1.3.2. Поглощение излучения в атмосфере	14
1.4. Отражательная способность объектов	16
1.5. Спектральные отражательные свойства природных объектов	20
1.5.1. Растительный покров	22
1.5.2. Почвы	27
1.5.3. Водные поверхности	29
1.6. Спектральные диапазоны, сроки и метеорологические условия съемки	30
2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	34
2.1. Виды съемки, классификация съемочных систем	34
2.2. Методы регистрации излучения	38
2.3. Съемка с воздушных летательных аппаратов	41
2.3.1. Носители аппаратуры	42
2.3.2. Аэросъемочное оборудование	44
2.3.3. Аэрофотоаппараты	47
2.3.4. Объектив	51
2.3.5. Светофильтры	53
2.3.6. Гиростабилизирующая платформа	54
2.3.7. Система управления полетом и съемкой	56
2.3.8. Фотоматериалы. Сенситометрические характеристики фотоматериалов	58
2.3.9. Цифровые камеры для аэрофотосъемки	63

2.3.10. Микроволновая и радиолокационная съемки	73
2.3.11. Лазерно-локационная съемка	79
2.4. Съемка с космических летательных аппаратов	88
2.4.1. Орбиты искусственных спутников Земли	89
2.4.2. Основные характеристики съемочной аппаратуры и цифровых снимков	91
2.4.3. Системы дистанционного зондирования Земли, датчики и сенсоры	95
3. ОСНОВЫ ФОТОГРАММЕТРИИ	103
3.1. Свойства одиночного снимка	104
3.1.1. Основные понятия о проекциях	104
3.1.2. Снимок как центральная проекция	106
3.1.3. Системы координат местности и снимка	111
3.1.4. Элементы ориентирования аэроснимка	113
3.1.5. Искажение изображения на снимке	115
3.1.6. Масштаб снимка	120
3.1.7. Смещения точек, вызванные наклоном снимка и рельефом местности	122
3.1.8. Преобразование плоских координат точки снимка в пространственные	125
3.1.9. Преобразование координат соответствующих точек местности и снимка	129
3.1.10. Преобразования между координатами соответствующих точек наклонного и горизонтального снимков	132
3.1.11. Определение элементов ориентирования снимка	132
3.2. Геометрические свойства пары аэроснимков	134
3.2.1. Стереоскопическое зрение, стереоскопический эффект	134
3.2.2. Условия и методы получения стереоскопического эффекта	139
3.2.3. Координаты и параллаксы соответственных точек стереопары	142
3.2.4. Элементы ориентирования стереопары	143
3.2.5. Связь координат точек местности с координатами точек на стереопаре	145
3.2.6. Взаимное ориентирование пары снимков	150

3.2.7. Фототриангуляция	152
3.2.8. Изготовление фотосхем, трансформирование снимков и изготовление фотопланов	156
3.2.9. Методы стереоскопических измерений по снимкам	159
3.3. Аналоговые и цифровые фотограмметрические системы	161
4. СТРОЕНИЕ ПОЛОГА ДРЕВОСТОЯ	167
4.1. Морфологические показатели полога древостоя	167
4.2. Изучение строения полога древостоя	176
4.3. Закономерности строения полога древостоя	181
4.4. Взаимосвязи между дешифровочными и таксационными показателями полога древостоя	184
5. ДЕШИФРИРОВАНИЕ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ	188
5.1. Понятие о дешифрировании	188
5.2. Прямые и косвенные дешифровочные признаки	190
5.2.1. Прямые дешифровочные признаки	190
5.2.2. Косвенные дешифровочные признаки	194
5.3. Ландшафтное (индикационное) дешифрирование	195
5.4. Особенности изображения крон деревьев и полога древостоя на снимках	198
5.5. Дешифровочные признаки основных лесообразующих пород	203
5.5.1. Сосна	204
5.5.2. Ель	207
5.5.3. Береза	210
5.5.4. Осина	213
5.5.5. Ольха черная	216
5.6. Дешифровочные признаки основных категорий нелесных и не покрытых лесом земель	217
5.7. Особенности дешифрирования основных лесообразующих пород на космических снимках высокого разрешения	223
5.8. Измерительное дешифрирование крон деревьев и полога древостоя	225
5.8.1. Рабочая область снимка	225
5.8.2. Приборы и инструменты для дешифрирования аналоговых фотоснимков	226

5.9. Дешифрирование основных таксационных показателей древостоев	232
5.10. Измерительное дешифрирование полога древостоя на цифровых снимках	243
6. ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ЛЕСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	247
6.1. Подготовительные работы	248
6.2. Аэросъемка лесов	250
6.3. Полевые работы	255
6.4. Инвентаризация лесов на основе рационального сочетания наземной таксации с камеральным дешифрированием снимков	260
6.5. Производство лесоустроительных планово-картографических материалов	265
6.5.1. Формирование планового геодезического обоснования	266
6.5.2. Основные этапы производства лесных планов и карт	268
7. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СНИМКОВ	274
7.1. Понятие о цифровых снимках	274
7.1.1. Формирование изображения	274
7.1.2. Формирование цвета	280
7.1.3. Форматы растровых данных	283
7.2. Предварительная обработка цифровых снимков	287
7.2.1. Основные этапы обработки снимков	287
7.2.2. Коррекция и восстановление снимков	289
7.2.3. Улучшение цифровых изображений	299
7.3. Классификация изображений	312
7.3.1. Неконтролируемая классификация	315
7.3.2. Контролируемая классификация	316
7.4. Выявление изменений по данным дистанционного зондирования	330
7.5. Программное обеспечение для автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования	333
ЛИТЕРАТУРА	337

Учебное издание

Толкач Игорь Владимирович

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ
В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Учебное пособие

Редактор *П. В. Васильцова*

Компьютерная верстка *Е. В. Ильченко*

Корректор *Т. Е. Самсанович*

Подписано в печать 02.07.2014. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 21,6. Уч.-изд. л. 20,0.
Тираж 200 экз. Заказ 266.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.

Переплетно-брошюровочные процессы произведены
в ОАО «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа».
Ул. Корженевского, 20, 220024, г. Минск. Заказ .