

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

О. Н. Писецкая, О. А. Куцаева

ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
в сфере высшего образования Республики Беларусь
по образованию в области сельского хозяйства
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений образования, обеспечивающих
получение общего высшего образования по специальности
6-05-0532-03 Землеустройство и кадастры*

Горки
Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия
2025

УДК 528.7:528.8(075.8)

ББК 26.12я73

ПЗ4

*Рекомендовано методической комиссией
землеустроительного факультета
22.12.2023 (протокол № 4)
и Научно-методическим советом
Белорусской государственной сельскохозяйственной академии
27.12.2023 (протокол № 4)*

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *О. Н. Писецкая*;
старший преподаватель *О. А. Куцаева*

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент *О. В. Кравченко*;
начальник отдела геоинформационных сервисов и аналитики
Государственного предприятия «БелПСХАГИ» *М. А. Гуцаки*

Писецкая, О. Н.

ПЗ4 Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли :
учебно-методическое пособие / О. Н. Писецкая, О. А. Куцаева. –
Горки : Беларус. гос. с.-х. акад., 2025. – 292 с.
ISBN 978-985-882-643-7.

В данном издании изложены теоретические сведения о выполнении аэро- и космосъемок, основ фотографии, съемочных систем, о метрических и информационных свойствах снимков и технологии их обработки, а также практического применения данных дистанционного зондирования Земли.

Для студентов учреждений образования, обеспечивающих получение общего высшего образования по специальности 6-05-0532-03 Землеустройство и кадастры.

УДК 528.7:528.8(075.8)

ББК 26.12я73

ISBN 978-985-882-643-7

© Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли – одна из профилирующих дисциплин в подготовке инженеров в области землеустройства и земельного кадастра.

В связи с широким развитием информационных и цифровых технологий происходит автоматизация процессов аэро- и космосъемок, обработки получаемых при этом снимков, составления планов и карт, разрабатываются и совершенствуются цифровые фотограмметрические методы. Поэтому встает острая проблема подготовки соответствующих специалистов и издания современной учебной литературы.

Целью учебной дисциплины «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли» является подготовка специалистов, способных на практике получать и использовать материалы дистанционного зондирования для информационного обеспечения землеустроительных и кадастровых работ, охраны земель и контроля за рациональным их использованием.

Учебно-методическое пособие содержит 11 разделов, которые охватывают всю тематику теоретического курса: от физических основ аэро- и космических съемок Земли до практического применения материалов дистанционного зондирования. Достаточно подробно рассматриваются вопросы, позволяющие приобрести навыки по изучению основ фотографии, съемочных систем, метрических и информационных свойств снимков, технологии их обработки. Ряд разделов посвящен вопросам практического применения данных дистанционного зондирования Земли при решении практических задач землеустроительного и кадастрового производства.

Рекомендовано учебно-методическим объединением в сфере высшего образования Республики Беларусь по образованию в области сельского хозяйства в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений образования, обеспечивающих получение общего высшего образования по специальности 6-05-0532-03 Землеустройство и кадастры.

При изучении данной учебной дисциплины студент должен приобрести не только теоретические и практические знания, умения и навыки по специальности, но и развить свой ценностно-личностный, духовный потенциал, сформировать качества патриота и гражданина, готового к активному участию в экономической, производственной, социально-культурной и общественной жизни страны.

1. ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ «ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ»

1.1. Понятие о дисциплине «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли». Задача курса, связь с другими дисциплинами.

1.2. Физическая сущность дистанционного зондирования. Активное зондирование. Пассивное зондирование.

1.3. Исторический обзор развития аэрофотогеодезических методов дистанционного зондирования.

1.1. Понятие о дисциплине «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли». Задача курса, связь с другими дисциплинами

Наряду с геодезическими методами определения координат точек земной поверхности, построения планов и карт, изучения формы и размеров Земли существует фотограмметрический метод.

Фотограмметрия – это дисциплина, изучающая формы и размеры объектов и определяющая положение объектов по их фотографическим изображениям.

Преимущество фотограмметрического метода определения координат точек определяется следующим:

– высокая производительность труда (применение современных технологий);

– высокая точность – определяется применением высокоточных измерительных приборов;

– информативность материалов съемки, детальность изображения;

– возможность изучения явлений в динамике;

– большой охват территории;

– возможность изучения явлений на расстоянии;

– культура производства.

Слово «фотограмметрия» в переводе с греческого означает:

фотос – свет;

грамма – запись;

метрео – мерить.

В дисциплине «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли» изучаются теория, средства получения и технология использования материалов аэрокосмических съемок для картографирования, междолевой и внутридольевой землеустройства, государственного учета земель и их охраны.

Задачей курса является формирование специалистов, способных на практике использовать результаты аэрокосмических съемок для информационного обеспечения землеустроительных и кадастровых работ, охраны земель и контроля за рациональным их использованием.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен:

знать: базовый понятийно-терминологический аппарат фотограмметрии и дистанционного зондирования Земли; физические основы аэро- и космосъемок; геометрические свойства аэрофотоснимка; принципы планово-высотной привязки аэрофотоснимков; основы трансформирования снимков и технологию изготовления фотосхем и фотопланов; дешифрирование материалов аэро- и космических съемок; теорию стереоскопической пары снимков и пространственной фототриангуляции; цифровые технологии обработки снимков; основы дистанционного зондирования Земли из космоса; практическое применение данных дистанционного зондирования Земли;

уметь: применять знания по выполнению аэрофотосъемочных работ; быть способным получать цифровые аэрофотоснимки и выполнять их фотограмметрическую обработку; выполнять дешифрирование снимков с использованием стереоскопических методов и использовать материалы дистанционного зондирования высокого разрешения для целей кадастра и землеустройства.

Таким образом, дисциплина «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли» тесно связана с такими дисциплинами, как «Геодезия», «Картография», «Геоинформационные системы и технологии», «Землеустройство», «Кадастр земель», «Мониторинг и охрана земель» и др.

1.2. Физическая сущность дистанционного зондирования.

Активное зондирование. Пассивное зондирование

В настоящее время в исследованиях земной поверхности специалисты землеустроительной отрасли широко используют аэрокосмические методы.

Под *аэрокосмическими методами* принято понимать совокупность методов исследования атмосферы, земной поверхности, океанов, верхнего слоя земной коры с воздушных и космических носителей путем дистанционной регистрации и последующего анализа идущего от Земли электромагнитного излучения.

Аэрокосмические методы обеспечивают определение точного географического положения изучаемых объектов и явлений и получение их качественных и количественных биогеофизических характеристик. При изучении земной поверхности и ее компонентов с помощью аэрокосмических методов пользователь черпает информацию о них из снимков, которые получают с помощью съемочной аппаратуры, удаленной на многие километры от изучаемого объекта. Эта особенность аэрокосмических методов позволяет отнести их к дистанционным.

Дистанционные методы понимают как любое изучение объекта, осуществляемое на расстоянии, без непосредственного с ним контакта. При аэрокосмических методах исследования информация об удаленном объекте (местности) передается с помощью электромагнитного излучения, которое характеризуется такими параметрами, как интенсивность, спектральный состав, поляризация и направление распространения.

Зарегистрированные физические параметры излучения, функционально зависящие от биогеографических характеристик, свойств, состояния и пространственного положения объекта исследования, позволяют изучать его косвенно. В этом заключается сущность дистанционных методов.

Ведущее место в аэрокосмических методах занимает изучение объекта по снимкам, поэтому главная их задача заключается в целенаправленном получении и обработке снимков.

Аэрокосмический снимок – наиболее универсальная форма регистрации излучения, несущего геoinформацию об исследуемом объекте, обеспечивает наибольшее число решаемых отраслевых задач.

Аэрокосмическое зондирование базируется на двух группах снимков:

- аэроснимков, получаемых с самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов;
- космических снимков, получаемых с орбитальных спутников.

В настоящее время в мировой практике используются и аэроснимки, и космические снимки, но доля космических снимков имеет устойчивую тенденцию к увеличению.

Аэрокосмический снимок – это двумерное изображение реальных объектов, которое получено по определенным геометрическим и радиометрическим законам путем дистанционной регистрации яркости объектов и предназначено для исследования видимых и скрытых объектов, явлений и процессов окружающего мира, а также для определения их пространственного положения.

1.3. Исторический обзор развития аэрофотогеодезических методов дистанционного зондирования

Дистанционные методы применялись с давних времен. Вначале использовались рисованные карты, которые фиксировали расположение изучаемых объектов.

Возможность применения фотосъемки для составления точных планов открылась со времени изображения фотографии во Франции в 1839 г. Даггером.

В 1851–1859 гг. француз Лосседа разработал графические приемы составления планов инженерных сооружений по фотоснимкам.

В России в 1886 г. впервые воздухоплаватель А. М. Коваленко получил снимки с воздушного шара, летевшего на высоте 800–1350 м.

Изобретение самолета открыло новые перспективы неограниченного развития аэрофотосъемки. Так, первая аэрофотосъемка с самолета в России была проведена в 1910 г. летчиком Гельгаром. В 1913 г. русский конструктор В. М. Поте создал полуавтоматический пленочный аэрофотоаппарат, применявшийся до 1930 г.

Но, несмотря на многие открытия и ценные предложения русских изобретателей в области фотограмметрии, Россия в то время как экономически отсталая страна, не имевшая своей развитой оптико-механической промышленности, оставалась глухой ко всему новому и прогрессивному. И только после Великой Октябрьской социалистической революции были созданы условия для совершенствования и развития аэрофотогеодезии.

В 1929–1930 гг. в Москве был организован Научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК).

В 1931 г. в системе Наркомзема РСФСР была создана «Сельхозаэросъемка», на которую возлагалось производство аэрофото- и геодезических работ для землеустройства колхозов и совхозов.

Большой вклад в развитие фотограмметрии, стереофотограмметрии, аэрофототопографии внесли видные ученые-геодезисты: Ф. В. Дробышев – разработал и создал ряд оригинальных стереоприборов для рисовки рельефа на аэроснимках; А. С. Скиридов – разработал способ пространственной фототриангуляции, что позволило осуществлять разреженную привязку аэроснимков; М. Д. Коншин, А. Н. Лобанов, Г. В. Романовский – разработали универсальные методы стереотопографической съемки с преобразованными связками проектирующих лучей; В. Ф. Дейнеко, Н. Я. Бобир, Н. Н. Веселовский – под их руководством выполнены аэрофотографические съемки в различных масштабах и на значительных территориях.

После Второй мировой войны метод дистанционного зондирования стали использовать для наблюдения за окружающей средой и оценки развития территорий, а также в гражданской картографии. В 60-х гг. XX в. с появлением космических ракет и спутников дистанционное зондирование вышло в космос. Новая эра дистанционного зондирования связана с пилотируемыми космическими полетами, разведывательными, метеорологическими и ресурсными спутниками. Возможности ДЗЗ в военной области значительно возросли после 1960 г. в результате запуска разведывательных спутников в рамках программ CORONA, ARGON и LANYARD, целью которых было получение фотоснимков с низких орбит. Вскоре были получены стереопары снимков с разрешением 2 м.

Первые спутники работали на орбите от семи до восьми дней, но уже следующие поколения этих аппаратов были способны поставлять данные в течение нескольких месяцев. В результате осуществления программ пилотируемых полетов, которые были начаты в США в 1961 г., человек впервые высадился на поверхность Луны (1969 г.). Следует отметить программу Меркури, в рамках которой были получены снимки Земли, систематический сбор данных дистанционного зондирования во время проекта Gemini (1965–1966 гг.), программу Apollo (1968–1975 гг.), в ходе которой велось дистанционное зондирование земной поверхности (ДЗЗ) и состоялась высадка человека на Луну, запуск космической станции Skylab (1973–1974 гг.), на которой проводились исследования земных ресурсов, полеты космических кораблей многообразного использования, которые начались в 1981 г., а также получение многозональных снимков с разрешением 100 м в видимом и близком инфракрасном диапазоне с использованием девяти спектральных каналов. В Советском Союзе, а затем в России космические программы развивались параллельно космическим программам США. Полет Юрия Гагарина 12 апреля 1961 г., ставший первым полетом человека в космос, запуски космических кораблей «Восток» (1961–1963 гг.), «Восход» (1964–1965 гг.) и «Союз», работа на орбите космических станций «Салют» (впервые 19 апреля 1971 г.).

В Республике Беларусь космическая программа стала активно развиваться с 2012 г., так как 17 июля на Байконуре была завершена сборка головной части ракеты для предстоящего запуска по программе «Союз/Канопус-В/БКА». 20 июля стало известно время запуска. Спутник планировалось запустить в 9 ч 41 мин по минскому времени. 22 июля примерно в 11 ч утра по минскому времени в ЦУП поступило первое сообщение от спутника.

БКА, БелКА (аббревиатура от белорус. *Беларускі касмічны апарат* – Белорусский космический аппарат) – второй белорусский космический

аппарат дистанционного зондирования Земли. Создан по заказу НАН Беларуси. Спутник примерно за 43 мин был выведен ракетой-носителем «Союз» и разгонным блоком «Фрегат» на орбиту высотой примерно в 500–520 км.

29 августа 2012 г. со спутника начали поступать первые космические снимки. Первоначальный срок эксплуатации составлял 5 лет и истекал в июле 2017 г. Однако, оценив техническое состояние и запасы горючего, завод-изготовитель продлил срок эксплуатации спутника. На 2017 г. государство является основным потребителем информации, при этом она передается государственным органам бесплатно: снимки с белорусского спутника используют пограничники, спасатели, землеустроители, лесники – всего более 20 предприятий и организаций, 11 республиканских органов государственного управления страны. С запуском спутника Республика Беларусь получила возможность реально участвовать в международных структурах и проектах. 1 ноября 2013 г. страну приняли в члены Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (на 2019 г. в этот список входило 37 стран мира).

Перспективы развития и технологии применения аэрокосмических съемок в землеустройстве и земельном кадастре.

В настоящее время активно развивается фотограмметрия на данных, получаемых с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА), что позволяет существенно снизить затраты на производство аэрофотосъемочных работ. Большое количество снимков, получаемых при такой съемке, для современного фотограмметрического программного обеспечения не представляет значительных проблем. Более того, развитие цифровых методов фотограмметрической обработки уже привело к появлению программ и программных комплексов, способных обрабатывать данные аэрофотосъемки в высокоавтоматизированном режиме при минимальном участии оператора.

К настоящему времени технология создания кадастровых планов и карт на основе аэрофотоснимков заключается в следующем: выполняется аэрофотосъемка, осуществляется привязка снимков, сгущение государственной опоры, трансформирование снимков, дешифрирование и составление плана по трансформированным снимкам. С развитием компьютерной техники возникает возможность разработки информационных систем, включающих электронные методы построения планов и карт. Достоинством электронных методов является их быстрота и четкость. При этом возможна следующая технология создания кадастровых планов и карт с применением ГИС-технологий: аэрофотосъемка, планово-высотная привязка снимков, сгущение геодезиче-

ской опоры, сканирование снимков, аналитическое трансформирование снимков (ортофототрансформирование), построение плана на основе ортофототрансформированных снимков. Отличительной особенностью данной технологии является ортофототрансформирование снимков.

Данные дистанционного зондирования Земли сейчас являются основным источником пространственных данных при создании и обновлении земельно-информационной системы районов, которая является одним из основополагающих слоев информационной платформы **Геоортал**.

Геоортал – картографический интернет-сервис, позволяющий пользователям получать, анализировать и изменять пространственные данные, хранимые на сервере. С развитием сети Интернет и веб-сервисов геоорталы стали закономерным шагом развития геоинформационных систем (ГИС). Основным преимуществом геоортала, как и любого интернет-приложения, является быстрый доступ к необходимым данным вне зависимости от компьютера или платформы, которая находится в распоряжении пользователя.

Геоортал земельно-информационной системы Республики Беларусь – интернет-ресурс, который является единой точкой доступа ко множеству информационных ресурсов с инструментами просмотра, поиска геопространственной информации, ее визуализации, загрузки, распространения и поиска геосервисов. Назначение геоортала ЗИС – полнофункциональная открытая геоинформационная система, предназначенная для хранения, обработки и предоставления пространственной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоортал земельно-информационной системы Республики Беларусь. – URL: https://www.giprozem.by/index.php?option=com_content&view=article&id=284&Itemid=295&lang=ru.
2. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
3. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
4. Назаров, А. С. Средства получения цифровых снимков и методы их фотограмметрической обработки / А. С. Назаров. – Минск: Учеб. центр повышения квалификации и переподготовки кадров землеустроительной и картографо-геодезической службы, 2009. – 263 с.
5. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ЗЕМЛИ

2.1. Понятие об аэро- и космических съемках Земли. Классификация аэрофотосъемок.

2.2. Схема получения видеоинформации при аэро- и космических съемках.

2.3. Электромагнитное излучение, используемое при аэро- и космических съемках земной поверхности.

2.4. Роль атмосферы при проведении аэро- и космических съемок.

2.5. Оптические свойства элементов ландшафта и их использование в съемочном процессе.

2.6. Аэро- и космические съемочные системы. Классификация съемочных систем.

2.7. Фотографические съемочные системы и их характеристики. Кадровые топографические аэрофотоаппараты. Аэрофотоаппараты, их устройство и типы.

2.8. Характеристики фотографического объектива.

2.9. Специальное аэросъемочное оборудование: радиовысотомер, статоскоп, гиросtabilизирующая установка.

2.10. Цифровые съемочные системы (ЦСС) и их классификация.

2.1. Понятие об аэро- и космических съемках Земли. Классификация аэрофотосъемок

Аэро- и космической съемкой называется совокупность работ по получению изображения местности с воздушных или космических летательных аппаратов. Космическая съемка выполняется с целью получения изображения Земли в целом, других планет и их спутников. В настоящее время космические съемки выполняются с целью получения специальной информации об изучаемых объектах и тематического картографирования.

В мировой практике получил широкое распространение термин «дистанционное зондирование». Под дистанционным зондированием понимается неконтактное изучение Земли (других планет), ее поверхности и недр, отдельных объектов и явлений путем регистрации и анализа их собственного или отраженного ими электромагнитного излучения. Регистрация может выполняться с помощью технических средств, установленных на аэро- и космических летательных аппаратах, а также на земной поверхности.

Съемка и получение дискретной информации называются *пассивными*, если при этом регистрируются естественные отраженные или излученные радиационные потоки.

Съемка называется *активной* в случае регистрации отражаемого объектами искусственного излучения.

Преобладают пассивные виды съемки и дискретного зондирования с использованием излучения солнца.

Поступивший на поверхность снимаемых объектов поток в результате сложного взаимодействия с веществом объекта претерпевает определенные преобразования, модулируется. При этом изменяется его спектральный состав, степень поляризации, энергия. Отразившаяся часть излучения несет информацию о вещественной сущности объекта и его состоянии, структуре поверхности и архитектонике сложных объектов в закодированном виде.

По пути от объекта к приемнику отраженное или собственное излучение оптического диапазона подвергается искажающим воздействиям атмосферы и ее включений, а излучения радиодиапазона – воздействиям радиопомех.

Приемниками излучения служат фотографические и другие светочувствительные слои, фотоэлектрические и термоэлектрические элементы, антенны.

В процессе регистрации информация искажается вследствие вибрации и поступательного движения носителя, аббераций объектива, светорассеяния в фотокамере, неравномерного распределения освещенности по полю кадра, непостоянства характеристик эмульсионного слоя (при фотографических съемках), нелинейности работы видеотракта и др.

2.2. Схема получения видеоинформации при аэро- и космических съемках

В съемочном процессе участвуют: источник электромагнитного излучения, снимаемый объект, передающая излучение среда, средства приема и регистрации излучения, средства бортовой обработки информации и передачи ее на пункты приема, носитель этих средств, средства приема и первичной обработки видеоинформации. Все перечисленные компоненты иногда включают в съемочную систему.

Первые три из перечисленных в начале подраздела компонента относят к условиям съемки. Состояние этих компонентов не зависит от человека – они выбираются при оптимизации съемочного процесса.

Съемки и соответственно съемочные системы можно классифицировать по разным признакам. Съемочные системы в зависимости от происхождения используемого для съемки излучения делят на **пассивные и активные**.

По используемому при съемке диапазону спектра электромагнитного излучения съемочные системы делят на **работающие в оптическом диапазоне и радиодиапазоне**. Классификация по этому признаку может быть продолжена с разделением спектра на более узкие интервалы. Например, первые можно разделить на работающие в видимой и инфракрасной областях спектра.

По способу приема и регистрации излучения различают фотографические съемочные системы, в которых пространственное распределение яркостей элементов снимаемого ландшафта записывается непосредственно на светочувствительных материалах, и оптико-электронные (нефотографические), в которых яркости измеряются с помощью фотоэлектрических, термоэлектрических и других приемников непосредственно на местности или через промежуточные регистрирующие устройства.

По способу формирования изображения съемочные системы делятся на **кадровые**, в которых изображение строится в виде двумерной непрерывной записи яркостей элементов ландшафта, и **сканирующие**, с помощью которых регистрация излучения выполняется последовательно по элементам и строкам (сканеры) или полосам (радиолокаторы бокового обзора, панорамные фотокамеры). **Кадровые системы** могут быть **фотографическими или телевизионными (ТВ)**.

В зависимости от числа одновременно используемых при съемке спектральных зон съемочные системы могут быть **однозональными и многозональными**. По способу доставки результатов съемки на пункты приема съемочные системы могут относиться к **оперативным**, когда получаемая видеoinформация может быть передана в реальном времени по радиоканалам, или **неоперативным**, продукция которых доставляется транспортными средствами.

2.3. Электромагнитное излучение, используемое при аэро- и космических съемках земной поверхности

В аэро- и космических съемках используется электромагнитное излучение с длиной волны λ от десятых долей микрометра до метра и более (рис. 2.1).

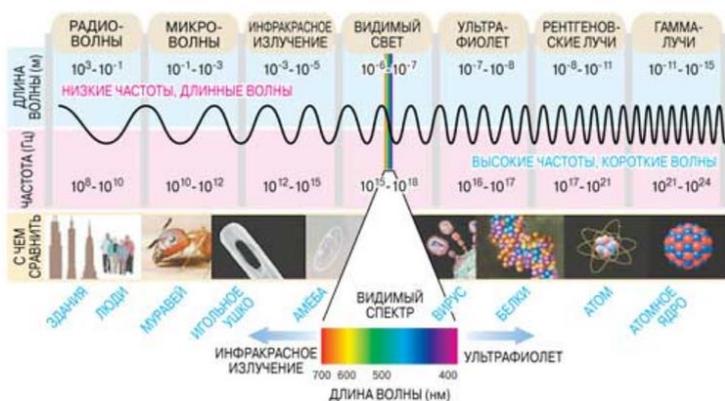


Рис. 2.1. Электромагнитное излучение

Спектр волн указанного интервала делят на оптический диапазон ($\lambda = 0,01 - 1000$ мкм) и ультракоротковолновый (УКВ) радиодиапазон ($\lambda > 1$ мм). В оптическом диапазоне выделяют ультрафиолетовую (УФ, $\lambda = 0,01 - 0,40$ мкм), видимую ($\lambda = 0,40 - 0,75$ мкм) и инфракрасную (ИК, $\lambda = 0,75 - 1000$ мкм) области спектра, которые в свою очередь делят на зоны. УКВ радиодиапазон включает миллиметровый, сантиметровый, дециметровый и метровый поддиапазоны (обычно называют диапазонами).

Основным источником излучения, используемого при пассивных съемках в оптическом диапазоне, является Солнце. На земную поверхность поступает радиация, непосредственно идущая от Солнца в виде пучка практически параллельных лучей, а также рассеяния в атмосфере и отражившаяся от Земли радиация. Отдельные участки поверхности подсвечиваются также излучением, отражающимся от возвышающихся объектов.

2.4. Роль атмосферы при проведении аэро- и космических съемок

Атмосфера значительно ослабляет и спектрально преобразует солнечное излучение вследствие рассеяния и поглощения молекулами газов, водяными парами, твердыми частицами. Ослабление интенсивности излучения взвешенными в атмосфере частицами зависит от оптической плотности атмосферы, состава взвесей и длины волны излучения.

Интенсивность рассеяния молекулами и частицами с диаметром, значительно меньшим длины волны излучения λ , обратно пропорциональна λ^4 (закон Релея). Поэтому наибольшему рассеянию подвергаются ультрафиолетовые, фиолетовые, синие и голубые лучи. Частички с диаметром, превышающим в несколько раз λ , вызывают ахроматическое рассеяние.

Основными поглотителями солнечного излучения являются водяной пар, двуокись водорода и озон. Поглощение избирательно. Для некоторых лучей атмосфера мало прозрачна или непрозрачна совсем.

Наименьшему искажению будут подвергаться отвесные лучи. По мере отклонения направления лучей от отвесного искажающее воздействие атмосферы возрастает.

Освещенность местности в основном зависит от высоты Солнца. С изменением h солнца изменяется также спектральный состав суммарного лучистого потока. Однако при h солнца $>15^\circ$ спектральный состав солнечного излучения остается практически постоянным. Это облегчает процесс моделирования солнечного излучения, исследование оптических свойств элементов ландшафта и определение постоянных для съемочного времени рекомендаций по выбору приемников излучения.

Прозрачность атмосферы для оптических и радиоволн. Существуют спектральные интервалы, в которых атмосфера прозрачна для прохождения лучей. Их называют «окнами прозрачности» (рис. 2.2), в них излучение практически не поглощается.

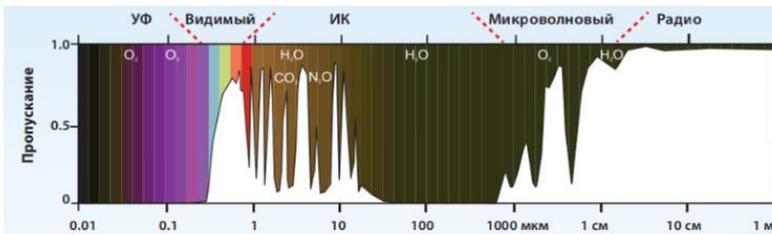


Рис. 2.2. Окна прозрачности для оптических и радиоволн

Съемки поверхности Земли необходимо выполнять в отдельных зонах спектра электромагнитного излучения, прозрачных для прохождения лучей.

Наиболее информативные для этого диапазоны электромагнитного излучения:

- оптический диапазон ($\lambda = 0,1-1000$ мкм);
- радиодиапазон (дл. волн эл. изл. >1 мм).

2.5. Оптические свойства элементов ландшафта и их использование в съемочном процессе

Возможность определения по снимкам положения и содержания элементов ландшафта, изучения их свойств решающим образом зависит от качества анализируемых снимков. Нужные элементы на фотографических и визуализированных снимках, полученных нефотографической съемочной системой, должны иметь достаточно четкие границы, отображаться по возможности собственным уровнем оптической плотности. Этого можно достичь путем оптимизации сочетания цветовой (нейтральной) чувствительности приемников электромагнитного излучения с оптическими особенностями элементов ландшафта. Это значит, что оптимизации должно предшествовать изучение оптических свойств этих элементов.

С оптической точки зрения ландшафт представляет собой совокупность элементов, различающихся по цвету и яркости. Цвет большинства искусственных и ряда природных объектов (почвы, горные породы) сравнительно устойчив во времени, изменяется в основном яркость с изменением условий освещения и влажности. Цвет и яркость растительности изменяются и во времени, и в пространстве. Они зависят от вида, возраста, физиологического состояния, качества питания и влагообеспечения и других факторов. Это усложняет изучение оптических свойств растений и приводит к непостоянству рекомендаций по выбору спектральной чувствительности приемника съемочной системы для разных моментов съемки. В съемочном процессе в качестве характеристик отражательной способности элементов ландшафта используют коэффициенты интегральной и спектральной яркости, интегральные и спектральные индикатрисы рассеяния (отражения).

Коэффициент интегральной (ахроматической) яркости, или просто коэффициент яркости (КЯ), – отношение интегральной яркости объекта в данном направлении B к яркости идеально рассеивающей, полностью отражающей радиацию поверхности в том же направлении наблюдения B° при одинаковых условиях их освещения:

$$r = B/B^\circ. \quad (2.1)$$

Аналогично отношение монохроматических яркостей даст коэффициент спектральной яркости (КСЯ):

$$r_{\lambda} = B_{\lambda} / B_{\lambda}^{\circ}. \quad (2.2)$$

КСЯ представляются в табличной форме и в графической (рис. 2.3).

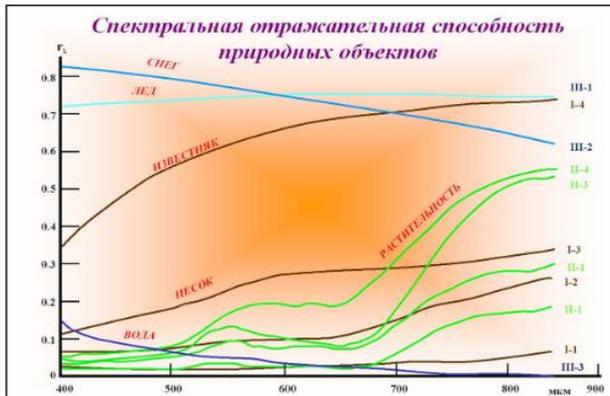


Рис. 2.3. Типичные графики КСЯ основных классов природных образований

Несмотря на огромное многообразие форм, кривые r_{λ} элементов ландшафта по их ходу в видимой области спектра можно разделить на три основных класса.

Первый класс включает кривые, постепенно поднимающиеся с увеличением длины волн. Они относятся к обнаженным почвам, горным породам, искусственным сооружениям, например, к дорогам, некоторым постройкам. Различаются эти кривые в основном уровнем и крутизной подъема.

Второй класс объединяет кривые, обладающие характерным возвышением в зоне около 0,55–0,56 мкм, понижением около 0,66 мкм и резким подъемом в начале инфракрасной области спектра. Они принадлежат растительным образованиям.

Третий класс объединяет кривые, плавно понижающиеся с увеличением длины волн. Они соответствуют поверхностям под водой, снегом, льдом.

Для решения фотометрических задач необходимо знать пространственное распределение отражаемого поверхностью данного объекта излучения. Оно характеризуется индикатрисой рассеяния, представ-

ляющей собой плавную поверхность, огибающую концы векторов r или r_λ . Индикатриса будет называться соответственно интегральной (ахроматической) или спектральной.

В практике чаще пользуются двумя сечениями индикатрисы: в плоскости главного вертикала Солнца и в перпендикулярной к ней плоскости, обозначая их азимутами A ($0-180^\circ$) и A ($90-270^\circ$) соответственно. Сечения представляются в виде таблиц или графиков (рис. 2.4).

Они в целях краткости часто называются индикатрисами.

По характеру пространственного рассеяния поверхности можно разделить на три основных типа:

гладкие, отражение от которых происходит зеркально по направлению от источника света (рис. 2.4, а). К ним относятся: спокойная водная поверхность, снег под настом и др.;

шероховатые, основная часть отражающейся энергии от которых направлена в сторону источника света (рис. 2.4, б). Ими являются вспаханные поверхности, крупноструктурный растительный покров и т. п.;

матовые, рассеивающие падающую на них лучистую энергию равномерно по всем направлениям (рис. 2.4, в). Такие поверхности называются ортотропными. В природе идеально ортотропные поверхности не встречаются; близки к ним ровные песчаные поверхности, плотный ровно постриженный газон и др.

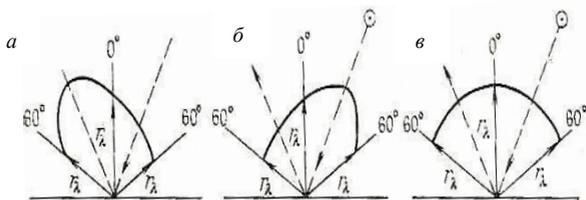


Рис. 2.4. Сечения индикатрис рассеяния основных типов поверхностей

Элементы ландшафта, в зависимости от постоянства формы индикатрис в разных зонах спектра, делят на *изохроматические* и *полихроматические*.

Первые отражают световые потоки постоянного спектрального состава во всех направлениях (обнаженные почвы и горные породы, сплошные одноярусные не цветущие растительные покровы и др.).

Спектральные индикатрисы рассеяния их имеют практически постоянную форму (рис. 2.5, а).

Световые потоки, отраженные в различных направлениях вторыми, не сохраняют постоянства спектрального состава (участки под несомкнутым или многоярусным растительным покровом с различными спектральными характеристиками растений в ярусах, участки под цветущей растительностью и т. п.). Непостоянство спектрального состава отраженного ими излучения обуславливается изменением доли участия в отражении слагающих поверхность объекта компонентов с изменением точки наблюдения. Спектральные индикатрисы рассеяния полихроматических элементов ландшафта не повторяют по форме одна другую, а иногда и пересекаются (рис. 2.5, б).

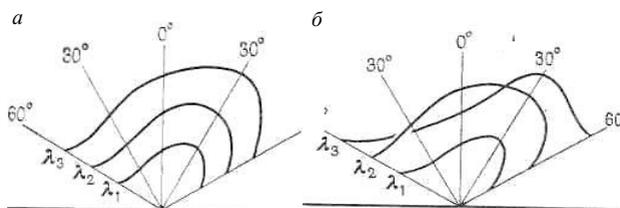


Рис. 2.5. Сечения индикатрис рассеяния изохроматических и полихроматических поверхностей

2.6. Аэро- и космические съемочные системы. Классификация съемочных систем

Аэрофотосъемка заключается в фотографировании с воздуха земной поверхности.

Аэрофотосъемка состоит из следующих процессов:

- 1) подготовительные работы (разработка технических условий и руководства полетом);
- 2) аэрофотографический – фотографирование местности по разработанным ранее техническим условиям;
- 3) фотолабораторный – проявление аэрофильмов, изготовление контактной печати с аэронегативов и фоторепродукций с накидного монтажа;
- 4) фотограмметрический – регистрация проявленных негативов, составление накидного монтажа и оценка качества выполненной аэрофотосъемки.

Результатом перечисленных работ являются аэронегативы, аэроснимки, а также зафиксированные в полете показания специальных приборов.

Аэронегативы (аэроснимки) – фотографические изображения местности, покрывающие без разрывов заданный участок земной поверхности – используются для последующего преобразования и создания по ним карт и планов.

Аэрофотосъемки классифицируются по следующим основным показателям:

- назначению;
- масштабу фотографирования;
- методу построения изображения;
- углу отклонения оптической оси АФА от вертикали – качеству и расположению фотоснимков.

1. **По назначению** аэрофотосъемку делят на *топографическую* и *специальную*. По материалам топографической аэрофотосъемки изготавливают топографические и специальные планы и карты, необходимые многим отраслям народного хозяйства, в том числе и органам землеустройства.

Специальные аэрофотосъемки выполняются в целях получения систематической или оперативной информации о земной поверхности, объектах, расположенных на ней, динамике различных явлений, процессов и т. д.

2. **По масштабу фотографирования** выделяют:

- крупномасштабную $1:m > 1:15\ 000$;
- среднемасштабную $1:16\ 000 < 1:m < 1:50\ 000$;
- мелкомасштабную $1:m < 1:51\ 000$;
- сверхмелкомасштабную *космическую* фотосъемку $1:m < 1:200\ 000$.

3. **По способу построения изображения** выделяют:

- кадровую;
- шелевую;
- панорамную аэрофотосъемку.

При кадровой фотосъемке земная поверхность изображается совокупностью отдельных фотоснимков, полученных по закону центральной проекции при одновременном проецировании участка земной поверхности на фотоматериал. Она выполняется кадровыми фотоаппаратами, к которым относятся рассмотренные нами топографические АФА.

При целевой фотосъемке изображаемая земная поверхность представляется непрерывной последовательностью изображений, полученных по закону центральной проекции при поступательном перемещении центра проекции относительно аэрофотопленки.

Для производства целевой фотосъемки используются целевые аэрофотоаппараты. Выполняться она может при любых скоростях носителя, на любых высотах фотографирования.

При панорамной фотосъемке изображаемая земная поверхность представляется суммой отдельных полос изображений, полученных по закону центральной проекции с помощью вращающегося вокруг центра проекции пучка проектирующих лучей.

Достоинством панорамной фотосъемки является высокая разрешающая способность изображения.

4. По углу отклонения оптической оси АФА от вертикали аэрофотосъемку делят:

- на плановую;
- перспективную.

При *плановой* фотосъемке угол отклонения оптической оси АФА от вертикали α_p не превышает 3° . Использование гиросtabilизирующих установок (приведение оптической оси АФА в отвесное положение с помощью гироскопов) обеспечивает получение фотоснимков с углами наклона α_p , не превышающими $20\text{--}40'$. Такой вид съемки условно называют гиросtabilизированной аэрофотосъемкой.

При *перспективной* фотосъемке углы наклона оптической оси задаются в зависимости от назначения съемки и числа одновременно используемых аэрофотоаппаратов.

Основным видом аэрофотосъемки для картографических целей является плановая или гиросtabilизированная аэрофотосъемка.

5. По количеству и расположению аэрофотоснимков различают:

- однокадровую;
- маршрутную;
- многомаршрутную аэрофотосъемки.

При *однокадровой* фотосъемке участок местности фотографируют на отдельные, не связанные друг с другом снимки. Ее выполняют в тех случаях, когда нет необходимости в стереоскопических наблюдениях и измерениях.

При *маршрутной* фотосъемке фотографируется полоса местности по направлению полета летательного аппарата.

В зависимости от фотографируемого объекта направление аэрофотосъемочного маршрута может быть прямолинейным, ломаным или криволинейным (например, при съемке рек, дорог, каналов).

Значительные по площади участки земной поверхности фотографируются с нескольких параллельных маршрутов, т. е. с использованием *многомаршрутной* аэрофотосъемки.

Для некоторых видов может производиться спаренная аэрофотосъемка двумя аэрофотоаппаратами или синхронно с двух самолетов.

2.7. Фотографические съемочные системы и их характеристики.

Кадровые топографические аэрофотоаппараты.

Аэрофотоаппараты, их устройство и типы

Основным средством, позволяющим получить аэрофотоснимки, является аэроаппарат.

Аэрофотоаппарат (АФА) – оптико-электромеханическое устройство, предназначенное для фотографирования земной поверхности с различных летательных аппаратов.

По целевому назначению АФА подразделяются на топографические и нетопографические.

Топографические АФА предназначены для аэрофотографирования в картографических и измерительных целях.

Для этого топографические АФА имеют конструкцию, обеспечивающую надежную его работу и сохранность оптических характеристик объектива в сложных условиях аэрофотосъемки (вибрации, толчки, перегрузки, колебания температуры и т. д.).

Нетопографические АФА не обеспечивают получение аэрофотоснимков с высокой геометрической точностью построения изображения. Поэтому аэрофотоснимки, полученные нетопографическими АФА, могут использоваться для обследования и изучения территории, рекогносцировочных и других работ, не требующих высокой точности линейных измерений.

Типы и конструкции современных АФА различны, но все они в своей основе имеют единую принципиальную схему.

Принципиальную схему любого АФА можно представить следующим образом (рис. 2.6):

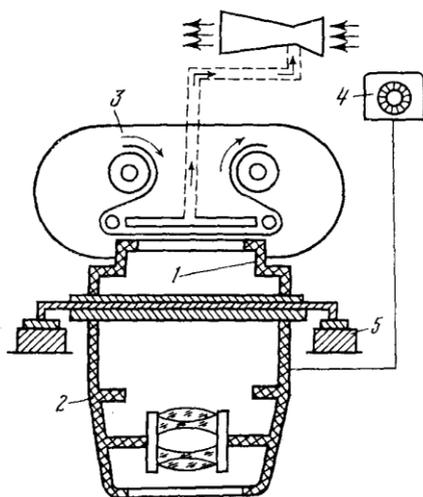


Рис. 2.6. Принципиальная схема АФА
 1 – объектив; 2 – фотокамера; 3 – входная кассета;
 4 – командное устройство; 5 – крепление

Фотокамера состоит из двух частей: внутреннего блока и наружного корпуса.

Внутренний блок называется оптической системой АФА, основным компонентом которой является аэрофотообъектив и аэрофотозатвор. Они располагаются в нижней части системы. Верхнее основание оптической системы является плоскостью прикладной рамки, к которой в момент фотографирования прижимается фотоматериал.

На прикладной рамке имеются зубчатые выступы, которые называются координатными метками. Они отпечатываются на аэрофото- снимке и служат для определения главной точки O . Размеры отверстия в прикладной рамке определяют размер аэроснимка.

Для выравнивания аэропленки в плоскости прикладной рамки имеется специальный прижимной стол и выравнивающее стекло.

Кроме координатных меток в плоскости прикладной рамки многих АФА имеются контрольные метки, которые фиксируются на площади снимка. Чаще всего это кресты, равномерно нанесенные на поверхности выравнивающего стекла через 1 или 2 см. Контрольные метки служат для учета искажений аэрофотоснимков.

Наружный корпус фотокамеры защищает внутренний блок от механических повреждений, температурных и прочих воздействий, служит для крепления аэрофотокамеры к аэрофотоустановке и является основанием для кассеты.

Кассетная часть, или **кассета**, – это светонепроницаемая коробка, предназначенная для размещения светочувствительного материала, его транспортирования со сматывающей катушки на наматывающую, отмеривания необходимого отрезка аэропленки и ее выравнивания перед экспонированием. Длина пленки – от 60 до 180 м.

Основной характеристикой механизма кассеты является цикл работы кассеты и его продолжительность, определяющая в целом цикл работы АФА. У современных АФА продолжительность цикла работы 1,5–2 с.

Кассетная часть чаще всего снимается, что позволяет перезаряжать АФА во время полета.

Для крепления аэрофотокамеры на летательном аппарате имеется аэрофотоустановка. Она предназначена также для ориентирования ее в пространстве в заданном положении и для ее виброизоляции.

С 1956 г. для устранения виброизоляции стали применять гиросtabilизирующую установку. Современные гиросtabilизирующие установки позволяют выдерживать в полете отвесное положение оптической оси АФА со средней квадратической погрешностью до 10'. Гиросtabilизация позволяет значительно упростить и облегчить последующую фотограмметрическую обработку аэрофотоснимков.

Командный прибор – это часть АФА, предназначенная для дистанционного автоматического управления и контроля за работой основных узлов и механизмов АФА, а также для синхронизации их работы с дополнительными частями АФА комплекта: статоскопом, радиовысотомером, радиотехнической станцией.

Для размещения АФА в летательном аппарате предназначен фотоотсек. Различают три вида фотоотсеков:

- не имеющие герметизации;
- с частичной герметизацией, в которых сохраняется постоянство температуры, а давление не регулируется;
- герметизированные.

Каждый фотоотсек имеет защитное стекло – иллюминатор.

Цикл работы АФА включает следующие операции:

- спуск затвора, во время которого происходит синхронное фотографирование местности, показаний радиовысотомера и статоскопа;

- ликвидация вакуума и подъем прижимной доски;
- перемотка аэрофотопленки;
- опускание прижимной доски и создание вакуума для выравнивания аэрофотопленки в плоскость;
- взвод затвора.

Современные АФА делятся по следующим признакам:

1) *по назначению* – на топографические и нетопографические;

2) *по степени автоматизации:*

- автоматические (по заданной программе);
- полуавтоматические (с участием оператора);
- неавтоматические;

3) *по количеству объективов* – однообъективные и многообъективные;

4) *по углу поля зрения и фокусному расстоянию* (рис. 2.7);

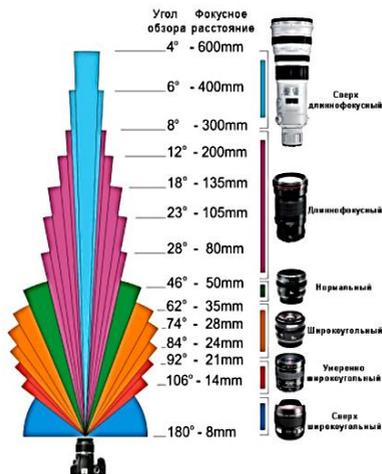


Рис. 2.7. Классификация объективов по фокусному расстоянию и углу поля зрения

5) *в зависимости от способа экспонирования аэропленки:*

- кадровые;
- панорамные;
- щелевые.

Современные аэрофотоаппараты имеют формат кадра 18×18, 23×23, 30×30 см и оснащены специальными устройствами, обеспечи-

вающими: аэрофотосъемку с заданным перекрытием; впечатывание в кадр сенситометрического клина и навигационных данных, автоматическое регулирование экспозиции; измерение контрастности изображения и компенсацию его сдвига, смену светофильтров, индикацию снимаемого ландшафта на мониторе.

Основные технические характеристики некоторых современных аэрофотоаппаратов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики АФА

Тип АФА	Фокусное расстояние, мм	Разрешающая способность линий/ мм	Остаточная дисторсия, мкм
АФА ТЭС-10М (РФ)	100	33	10
АФА ТЭ-50 (РФ)	500	35	10
АТ-204 (РБ)	150, 300	50–100	3
RC Wild/Leica	153	120	2
RC Wild/Leica	305	107	2

В конце XX в. начали появляться цифровые съемочные системы, основанные на использовании приборов с постоянной зарядной связью в виде матриц или линеек, помещаемых в плоскости прикладной рамки.

2.8. Характеристики фотографического объектива

Основным компонентом оптической системы АФА является аэрофотообъектив и аэрофотозатвор.

Аэрофотообъектив – представляет собой оптико-механическое устройство, оптическая часть которого предназначена для построения оптического изображения в аэрофотоаппарате.

Основными характеристиками аэрофотообъектива являются:

- фокусное расстояние;
- угол поля зрения;
- светораспределение по полю зрения;
- относительное отверстие;
- глубина рукоятки;
- фотограмметрическая дисторсия;
- разрешающая способность.

Фокусное расстояние – одна из величин, определяющих масштаб изображения. Обычно аэрофотообъективы фокусируются на бесконечность. Следовательно, расстояние от задней узловой точки аэрофотообъектива до фокальной плоскости АФА, в которой помещается све-

точувствительный слой, будет всегда постоянное. Это расстояние и называется фокусным расстоянием аэрофотоаппарата. Оно определяется с точностью до 0,01 мм и записывается в формуляр АФА и в аттестат аэрофотообъектива.

По величине фокусного расстояния топографические аэрофотообъективы делятся на короткофокусные (до 150 мм), среднефокусные (151–300 мм) и длиннофокусные (более 300 мм). С помощью фокусного расстояния аэрофотоаппарата f определяется масштаб аэрофотографирования, величина которого

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}, \quad (2.3)$$

где H – высота аэрофотографирования, т. е. высота полета летательного аппарата при выполнении фотографирования относительно средней плоскости фотографируемого участка.

Угол поля зрения. Если через объектив, сфокусированный на бесконечность, пропускать однородный пучок света, то в фокальной плоскости образуется круг, освещенность которого уменьшается от центра к краям.

Центральная часть этого круга, в которой размещается прикладная рамка аэрофотоаппарата, называется полем зрения, а угол 2β , образованный лучами, проведенными из задней угловой точки объектива S на углы прикладной рамки, называется углом поля зрения АФА (рис. 2.8).

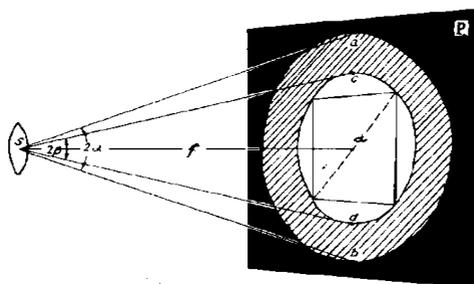


Рис. 2.8. Поле зрения и поле изображения:
 S – центр объектива; f – фокусное расстояние объектива;
 2α – угол зрения; 2β – угол изображения;
 ab – поле зрения; cd – поле изображения

По величине угла поля зрения аэрофотоаппараты условно подразделяются на узкоугольные (менее 15°), нормоугольные ($15-60^\circ$) и широкоугольные (более 60°).

Из рис. 2.8 видно, что

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{d}{2f} = \frac{l}{f\sqrt{2}}, \quad (2.4)$$

где d – диагональ кадра;

l – сторона квадратного кадра.

В широкоугольных АФА происходит значительное падение освещенности плоскости кадра на краях. Для выравнивания освещенности аэрофотообъективы широкоугольных АФА снабжаются оттенителями, которые представляют собой стеклянные пластинки с нанесенными на них мелкими частицами металла, плотность которых постепенно уменьшается к краям.

Диафрагма. В объективе размещается диафрагма, представляющая собой непрозрачный экран с круглым отверстием. С помощью диафрагмы изменяется диаметр пучка световых лучей, проходящих через объектив.

Диафрагмы (рис. 2.9) располагаются перпендикулярно к оптической оси, а их центры совпадают с оптической осью объектива. Диафрагмы могут быть различных конструкций.

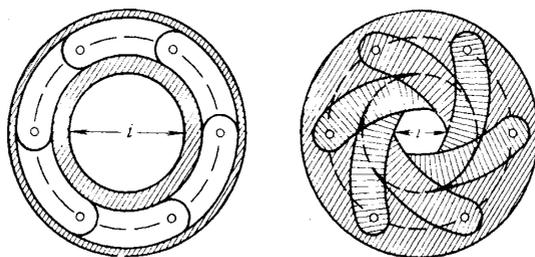


Рис. 2.9. Ирисовая диафрагма

В топографических АФА применяются преимущественно ирисовые диафрагмы, состоящие из нескольких лепестков. Эти лепестки, поворачиваясь вокруг своей оси, изменяют диаметр действующего отверстия объектива l (под которым понимают диаметр параллельного пуч-

ка лучей, проходящего через объектив от точечного источника света, расположенного в главном фокусе).

Относительным отверстием объектива называется отношение диаметра действующего отверстия i к фокусному расстоянию объектива f .

От величины $\frac{1}{K} = \frac{i}{f}$ действующего отверстия объектива зависит яр-

кость получаемого оптического изображения и глубина резкости. На оправе объектива нанесена шкала, на которой указываются числа $K = f/i$, т. е. величины обратные относительному отверстию, начиная с числа, соответствующего полному открытию диафрагмы: 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32.

Глубина резкости объектива – это расстояние вдоль оптической оси, в пределах которого все объекты изображаются в фокальной плоскости достаточно резко (рис. 2.10).

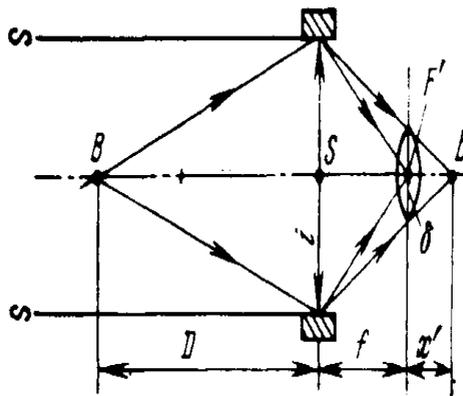


Рис. 2.10. Глубина резкости объектива

Степень нерезкости определяется диаметром кружка нерезкости δ . При визуальной оценке фотоизображения величина δ допускается не более 0,1 мм. На аэрофотоснимках она должна быть значительно меньше. Желательно, чтобы $\delta \leq 0,002 \div 0,005$ мм (допустимый кружок нерезкости).

Точка B , находящаяся на конечном расстоянии, изобразится в виде точки и только на расстоянии $(f + x')$, а в фокальной плоскости она изобразится в виде кружка нерезкости диаметром δ .

$$\frac{\delta}{i} = \frac{x'}{f + x'}, \quad x' = \frac{\delta f}{i - \delta}, \quad D = \frac{f^2}{k\delta} - \text{гиперфокальное расстояние.}$$

Фотограмметрическая дисторсия. Важной характеристикой качества объективов топографических АФА является дисторсия – это искажение изображения, построенного объективом, приводящее к нарушению подобия изображения предмету. Оно вызывается неравномерным радиальным смещением лучей, что приводит к радиальному смещению точек изображения. Схема образования дисторсии представлена на рис. 2.11.

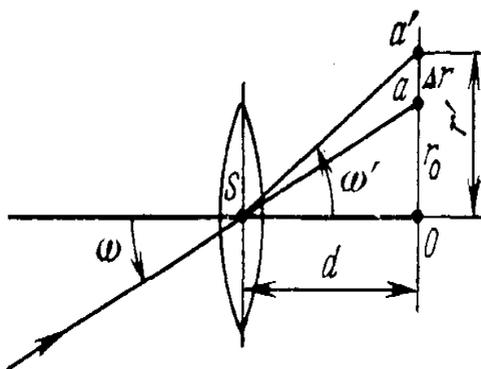


Рис. 2.11. Схема образования дисторсии

Луч, падающий на объектив под углом w к главной оптической оси, выходит из него под углом w' . Вследствие этого точка a изобразится в точке a' . Смещение Δr можно определить по формуле

$$\Delta r = r' - r_0 = dtg w' - dtg w = dtg w \left(\frac{tg w'}{tg w} - 1 \right). \quad (2.5)$$

Смещение Δr , рассчитанное по формуле, называется оптической дисторсией. Если вместо d в формулу подставить f , действительно определяющее масштаб изображения при аэро съемке, то смещение Δr будет называться фотограмметрической дисторсией.

Если отношение $tg w' / tg w$ постоянно для всего поля изображения, то смещение точек не нарушит подобия, а отразится только на мас-

штабе. В противном случае подобие нарушается, и при $\text{tg } w' / \text{tg } w > 1$ дисторсия положительная, а при $\text{tg } w' / \text{tg } w < 1$ – отрицательная. Для устранения дисторсии изготавливают симметричные объективы с диафрагмой посередине.

Объективы, у которых исправлена дисторсия в пределах всего поля зрения, называют фотоскопическими. У аэрофотообъективов дисторсия полностью не устраняется, а лишь сводится к минимуму и допускается в пределах 0,005–0,002 мм.

Разрешающая способность – это способность объектива раздельно изображать близкие мелкие детали объектива.

За разрешающую способность R принимается максимальное число штрихов равной толщины, которые можно различать раздельно на протяжении 1 мм оптического изображения. Если через d обозначить толщину такой линии, то разрешающая способность R выразится формулой

$$R = \frac{1}{2d} . \quad (2.6)$$

Для определения разрешающей способности объектива применяют специальные таблицы – миры, представляющие собой совокупность групп линий различного направления, разделенных равными с ними по величине белыми промежутками. Получив с помощью исследуемого объектива оптическое изображение миры, рассматривают его в микроскоп и определяют максимальное число линий, видимых раздельно на одном погонном миллиметре изображения.

Разрешающая способность объектива на всем поле неодинакова: она наибольшая в центральной части и снижается к краям поля. Разрешающая способность имеет очень важное значение в аэро съемке, так как от нее зависит степень получаемой детальности фотографического изображения местности.

Аэрофотозатвор представляет собой устройство для пропускания в течение заданного промежутка времени света от объекта фотографирования к светочувствительному слою. Этот промежуток времени называется выдержкой. Выдержки у аэрофотозатворов изменяются в интервале от 1/40 до 1/1000 с и менее. По способу открывания светового отверстия аэрофотозатворы делятся на центральные, жалюзи и шторно-щелевые. Чаще всего они помещаются в междулинзовом пространстве объектива.

2.9. Специальное аэросъемочное оборудование: радиовысотомер, статоскоп, гиросtabilизирующая установка

При топографической аэрофотосъемке кроме аэрофотоаппарата на самолете устанавливают дополнительное оборудование, обеспечивающее стабилизацию съемочной камеры, контроль высоты, скорости, прямолинейности полета, интервала между экспозициями, захода на очередной съемочный маршрут, а также определение данных для последующей фотограмметрической обработки. С этой целью на борту самолета устанавливают статоскоп, радиовысотомер, гиросtabilизирующую установку.

Радиовысотомер. С помощью радиовысотометров определяют расстояния от самолета до ближайшей точки земной поверхности в момент фотографирования. Типы: РВ-10, РВ-17, РВТД.

Определение высоты фотографирования с помощью радиовысотомера основано на измерении времени t прохождения прямого радиосигнала от передающей антенны до земли и отраженного от земли до принимаемой антенны. Поэтому расстояние D до ближайшей точки земной поверхности

$$D = c \cdot t / 2, \quad (2.7)$$

где c – скорость распространения радиоволн 300 000 км/с.

Время t фиксируется в момент открытия затвора АФА на экране электроннолучевой трубки в виде круговой развертки, шкала которой оцифрована в метрах. Показания радиовысотомера фотографируются фоторегистратором. Схема работы радиовысотомера (рис. 2.12) приведена далее.

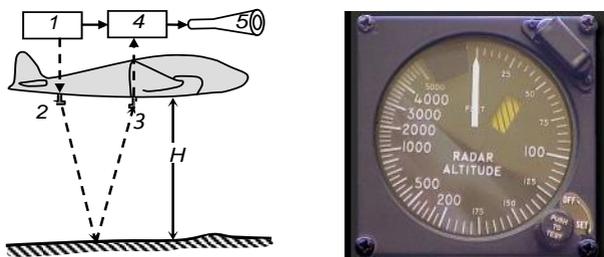


Рис. 2.12. Схема работы радиовысотомера:

- 1 – передатчик; 2 – передающая антенна; 3 – приемная антенна;
4 – приемник; 5 – индикатор

Точность определения высоты полета H радиовысотомером типа РВТД – 1,5 м в равнинной и холмистой местности; 2 м – в горной местности.

Статоскоп предназначен для определения разности высот фотографирования при аэрофотосъемке. Он является жидкостным дифференциальным барометром. В манометрической трубке статоскопа находится жидкость, обладающая низкой температурой замерзания. Один конец трубки соединен с баллоном, а другой – открыт.

Если клапан открыт, жидкость в коленах трубки находится на одном уровне. При включении статоскопа клапан закрывается, а в баллоне сохраняется давление, соответствующее высоте полета в момент закрывания (рис. 2.13).



Рис. 2.13. Схема статоскопа: 1 – манометрическая трубка; 2 – баллон; 3 – клапан

При измерении высоты изменяется внешнее давление. Поэтому жидкость в колене статоскопа займет новое положение, при котором разность давлений воздуха в баллоне и атмосферного уравновесится весом столба жидкости в барометре. Разность уровней жидкости в коленах на момент фотографирования фиксируется специальной фотокамерой, а затем измеряется и переводится в разность высот фотографирования.

Современные статоскопы типа С-51 и С-51М являются автоматическими устройствами, обеспечивающими среднюю квадратическую погрешность определения разности высот фотографирования 1–1,5 м.

Гиросtabilизирующая установка (рис. 2.14) предназначена для стабилизации в полете положения съемочной камеры и уменьшения углов отклонения ее главной оптической оси от отвесной линии. В основе конструкции современных гироскопов лежит принцип волчка, стремящегося сохранить неизменным пространственное положение своей оси вращения при наклоне плоскости, на которой он установлен.



Рис. 2.14. Гиросtabilизирующая установка

В применяемых гиросtabilизирующих установках Н-55, ТАУ, ГУТ-9 и др. используют трехстепенные гироскопы.

2.10. Цифровые съемочные системы (ЦСС) и их классификация

В последнем десятилетии прошлого столетия появились опытные образцы аэросъемочных систем, в которых изображение формируется с помощью твердотельных светочувствительных элементов матричного или линейного типа.

Насыщение съемочной и вспомогательной аппаратуры электронной и микропроцессорной техникой превратило аэрокамеры в *съемочные системы*, которые выполняют информационное взаимодействие со всем комплексом оборудования, используемого при съемке и послеполетной обработке данных.

В первом случае результатом съемки являются цифровые кадровые снимки, а во втором – строки изображений, являющиеся результатом линейного сканирования, которые объединяются в изображения местности в результате соответствующих преобразований. В соответствии с этим сами камеры называют кадровыми и сканирующими.

Цифровые съемочные системы имеют малый вес, допускают использование для съемки легких летательных аппаратов, а их применение исключает необходимость фотохимической обработки полученных изображений местности и обеспечивает возможность:

- единовременной съемки в панхроматическом, красном, синем, зеленом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах;

- интерактивного управления процессом съемки в реальном времени, визуального контроля снимков и их предварительной обработки на борту самолета;

- получения снимков высокого качества за счет использования линейной передачи яркостей объектов, высокой фотометрической точности и широкого динамического диапазона;

- повышения надежности дешифрирования объектов и расширения диапазона масштабов создаваемых картографических материалов благодаря практически полному отсутствию шумов изображений.

Большинство цифровых аэрофотосъемочных камер имеет GPS/INS-поддержку, систему компенсации сдвига изображения FMC (Forward Motion Compensation), средства гиросtabilизации при съемке и др.

Однако внедрение в практику аэросъемочных и фотограмметрических работ новейших достижений науки и техники стремительно меняет ситуацию, и специалисты производства едва успевают полностью освоить одну технологию, как на смену ей идут другие, базирующиеся на совершенно иных принципах. Эксплуатация таких технологий в силу высочайшего интеллекта применяемых инструментальных и программных средств нередко не требует профессионализма исполнителей и снижает квалификационные требования к ним. Возникновению такой ситуации в значительной степени способствовало:

- появление цифровых крупноформатных фотограмметрических кадровых (DMC, UltraCam и др.) и сканирующих (3-DAS, ADS40 и др.) съемочных камер;

- развитие систем лазерной локации и внедрение их для получения точной цифровой модели рельефа и поверхности;

- появление и практическое использование методов прямого геопозиционирования на базе комплексов GPS/IMU, созданных на основе интеграции методов спутниковой и инерциальной навигации;

- ускоренное развитие цифровых компьютерных технологий и специального программного обеспечения, которые базируются на использовании новейших достижений в области обработки изображений, существенно повышают уровень автоматизации процессов фотограмметрической обработки снимков и изготовления составительских оригиналов.

Внедрение методов инерциальной и спутниковой навигации позволило отказаться от целого ряда одних вспомогательных приборов (статоскопа, радиовысотомера и др.), изменить функции других (гиросtabilизирующих установок), ввести третьи (инерциальные измерительные приборы, спутниковые приемники).

Цифровые съёмочные системы классифицируют:

- 1) *на кадровые съёмочные системы;*
- 2) *сканирующие съёмочные системы.*

Формирование изображения в цифровых съёмочных системах.

Цифровой снимок. Визуализации цветного изображения предшествуют некоторые операции, состав которых зависит от способа выделения его цветовых компонентов: с помощью светофильтров или расщепления светового потока на составляющие.

Электрические заряды, пропорциональные яркостям соответствующих им *элементов пространства объектов* и образовавшиеся при экспонировании светочувствительных датчиков, становятся *элементами изображений* только после их преобразования, размещения в определенном порядке (т. е. конструирования растра) и в процессе визуализации. Дальнейшая обработка полученного изображения требует установления правил определения положения его элементов, что предполагает введение растровой и физической координатных систем и порядка взаимных преобразований. Причем указанные операции выполняются для каждого диапазона электромагнитного излучения (панхроматического, зеленого, синего и др.), зарегистрированного датчиками.

Способы получения цветного снимка. Заряды потенциальных ям, преобразованные из аналоговой формы в цифровую форму, заносятся в накопители и представляются в виде упорядоченных одномерных (для панхроматического изображения) или многомерных (для мультиспектрального изображения) массивов. Эти массивы сигналов, интерпретирующих интегральные яркости соответствующих им элементов исходного объекта (или изображения) в том или ином диапазоне электромагнитного излучения, и являются растровой моделью объекта; при аэрофотосъемке чаще всего используются четыре диапазона, соответствующие панхроматической, синей, зеленой, красной и ближней инфракрасной зонам спектра.

Задачей формирования мультиспектрального снимка является создание многомерной матрицы, определяющей положение и яркости элементов изображения в том или ином диапазоне электромагнитного излучения. Число строк и столбцов многомерной матрицы и каждый ее элемент отождествляются с размерами ПЗС-матрицы и каждым ее светочувствительным элементом соответственно.

Ниже рассмотрены несколько способов формирования таких массивов применительно к диапазонам, соответствующим основным цветам: красному, синему и зеленому. Для этого используются несколько способов, различающихся исходными компонентами.

Получение цветного изображения путем цветodelения. Способы формирования цветных компонентов базируются на выделении компонентов цветовой палитры RGB с помощью светофильтров или иных приспособлений, и поэтому формирование цветного изображения сводится к их объединению.

Интерполяция яркостей соответствующих компонентов палитры RGB выполняется по их значениям для смежных пикселей, которые получены по схеме Байера или с частичным разделением цветов. В обоих случаях исходная матрица ПЗС-элементов содержит все необходимые данные, а интерполяция цветов сопровождается неизбежными потерями.

Расщепление светового потока по цветовым составляющим выполняется с помощью дихроичных призм, многослойных сенсоров или «цветных ПЗС-линеек». Во всех случаях речь идет о «прямой» регистрации цветов соответствующими ПЗС-элементами и отсутствии цветных потерь. Рассматриваемый способ используется в сканирующих аэрокамерах (ADS40/80, 3-DAS и др.), а полученные цветные изображения называются *истинными* (RGB-true).

Слияние изображений (технология pan-sharpening). Слияние изображений по технологии pan-sharpening выполняется с целью получения цветных или иных синтезированных снимков. Чаще всего для этой цели используются панхроматические изображения высокого разрешения и мультиспектральные изображения более низкого разрешения. При этом для объединения изображений, предварительно приведенных к единой координатной системе по общим (связующим) точкам, используются методы фильтрации, а для сохранения радиометрических составляющих двух изображений их пространственные разрешения должны различаться не более чем в два раза.

Глаз человека воспринимает окружающий мир с помощью цветочувствительных элементов, реагирующих лишь на основные цвета: красный (Red), зеленый (Green) и голубой или синий (Blue). Все остальные цвета воспринимаются в виде сочетания перечисленных цветов. Их наименования дали название цветовой палитре (RGB), а соответствующие им длины волн электромагнитного излучения определены Международной комиссией по освещению CIE (Commission Internationale de FEclairage, фр.) следующим образом: *Red* – 700,0 нм, *Green* – 546,1 нм, *Blue* – 435,8 нм.

Сущность технологии **pan-sharpening** заключается в следующем. Сначала многоспектральные изображения *R*, *G* и *B* низкого разреше-

ния преобразуют в избранное перцепционное цветовое пространство и заменяют один из вычисленных параметров его значением для исходного панхроматического изображения, затем выполняют обратное преобразование в пространство *RGB* с интерполяцией яркостей одним из рассмотренных ранее способов. В результате получают цветной снимок с пространственным разрешением, соответствующим панхроматическому изображению.

Имеется достаточно много методов реализации технологии *pan-sharpening*, наименования которых обычно соответствуют используемой цветовой модели.

Широко используется **преобразование Бровей** (*Brovey transform*), вейвлет-преобразования (*wavelet* – небольшая волна, англ.) путем многократной фильтрации изображений с выделением в них компонент разного масштаба и детальности с минимизацией цветовых искажений (ATWT-SDM, ATWT-CBD) и пр., выбор которых определяется характером исходных изображений. Так, методы PCA и HSV дают хорошие результаты на снимках без явного преобладания или отсутствия какого-либо цвета; метод *Brovey* близок к ним на снимках средней яркости, но отличается на затемненных или слишком ярких снимках.

Рассмотренные выше и целый ряд других методов слияния реализованы в программах обработки мультиспектральных изображений (например, ENVI); несколько меньший набор таких средств имеется в программном обеспечении цифровых фотограмметрических систем.

К недостаткам технологии *pan-sharpening* относится возможность несовмещения некоторых цветов. Это явление вызывается, как правило, погрешностями определения параметров преобразований соответствующих изображений, несовпадением времени их получения или различным положением центров проектирования.

Найденные тем или иным способом яркости каждой цветовой компоненты пикселей изображения заносятся в соответствующий элемент многомерной матрицы, которая на машиночитаемом носителе представляется в виде соответствующего файла того или иного растрового формата (*tiff*, *jpeg*, *bmp* и др.).

Кадровые съемочные системы.

Известно, что объем информации цифрового снимка, полученного путем сканирования аналогового аэронегатива формата 23×23 см с геометрическим разрешением не хуже 15 мкм, составляет 150–230 Мр. В то же время максимальный размер светочувствительных матриц КМОП или ПЗС редко превышает 20 Мр, поэтому конструирование

цифровых камер большого формата требует применения специальных приемов, обеспечивающих формирование единого выходного изображения с помощью нескольких матриц меньшего размера.

В связи с этим кадровые камеры малого формата нередко используют единственную матрицу (КМОП или ПЗС) соответствующего размера, а среднего и большого формата – несколько (от четырех до девяти) ПЗС-матриц и предполагают аналитическое формирование единого (синтезированного, композитного) выходного изображения (снимка) путем объединений нескольких изображений (рис. 2.15).

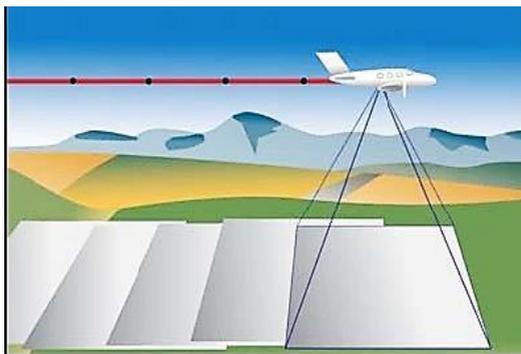


Рис. 2.15. Цифровые съемочные системы с использованием ПЗС-матриц (кадровые системы)

Таким образом, в любом случае результатом съемки с помощью кадровой аэрокамеры является снимок, построенный по законам центрального проектирования.

1. Малоформатные съемочные камеры. Малоформатные камеры, за редким исключением, представляют собой обычные, серийно выпускаемые промышленностью и относительно дешевые потребительские (бытовые) или профессиональные цифровые фотоаппараты, рассчитанные на широкий круг пользователей. Такие камеры имеют ограниченное применение для топографической аэрофотосъемки из-за малого формата, увеличения числа покрываемых участков снимков и большого объема фотограмметрических работ. Большой угол изображения, достигающий 90° , делает их перспективными для использования в ближней (наземной) фотограмметрии, архитектуре, автомобилестроении, археологии, судостроении, при съемке дорожных ситуаций и пр.

Малоформатные камеры практически не имеют приспособлений для аэрофотосъемки, а также устройств и принадлежностей для крепления на гиросtabilизирующей платформе, интерфейса для интеграции с навигационными комплексами и не всегда обеспечивают получение метрически точного изображения. Поэтому их применение требует выполнения калибровки с определением фокусного расстояния, положения главной точки и значений фотограмметрической дисторсии. Так, использование для топографической съемки камеры Hasselblad HI потребовало разработки аэрофотоустановки, обеспечивающей разворот аэрофотоаппарата по азимуту для компенсации угла сноса, и специального программного обеспечения для управления фотоаппаратом в полете. Имеется опыт применения малоформатных камер для топографической аэросъемки с беспилотных летательных аппаратов.

2. Аэрокамеры среднего формата. Цифровые аэрокамеры среднего формата полностью адаптированы к особенностям аэрофотосъемочных работ, могут быть интегрированы в современные системы планирования аэрофотосъемки, управления полетом, контроля качества съемки и характеризуются объемом ПЗС-матрицы в диапазоне от 16–20 Мр до 64 Мр. Наибольшую известность среди них имеют камеры DSS (Applanix), DigiCAM (IGJ-Systems), DiMAC (Dimac Systems) и A1C (Rollei Metric).

Аэрокамеры рассматриваемой группы обеспечивают возможность получения изображения в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра (при использовании светофильтров), могут быть оснащены средствами компенсации смаза изображения FMC, управления полетом (FCMS), прямого геопозиционирования GPS/IMU и пр. Некоторые из них формируют результирующее изображение из двух и более кадров.

3. Аэрокамеры большого формата. Аэрокамеры большого формата ориентированы, прежде всего, на решение топографических (картографических) задач, что достигается принудительной компенсацией сдвига изображения, а также реализацией комплекса мер по обеспечению стабильности метрологических характеристик прибора, в частности, элементов внутреннего ориентирования одиночных камер, температурного режима и пр. Их конструкции, кроме того, обеспечивают возможность синхронной съемки в панхроматическом (PAN), красном, зеленом, голубом (RGB) и ближнем инфракрасном (NIR) спектральных каналах.

В настоящее время на рынке аэрофотосъемочного оборудования имеются две полноформатные кадровые цифровые камеры UltraCam и DMC, построенные с использованием матричных светочувствительных датчиков ПЗС. В обоих случаях выходное синтезированное (композитное) изображение размером примерно 23×15 см формируется из нескольких кадров: четырех – в камере DMC и девяти – в камере UltraCAM. Названные обстоятельства объясняют и высокую стоимость полноформатных цифровых аэрокамер.

Сканирующие съемочные системы.

Сканирующие съемочные системы оснащены тремя ПЗС-линейками, обеспечивающими съемку по направлениям вперед, назад и в надир, а запись получаемых ими изображений узких полос местности (строк) осуществляется по мере перемещения носителя аппаратуры. Объединение отдельных строк, полученных ПЗС-линейками под одним углом, образует полосу съемки произвольной длины, называемую ковром; три ПЗС-линейки формируют три полосы (ковра) (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Цифровые съемочные системы с использованием ПЗС-линеек (сканирующие системы)

Эта концепция съемки была предложена доктором Отто Хофманом еще в 1970-е гг. и использовалась немецким аэрокосмическим центром (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt – DLR) в ряде разработок цифровых съемочных систем космического базирования.

Полученные с помощью линейного сканера изображения местности обладают весьма специфическими геометрическими и фотометрическими свойствами, а их обработка связана с использованием своеоб-

разной математической модели и специального программного обеспечения. Кроме того, получение таких изображений требует согласования навигационных параметров полета (скорости, высоты полета, пространственного разрешения снимков и пр.) с масштабом аэроснимка, а также применения оборудования высокой точности.

В настоящее время имеется целый ряд камер авиационного базирования с линейными датчиками изображения: HRSC-A, -AX и -AXW (DLR); ADS (Leica GeoSystems); JAS 150 (Jena Optronik); 3-DAS-1 и 3-OC-1 (Werhli and Associates, Геосистема) и др.

Основные принципы и особенности линейного сканирования.

Применение ПЗС-линейки предполагает использование принципа линейного сканирования (push broom), позволяющего получить изображение узкой полосы местности поперек направления маршрута. Совокупность таких полос, формируемых за счет движения носителя (самолета или спутника), создает полное изображение местности. Для создания стереоскопического изображения используются отдельные каналы для съемки местности под разными углами.

К основным особенностям сканерного изображения местности можно отнести следующие.

1. *Радиометрическое качество изображений.* Практически все кадровые камеры, построенные на ПЗС-матрицах, позволяют получить снимки с радиометрическим разрешением около 12 бит. Однако известно, что динамический диапазон ПЗС-линеек в 2–3 раза выше, чем ПЗС-матриц, что обеспечивает высокое фотометрическое качество снимков сканирующих аэрокамер и существенные преимущества их перед кадровыми.

Кроме того, в сканирующих камерах для получения цветного изображения могут использоваться несколько ПЗС-линеек, чувствительных к панхроматическому, синему, зеленому, красному и ближнему инфракрасному диапазонам с тем же геометрическим разрешением, что и в панхроматическом. Применение такой схемы получения цветных изображений позволяет избежать интерполяции цветов по схеме Байера и получить «истинные» цвета (True RGB) максимального разрешения.

2. *Геометрические свойства изображений.* Результаты линейного сканирования представляются в виде строк изображений, считываемых с частотой 200–1000 Гц. Каждая строка, как и снимок кадровой съемки, является результатом центрального проектирования и характеризуется своими элементами внешнего ориентирования.

Объединение полученных при линейном сканировании строк в единое изображение можно выполнить путем их трансформирования по элементам внешнего ориентирования. Однако вычисление угловых элементов внешнего ориентирования десятков и сотен тысяч строк по результатам построения сети фототриангуляции нереально, их линейная интерполяция из-за беспорядочности изменения под влиянием атмосферных условий невозможна, и единственной альтернативой является их определение средствами инерциальной навигации.

Поэтому обязательными условиями выполнения сканерной съемки является использование системы прямого геопозиционирования (iPS/IMU) и сети постоянных (временных) базовых станций GPS или метода позиционирования PPP с использованием точных эфемерид. Совместная обработка спутниковых и инерциальных данных позволяет воссоздать точную траекторию полета и определить элементы внешнего ориентирования строк изображений с частотой не реже 200 Гц. Таким образом, точность любой сканирующей камеры практически полностью зависит от параметров используемой системы определения пространственных координат. При линейном сканировании геометрические параметры формируемого изображения – пространственное разрешение (см) в направлении полета (L_x) и перпендикулярно к нему (L_y) – связаны со знаменателем масштаба аэрофотосъемки m , геометрическим разрешением ПЗС-линейки A (мкм), скоростью полета V (км/ч) и частотой считывания зарядов ПЗС-линейки S_{mc} . Очевидно, что для получения одинакового пространственного разрешения по направлению полета и перпендикулярно к нему необходимо, чтобы самолет летел со скоростью

$$V = 0,036 y - L_y x S_{пзс}. \quad (2.8)$$

В сканирующих системах отсутствует устройство компенсации сдвига изображения, так как его величина никак не может превышать одного пикселя, а время накопления заряда элементов ПЗС-линейки сопоставимо со временем пролета расстояния L_x .

3. *Обеспечение стереоскопических измерений.* При использовании кадровых камер возможность стереоскопических измерений, а следовательно, определения пространственного положения точек местности по их изображениям обеспечивается за счет продольного перекрытия снимков. Величина этого перекрытия всегда превышает 50 %, и, следовательно, любая точка местности изображается на снимках одного маршрута минимум два, а то и три раза.

Съемка местности сканирующей камерой осуществляется через три независимых канала: один из них направлен вниз (Nadir, N), второй отклонен от направления в надира на угол φ_1 вперед (Forward, F), а третий – на угол φ_2 назад (Backward, B). Поэтому каждая точка местности изображается трижды, а стереоскопические измерения могут быть выполнены по любой из трех стереопар (N-F, N-B или F-B).

Полное тройное перекрытие изображений открывает возможность выбора нужных снимков для обработки (что особенно важно при съемке застроенной территории) и существенного повышения уровня автоматизации работ при создании цифровой модели рельефа (ЦМР) за счет ее двукратного автоматического построения по изображениям разных каналов с последующей браковкой недостоверных измерений.

При выборе снимков для обработки стереопар учитывается, что углы φ_1 и φ_2 не равны, и в разных комбинациях изображений трех каналов точность измерений различна.

4. *Геометрическая точность.* В настоящее время имеются все основания полагать, что технология производства светочувствительных датчиков обеспечивает микронную точность их изготовления и гарантирует жесткую геометрическую связь между элементами изображения, а методы изготовления объективов с малой дисторсией и математический аппарат учета поправок за дисторсию также хорошо отработаны. Поэтому если геометрическая точность кадровых снимков всецело определяется погрешностями объединения их первичных изображений, то при использовании сканерных снимков она определяется погрешностями объединения строк изображения по данным интегрированных комплексов GPS/IMU. Сканирующие системы снабжаются объективами с фокусным расстоянием 60 и 100 мм, что ограничивает возможность их использования для крупномасштабной аэрофотосъемки застроенных территорий (крупнее 1:5000) из-за ограничений по высоте фотографирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

3. ПРОИЗВОДСТВО АЭРОФОТОСЪЕМКИ

3.1. Аэрофотосъемка. Носители съемочной аппаратуры.

3.2. Технические требования к топографической аэрофотосъемке: высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытие снимков, рабочая площадь снимка.

3.3. Составление проекта летно-съемочных работ.

3.1. Аэрофотосъемка. Носители съемочной аппаратуры

Аэрофотосъемка состоит из комплекса работ, включающего: подготовку, аэрофотографирование, первичную фотолабораторную и фотограмметрическую обработку материалов.

К носителям аэрофотосъемочной аппаратуры предъявляется ряд технических требований общего и специального характера. Общетеchnические требования определяют условия размещения аппаратуры, максимальную высоту полета (потолок), рабочую скорость, дальность и длительность полета, устойчивость во время съемки, наличие вибрации при работе винтомоторной группы и т. п. Специальные требования вытекают из условий эффективной эксплуатации носителя, простоты его оборудования (или переоборудования для целей аэрофотосъемки), а также эксплуатации в соответствующих физико-географических условиях.

Все это делает пригодными для аэрофотосъемки ряд самолетов, а для съемки малых участков – и вертолетов, мини-самолетов, подвесных аэростатов, радиоуправляемых авиамodelей и даже мотодельтопланов. Технические требования к ним и показатели для некоторых, широко применяемых на территории стран постсоветского пространства самолетов и вертолетов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Технические требования летательных аппаратов

Показатели	Технические требования	Характеристики носителей			
		Ан-30	Ан-2	Cessna-402	Ка-26
Максимальная высота, м ²	3500	6000	5000	8200	3000
Средняя скорость, км/ч	100–350	440	180	263	140
Дальность, км	1200	2000	1300	2358	400

Вертолет Ка-26 и самолет Ан-2 применяют для аэрофотосъемки небольших участков местности в крупных масштабах, самолеты Ил-14ФК – для аэрофотосъемки в средних и мелких масштабах. Самолет Cessna-402 является основным для получения снимков в Государственном предприятии «БелПСХАГИ» (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Cessna-402

Современные тенденции выполнения аэрофотосъемочных работ – использование беспилотных летательных аппаратов (далее – БЛА). Аэрофотосъемка с БЛА – это один из самых эффективных методов получения пространственных данных высочайшего качества с разрешением вплоть до 1 см. Аэрофотосъемка с БЛА – оптимальный вариант для оперативного получения пространственных данных. Беспилотные аппараты могут быть оснащены различным оборудованием для проведения изыскательских работ.

Беспилотные летательные аппараты (рис. 3.2) следует рассматривать в первую очередь по *типу летательного аппарата*:

- 1) вертолетного;
- 2) самолетного;
- 3) смешанного (конвертопланы).

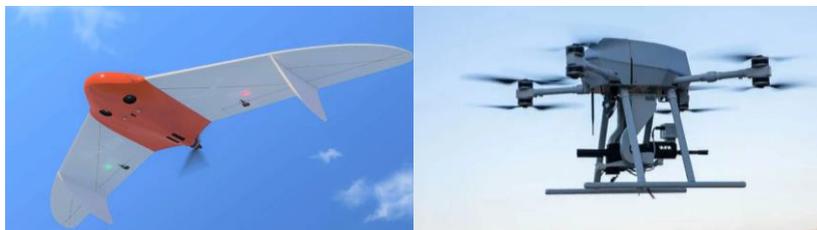


Рис. 3.2. Беспилотные летательные аппараты

В основном классификация БЛА основана на массе и дальности полетов (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Классификация беспилотных летательных аппаратов

Группа	Масса, кг	Рабочая высота, м	Скорость (узлы)
I	0–9	<360	45–50
II	9–25	<1050	<250
III	<	<5400	
IV	>	>5400	Любая
V		>5400	

Виды беспилотных летательных аппаратов по расположению роторов (рис. 3.3):

1. Бикоптеры и трикоптеры. Они имеют соответственно два и три мотора, которые вращаются в разных направлениях для компенсации крутящего момента. Самые дешевые и самые ненадежные конструкции, которые применяются только в игрушках.

2. Квадрокоптеры – четырехроторные беспилотники, способные нести более тяжелый груз. Основной недостаток такой же, как и у предыдущих, – отказ одного двигателя приводит к падению.

3. Гексакоптеры – аппараты с шестью двигателями – существенно надежнее и дороже. В случае поломки они способны совершить аварийное планирование на пяти двигателях, на них можно закреплять технику для аэросъемки.

4. Октокоптеры – могут полноценно летать с одним неисправным мотором из восьми. Это дорогие, но надежные аппараты, которым доверяют ценный груз, например, профессиональную видео- и фототехнику.

5. Многороторные мультикоптеры на базе более чем восьми моторов создаются для повышения надежности, маневренности, стабилизации.

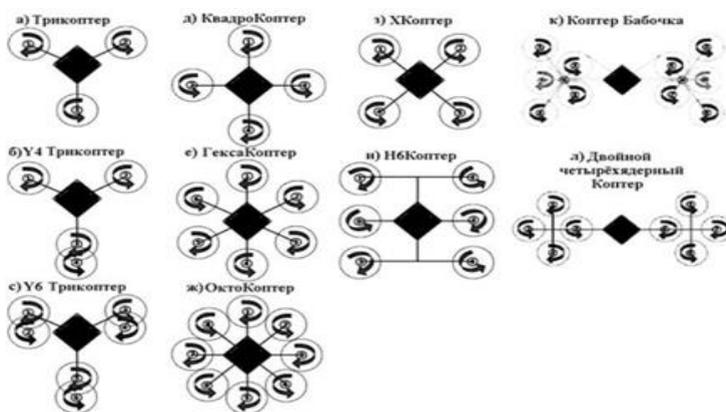


Рис. 3.3. Схема расположения роторов

Летательные аппараты, цена которых существенно выше по сравнению с рассмотренными ранее, предназначены для выполнения специальных задач.

3.2. Технические требования к топографической аэрофотосъемке: высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытие снимков, рабочая площадь снимка

При топографической аэрофотосъемке должен быть выполнен ряд требований, соблюдение которых обеспечивает последующую фотограмметрическую обработку аэрофотоснимков. Контроль за соблюде-

нием этих требований производится как в процессе аэрофотосъемки, так и по завершении, при оценке качества полученных материалов.

Высота фотографирования – это расстояние, измеряемое по отвесной линии от узловой точки объектива, установленного на самолете аэрофотоаппарата до некоторой поверхности (рис. 3.4). В зависимости от выбора этой поверхности различают:

- абсолютную высоту фотографирования H_0 над уровнем моря (плоскость А);
- относительную высоту фотографирования H_a над аэродромом (плоскость В);
- высоту фотографирования H над средней плоскостью съемочного участка (С);
- истинную высоту фотографирования H_i над какой-либо точкой местности (Д).

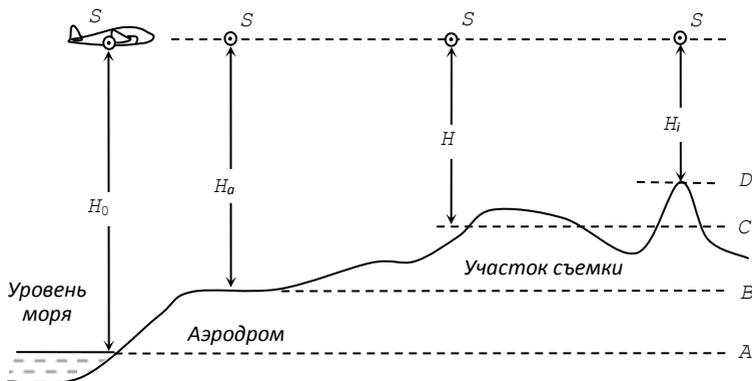


Рис. 3.4. Высоты фотографирования

Высота фотографирования над средней плоскостью съемочного участка определяется в период предполетной подготовки в зависимости от параметров аэрофотосъемки (f , m) и масштаба плана (M):

$$H = mf = K_r Mf, \quad (3.1)$$

где коэффициент увеличения снимка

$$K_r = m/M. \quad (3.2)$$

При аэрофотосъемке равнинных районов реальная высота фотографирования может отличаться от расчетной не более чем на 3 %. Фактическую высоту фотографирования определяют по показаниям радиовысотомера.

Перекрытие аэроснимков. При маршрутной и многомаршрутной аэрофотосъемке фотографируется часть территории, заснятая на предыдущем аэрофотоснимке, т. е. смежные снимки перекрываются между собой. Перекрытия аэроснимков, выражаемые в процентах от размера аэронегатива, обеспечивают возможность фотограмметрической обработки аэроснимков, и требование их соответствия расчетным является одним из основных.

Продольным перекрытием P_x называется перекрытие смежных снимков в направлении полета летательного аппарата (рис. 3.5).

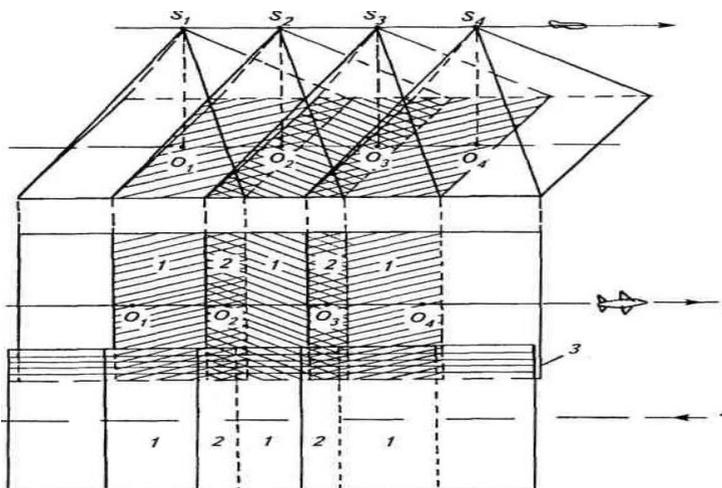


Рис. 3.5. Продольное перекрытие АФС:

1 – двойное продольное перекрытие; 2 – тройное продольное перекрытие

Оно рассчитывается по формуле

$$P_x = \frac{l_x}{l} \cdot 100 \%, \quad (3.3)$$

где l – размер снимка по направлению полета;

l_x – размер перекрытой части снимка в том же направлении.

Продольное перекрытие снимков зависит от превышения h точек местности над средней плоскостью съемочного участка и высоты фотографирования.

В среднем оно должно быть 60 %, при минимальном – 56 %, что обеспечивает наличие 12%-ной зоны тройного продольного перекрытия.

В некоторых случаях (например, при съемке населенных пунктов с многоэтажной застройкой) продольное перекрытие может устанавливаться равным 80–90 %. Это позволяет обрабатывать маршруты, в которых снимки взяты через один (при $P_x = 80$ %) или через два (при $P_x = 90$ %). В этом случае в маршруте будут получаться не только двойные продольные перекрытия, но и тройные перекрытия аэрофото-снимков. Зоны тройных продольных перекрытий используют для геометрической связи пар снимков.

Оси крайних маршрутов намечаются по границам съемочного участка. Маршруты прокладываются за границы съемочного участка на один, два или четыре базиса фотографирования.

Поперечное перекрытие. При выполнении аэрофотосъемки расстояние между смежными маршрутами B_y устанавливают такое, которое обеспечивает задаваемое поперечное перекрытие.

Поперечным называется перекрытие снимков двух смежных маршрутов P_y . Оно обычно задается равным 40 % и используется для размещения в нем опорных точек и точек связи смежных маршрутов.

В общем случае поперечное перекрытие определяется по формуле

$$P_y = \frac{l_y}{l} \cdot 100 \%, \quad (3.4)$$

где l_y – размер перекрывающейся части снимков в двух смежных маршрутах;

l – размер снимка.

Для измерения перекрытий изготавливается палетка, представляющая собой полосу бумаги, на которой отложена длина стороны снимка, разделенная на 10 частей, каждая из которых соответствует 10 %. Палетка накладывается на перекрывающиеся смежные снимки. Штрих палетки, соответствующий 100 %, совмещается с краем правого снимка, а по краю левого отсчитывается значение продольного перекрытия.

Аналогично измеряется поперечное перекрытие по снимкам смежных маршрутов.

Наличие продольного и поперечного перекрытий обуславливает целесообразность практического использования не всей площади, а только его центральной части, в которой величины искажений положения точек под влиянием факторов физического и геометрического характера заметно меньше, чем по краям. Эта часть аэроснимка, ограниченная средними линиями продольного и поперечного перекрытий, называется *рабочей площадью* (рис. 3.6).

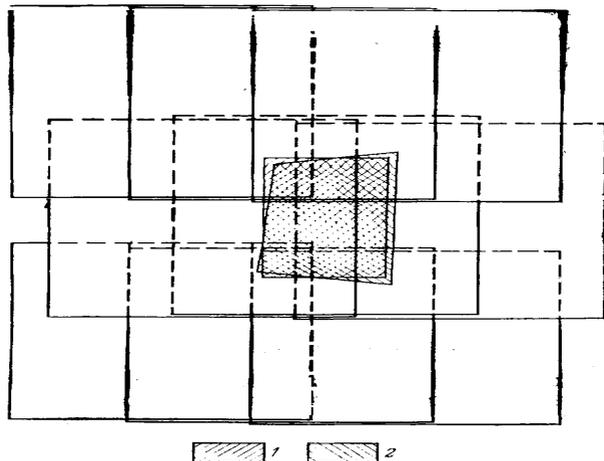


Рис. 3.6. Рабочая площадь АФС

Размеры сторон рабочей площади определяются по следующим формулам:

по оси абсцисс –

$$b_x = l(100 - P_x) / 100; \quad (3.5)$$

по оси ординат –

$$b_y = l(100 - P_y) / 100. \quad (3.6)$$

Такая рабочая площадь используется при теоретических расчетах и выводах.

Пользоваться ею при выполнении фотограмметрических работ неудобно, так как трудно обеспечить идентичность границ на смежных снимках.

Для этих целей на снимках намечается практическая рабочая площадь, под которой понимается площадь, ограниченная линиями, соединяющими четкие контурные точки, хорошо опознаваемые на всех перекрывающихся снимках и выбираемые вблизи углов теоретической рабочей площади снимка.

Прямолинейность маршрутов характеризуется отношением стрелы прогиба l (максимального удаления центра какого-либо снимка маршрута от линии, соединяющей первый и последний снимки) к длине маршрута L . Для этого на накидном монтаже соединяют прямой линией главные точки крайних аэроснимков маршрута и измеряют расстояние L между этими точками (рис. 3.7).

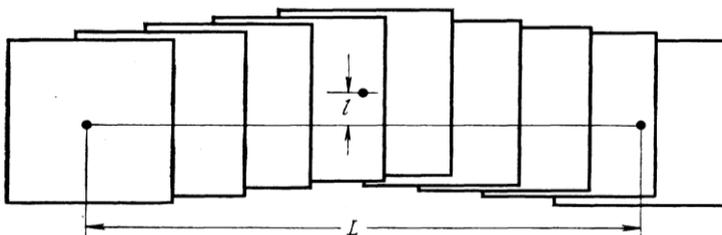


Рис. 3.7. Определение прямолинейности маршрута

Затем измеряют наибольшее уклонение l от оси маршрута главной точки одного из аэроснимков, расположенных внутри маршрута. Уклонение определяют по формуле

$$n = \frac{l}{L} \cdot 100 \% . \quad (3.7)$$

Величина уклонения не должна превышать 3 %.

Непараллельность стороны аэроснимка (базиса фотографирования) направлению полета затрудняет фотограмметрическую обработку снимков и не должна превышать 5–10 % (в зависимости от фокусного расстояния съёмочной камеры и высоты фотографирования).

Непараллельность базиса фотографирования стороне снимка («елочка») определяется на накидном монтаже путем измерения с по-

мощью транспортира углов ϵ , составленных продольными сторонами снимков с линиями, соединяющими их центры. Углы измеряют в трех местах только тех маршрутов, где глазомерно наблюдается «елочка». Максимальные углы непараллельности базиса фотографирования стороне снимка не должны превышать 5, 7, 10° при фактическом расстоянии АФА 100, 140, 200 мм (рис. 3.8).

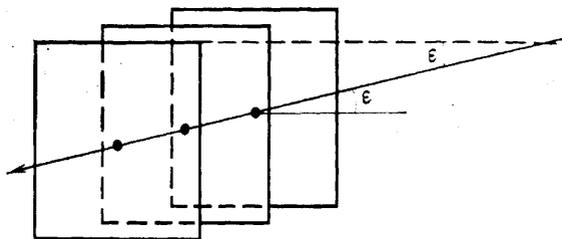


Рис. 3.8. Определение непараллельности базиса фотографирования

Угол наклона. Действующие нормативные документы, регламентирующие аэрофотосъемочные работы, устанавливают критерии по величине угла наклона, которая не должна превышать 1° при аэрофотосъемке с использованием средств стабилизации аэрофотоаппарата и 3° без них. Причем число снимков с максимальным углом наклона не должно превышать 10 % от их общего числа.

Ряд требований регламентирует метеорологические условия съемки, определяющие фотографическое качество снимков.

В частности, аэрофотосъемка должна выполняться при безоблачном небе, поскольку на снимках недопустимо изображение ни самих облаков, ни отбрасываемой ими тени. Отрицательное влияние на фотографическое качество оказывает также туман, дымка, избыточная влажность воздуха и пр. Все это меняет отражательную способность аэроландшафта, делает границы между объектами плохо различимыми и т. п. Нежелательно выполнять аэрофотосъемку ранней весной, поздней осенью, после распускания деревьями листвы и совершенно недопустимо зимой, при наличии снежного покрова. Аэрофотосъемка выполняется, как правило, при высоте Солнца над горизонтом не менее 20–25°, с обязательным использованием светофильтров.

3.3. Составление проекта летно-съёмочных работ

Летно-съёмочным работам предшествует расчет параметров аэрофотосъёмки, к числу которых относят площадь участка, высоту фотографирования, расстояния между центрами фотографирования (базис) и смежными маршрутами, интервал между экспозициями и др.

Прежде всего, исходя из назначения материалов аэрофотосъёмки, имеющегося оборудования, принятой технологии и пр., устанавливают масштаб создаваемого плана $1:M$, аэрофотосъёмки $1:m$, фокусное расстояние съёмочной камеры f , ее тип и формат кадра l . Все эти данные отражаются в техническом проекте на производство работ.

Высоту фотографирования H над средней плоскостью участка съёмки определяют по формуле

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \quad (3.8)$$

по фокусному расстоянию и масштабу аэрофотосъёмки.

Одновременно по топографической карте определяют максимальную (A_{\max}), минимальную (A_{\min}) отметки точек на участке работ (без учета отдельных вершин) и вычисляют абсолютную высоту фотографирования (высоту полета самолета) над уровнем моря:

$$H_{\text{абс}} = A_{\text{ср. пл.}} + H, \quad (3.9)$$

где отметка средней плоскости

$$A_{\text{ср. пл.}} = 0,5(A_{\max} + A_{\min}). \quad (3.10)$$

Расчетные перекрытия p и q смежных снимков, выражаемые в процентах от их размера, всегда задаются по отношению к средней плоскости съёмочного участка. Однако их фактические значения не должны быть меньше минимально допустимых и для других плоскостей, встречающихся на съёмочном участке (рис. 3.9, $P_1 < p$).

В связи с этим расчет продольного (p) и поперечного (q) перекрытий выполняют по эмпирическим формулам, учитывающим поправки к их оптимальным значениям (62 % и 32 %), зависящие от величины превышения h над средней плоскостью съёмочного участка и высоты H фотографирования над ней:

$$p = \left(62 + 50 \frac{h}{H}\right) \%, \quad q = \left(32 + 50 \frac{h}{H}\right) \%. \quad (3.11)$$

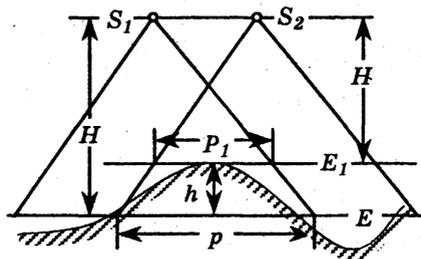


Рис. 3.9. Влияние рельефа местности на величину перекрытия

Базис фотографирования B_x (расстояние между центрами фотографирования) и расстояние между маршрутами B_y зависят от размера кадра фотокамеры l , величин продольного p , поперечного q перекрытий и знаменателя масштаба аэрофотосъемки m :

$$B_x = l \left(l - \frac{p}{100} \right) m, \quad B_y = l \left(l - \frac{q}{100} \right) m. \quad (3.12)$$

Интервал между экспозициями определяет продолжительность полета самолета со скоростью W (км/ч) между двумя последовательными экспозициями, т. е. время, в течение которого самолет преодолет расстояние B_x :

$$t'' = \frac{B_x}{W}. \quad (3.13)$$

Минимальную выдержку определяют исходя из того, что за время экспонирования t^S самолет, двигаясь со скоростью W , пролетает расстояние Wt^S . Так как в течение времени t^S объектив фотокамеры открыт, то изображение на аэроснимке окажется смазанным, причем величина смаза в масштабе аэроснимка составит Wt^S / m . Отсюда минимальное время экспонирования t^S , при котором величина смаза изображения не превысит δ мм в масштабе создаваемого плана. Переходя от масштаба снимка к масштабу плана в соответствии с формулой

$K_t = m/M$, потребуем, чтобы величина смаза не превышала значения $\delta_{\text{пред}}$:

$$t^s \leq \frac{\delta_{\text{пред}} m}{WK_t}. \quad (3.14)$$

Современная технология аэрофотосъемки предусматривает применение специального компенсатора сдвига изображения, что делает расчет минимальной выдержки неактуальным.

Число аэроснимков на участке определяют по простым формулам, связывающим размеры участка (L_x, L_y), базис фотографирования (B_x) и расстояние между маршрутами (B_y), причем для обеспечения сводок со смежными участками число маршрутов на участке и число снимков в маршруте увеличивают на 1 и на 3 соответственно

$$K_{\text{сн}} = \left(\frac{L_x}{B_x} + 2 \right) \cdot \left(\frac{L_y}{B_y} + 1 \right). \quad (3.15)$$

По завершении расчетов готовят полетную карту, масштаб которой в 10–20 раз мельче масштаба создаваемого плана. На эту карту наносят границы съемочного участка, оси маршрутов и ориентиры в начале и конце каждого из них.

Подготовительные работы завершаются установкой, проверкой основного и вспомогательного оборудования, подбором светофильтров и определением выдержки при фотосъемке. Важным их элементом является установка GPS-оборудования и определение положения антенны приемки относительно узловой точки объектива аэрокамеры.

При выполнении аэрофотосъемки с запада на восток и с востока на запад первый аэросъемочный маршрут прокладывают по северной границе съемочного участка, последний – по южной, а оси маршрутов продолжают за границы участка на полтора-два базиса, что обеспечивает последующую сводку результатов фотограмметрической обработки по границам съемочных участков.

Непосредственно аэрофотосъемка выполняется в соответствии с подготовленными расчетами и техническими условиями.

Во время полета к съемочному участку самолет набирает нужную высоту полета, по намеченным на полетной карте ориентирам выполняет заход в створ первого маршрута, после чего оператор включает аэрофотоаппарат за полтора-два базиса фотографирования до границы

съемки. С этого момента аэрофотоаппарат выполняет все операции автоматически, в том числе соблюдение заданной величины продольного перекрытия. Заметим, что оборудование самолета АН-30 и некоторых других позволяет автоматизировать как полет по маршруту, так и заход на следующий маршрут.

В момент срабатывания затвора съемочной камеры показания всех приборов и датчиков, определяющих положение гиросtabilизирующей платформы на определенные моменты времени, заносятся на магнитный носитель для последующего использования при расшифровке данных GPS-измерений. В конце маршрута на границе съемки с западом полтора-два базиса аэрофотоаппарат отключают и выполняют заход на очередной маршрут по ориентирам полетной карты. Так что если какой-то маршрут направлен, например, с запада на восток, то следующий за ним – с востока на запад, и это обстоятельство учитывают при фотограмметрической обработке снимков.

По завершении аэрофотосъемочных работ выполняют фотолабораторную обработку материалов съемки, их регистрацию, изготовление репродукций накидного монтажа и оценку качества лётно-съемочных работ по фотографическим, фотометрическим и фотограмметрическим показателям, а также расшифровку данных GPS-оборудования, вычисление координат центров фотографирования и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Системс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОФОТОСНИМКА. ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОГО СНИМКА

- 4.1. Центральная проекция как геометрическая основа аэрофотоснимка. Основные элементы центральной проекции.
- 4.2. Главная точка аэрофотоснимка, точка надира, точка нулевых искажений. Их положение в проекции и на аэрофотоснимке.
- 4.3. Перспектива точки и прямой на пространственном чертеже.
- 4.4. Теорема Шаля. Понятие об эпюрах.
- 4.5. Перспектива сетки квадратов на эпюре.
- 4.6. Системы координат, применяемые в фотограмметрии.
- 4.7. Элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка.
- 4.8. Связь координат соответствующих точек наклонного снимка и местности.
- 4.9. Зависимость между координатами точек наклонного и горизонтального снимков.
- 4.10. Масштаб изображения на аэрофотоснимке.
- 4.11. Главный, средний и частный масштабы аэрофотоснимка.
- 4.12. Смещение изображения контурной точки на аэрофотоснимке из-за влияния рельефа местности.
- 4.13. Смещение контурных точек на снимке за угол наклона.
- 4.14. Искажение изображения площадей на наклонном снимке.

4.1. Центральная проекция как геометрическая основа аэрофотоснимка. Основные элементы центральной проекции

Для решения многих задач, особенно в инженерном деле, широко используют изображения объектов, построенные тем или иным методом на плоскости или на поверхности. Построение изображения какого-либо предмета (объекта) на избранной поверхности по определенному закону называется *проектированием*, а его результат – *проекцией*. Естественными примерами проекции являются: картина, созданная по законам зрительного восприятия; фотографическое изображение, полученное в плоскости прикладной рамки съемочной камеры лучами, проходящими через объектив; изображение объекта на сетчатке глаза; топографическая карта и т. п.

При центральном проектировании проекция точки пространства находится как след сечения прямой, проходящей от нее через центр проекции, с поверхностью, на которую выполняется проектирование.

Центром проекции называется точка, через которую проходят все проектирующие лучи. Плоскость, на которой строится изображение объектов, называется **картинной**. Совокупность лучей, с помощью которых получено изображение в фокальной плоскости, называется **связкой**, или **пучком**.

На рис. 4.1 изображены точки местности A, B, C, O , центр проекции S и две плоскости: $P_{\text{нег}}$ и $P_{\text{поз}}$.

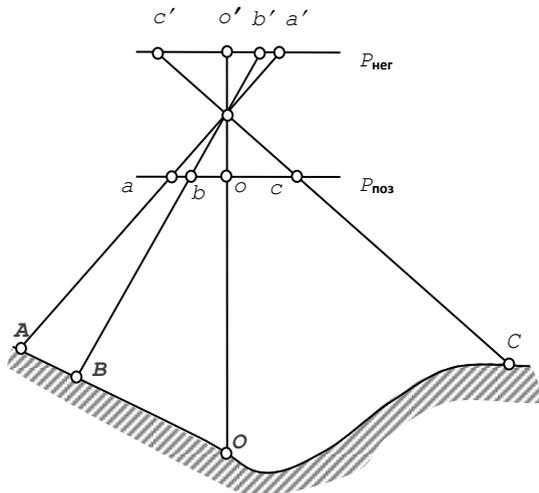


Рис. 4.1. Аэроснимок – центральная проекция

Плоскость $P_{\text{нег}}$, расположенная по одну сторону от центра проекции и местности, называется **негативной**, а плоскость $P_{\text{поз}}$, расположенная между центром проекции и местностью, – **позитивной**.

Изображения точек местности на плоскостях $P_{\text{нег}}$ и $P_{\text{поз}}$ получены путем центрального проектирования из центра проекции S прямолинейными проектирующими лучами AS, BS, CS и OS . Точки a, b, c, o и соответствующие им точки a', b', c', o' получены как следы пересечения проектирующих лучей с плоскостями $P_{\text{поз}}$ и $P_{\text{нег}}$ и являются центральными проекциями соответствующих точек местности. Результатом центрального проектирования местности является изображение, построенное фотообъективом: прямолинейные проектирующие лучи, исходящие от точек местности, проходят через центр проекции и строят изображение в фокальной плоскости.

Если удаления So' и So плоскостей P_{neg} и $P_{\text{поз}}$ от центра проекции одинаковы и равны фокусному расстоянию съемочной камеры f , то построенные на них изображения различаются только порядком размещения точек, взаимное расположение которых на плоскостях зависит от их расстояния до местности, т. е. от высоты фотографирования.

В последующем будем использовать преимущественно позитивные изображения, соответствующие контактным отпечаткам с аэронегативов. Такие изображения более четко отражают взаимное расположение объектов, их частей и полностью соответствуют местности.

Спроектируем на плоскость P точки A, B, O, C отвесными проектирующими лучами (рис. 4.2) и получим их ортогональные проекции a_0, b_0, o и c_0 . Заметим, что масштаб изображения 1:1, и перемещение плоскости P в положение P' не изменит ни масштаба, ни подобия объектов местности, т. е. изображения, представленные точками a_0, b_0, o, c_0 и a'_0, b'_0, o', c'_0 , тождественны.

Выберем центр проекции S и спроектируем те же точки на плоскости P и P' (рис. 4.2).

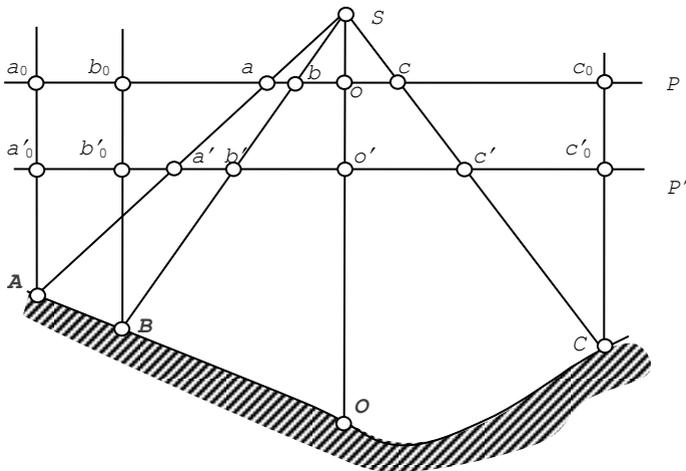


Рис. 4.2. Ортогональная и центральная проекции

Как легко видеть, полученные изображения, представленные точками a, b, c и a', b', c' соответственно, не являются тождественными, а их масштаб зависит от положения плоскости, на которую выполнено

проектирование. Такие изображения не являются планом местности и несут некоторые искажения геометрического характера, особенно если плоскости не горизонтальны.

Сопоставляя изображения, представленные точками на плоскостях P и P' , можно сделать вывод о том, что ортогональное проектирование есть частный случай центрального проектирования, когда центр проекции находится в бесконечности.

Построенные по законам центрального проектирования перспективные изображения обладают следующими очевидными свойствами:

1. Всякая точка, расположенная в пространстве объектов, изображается в картинной плоскости также точкой.

2. Всякая прямая, если она не проходит через центр проекции, изображается в картинной плоскости также прямой.

3. Точки пространства, расположенные в одной проектирующей плоскости и не лежащие на одной прямой, изображаются в картинной плоскости расположенными на одной прямой.

При изучении основных законов центрального проектирования применительно к фотограмметрии будут использоваться основные элементы центральной проекции (рис. 4.3):

E – *предметная плоскость*, содержащая проектируемые объекты (в фотограмметрии это горизонтальный участок земной поверхности);

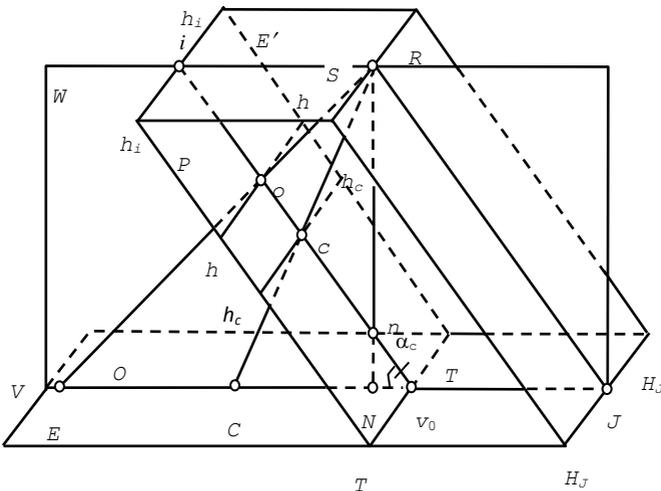


Рис. 4.3. Элементы центральной проекции

P – **картинная плоскость**, в которой строится изображение объектов (в фотограмметрии это плоскость аэроснимка);

S – **центр проекции**;

TT – **основание картины**, или **ось перспективы**, – линия пересечения предметной и картинной плоскостей;

W – **плоскость главного вертикала**, проходящая через центр проекции перпендикулярно к предметной и картинной плоскостям;

v_0 – **главная точка основания картины** – точка пересечения основания картины TT с плоскостью главного вертикала W ;

E' – **плоскость действительного горизонта**, проходящая через центр проекции S параллельно предметной плоскости;

$h_i h_i$ – **линия действительного горизонта** – сечение картинной плоскости с плоскостью действительного горизонта;

i – **главная точка схода** – пересечение линии действительного горизонта $h_i h_i$ с картинной плоскостью;

$V_0 i$ – **главная вертикаль** – линия пересечения картинной плоскости с плоскостью главного вертикала;

$v_0 V$ – **проекция главной вертикали** – линия пересечения предметной плоскости с плоскостью главного вертикала (направление съемки);

R – **разделяющая плоскость**, проходящая через центр проекции параллельно картинной плоскости;

$H_i H_j$ – **линия картинного горизонта** – линия пересечения предметной плоскости и разделяющей;

J – **главная точка схода предметной плоскости** – точка пересечения линии картинного горизонта с разделяющей плоскостью;

S_0 – **главная оптическая ось съёмочной камеры**, проходящая через центр проекции перпендикулярно картинной плоскости. Отрезок S_0 равен фокусному расстоянию съёмочной камеры f ;

o – **главная точка картинной плоскости** (аэроснимка) – точка пересечения главной оптической оси с картинной плоскостью;

O – **проекция главной точки картинной плоскости** – точка пересечения главной оптической оси с предметной плоскостью;

n – **точка надира** – точка пересечения картинной плоскости с отвесной линией, опущенной из центра проекции;

N – **проекция точки надира** – точка пересечения предметной плоскости с отвесной линией, опущенной из центра проекции. Отрезок SN соответствует высоте фотографирования;

α_c – **угол наклона картинной плоскости** (аэроснимка), отсчитываемый между главной оптической осью и отвесной линией (или между главной вертикалью и ее проекцией);

s – *точка нулевых искажений* – точка пересечения биссектрисы угла наклона картинной плоскости, отсчитываемого в точке S , с главной вертикалью;

C – *проекция точки нулевых искажений* – точка пересечения предметной плоскости с биссектрисой угла наклона аэроснимка, отсчитываемого в точке S .

Любая прямая картинной плоскости, проходящая параллельно основанию картины, называется *горизонталью*. Горизонталь hh , проходящая через главную точку аэроснимка, называется *главной горизонталью*, а проходящая через точку нулевых искажений ($h_c h_c$) – *линией неискаженных масштабов*.

Элементы предметной плоскости принято обозначать прописными буквами латинского алфавита, а картинной плоскости – строчными.

4.2. Главная точка аэрофотоснимка, точка надира, точка нулевых искажений. Их положение в проекции и на аэрофотоснимке

На рис. 4.4 изображен разрез пространственного чертежа в плоскости главного вертикала W и значения некоторых углов между основными линиями. Из соответствующих треугольников легко получить следующие формулы, определяющие взаимное положение основных элементов центральной проекции:

$$\left. \begin{aligned} So = So^0 = f, & & Si = ic = \frac{f}{\sin \alpha_c}, \\ on = f \operatorname{tg} \alpha_c, & & oc = f \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_c}{2} \right) = f \frac{1 - \cos \alpha_c}{\sin \alpha_c}, \\ oi = f \operatorname{ctg} \alpha_c, & & \\ SN = H, & & SJ = iv_0 = \frac{H}{\sin \alpha_c}, \\ ON = H \operatorname{tg} \alpha_c, & & C v_0 = cv_0 = \frac{H - f}{\sin \alpha_c}. \\ Sn = \frac{f}{\cos \alpha_c}, & & \end{aligned} \right\} (4.1)$$

Дополним рис. 4.4 сечением горизонтальной плоскостью P^0 , проходящей через точку нулевых искажений параллельно предметной плоскости. Точку пересечения отвесной линии SN с горизонтальной плоскостью P^0 обозначим o^0 .

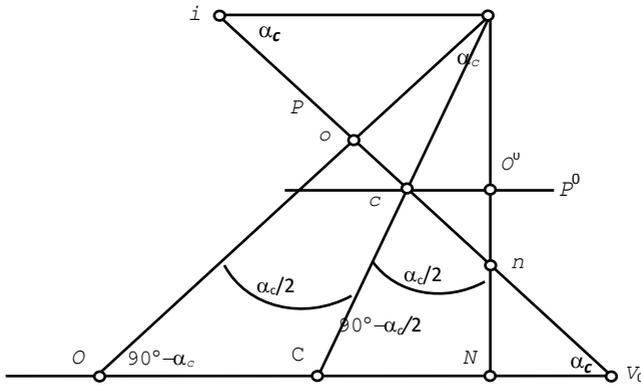


Рис. 4.4. Взаимное положение основных точек центральной проекции

Легко видеть, что треугольники Sic и cv_0C – равнобедренные, а треугольники ocS и o^0cS равны, поскольку $\angle ioS = \angle v_0o^0S = 90^\circ$ и $\angle icS = \angle v_0cC = \angle sco^0 = 90^\circ - \alpha/2$.

Равенство отрезков oS и o^0S , вытекающее из равенства треугольников ocS и o^0cS , означает, что плоскости P и P^0 представляют собой наклонный и горизонтальный снимки, полученные из одного центра фотографирования S одной съёмочной камерой с фокусным расстоянием f и пересекающиеся по линии неискаженных масштабов $h_c h_c$. Иначе говоря, P^0 – это проекция наклонного снимка P на горизонтальную плоскость.

Этот факт широко используются при обработке материалов аэрофотосъёмки и в конструкциях ряда фотограмметрических приборов.

4.3. Перспектива точки и прямой на пространственном чертеже

Перспектива точки. Определение перспективы точки A , лежащей в предметной плоскости E , можно выполнить несколькими вариантами (рис. 4.5).

Например, использовать проектирующую плоскость, проходящую через центр проекции S и точку A и рассекающую плоскость E под каким-либо произвольным углом φ по отношению к проекции главной вертикали. В этом случае, на основании ранее изложенного, плоскость картины P рассеется проектирующей плоскостью по линии l_3i_3 . Пере-

сечение проецирующего луча SA с линией l_2i_3 определит перспективу точки A на картине.

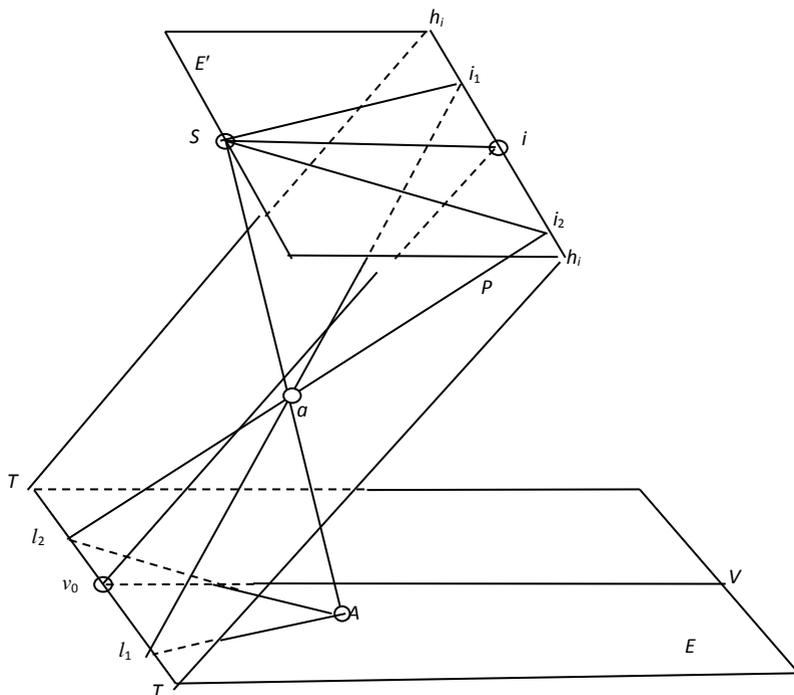


Рис. 4.5. Перспектива точки

В частном случае проецирующая плоскость через точку A может быть проведена так, чтобы след сечения ею предметной плоскости E был параллелен проекции главной вертикали. В этом случае сечение плоскости действительного горизонта E' проецирующей плоскостью пройдет по линии Si . Точка i – главная точка схода будет перспективой бесконечно удаленных точек прямых, расположенных в предметной плоскости параллельно проекции главной вертикали. В этом случае плоскость картины P пересечется с проецирующей плоскостью по линии l_2i . Перспектива точки A определится путем пересечения проецирующего луча SA с линией l_2i .

Исходя из изложенного, для построения перспективы прямой предметной плоскости необходимо выполнить следующие действия:

- найти двойную точку, продолжив прямую до пересечения с основанием картины;
- отыскать точку схода проекции прямой, проведя параллельную ей линию из центра проекции до пересечения с линией действительного горизонта;
- провести направление перспективы, соединив двойную точку с точкой схода;
- провести в концы прямой предметной плоскости проектирующие лучи, пересечение которых с направлением перспективы даст искомую проекцию.

Перспектива отрезка.

Пусть в предметной плоскости дана прямая AB , и требуется построить ее проекцию ab в картинной плоскости (рис. 4.6).

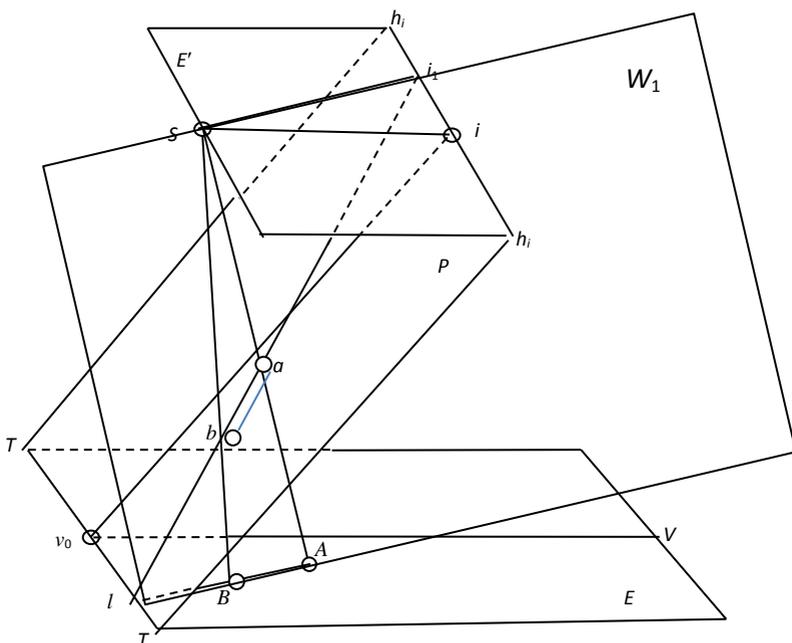


Рис. 4.6. Перспектива прямой

Искомая проекция ab лежит в проектирующей плоскости W_1 , проходящей через центр проекции S и прямую AB , потому для ее нахождения достаточно построить плоскость W_1 и провести проектирующие лучи SA и SB .

Поскольку прямая AB принадлежит плоскостям E и W_1 , то линией их пересечения является продолжение прямой до ее пересечения с основанием картины TT в точке l_1 .

Плоскость W_1 пересекает плоскость действительного горизонта E' по прямой Si_1 , причем отрезок Si_1 параллелен исходной прямой AB , поскольку оба они лежат в параллельных плоскостях E и E' .

Точки i_1 и l_1 принадлежат картинной P и проектирующей W_1 плоскостям, и потому соединяющая их прямая i_1l_1 является линией пересечения плоскостей P и W_1 .

Теперь для нахождения искомой проекции ab достаточно провести проектирующие лучи SA и SB , пересечение которых с линией i_1l_1 даст точки a и b .

Точка i_1 называется *точкой схода* перспективы прямой предметной плоскости AB , линия i_1l_1 – *направлением перспективы* этой прямой, а точка l_1 – *двойной*. Заметим, что точка i_1 является проекцией бесконечно удаленной точки прямой AB , так как является точкой пересечения картинной плоскости с проектирующим лучом, проведенным из центра проекции в эту бесконечно удаленную точку. Поэтому главную точку схода i называют точкой схода проекций прямых предметной плоскости, параллельных проекции главной вертикали, а линию действительного горизонта h_1h_2 – геометрическим местом точек схода проекций всех прямых предметной плоскости.

Перспектива отвесной прямой. До сих пор рассматривались вопросы построения проекций точек и прямых, расположенных в предметной плоскости. Очевидно, проектируемые объекты могут располагаться и вне предметной плоскости, например, возвышаясь над ней.

Пусть дана отвесная прямая AA_0 (точка A_0 лежит в предметной плоскости E), и требуется построить ее проекцию (рис. 4.7).

Для этого построим проектирующую плоскость W , проведя ее через центр проекции и отвесную прямую AA_0 . В этой проектирующей плоскости размещается также отвесная линия SN , точка надира n , ее проекция N , искомая проекция aa_0 и точка схода направления ее перспективы.

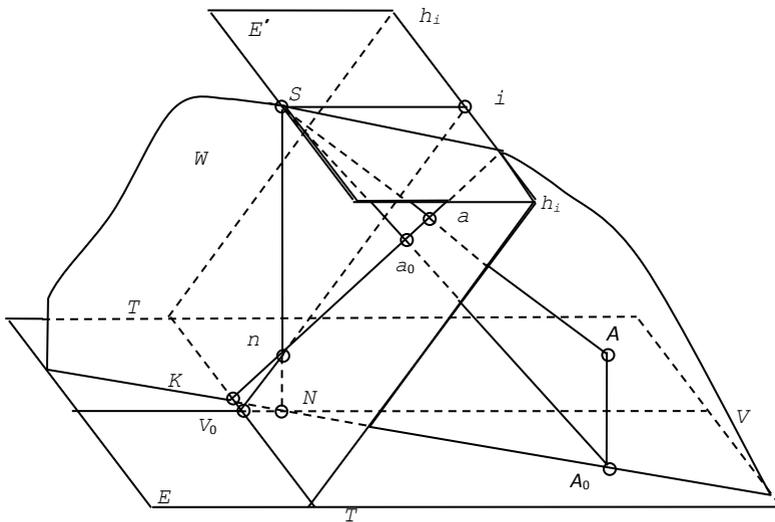


Рис. 4.7. Проекция отвесной прямой

Поскольку точки A_0 и N принадлежат проектирующей и предметной плоскостям, то линией их пересечения будет прямая A_0N , пересекающая основание картины в точке K . Очевидно, что линия пересечения картинной и проектирующей плоскостей проходит через точку надира n и точку K основания картины, поскольку обе они принадлежат как картинной, так и проектирующей плоскостям.

Теперь для нахождения искомой проекции aa_0 достаточно провести проектирующие лучи в точки A и A_0 , ограничивающие исходную отвесную линию. Их пересечение с направлением перспективы Kn даст точки a , a_0 и искомую проекцию aa_0 .

Для определения положения точки схода перспектив отвесных линий можно провести проектирующий луч в бесконечно удаленную точку исходной прямой. Этот луч совпадет с отвесной линией SN , пересекающейся с картинной плоскостью в точке надира n . Таким образом, *направлению перспектив проекций всех отвесных прямых проходят через точку надира, которая является их точкой схода*. Это означает, что продолжения изображенных на аэроснимке вертикальных объектов (дымовых труб, водонапорных башен, телеграфных столбов, телевизионных мачт и др.) пересекаются в точке надира.

4.4. Теорема Шаля. Понятие об эпюрах

Найдем проекцию a точки A предметной плоскости (рис. 4.8) и будем вращать картинную плоскость P вокруг основания картины TT и одновременно плоскость действительного горизонта E' вокруг линии действительного горизонта $h_i h_i$ вместе с построениями на них, сохраняя взаимную параллельность плоскости действительного горизонта и предметной. Вращение прекратим, как только предметная плоскость E , картинная P и плоскость действительного горизонта E' сольются в одну, точка S окажется в положении S' , точка i – в положении i' , а точка a – в положении a' . По условию $Si = S'i$ и $il = li'$.

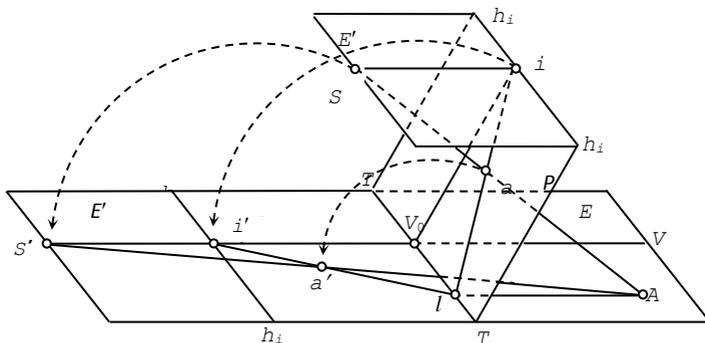


Рис. 4.8. Теорема Шаля

Докажем, что проекция a точки A при вращении плоскостей своего положения не изменила.

Из подобных треугольников Sai и Aal следует:

$$lA / Si = la / ia. \quad (4.2)$$

Треугольники $S'a i'$ и $a'Al$ также подобны, и можно записать:

$$lA / S'i' = la' / i'a. \quad (4.3)$$

Так как $Si = S'i'$, приравняем левые части выражений (4.2) и (4.3)

$$la / ia = la' / i'a' \quad (4.4)$$

и составим производную пропорции

$$\frac{ia + al}{ia} = \frac{i'a' + a'l}{i'a'}. \quad (4.5)$$

Поскольку $ia + al = i'a' + a'l = il$, то и $ia = i'a'$, т. е. проекция a точки предметной плоскости A при одновременном вращении плоскостей своего положения не изменила. Этим доказана теорема, известная в специальной литературе как теорема Шаля:

Если при одновременном вращении плоскости действительного горизонта вокруг линии действительного горизонта $h_i h_i$ и предметной плоскости вокруг основания картины TT сохраняется их взаимная параллельность, то проектирующий луч SA всегда проходит через ту же пару сопряженных точек предметной (A) и картинной (a) плоскостей.

Результат не изменится при одновременном вращении любой пары плоскостей: E и E' , E и P или P и E' , если плоскости E и E' останутся параллельными. Это обстоятельство имеет в фотограмметрии исключительно большое значение и лежит в основе всех методов обработки аэроснимков с преобразованными связками проектирующих лучей.

Совмещенное положение всех трех основных плоскостей вместе с построениями на них называется **эпюром** (от французского «*épure*» – «улучшенный»). Если эпюр получен путем увеличения угла наклона картинной плоскости до 180° (как на рис. 4.9), он называется **эпюром растяжения**, а если уменьшением этого угла до 0° – **эпюром сложения** (рис. 4.10).

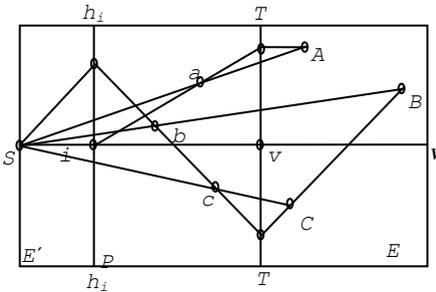


Рис. 4.9. Эпюр растяжения

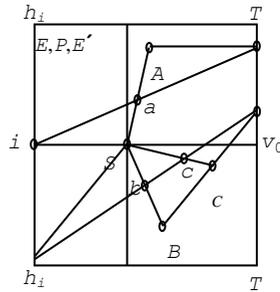


Рис. 4.10. Эпюр сложения

К недостаткам эпюра растяжения относится наличие острых углов в точках пересечения прямых, затрудняющих уверенное отыскание

проекций, а эпюра сложения – большая загроуженность чертежа из-за совмещенного положения картинной и предметной плоскостей.

На эпюре сложения, в силу равенства отрезков Si и ci , центр проекции S совпадает с точкой нулевых искажений c и ее проекцией C . Это означает, что углы с вершиной в проекции точки нулевых искажений C равны проекциям этих углов в картинной плоскости (с вершиной в точке нулевых искажений c).

4.5. Перспектива сетки квадратов на эпюре

Для исследования масштаба перспективного изображения построим перспективу сетки квадратов на эпюре растяжения. Стороны сетки выберем так, чтобы одна из них совпадала с основанием картины TT , а другая – с проекцией главной вертикали Vv_0 (рис. 4.11).

В этом случае точкой схода направлений перспективы прямых, параллельных проекции главной вертикали, будет главная точка схода картинной плоскости i , а направления перспективы линий сетки, параллельных основанию картины, будут также параллельны основанию картины. Для их отыскания построим проекции диагоналей сетки.

Для нахождения направлений перспектив проекций диагоналей сетки соединим точки пересечения диагоналей с основанием картины (точки k_1, \dots, k_6) с точками схода их проекций (i_1, i_2), полученными в пересечении линии действительного горизонта с прямыми, проведенными из центра проекции S параллельно диагоналям сетки.

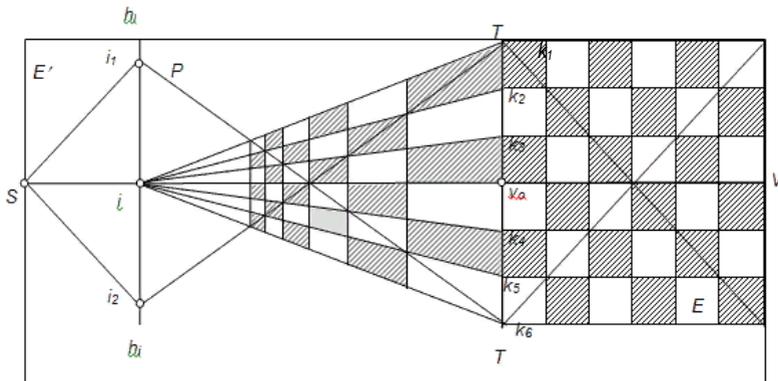


Рис. 4.11. Перспектива сетки квадратов

Для отыскания направления перспективы проекций прямых, параллельных основанию картины, соединим соответствующие точки пересечения направлений перспектив диагоналей сетки (i_1k_6, i_2k_1) и ее сторон, параллельных проекции главной вертикали ($ik_1, ik_2, ik_3, iv_0, \dots, ik_6$).

Анализ полученной перспективы позволяет сделать некоторые общие выводы об изменении масштаба изображения и наличии перспективных искажений, в частности:

1) при перемещении вдоль главной вертикали от основания картины к главной точке схода картинной плоскости линейные размеры проекций сторон сетки уменьшаются и в точке i становятся равными нулю. Следовательно, масштаб их изображения изменяется от единицы на основании картины до нуля в главной точке схода;

2) масштаб изображения по направлениям, совпадающим с горизонталями, остается неизменным. В этом можно убедиться, рассмотрев подобные треугольники с общей вершиной в точке i ;

3) преобразование сетки квадратов предметной плоскости в сетку трапеций в картинной плоскости позволяет говорить о наличии угловых и линейных искажений.

4.6. Системы координат, применяемые в фотограмметрии

Применяемые в фотограмметрии координатные системы можно условно разделить на две группы, различающиеся областью применения, выбором начала координат и направлениями координатных осей.

Координатные системы местности используются для определения пространственного положения точек местности. К таким системам относятся как левые геодезические (геоцентрическая, Гаусса – Крюгера, местная и др.), так и правые фотограмметрические.

Напомним, что в левой (французской) координатной системе последовательное преобразование осей $X \rightarrow Y \rightarrow Z \rightarrow X$ выполняется путем вращения их по часовой стрелке; в правой (английской) системе тот же результат достигается при вращении против часовой стрелки.

Геоцентрическая система координат $OXYZ'$ (рис. 4.12) используется при решении фотограмметрических задач на большие расстояния, при выполнении космических исследований и т. п. Ее начало совпадает с центром земных масс, плоскость OXY' располагается в плоскости экватора, ось OZ' совмещена с полярной осью планеты, ось OX' установлена в плоскости начального меридиана, а ось OY' дополняет систему до левой. Положение точки земной поверхности A в этой си-

стеме определяется прямоугольными координатами X', Y', Z' , значения которых зависят от параметров эллипсоида.

Система координат Гаусса – Крюгера $O_G X_G Y_G Z_G$ (рис. 4.13) используется для представления результатов фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки и положения необходимых для этого опорных точек.

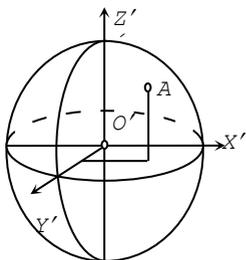


Рис. 4.12. Геоцентрическая система координат

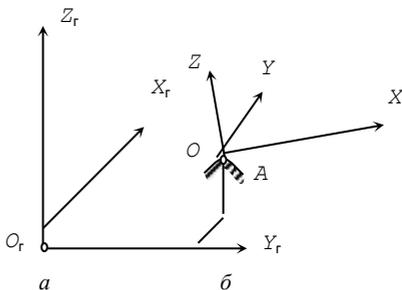


Рис. 4.13. Геодезическая (а) и фотограмметрическая (б) системы координат

Система относится к топоцентрическим: ее начало O_G совмещено с точкой пересечения осевого меридиана и экватора, ось $O_G X_G$ – с осевым меридианом, ось $O_G Z_G$ направлена по нормали к эллипсоиду, а ось $O_G Y_G$ дополняет систему до левой.

Начало **местной системы координат** совмещается с произвольной точкой O_m , а оси $O_m X_m$, $O_m Y_m$ и $O_m Z_m$ параллельны соответствующим осям системы координат Гаусса – Крюгера. Положение точек в этой системе определяется пространственными координатами X_m , Y_m и Z_m .

Фотограмметрическая система координат $OXYZ$ (рис. 4.13) может выбираться произвольно, так, чтобы зависимости между координатами соответственных точек снимка и местности имели наиболее простой вид. Ее начало совмещается с произвольной точкой (например, с точкой местности или с центром проекции), а координатные оси выбираются так, чтобы система оставалась прямоугольной и правой. Чаще всего ось OX совмещают с направлением маршрута. Положение точек в фотограмметрической системе определяется координатами X , Y и Z .

Координатные системы аэроснимка предназначены для определения положения точек аэроснимков, являются прямоугольными, пра-

выми и делятся на внутренние и внешние. Внешние координатные системы являются пространственными, а их начало совмещено с центром проектирования. Внутренние системы – плоские, с началом в точке пересечения линий, соединяющих координатные метки снимка.

Плоская прямоугольная координатная система oxy относится к внутренним и используется для определения положения точек аэроснимка (рис. 4.14, *a*, *б*).

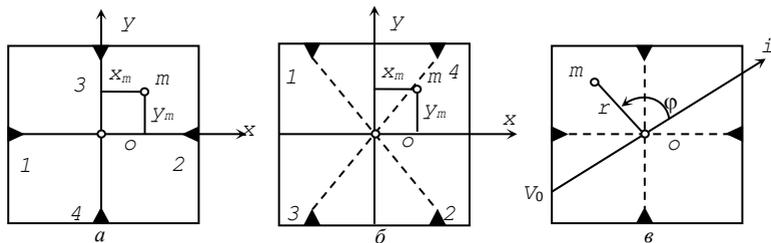


Рис. 4.14. Внутренние координатные системы аэроснимка

Ее начало совмещено с точкой пересечения линий 1–2 и 3–4, соединяющих противоположные координатные метки, ось ox – с линией 1–2 (рис. 4.14, *a*) или параллельно ей (рис. 4.14, *б*), а ось oy устанавливаются перпендикулярно оси x . Положение точки m аэроснимка определяется координатами x_m, y_m .

Иногда ось ox совмещается с главной вертикалью, а ось oy – с горизонталью, проходящей через главную точку снимка, точку нулевых искажений или точку надира.

Если главная точка аэроснимка не совпадает с точкой пересечения координатных меток, то координаты произвольной точки аэроснимка

$$x_m = x - x_0, y_m = y - y_0, \quad (4.6)$$

где x, y – измеренные координаты точки аэроснимка, а x_0, y_0 – координаты главной точки аэроснимка.

Полярная система координат $or\phi$ (рис. 4.14, *в*) относится также к внутренним, применяется при анализе изображения на аэроснимке и реализуется в конструкциях ряда фотограмметрических приборов. Ее начало совпадает с точкой пересечения линий, соединяющих противоположные координатные метки, полярная ось – с главной вертикалью iv_0 , а ее положительное направление размещено в правой части снимка. Полярный угол ϕ отсчитывается от положительного направления главной вертикали против часовой стрелки.

Промежуточная система координат $Sxyz$ (рис. 4.15) относится к внешним пространственным и используется для теоретических исследований.

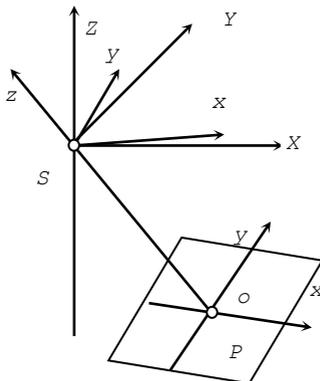


Рис. 4.15. Промежуточная система координат

Ее начало размещено в центре проекции S , ось Sz совмещена с главным оптическим лучом, а оси Sx и Sy параллельны соответствующим осям системы координат аэроснимка oxy (рис. 4.15). В этой системе координатами точки аэроснимка m являются величины x_m , y_m , и $z_m = -f$.

К внешним относится также промежуточная система координат $SXYZ$ (рис. 4.15), оси которой параллельны соответствующим осям фотограмметрической системы координат $OXYZ$ (рис. 4.15).

4.7. Элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка

Элементы ориентирования разделяются на две группы – элементы внутреннего ориентирования и элементы внешнего ориентирования.

Элементами внутреннего ориентирования называют величины, определяющие положение центра проекции относительно плоскости аэроснимка. К ним относят три величины (рис. 4.16): фокусное расстояние f и координаты главной точки x_0 , y_0 аэроснимка в системе oxy .

Эти элементы определяют в процессе калибровки съёмочной камеры и заносят в ее технический паспорт.

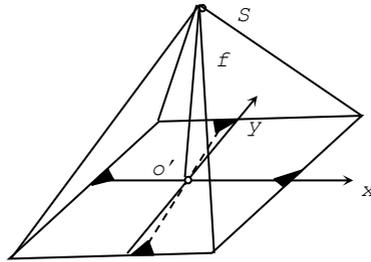


Рис. 4.16. Элементы внутреннего ориентирования снимка

По элементам внутреннего ориентирования аэроснимка можно восстановить связку лучей, существовавших во время съемки: для этого нужно по координатным меткам и элементам x_0, y_0, f найти положение центра проекции. После этого установить в полученный центр проекции источник света и спроектировать изображение снимка на какой-либо экран (иными словами – соединить центр прямыми линиями с точками аэроснимка, обозначив тем самым проектирующие лучи).

Элементами внешнего ориентирования называют величины, определяющие положение аэроснимка в момент съемки относительно системы координат местности. В фотограмметрии используются две таких системы, различающиеся системами отсчета.

Первая система элементов внешнего ориентирования представлена на рис. 4.17, где показана плоская прямоугольная система координат снимка oxy и две промежуточные системы: $SXYZ$ и $Sxyz$. Их координатные оси параллельны осям фотограмметрической системы $OXYZ$ и плоской прямоугольной системы снимка oxy соответственно. Элементами внешнего ориентирования в этой системе являются шесть величин – три линейных и три угловых, причем два угловых элемента связаны с плоскостью, проходящей через главную оптическую ось So и ось SY промежуточной системы $SXYZ$:

XS, YS, ZS – координаты центра проекции в системе $OXYZ$;

α – продольный угол наклона в плоскости SXZ между осью SZ и проекцией главного оптического луча So на плоскость SXZ ;

ω – поперечный угол наклона в плоскости SoY между главным оптическим лучом So и его проекцией на плоскость SXZ ;

χ – угол поворота в плоскости снимка между осью y и следом сечения плоскости SoY .

Система находит широкое применение в научных исследованиях, при аналитической и цифровой обработке аэроснимков, в конструкциях фотограмметрических приборов. Сравнительно небольшие значения углов α и ω допускают применение дифференциальных формул связи координат точек снимка местности.

Вторая система элементов внешнего ориентирования предполагает определение пространственного положения аэроснимка также шестью элементами (рис. 4.18), в том числе тремя линейными и тремя угловыми. К линейным элементам относятся прямоугольные координаты X_S, Y_S, Z_S центра проекции S , а к угловым – три угла:

α_c – суммарный угол наклона, отсчитываемый в плоскости главного вертикаля между осью SZ и главным оптическим лучом So ;

t – дирекционный угол оптической оси съёмочной камеры, отсчитываемый в плоскости OXY между осью X и проекцией главной вертикали;

χ' – угол поворота снимка, отсчитываемый в плоскости снимка между осью x и главной вертикалью.

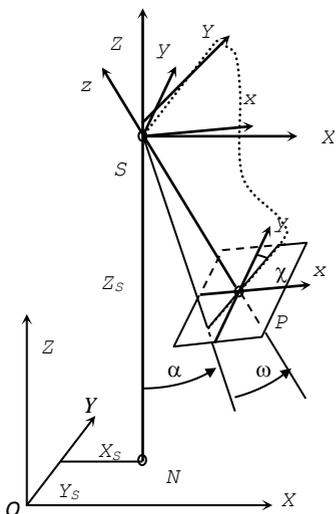


Рис. 4.17. Элементы внешнего ориентирования снимка
 $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi$

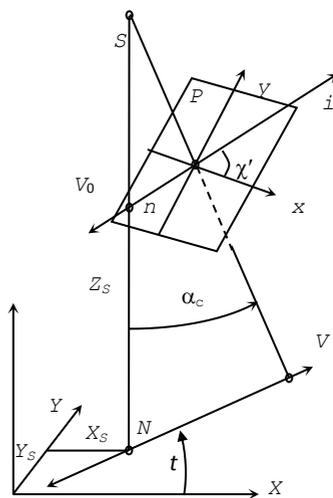


Рис. 4.18. Элементы внешнего ориентирования снимка
 $X_S, Y_S, Z_S, \alpha_c, t, \chi'$

Преобразования координатных систем. Из аналитической геометрии известно, что ортогональное преобразование пространственных координатной системы $OXYZ$ или $Oxyz$ с совмещенными началами в общем случае описывается через исходные, преобразованные координаты и углы между соответствующими координатными осями до и после преобразования, причем для прямого и обратного преобразования используют формулы:

$$\left. \begin{aligned} X &= a_1x + a_2y + a_3z, & x &= a_1X + b_1Y + c_1Z \\ Y &= b_1x + b_2y + b_3z, & y &= a_2X + b_2Y + c_2Z \\ Z &= c_1x + c_2y + c_3z, & z &= a_3X + b_3Y + c_3Z \end{aligned} \right\}, \quad (4.7)$$

где a_i, b_i, c_i ($i = 1, 2, 3$) – косинусы углов, составленных координатными осями X, Y, Z системы $OXYZ$ с координатными осями x, y, z системы $Oxyz$.

Величины a_i, b_i, c_i называют направляющими косинусами, или компонентами матрицы ортогонального преобразования.

Три параметра, от которых зависят значения направляющих косинусов, называют углами Эйлера, которые в фотограмметрии отождествляют с угловыми элементами внешнего ориентирования. Выбор углов Эйлера осуществляется различными способами, и от того, как это сделано, зависит вид функции для определения направляющих косинусов.

Девять направляющих косинусов определяются через три независимых угла, следовательно, они должны быть связаны шестью независимыми условиями. Таковыми являются:

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 &= 1, & a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3 &= 0 \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 &= 1, & a_1c_1 + a_2c_2 + a_3c_3 &= 0 \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 &= 1, & b_1c_1 + b_2c_2 + b_3c_3 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.8)$$

Из этих свойств вытекают и другие, в частности, следующие:

$$\left. \begin{aligned} a_1^2 + b_1^2 + c_1^2 &= 1, & a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2 &= 0 \\ a_2^2 + b_2^2 + c_2^2 &= 1, & a_1a_3 + b_1b_3 + c_1c_3 &= 0 \\ a_3^2 + b_3^2 + c_3^2 &= 1, & a_2a_3 + b_2b_3 + c_2c_3 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (4.9)$$

Уравнения (4.7) могут быть представлены в матричной форме

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A_{\omega\sigma\chi} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A_{\omega\sigma\chi}^T \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

или в векторной

$$R = A_{\omega\sigma\chi} \cdot r, \quad r = A_{\omega\sigma\chi}^T \cdot R, \quad (4.11)$$

где R, r – векторы с компонентами, представленными в координатных системах $OXYZ$ и $Oxyz$ соответственно;

$A_{\omega\sigma\chi}, A_{\omega\sigma\chi}^T$ – прямая и транспонированная матрицы ортогонального преобразования, причем

$$A_{\omega\sigma\chi} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}, \quad A_{\omega\sigma\chi}^T = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix}. \quad (4.12)$$

Имея в виду связь промежуточных координатных систем $SXYZ$ и $Sxyz$, когда для всех точек аэроснимка $z = -f$, вместо (4.7) будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} X &= a_1x + a_2y - a_3f, & x &= a_1X + b_1Y + c_1Z \\ Y &= b_1x + b_2y - b_3f, & y &= a_2X + b_2Y + c_2Z \\ Z &= c_1x + c_2y - c_3f, & z &= -f = a_3X + b_3Y + c_3Z \end{aligned} \right\}. \quad (4.13)$$

Если координаты главной точки аэроснимка не равны нулю, то в формулах (4.7)–(4.12) величины x и y заменяют на $(x - x_0)$ и $(y - y_0)$.

Определение направляющих косинусов. Для определения направляющих косинусов воспользуемся известными из аналитической геометрии формулами связи исходных (x, y) и преобразованных (x', y') координат точек при повороте координатных осей на угол φ , отсчитываемый против часовой стрелки:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

и

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

Для определения направляющих косинусов выполним преобразование координатной системы $Sxyz$ в систему $SXYZ$ (или $SXYZ$ в систему $Sxyz$) путем трех последовательных поворотов вокруг координатных осей, каждый из которых описывается формулами (4.12) или (4.13), и найдем произведение соответствующих этим поворотам матриц. При этом будем использовать угловые элементы внешнего ориентирования α , ω и χ .

Из трех углов, связывающих системы $Sxyz$ и $SXYZ$, один (χ) лежит в плоскости Sxy , другой (α) – в плоскости SXZ , а третий угол (ω) – в плоскости SoY , не являющейся координатной ни в системе $Sxyz$, ни в системе $SXYZ$. С учетом этого и принимая во внимание направления отсчета угловых элементов внешнего ориентирования, для определения направляющих косинусов имеется две возможности:

1. Преобразовать систему $SXYZ$ в систему $Sxyz$ в результате трех последовательных поворотов ее координатных осей на углы α , ω и χ , формируя матрицу ортогонального преобразования на основе зависимостей (4.12).

2. Преобразовать систему $Sxyz$ в систему $SXYZ$ в результате трех последовательных поворотов ее координатных осей на углы χ , ω , α , формируя матрицу ортогонального преобразования на основе зависимостей (4.12).

Оба пути равноценны и ведут к одинаковым результатам. Выберем второй вариант и выполним три последовательных поворота (рис. 4.19).

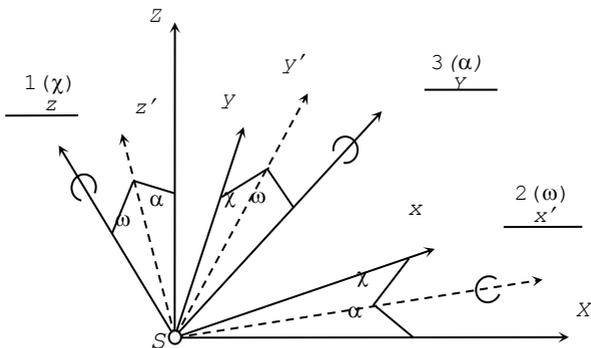


Рис. 4.19. Преобразование координатных систем

1. Первый поворот системы $Sxyz$ на угол $-\chi$ вокруг оси Sz преобразует ее в систему $Sx'y'z'$ (рис. 4.19). Матрица ортогонального преобразования

$$A_\chi = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.16)$$

2. Второй поворот системы $Sx'y'z'$ на угол $-\omega$ вокруг оси Sx' преобразует ее в $Sx'Yz'$ (рис. 4.19). При этом оси Sx' и Sz' окажутся лежащими в плоскости SXZ , а матрица ортогонального преобразования будет иметь вид:

$$A_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}. \quad (4.17)$$

3. Третий поворот системы $Sx'Yz'$ вокруг оси SY на угол $-\alpha$ преобразует ее в систему $SXYZ$ (рис. 4.19). Матрица ортогонального преобразования будет иметь вид:

$$A_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (4.18)$$

Матрица преобразования, соответствующая суммарному повороту, определяется как произведение трех матриц: $A_{\omega\chi} = A_\alpha A_\omega A_\chi$.

Перемножить две матрицы – значит составить новую, каждый элемент которой равен сумме произведений соответствующих элементов строк первой матрицы на элементы столбцов второй. Таким образом:

$$\begin{aligned} A_{\omega\chi} = A_\alpha A_\omega A_\chi &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \sin \omega & -\sin \alpha \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \alpha & \cos \alpha \sin \omega & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \omega \sin \chi & \cos \omega \sin \chi & \sin \alpha \cos \chi + \cos \alpha \sin \omega \sin \chi \\ -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi & \cos \omega \cos \chi & -\sin \alpha \sin \chi + \cos \alpha \sin \omega \cos \chi \\ -\sin \alpha \cos \omega & -\sin \omega & \cos \alpha \cos \omega \end{pmatrix}. \quad (4.19) \end{aligned}$$

Сопоставив полученное выражение с (4.9), получим следующие формулы определения направляющих косинусов по угловым элементам внешнего ориентирования α , ω и χ :

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha \cos \chi - \sin \alpha \sin \omega \sin \chi, \\ a_2 &= -\cos \alpha \sin \chi - \sin \alpha \sin \omega \cos \chi, \\ a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega, \\ b_1 &= \cos \omega \sin \chi, \\ b_2 &= \cos \omega \cos \chi, \\ b_3 &= -\sin \omega, \\ c_1 &= \sin \alpha \cos \chi + \cos \alpha \sin \omega \sin \chi, \\ c_2 &= -\sin \alpha \sin \chi + \cos \alpha \sin \omega \cos \chi, \\ c_3 &= \cos \alpha \cos \omega. \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Для связи направляющих косинусов с угловыми элементами внешнего ориентирования второй системы α_c , t и χ' выполним три последовательных поворота системы $SXYZ$:

вокруг оси SZ на угол t в положение $Sx'y'Z$;

вокруг оси Sy' на угол α_c в положение $Sx''y''z$;

вокруг оси Sz на угол χ' в положение $Sxyz$.

Перемножив соответствующие матрицы ортогонального преобразования, получим

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos t \cos \alpha_c \cos \chi' - \sin t \sin \chi', \\ a_2 &= -\cos t \cos \alpha_c \sin \chi' - \sin t \cos \chi', \\ a_3 &= -\cos t \cos \alpha_c, \\ b_1 &= \sin t \cos \alpha_c \cos \chi' + \cos t \sin \chi', \\ b_2 &= -\sin t \cos \alpha_c \sin \chi' + \cos t \cos \chi', \\ b_3 &= -\sin t \sin \alpha_c, \\ c_1 &= \sin \alpha_c \cos \chi', \\ c_2 &= -\sin \alpha_c \sin \chi', \\ c_3 &= \cos \alpha_c. \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Если известны направляющие косинусы, то угловые элементы внешнего ориентирования в первой и второй системах можно определить по следующим формулам, вытекающим из (4.14) и (4.15):

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(-\frac{a_3}{c_3}\right), \quad \omega = \arcsin(-b_3), \quad \chi = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_1}{b_2}\right). \quad (4.22)$$

$$t = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_3}{a_3}\right), \quad \alpha_c = \arccos(c_3), \quad \chi' = \operatorname{arctg}\left(-\frac{c_2}{c_1}\right). \quad (4.23)$$

Знак суммарного угла наклона α_c второй системы условимся считать соответствующим знаку продольного угла наклона α первой системы элементов внешнего ориентирования.

4.8. Связь координат соответствующих точек наклонного снимка и местности

Пусть из точки S получен аэроснимок P (рис. 4.20), на котором имеется изображение m точки местности M . Требуется установить зависимость между координатами точек m и M , полагая элементы внешнего ориентирования аэроснимка известными.

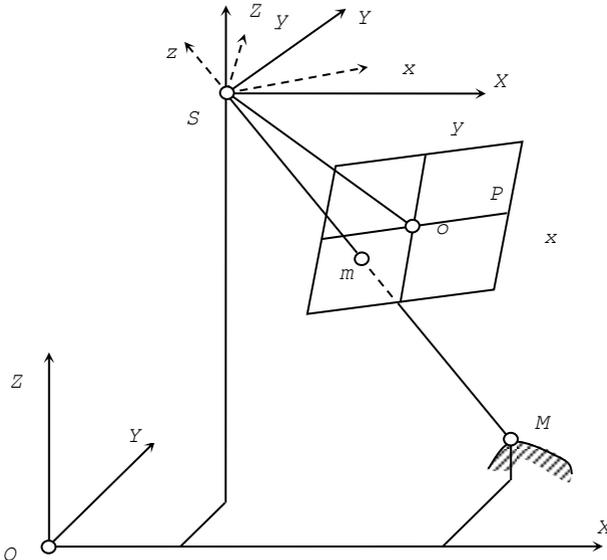


Рис. 4.20. Связь координат точек аэроснимка и местности

Так как точки S , m и M принадлежат одному проектирующему лучу, то для вывода искомой зависимости воспользуемся уравнением прямой, проходящей через три произвольные точки 1, 2 и 3:

$$\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_3 - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z_3 - z_1}{z_2 - z_1}. \quad (4.24)$$

Пусть точкам 1, 2 и 3 соответствуют точки S , M и m . Подставляя их координаты в систему $SXYZ$ в уравнение прямой, получим:

$$\frac{X_m - X_S}{X_M - X_S} = \frac{Y_m - Y_S}{Y_M - Y_S} = \frac{Z_m - Z_S}{Z_M - Z_S},$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} X_M - X_S &= (Z_M - Z_S) \frac{X_m}{Z_m} \\ Y_M - Y_S &= (Z_M - Z_S) \frac{Y_m}{Z_m} \end{aligned} \right\}. \quad (4.25)$$

Подставив в эти выражения значения пространственных координат точки снимка, получим

$$\left. \begin{aligned} X_M - X_S &= (Z_M - Z_S) \frac{X_m}{Z_m} = (Z_M - Z_S) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y_M - Y_S &= (Z_M - Z_S) \frac{Y_m}{Z_m} = (Z_M - Z_S) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \right\}. \quad (4.26)$$

Полученные формулы позволяют определить координаты точки местности по координатам ее изображения на аэроснимке в случае, если известна высота точки Z_M . Таким образом, для определения пространственных координат точки данных одного аэроснимка, т. е. двух измерений координат изображения, недостаточно.

Для решения обратной задачи, т. е. определения координат точки аэроснимка по ее координатам на местности и элементам внешнего ориентирования, воспользуемся уравнением прямой, подставляя в него координаты точек S , M и m в системе $Sxyz$ вместо координат точек 1, 2 и 3 уравнения прямой:

$$\frac{x_m}{x_M} = \frac{y_m}{y_M} = \frac{-f}{z_M} \quad \text{или} \quad x_m = -f \frac{x_M}{z_M}, \quad y_m = -f \frac{y_M}{z_M}.$$

Так как координатные оси систем $SXYZ$ и $OXYZ$ параллельны, приращения $X_M - X_S$, $Y_M - Y_S$ и $Z_M - Z_S$ координат точки M относительно центра фотографирования можно рассматривать как ее координаты в системе $SXYZ$, переход от которых к координатам той же точки в системе $Sxzy$ описывается зависимостями (4.10). Следовательно

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X_M - X_S) + b_1(Y_M - Y_S) + c_1(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \\ y &= -f \frac{a_2(X_M - X_S) + b_2(Y_M - Y_S) + c_2(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \end{aligned} \right\}. \quad (4.27)$$

Таким образом, по трем измерениям (пространственным координатам точки местности) определены два неизвестных; третье измерение неявно использовано для определения масштаба изображения.

Рассмотрим несколько частных случаев.

1. **Снимок горизонтальный.** Подставляя в (4.14) и (4.15) углы $\alpha = \omega = \chi = 0$ (или $\alpha_c = t = \chi' = 0$), получим, что $a_1 = b_2 = c_3 = 1$, а остальные (a_2, a_3, \dots, c_2) равны нулю. Совместим начало координат $OXYZ$ с проекцией точки надира ($X_S = Y_S = Z_S = 0$), примем $Z_M = 0$ (точки в плоскости OXY) и, подставив эти значения в (4.22) и (4.23), получим

$$X = x^0 \frac{H}{f} = x^0 m, \quad Y = y^0 \frac{H}{f} = y^0 m, \quad (4.28)$$

$$x^0 = X \frac{f}{H} = \frac{X}{m}, \quad y^0 = Y \frac{f}{H} = \frac{Y}{m}, \quad (4.29)$$

где x^0, y^0 – координаты точки на горизонтальном снимке;

H – высота фотографирования над определяемой точкой.

Использование полученных формул ограничивается сделанным выше допущением, что все точки местности размещены в горизонтальной плоскости ($Z_M = 0$). Допускаемая при этом относительная погрешность вычислений будет пропорциональна относительной ошибке определения высоты фотографирования (т. е. отношению реального

превышения точки над плоскостью OXY к высоте фотографирования), что ограничивает область применения полученных формул.

2. Снимок наклонный. Выберем координатные системы снимка (oxy) и местности ($OXYZ$) так, чтобы оси ox и OX совместились с главной вертикалью и ее проекцией соответственно ($t = \chi' = 0$). Тогда направляющие косинусы будут зависеть только от суммарного угла наклона α_c , и вместо формул (4.15) будем иметь

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \alpha_c & b_1 &= 0, & c_1 &= \cos \alpha_c \\ a_2 &= 0, & b_2 &= 1, & c_2 &= 0 \\ a_3 &= -\sin \alpha_c, & b_3 &= 0, & c_3 &= \cos \alpha_c \end{aligned} \right\}. \quad (4.30)$$

Примем с целью упрощения выводов, что местность равнинная ($Z_S - Z_M = -H$), а начало координат системы $OXYZ$ совмещено с точкой надира N ($X_S = Y_S = 0$). Подстановка (4.28) в (4.23) при $X_S = Y_S = 0$ и $Z_S = H$ приводит к следующим формулам связи координат:

$$\left. \begin{aligned} X &= H \frac{x \cos \alpha_c + f \sin \alpha_c}{f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c} \\ Y &= H \frac{y}{f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c} \end{aligned} \right\}. \quad (4.31)$$

Выбирая те или иные системы координат аэроснимка и местности (например, с началами в главной точке снимка и ее проекции, в точке нулевых искажений и ее проекции) или определяя положение координатных плоскостей, можно получить различные зависимости между координатами точек снимка и местности, сфера применения которых будет ограничена решением соответствующих локальных задач.

4.9. Зависимость между координатами точек наклонного и горизонтального снимков

Фотограмметрические задачи наиболее просто решаются по горизонтальным снимкам. Получить такой снимок при нынешнем состоянии средств аэрофотосъемки невозможно, да в этом нет и необходимости, поскольку при известных угловых элементах внешнего ориентирования измеренные на наклонном снимке координаты можно перевычислить на строго горизонтальный снимок. Этот процесс в фотограмметрии называется *трансформированием координат*.

Пусть из точки S (рис. 4.21) получены горизонтальный P^0 и наклонный P снимки с изображениями m и m^0 точки местности M . Эти снимки пересекаются по линии неискаженных масштабов, и их фокусные расстояния одинаковы ($So = So^0 = f$). Точка m^0 горизонтального снимка имеет координаты x^0, y^0 , а точка m наклонного снимка – координаты x и y .

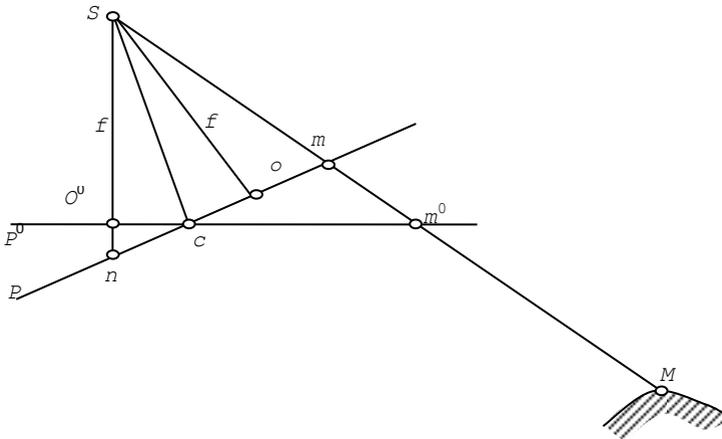


Рис. 4.21. Схема зависимости координат точек наклонного и горизонтального снимков

Рассматривая горизонтальный снимок P^0 вместе с расположенными на нем точками как плоскую местность, для установления связи между координатами соответственных точек плоскостей P и P^0 воспользуемся формулами (4.23), полагая отметки Z_M всех точек одинаковыми и равными нулю (местность равнинная), $X_S = Y_S = 0$ и $Z_S = f$. Тогда формулы связи координат точек снимков P и P^0 примут вид:

$$\left. \begin{aligned} x^0 &= -f \frac{X}{Z} = -f \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ y^0 &= -f \frac{Y}{Z} = -f \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

Полученные формулы позволяют преобразовать координаты точек наклонного снимка к горизонтальному случаю съемки с полным

устранением перспективных искажений при любых значениях угловых элементов внешнего ориентирования.

Действуя аналогично, можно получить и обратные зависимости, выполнив преобразование формул (4.26). Полагая координаты главной точки x^0 и y^0 равными нулю, найдем:

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1 x^0 + b_1 y^0 - c_1 f}{a_3 x^0 + b_3 y^0 - c_3 f} \\ y &= -f \frac{a_2 x^0 + b_2 y^0 - c_2 f}{a_3 x^0 + b_3 y^0 - c_3 f} \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

Точка надира наклонного снимка лежит на том же проектирующем луче, что и главная точка горизонтального снимка (рис. 4.21), и для определения ее координат на наклонном снимке достаточно в формулы (4.22) подставить $x_n^0 = y_n^0 = 0$:

$$x_n = -f \frac{c_1}{c_3}, \quad y_n = -f \frac{c_2}{c_3}. \quad (4.34)$$

Несложные преобразования приводят к следующим формулам для вычисления на наклонном снимке координат точки нулевых искажений:

$$x_c = -f \frac{c_1}{1+c_3}, \quad y_c = -f \frac{c_2}{1+c_3}. \quad (4.35)$$

4.10. Масштаб изображения на аэрофотоснимке

Ранее было установлено, что масштаб горизонтального снимка равнинной местности постоянен и определяется отношением фокусного расстояния съёмочной камеры к высоте фотографирования. Наклонный снимок содержит перспективные искажения, и его масштаб уже не будет постоянным (рис. 4.22).

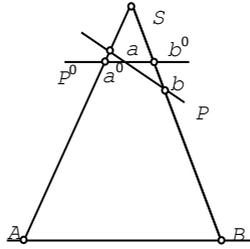


Рис. 4.22. Масштаб наклонного и горизонтального снимков

В частности, из рис. 4.22 следует, что для снимка P^0 :

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} = \frac{a^0 b^0}{AB}; \quad (4.36)$$

для снимка P :

$$\frac{1}{m} \neq \frac{f}{H} = \frac{ab}{AB}. \quad (4.37)$$

Следовательно, масштаб изображения следует определять как отношение бесконечно малых отрезков наклонного снимка и местности:

$$\frac{1}{m} = \frac{dl}{dL}, \quad (4.38)$$

где dl и dL – бесконечно малые отрезки снимка и местности, связанные с бесконечно малыми приращениями координат ограничивающих их точек следующими зависимостями (рис. 4.23):

$$\left. \begin{aligned} dL &= \sqrt{dX^2 + dY^2} \\ dy &= dx \cdot \operatorname{tg} \varphi \\ dl &= dx / \cos \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (4.39)$$

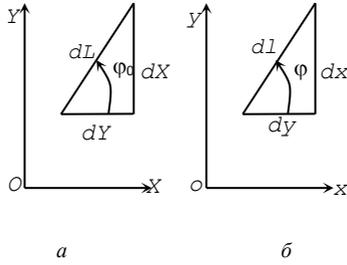


Рис. 4.23. Бесконечно малые отрезки на местности (а) и на снимке (б)

Для вывода формулы, определяющей масштаб наклонного снимка по произвольному направлению, воспользуемся формулами связи координат точек снимка и местности (4.29), при выводе которых координатные оси ox и Ox совмещались с главной вертикалью и ее проекцией, и выполним их дифференцирование по переменным dx и dy :

$$dX = H \frac{(f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c) \cos \alpha_c dx - (x \cos \alpha_c + f \sin \alpha_c)(-\sin \alpha_c) dx}{(f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c)^2}; \quad (4.40)$$

$$dY = H \frac{(f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c) \cos \alpha_c dy - y(-\sin \alpha_c) dx}{(f \cos \alpha_c - x \sin \alpha_c)^2}.$$

После несложных преобразований с учетом выражения (4.33):

$$dX = \frac{H dx}{fk^2}, \quad dY = \frac{H(k \operatorname{tg} \varphi + c) dx}{fk^2}, \quad (4.41)$$

где

$$k = (\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c), \quad c = \frac{y}{f} \sin \alpha_c. \quad (4.42)$$

Подстановка (4.34) в (4.24) дает

$$dL = \frac{H dx}{fk^2} \sqrt{1 + (k \operatorname{tg} \varphi + c)^2}, \quad (4.43)$$

и формула (4.23) масштаба снимка в точке с координатами x , y по произвольному направлению с учетом (4.33) примет вид

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \frac{k^2}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (k \sin \varphi + c \cos \varphi)^2}}. \quad (4.44)$$

Выполнив анализ формулы (4.40), получим формулы масштаба в основных точках снимка по главной вертикали и по горизонталям.

1. **Снимок горизонтальный** ($\alpha_c = 0$). Подстановка α_c в (4.37) дает $k = 1$, $c = 0$, и вместо (4.40) будем иметь

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}. \quad (4.45)$$

Следовательно, масштаб горизонтального снимка плоской местности – величина постоянная, не зависящая от положения точки.

2. **Масштаб по главной вертикали** ($y = 0$, $\varphi = 0$). Подстановка в (4.40) дает $k = \cos \alpha_c$ и $c = 0$. Тогда формула масштаба по главной вертикали

$$\frac{1}{m_{VV}} = \frac{f}{H} k^2 = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right)^2. \quad (4.46)$$

3. **Масштаб по горизонталям** ($\varphi = 90^\circ$). Подкоренное выражение в знаменателе формулы (4.40) равно k , и искомый масштаб

$$\frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H} k = \frac{f}{H} \left(\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right). \quad (4.47)$$

Как видно, масштаб по любой горизонтали является величиной постоянной, что и подтверждает перспектива сетки квадратов.

Действуя аналогично, можно получить формулы для расчета масштаба по главной вертикали и горизонталям в основных точках.

Масштаб в точке нулевых искажений. Подставив в (4.40) $y = 0$, $oc = x = -f(1 - \cos \alpha)/\sin \alpha$, $k = 1$, $c = 0$, получим

$$\frac{1}{m_{VV}} = \frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H}. \quad (4.48)$$

Масштаб в точке надира ($x = -f \operatorname{tg} \alpha$, $k = 1/\cos \alpha$, $c = 0$):

$$\frac{1}{m_{VV}} = \frac{f}{H \cos^2 \alpha_c}, \quad \frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H \cos \alpha_c}. \quad (4.49)$$

Масштаб в главной точке снимка ($x = 0, k = \cos \alpha, c = 0$):

$$\frac{1}{m_{VV}} = \frac{f}{H} \cos^2 \alpha_c, \quad \frac{1}{m_{hh}} = \frac{f}{H} \cos \alpha_c. \quad (4.50)$$

4. **Изменение масштаба в пределах аэроснимка** можно получить, определив разность масштабов по главной вертикали в двух симметрично расположенных точках с абсциссами $+x$ и $-x$:

$$\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2} = \frac{f}{H} \left[\left(\cos \alpha_c + \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right)^2 - \left(\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right)^2 \right]. \quad (4.51)$$

После несложных преобразований, полагая с достаточной для приближенных оценок точностью, что средний масштаб аэроснимка определяется по формуле (4.46):

$$\frac{\Delta m}{m} = 4 \frac{x \alpha'_c}{f \rho'}. \quad (4.52)$$

Расчеты по этой формуле показывают, что при $x = f$ и $\alpha_c = 30'$ относительное изменение масштаба составит около $1/30$. С такой же точностью будут определены и длины измеренных на снимке линий. Следовательно, выполнять измерения по контактным аэроснимкам с использованием их среднего масштаба нужно весьма осторожно.

4.11. Главный, средний и частный масштабы аэрофотоснимка

Главный масштаб аэрофотоснимка вычисляют по формуле

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}, \quad (4.53)$$

где H – высота фотографирования над средней плоскостью.

Для определения *среднего масштаба планового аэрофотоснимка* с относительно ровным рельефом необходимо измерить длины первоначально выбранных отрезков (базисов) AB и DF на снимке и фотоплане.

Для каждого из отрезков вычисляют масштаб по формуле

$$\frac{1}{m} = \frac{l}{L \cdot M}, \quad (4.54)$$

где m – знаменатель масштаба;

l – длина отрезка, измеренная по аэрофотоснимку, мм;

L – длина отрезка, измеренная по фотоплану, мм;

M – знаменатель масштаба фотоплана.

Из формулы (4.54) знаменатель масштаба для каждого из базисов равен:

$$m_{AB} = \frac{L_{AB} \cdot M}{l_{AB}}, \quad m_{DF} = \frac{L_{DF} \cdot M}{l_{DF}}. \quad (4.55)$$

Средний масштаб аэрофотоснимка вычисляют как среднее из масштабов по базисам AB и DF :

$$m_{\text{cp}} = \frac{m_{AB} + m_{DF}}{2}. \quad (4.56)$$

Выполним оценку точности определения среднего масштаба аэрофотоснимка, вычислив расхождение масштабов аэрофотоснимка, полученного по двум базисам:

$$\Delta m = |m_{AB} - m_{DF}|. \quad (4.57)$$

А также найдем относительную погрешность определения среднего масштаба как отношение Δm к m_{cp} .

Относительная погрешность измерения длин линий по аэрофотоснимку и относительная погрешность определения среднего масштаба находятся в следующей зависимости:

$$\frac{\Delta l}{L} = \frac{\Delta m}{m_{\text{cp}}}. \quad (4.58)$$

Используя формулу (4.58), вычислим предельную длину линии, которая может быть измерена по аэрофотоснимку с требуемой точностью при использовании среднего масштаба:

$$L = \frac{m_{\text{cp}}}{\Delta m} \Delta l. \quad (4.59)$$

На основании этих расчетов можем сделать вывод, что длины искаженных отрезков (базисов), по которым определяется масштаб

снимка, должны быть больше длины линий, которые будут измеряться на аэрофотоснимке.

Для определения *частных масштабов* в зонах точек A , B , D и F на аэрофотоснимке и фотоплане с точностью до 0,1 мм измеряют базисы AA_1 и AA_2 , BB_1 и BB_2 , DD_1 и DD_2 , FF_1 и FF_2 .

Знаменатели масштабов для каждого базиса вычисляют по формуле (4.55).

Вычисляем среднее значение частного масштаба для зон A , B , D и F , взяв среднее из значений частных масштабов соответствующих отрезков.

Значение частного масштаба для всего аэрофотоснимка вычисляем по формуле

$$m_{\text{cp}} = \frac{m_A + m_B + m_D + m_F}{4}. \quad (4.60)$$

4.12. Смещение изображения контурной точки на аэрофотоснимке из-за влияния рельефа местности

Линейные искажения, вызванные влиянием рельефа местности.

Ранее было показано, что аэроснимок является изображением местности в центральной проекции, а топографический план – в ортогональной, и что эти проекции совпадают только в случаях, когда снимок горизонтальный, а местность равнинная.

На рис. 4.24 изображен горизонтальный снимок P^0 всхолмленной местности, полученный с высоты H над плоскостью E . Точки местности A и B , имеющие превышения над плоскостью E соответственно $+h$ и $-h$, изобразились в виде точек a и b , расположенных на расстояниях $oa = r_a$ и $ob = r_b$ от главной точки.

Точка A^0 и B^0 являются ортогональными проекциями точек местности A и B на предметную плоскость E ; их проекции, если бы они могли быть получены, располагались бы в точках a_0 и b_0 . Следовательно, отрезки aa^0 и bb^0 являются смещениями (искажениями) δ_h точек a и b , вызванными влиянием рельефа местности. Поскольку точка надира является точкой схода перспектив всех отвесных линий, эти смещения всегда совпадают с направлениями, проходящими через точку надира.

Для определения величины искажения δ_h рассмотрим две пары подобных треугольников Soa , AA^0A' и Saa^0 , $SA'A^0$, из которых следует:

$$aa^0 = A'A^0 \cdot So / SO = AA^0 \cdot oa / SO. \quad (4.61)$$

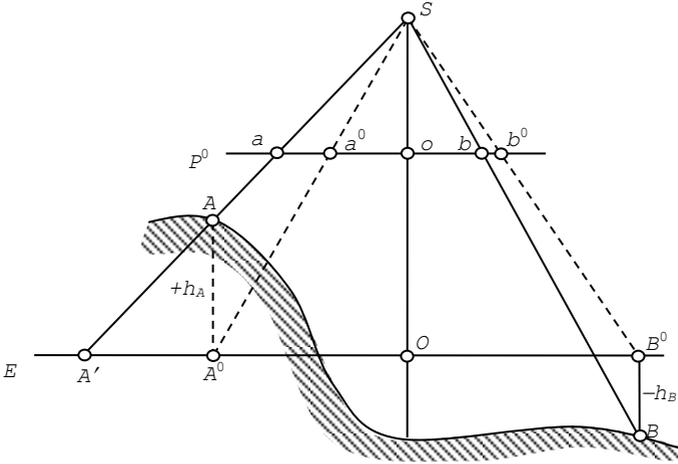


Рис. 4.24. Линейные смещения, вызванные влиянием рельефа местности

Поскольку $AA^0 = h$, $oa = r$, $SO = H$ и $aa^0 = \delta_h$, получим

$$\delta_h = \frac{rh}{H}. \quad (4.62)$$

При $h = 50$ м, $r = 100$ мм и $H = 2000$ м смещение $\delta_h = 2,5$ мм, что больше смещения, обусловленного влиянием угла наклона.

Формула (4.62) получена без учета угла наклона снимка и уже поэтому не является строгой. Однако она широко применяется в фотограмметрической практике, поскольку допускаемая ошибка вычислений величины искажения δ_h при плановой аэрофотосъемке не превышает 0,1–0,2 мм.

Заметим, что искажения точек, вызванные влиянием рельефа местности, объясняются тем, что масштаб их изображения крупнее масштаба изображения средней плоскости снимка при положительном превышении над ней (точка ближе к центру фотографирования) и мельче при отрицательном превышении (точка дальше от центра).

Используя формулу (4.62), можно установить предельное превышение, при котором величина искажения δ_h не превысит заданного

предела. Учитывая, что можно допускать как положительные, так и отрицательные превышения, можно вести речь о некоторой зоне, в пределах которой искажения окажутся допустимыми.

В соответствии с требованиями Инструкции по фотограмметрическим работам смещение точки вследствие влияния рельефа местности не должно превышать $0,3 \div 0,4$ мм на плане. Для расчета высоты зоны, в пределах которой это требование может быть выполнено, соответствующим образом преобразуем формулу (4.62), учтем коэффициент увеличения снимка (и искажения) и удвоим полученный результат:

$$Q = 2h_{\text{пред}} \leq \frac{0,6fM}{1000r}, \quad (4.63)$$

где f – фокусное расстояние съёмочной камеры;

M – знаменатель масштаба плана;

r – расстояние (мм) от центра снимка до угла рабочей площади.

Анализ формул (4.62) и (4.63) позволяет сделать несколько выводов.

1. Величина смещения $\delta_n = 0$ при $r = 0$ или $h = 0$, т. е. когда точка располагается на начальной плоскости E или совпадает с точкой надира.

2. При положительных превышениях точек местности над предметной плоскостью смещения δ_n направлены к точке надира, а при отрицательных превышениях – от точки надира.

3. Для уменьшения влияния рельефа местности следует увеличивать либо высоту фотографирования H , либо фокусное расстояние f .

Отметка предметной плоскости E снимка (рис. 4.23), относительно которой отсчитываются превышения в формулах (4.62) и (4.63), вычисляется как полусумма максимальной и минимальной отметок точек в пределах его рабочей площади.

4.13. Смещение контурных точек на снимке за угол наклона

Пусть наклонный (P) и горизонтальный (P^0) снимки получены одной съёмочной камерой, имеют общий центр проекции S (рис. 4.25, a), а точка местности M изобразилась на них в виде точек m и m^0 . Такие снимки пересекаются по линии неискаженных масштабов $h_c h_c$.

Поскольку изображение горизонтального снимка P^0 соответствует ортогональной проекции, его можно рассматривать как предметную

плоскость, а линию неискаженных масштабов – как основание картины.

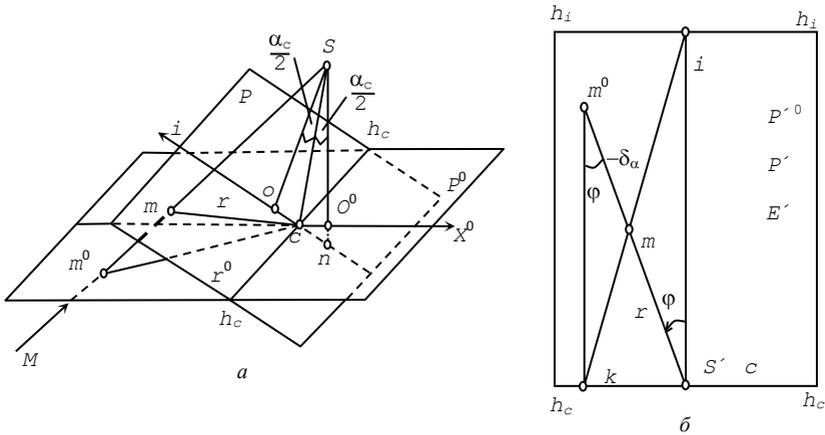


Рис. 4.25. Линейные искажения, вызванные влиянием угла наклона аэроснимка на пространственном чертеже (а) и на эпюре сложения (б)

С учетом этого получим эпюр сложения (рис. 4.25, б), выполнив вращение картинной плоскости и плоскости действительного горизонта согласно условиям теоремы Шаля. На эпюре сложения центр проекции S совместится с точкой нулевых искажений c , которая в данном случае будет одновременно и главной точкой основания картинной плоскости, а точки m и m^0 окажутся лежащими на одном проектирующем луче Smm^0 . Обозначим удаления точек m и m^0 от точки нулевых искажений через r и r^0 соответственно. Тогда искажение $\delta_\alpha = r - r^0$, а $mm^0 = -\delta_\alpha$.

Из подобных треугольников mm^0k и $ictm$ можно записать:

$$mm^0 / m^0k = mc / ic \quad (4.64)$$

или

$$mm^0 = m^0k \cdot mc / ic. \quad (4.65)$$

Поскольку $mc = r_c$, $ic = f / \sin \alpha_c$ и $m^0k = r^0 \cos \varphi$, то

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c r_c^0}{f} \sin \alpha_c \cos \varphi. \quad (4.66)$$

Эта формула определяет величину искажения, вызванного влиянием угла наклона снимка, или *перспективного* искажения. В таком виде эта формула применяется в конструкциях ряда фотограмметрических приборов.

Если в правой части формулы (4.66) сделать замену r^0 на $r - \delta_\alpha$, то после несложных преобразований получим окончательно

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c^2 \sin \alpha_c \cos \varphi}{f - r_c \sin \alpha_c \cos \varphi}. \quad (4.67)$$

Опустив в знаменателе второе слагаемое, что оправданно при использовании плановых снимков, получим

$$\delta_\alpha = -\frac{r_c^2}{f} \sin \alpha_c \cos \varphi. \quad (4.68)$$

При $\alpha_c = 1^\circ$, $f = r_c = 100$ мм, и $\varphi = 0$ найдем, что $\delta_\alpha = 1,75$ мм.

Индекс «с» в обозначении радиус-вектора r напоминает, что он отсчитывается от точки нулевых искажений, а угол φ – от положительного направления главной вертикали против хода часовой стрелки.

Легко видеть, что максимальное искажение δ_α имеют точки, расположенные на главной вертикали ($\cos \varphi = \pm 1$), причем при $\alpha_c < 3^\circ$:

$$\delta_{\alpha_{\max}} = -\frac{r_c^2 \alpha'_c}{f \rho'}. \quad (4.69)$$

По формуле (4.69) можно вычислить *радиус полезной площади* аэроснимка r , в пределах которого максимальное искажение δ_α не превысит заданного значения Δ_α . Заменяв в (4.69) r_c на r и δ_α на Δ_α , получим

$$r = \sqrt{\frac{f \Delta_\alpha \rho'}{\alpha'_c}}. \quad (4.70)$$

При $\Delta_\alpha = 0,3$ мм, $\alpha_c = 30'$ и $f = 100$ мм $r = 58,5$ мм, а при $f = 200$ мм и $r = 82,3$ мм.

Анализ полученных формул позволяет сделать несколько выводов.

1. Величина искажения $|\delta_\alpha|$ тем больше, чем больше угол наклона α_c и чем меньше фокусное расстояние съемочной камеры f . При постоянных значениях α_c и f величина искажения зависит от положения точки на снимке, т. е. от величин угла φ и радиуса-вектора r_c .

2. Полезная площадь планового аэроснимка близка к его рабочей площади.

3. На линии неискаженных масштабов $h_c h_c$ величины искажений δ_α равны нулю ($\cos \varphi = 0$), и масштаб ее изображения соответствует масштабу горизонтального снимка.

4. Длина отрезка, симметричного относительно точки нулевых искажений, не искажается: углы φ для концов отрезка различаются на 180° , а их искажения равны по величине и противоположны по знаку.

Смещения точек, вызванные влиянием угла наклона снимка, полностью устраняются в процессе его трансформирования.

4.14. Искажение изображения площадей на наклонном снимке

Линейные искажения точек снимка, вызванные влиянием угла наклона и рельефа местности, приводят к искажениям линий, следовательно, и площадей участков, ограниченных этими линиями. Причем отдельные и независимые влияния угла наклона снимка и превышений между точками местности на искажения площадей суммируются. Рассмотрим эти источники.

Влияние угла наклона на искажения площадей участков установим, исходя из следующих соображений. Пусть имеем на плоской местности квадрат со стороной L , расположенный симметрично относительно главной вертикали (рис. 4.26).

На наклонном снимке этот квадрат изобразится в виде трапеции со средней линией $ab = l_1$ и высотой $cd = l_2$. Площади участка на наклонном (P) и на горизонтальном (P^0) снимках равны:

$$P = l_1 l_2 = (L / m_h) \cdot (L / m_v) \quad (4.71)$$

и

$$P^0 = l^2 = L^2 f^2 / H^2. \quad (4.72)$$

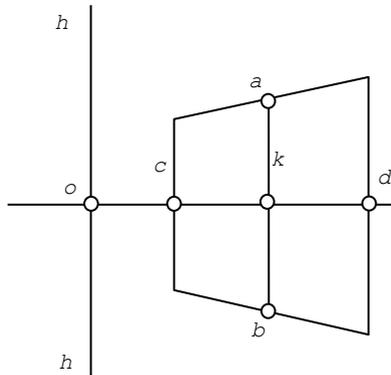


Рис. 4.26. Искажение изображения площади

Искажение площади есть разность площадей P и P^0 , которая с учетом масштаба по вертикали и горизонтали равна:

$$\Delta P = P - P^0 = \frac{L^2 f^2}{H^2} \left[\left(\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right)^3 - 1 \right]. \quad (4.73)$$

Более показательнее относительное искажение площади:

$$\frac{\Delta P}{P^0} = \left(\cos \alpha_c - \frac{x}{f} \sin \alpha_c \right)^3 - 1. \quad (4.74)$$

Если центр участка k совпадает с главной точкой снимка ($x = 0$), то

$$\frac{\Delta P}{P^0} = \cos^3 \alpha_c - 1. \quad (4.75)$$

Расчеты по формуле (4.74) показывают, что площадь участка, изображенного на снимке симметрично относительно главной его точки, определяется с достаточно высокой точностью: при углах наклона α_c , равных 30 и 60 мин, относительное искажение составляет 1/8700 и 1/2900 соответственно.

Влияние рельефа местности на искажения площадей участков, изображенных на плановом снимке, определим, исходя из ошибок определения масштаба снимка или, точнее, высоты фотографирования

над средней плоскостью, расчет которой обычно выполняется по опознанным на карте (на местности) точкам и последующего измерения расстояния между ними.

Площадь земельного участка на местности (P^0) вычисляют по результатам ее измерения на снимке (P):

$$P^0 = Pm^2 = P \cdot H^2 / f^2. \quad (4.76)$$

Неточное определение высоты фотографирования H (или не учет превышений h между точками ее определения) приведет к ошибке определения масштаба и площади участка. Для установления ошибки функции P^0 в зависимости от ошибки аргумента H в соответствии с правилами теории ошибок измерений выполним дифференцирование:

$$dP^0 = P \frac{2HdH}{f^2} = P \frac{2H^2}{f^2} \cdot \frac{dH}{H} = 2P^0 \frac{dH}{H}. \quad (4.77)$$

Примем $dP^0 = \Delta P$ и $dH = h$. Тогда относительная ошибка площади

$$\frac{\Delta P}{P} = 2 \frac{h}{H}. \quad (4.78)$$

Из полученной формулы следует, что влияние рельефа достаточно ощутимо: при высоте фотографирования $H = 2000$ м и превышении $h = 50$ м относительная ошибка определения площади составит 5 % или 1/20 от ее величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Системс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

5. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОСХЕМ И ФОТОПЛАНОВ

5.1. Трансформирование снимков.

5.1.1. Понятие о трансформировании снимков. Виды трансформирования. Аналитическое трансформирование.

5.1.2. Устройство фототрансформатора.

5.1.3. Оптические и геометрические условия трансформирования.

5.1.4. Трансформирование снимков на фототрансформаторе: трансформирование по опорным точкам, учет рельефа при фототрансформировании.

5.2. Фотопланы и фотосхемы.

5.2.1. Понятие о фотосхемах и фотопланах.

5.2.2. Способы изготовления фотосхем.

5.2.3. Технология изготовления фотопланов.

5.2.4. Контроль качества проявления фотосхем и фотопланов.

5.1. Трансформирование снимков

5.1.1. Понятие о трансформировании снимков.

Виды трансформирования. Аналитическое трансформирование

Трансформированием называется преобразование центральной проекции, которую представляет собой аэронегатив (аэроснимок), полученный при наклонном положении главного оптического луча, в другую центральную проекцию, соответствующую его отвесному положению, с одновременным приведением к заданному масштабу.

Трансформирование выполняют путем «обратного проектирования» изображения, т. е. преобразования изображения путем переноса его с картинной плоскости на предметную, соответствующую ортогональной проекции. Для такого преобразования необходимы данные, позволяющие прямо или косвенно найти элементы внешнего ориентирования снимка. В связи с этим методы трансформирования делятся на две основных, принципиально и технически различных группы – трансформирование по опорным точкам и трансформирование по элементам ориентирования.

В процессе трансформирования полностью исключаются все виды перспективных искажений аэроснимка, вызванных влиянием угла наклона, а также разномасштабность смежных снимков, являющаяся

следствием колебания высоты фотографирования. Названные искажения подчиняются определенным законам, поэтому их учет не вызывает затруднений.

Что же касается искажений, вызванных влиянием рельефа местности, то определяющие их превышения точек местности связаны, с одной стороны, с формами рельефа, а с другой – с выбором плоскости, на которую производится трансформирование. Учет таких искажений является одной из наиболее трудных задач фотограмметрии, строгое решение которой связано с разложением изображения на отдельные точки (зоны) и раздельным их трансформированием. Устранение этих искажений возможно лишь применением соответствующих методов или технологических приемов, обеспечивающих учет рельефа с той или иной степенью точности.

Для трансформирования аэроснимков применяют несколько способов, различающихся используемыми техническими средствами: аналитический, фотомеханический, оптико-графический, дифференциальный и др.

Аналитический способ трансформирования основан на использовании зависимостей между координатами соответственных точек аэроснимка и местности.

Фотомеханический способ трансформирования основан на использовании специальных приборов – фототрансформаторов. Соответствующими рабочими движениями основные части фототрансформатора приводят в положение, при котором построенное на экране изображение соответствует горизонтальному аэроснимку, и фиксируют это изображение на фотобумаге. Трансформированный фотоснимок получается в результате химической обработки экспонированной фотобумаги. До недавнего времени этот способ трансформирования был основным.

Оптико-графический способ трансформирования предполагает применение специальных малоформатных приборов – проекторов. Полученное с их помощью трансформированное изображение проектируют на лист бумаги, обводят карандашом и оформляют принятыми условными знаками. В настоящее время способ находит ограниченное применение при обновлении топографических или иных карт неспециализированными предприятиями.

Дифференциальный способ трансформирования (ортотрансформирование) основан на преобразовании отдельных фрагментов исходного изображения с учетом элементов ориентирования аэроснимка и

высоты центра этого фрагмента над средней плоскостью. Способ реализуется на приборах универсального типа либо на ЭВМ. Результатом обработки является ортофотоснимок или ортофотоплан.

Аналитическое трансформирование. Аналитическое трансформирование основано на использовании зависимостей между координатами соответственных точек аэроснимка и местности. Предположив, что $Z_M = 0$, $Z_S = H$ и $Q = H / (c_3f)$, получим формулы проективного преобразования:

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{A_1x + A_2y + A_3}{C_1x + C_2y + 1} \\ Y &= \frac{B_1x + B_2y + B_3}{C_1x + C_2y + 1} \end{aligned} \right\}, \quad (5.1)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= Qa_1, & A_2 &= Qa_2, & A_3 &= -Qa_3, \\ B_1 &= Qb_1, & B_2 &= Qb_2, & B_3 &= -Qb_3, \\ C_1 &= -c_1/(c_3f), & C_2 &= -c_2/(c_3f) \end{aligned} \right\}, \quad (5.2)$$

где a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, связывающие направления координатных осей систем аэроснимка и местности.

Формулы (5.1) содержат восемь неизвестных. Одна опорная точка с известными геодезическими координатами позволяет составить два уравнения поправок, полученных путем приведения (5.1) к линейному виду. При наличии пяти и более опорных точек для отыскания неизвестных применяют метод наименьших квадратов, а неизвестные используют для вычисления по формулам (5.1) трансформированных координат X и Y произвольного числа точек.

Способ предполагает равенство высот фотографирования H для всех определяемых точек, что делает его пригодным в случаях, когда колебание рельефа местности не превышает высоты зоны.

5.1.2. Устройство фототрансформатора

Фотомеханическое трансформирование (фототрансформированием) называется такое преобразование фотографического изображения, в результате которого получается новое фотографическое изображение в заданном масштабе и требуемой точности.

Фотомеханическое трансформирование выполняют с помощью специальных оптико-механических приборов – фототрансформаторов. В кассету фототрансформатора, находящегося в темном помещении, закладывают аэронегатив P (рис. 5.1), освещают его сверху и проектируют изображение через объектив S на экран E .

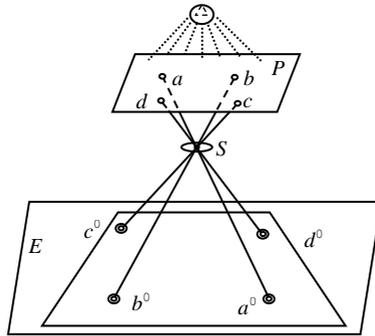


Рис. 5.1. Принципиальная схема фототрансформирования

Механическими перемещениями и наклонами добиваются такого взаимного положения аэронегатива, объектива и экрана фототрансформатора, при котором проекции наколотых на аэронегативе точек a , b , c и d точно совмещаются с нанесенными по координатам точками a^0 , b^0 , c^0 и d^0 основы, уложенной на экран E . При этом масштаб спроектированного на экран изображения будет равен масштабу основы, а само изображение окажется свободным от перспективных искажений и будет соответствовать плану местности.

После совмещения точек объектив закрывают красным светофильтром, заменяют основу фотобумагой и, открыв объектив, печатают трансформированное изображение. После фотографической обработки полученный снимок используют для монтажа фотоплана.

Фототрансформирование можно выполнить двумя путями:

- *восстановить* связь проектирующих лучей, подобную существовавшей в момент фотографирования;
- *построить* связь проектирующих лучей в соответствии с условиями теоремы Шаля, т. е. изменив взаимное положение плоскости аэроснимка P и экрана (предметной плоскости E).

5.1.3. Оптические и геометрические условия трансформирования

Для правильного фототрансформирования снимков необходимо, чтобы был выполнен ряд условий, обеспечивающих резкость и геометрическую корректность формируемого на экране изображения.

Оптические условия фототрансформирования обеспечивают получение на экране фототрансформатора резкого изображения.

Аэрофотосъемочные объективы рассчитывают для установки их на «бесконечность» и формирование изображения в главной фокальной плоскости. Так как высота фотографирования многократно превышает гиперфокальное расстояние, то проектирующие лучи после прохождения через объектив всегда дают на негативе резкое изображение. В фототрансформаторе расстояния от объектива до экрана сравнительно малы, и в его конструкции должны быть предусмотрены средства обеспечения резкости в плоскости экрана.

Для получения на экране фототрансформатора резкого изображения необходимо соблюдение двух оптических условий, одно из которых определяет соотношение расстояний до оптически сопряженных точек, а второе – взаимное положение плоскостей негатива, объектива и экрана.

Первое оптическое условие требует, чтобы основная формула оптики оставалась справедливой для пары соответственных точек негатива и экрана, лежащих на главном оптическом луче. Заменяя в формуле фокусное расстояние объектива фотоаппарата f на фокусное расстояние объектива фототрансформатора F , получим

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d}, \quad (5.3)$$

где D и d – расстояния вдоль главного оптического луча от главной плоскости объектива до экрана и негатива соответственно.

Предположим, что $D = F + D'$ и $d = F + d'$, подставим эти значения в (5.3) и после несложных преобразований получим формулу Ньютона, используемую в конструкциях многих фотограмметрических приборов для автоматического решения основной формулы оптики:

$$F^2 = D'd'. \quad (5.4)$$

Для выполнения *первого оптического условия* в фототрансформаторах используют так называемые масштабные инверсоры.

Однако выполнение первого оптического условия (5.3) или (5.4) обеспечивает получение резкого изображения в случае, если плоскости негатива (P), объектива (R) и экрана (E) параллельны между собой. В действительности эти плоскости не параллельны, и точки a и b на экране оказываются размытыми (рис. 5.2).

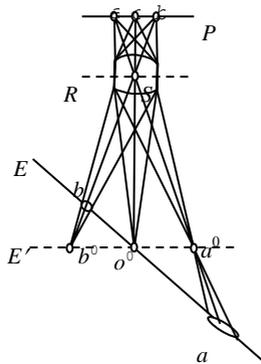


Рис. 5.2. Первое оптическое условие обеспечивает резкость при параллельных плоскостях

Для получения резкого изображения при наклонных плоскостях необходимо выполнить *второе оптическое условие*, известное в фотограмметрической литературе как условие Чапского (или Шеймпфлюга), согласно которому *для оптического сопряжения двух плоскостей пространства необходимо, чтобы линия их пересечения лежала в главной плоскости объектива R* (рис. 5.3).

Таким образом, для получения на экране E резкого изображения необходимо обеспечить:

- выполнение основной формулы оптики в виде условия (5.3) или (5.4) вдоль главного оптического луча eSe^0 ;
- пересечение плоскости объектива, экрана и негатива по одной прямой, лежащей в главной плоскости объектива.

Для выполнения второго оптического условия в фототрансформаторах применяются так называемые перспективные инверсоры.

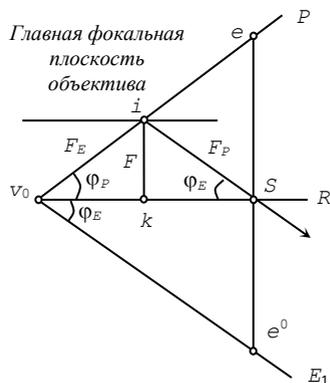


Рис. 5.3. Второе оптическое условие обеспечивает резкость при наклонных плоскостях

Главная точка схода i (рис. 5.3) есть проекция бесконечно удаленных точек предметной плоскости и в соответствии с законами оптики лежит в главной фокальной плоскости объектива. В этом случае отрезок ik , являющийся кратчайшим расстоянием между главной фокальной плоскостью и главной плоскостью объектива Sv_0 , есть не что иное как фокусное расстояние F объектива фототрансформатора.

Геометрические условия фототрансформирования обеспечивают получение на экране фототрансформатора геометрически правильного изображения в заданном масштабе $1:M$. Для этого предметная плоскость E (экран) должна быть перемещена в положение E_1 (рис. 5.3), при котором высота проектирования SN' окажется равной высоте фографирувания в масштабе плана.

Прежде всего заметим, что при любых преобразованиях изображения отрезки $iS = F_P$ и $iv'_0 = F_E$, называемые **инвариантами трансформирования**, должны оставаться неизменными. Их величины определяются по формулам с учетом масштаба плана:

$$F_P = \frac{f}{\sin \alpha_c}, \quad F_E = \frac{H}{M \sin \alpha_c} = \frac{fK_t}{\sin \alpha_c}, \quad (5.5)$$

где K_t – коэффициент трансформирования, равный отношению знаменателя масштаба аэрофотосъемки к знаменателю масштаба плана.

Углы, составленные плоскостью объектива с плоскостями экрана и негатива, зависят от инвариантов трансформирования и обозначаются φ_P и φ_E (рис. 5.3). Их значения можно найти из прямоугольных треугольников Sik и ikv_0 :

$$\sin \varphi_E = \frac{F}{F_P} = \frac{F \sin \alpha_c}{f}, \quad \sin \varphi_P = \frac{F}{F_E} = \frac{F \sin \alpha_c}{fK_t} = \frac{\sin \varphi_E}{K_t}. \quad (5.6)$$

Фототрансформаторы. При выполнении фотограмметрических работ используется ряд современных приборов отечественного и зарубежного производства, часть которых рассмотрена ниже.

Фототрансформаторы автоматизированные ФТА (рис. 5.4, а) и «Пеленг» (рис. 5.4, б) реализуют первую систему элементов трансформирования и предназначены для трансформирования плановых и перспективных снимков с преобразованными связками проектирующих лучей по опорным точкам или установочным данным.

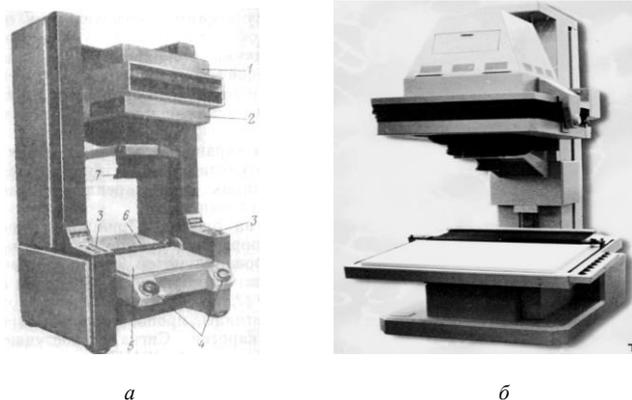


Рис. 5.4. Автоматизированные фототрансформаторы ФТА (а) и «Пеленг» (б)
 1 – осветитель; 2 – кассета; 3 – пульт управления; 4 – счетчики коррекционных
 механизмов; 5 – экран; 6 – подвижная щель; 7 – объектив

В качестве дополнительной информации о местности может использоваться цифровая модель рельефа, что обеспечивает возможность обработки снимков любой местности.

Оба прибора снабжены вычислительными устройствами для выполнения оптических и геометрических условий и щелевой установкой, позволяющей выполнять аффинное преобразование изображения

путем его поперечного сдвига и сжатия (растяжения) в продольном направлении, что важно при трансформировании снимков местности с однообразным уклоном.

Ширина щели регулируется в зависимости от параметров аэрофото съемки и рельефа местности.

В связи с широким распространением цифровых фотограмметрических приборов и рабочих станций на базе ПЭВМ разработка новых конструкций фототрансформаторов перестала быть актуальной.

5.1.4. Трансформирование снимков на фототрансформаторе: трансформирование по опорным точкам, учет рельефа при фототрансформировании

Фототрансформирование снимков может быть выполнено *по установочным данным* или *по опорным точкам*.

Трансформирование снимков по установочным данным. Трансформирование снимков по установочным данным выполняется с помощью наиболее приспособленных для этой цели фототрансформаторов ФТА, Rectimat, Seg-V, Seg-VI и некоторых других.

Для аналитического трансформирования необходимы: элементы внутреннего ориентирования снимка f , x_0 , y_0 ; угловые элементы его внешнего ориентирования α , ω , χ ; средняя высота фотографирования H ; фокусное расстояние фототрансформатора F и масштаб создаваемого плана $1:M$. Элементы внешнего ориентирования аэроснимка определяют по опорным точкам.

Далее аэронегатив закладывают в кассету фототрансформатора и точно ориентируют по координатным меткам. На соответствующих шкалах с учетом их мест нулей устанавливают вычисленные значения элементов трансформирования, а аэронегатив разворачивают в своей плоскости на угол $\chi_p = \chi + t$, где χ – угол поворота снимка в первой системе элементов внешнего ориентирования, а t – дирекционный угол оптической оси съемочной камеры.

После этого включают освещение и полученное на экране трансформированное изображение снимка фиксируют на фотобумаге.

Точность трансформирования снимков по установочным элементам зависит главным образом от точности определения элементов внешнего ориентирования снимков и погрешностей юстировок фототрансформатора.

Трансформирование снимков по опорным точкам. Трансформирование снимков по опорным точкам и в настоящее время является одним из наиболее распространенных способов преобразования наклонной центральной проекции в горизонтальную, хотя и требует наличия на каждый снимок не менее четырех четких контурных точек, расположенных по углам его рабочей площади снимка. Обычно используемая пятая контрольная точка располагается в центре снимка. Такие точки, называемые *опорными* или *трансформационными*, определяют в ходе полевых геодезических работ или построения фототриангуляционных сетей. В отдельных случаях их координаты могут быть определены по топографическим картам.

Основными процессами трансформирования являются: изготовление плановой основы и опорных планшетиков, подготовка аэронегативов, расчет толщины подложки для учета деформации фотобумаги, собственно фототрансформирование и фотографическая обработка отпечатков. Кратко рассмотрим эти процессы.

Изготовление основы. На лист тонкой авиационной фанеры или алюминия размером 60×60 см наклеивают чертежную бумагу. После просушивания на планшете строят сетку координат, наносят углы рамки съёмочной трапеции или границы обработки, сетку координат, трансформационные точки, подписывают номера аэронегативов, вычерчивают границы рабочих площадей и оформляют принятыми на предприятии условными знаками (рис. 5.5).

Опорные планшетки используют для совмещения точек на экране фототрансформатора вместо основы. Их готовят на каждый трансформируемый аэронегатив или на их группу, включающую два-три смежных аэронегатива одного маршрута. С этой целью на лист чертежной бумаги с помощью восковки или на просветном столе переносят центр аэронегатива и необходимые для его трансформирования ориентирующие точки. Точки оформляют принятыми условными знаками, а их наколы чернят тушью или острием карандаша.

Подготовка аэронегативов заключается в прочистке наколов центральных и ориентирующих точек, по которым будет выполняться фототрансформирование. Диаметр накола должен быть не более 0,1 мм при трансформировании аэронегатива на увеличение и не более 0,2 мм при трансформировании аэронегатива на уменьшение.

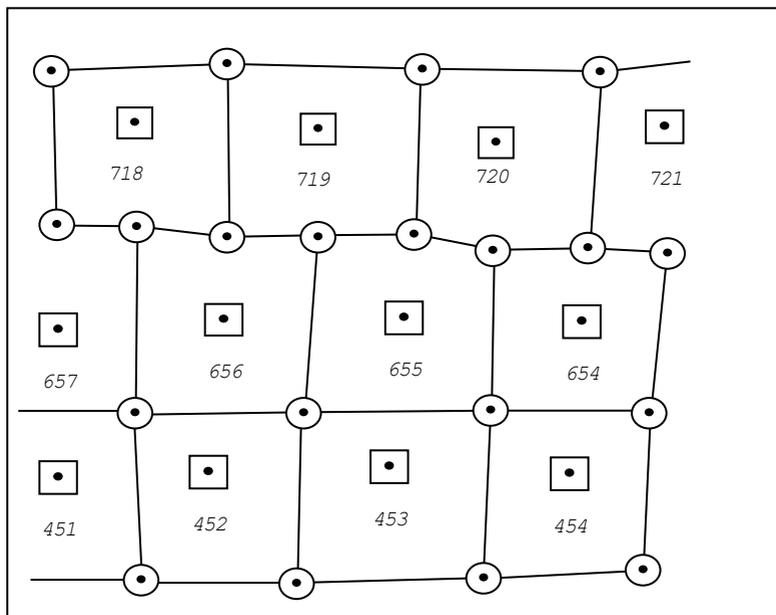


Рис. 5.5. Плановая основа

Учет деформации фотобумаги выполняется путем изготовления отпечатка в более крупном масштабе, чем это требуется. С этой целью определяют величину деформации: получают отпечаток с заранее известными размерами элементов изображения и подсчитывают толщину картонной подложки, которую нужно разместить при совмещении точек под опорным планшетиком. При печати изображения подложку и опорный планшетик заменяют фотобумагой, на которой фиксируется изображение в чуть более крупном, чем требуется, масштабе. После мокрой фотографической обработки и последующей сушки отпечаток примет нужные размеры.

Собственно **фототрансформирование** начинают с приведения прибора в исходное состояние: экран устанавливают в горизонтальное положение, а на шкалах рабочих движений – начальные отсчеты (места нулей). В кассету укладывают аэронегатив эмульсией к объективу, совмещая его главную точку с центром кассеты, а на экране размещают подложку с уложенным на нее опорным планшетиком. После этого включают освещение и открывают диафрагму объектива.

Техника фототрансформирования зависит от конструкции применяемого фототрансформатора и сводится к совмещению светящихся точек аэронегатива (проектируемого на экран изображения) с зачерненными точками опорного планшетика. Общие принципы, на которых построена техника совмещения точек аэронегатива и основы, иллюстрируют представленные на рис. 5.6 ситуации.

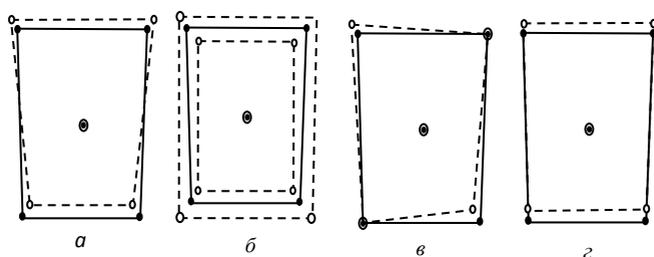


Рис. 5.6. Методика совмещения точек при фототрансформировании:
а – наклонить экран (опустить переднюю его часть);
б – изменить масштаб изображения; *в* – наклонить экран вокруг линии, соединяющей совмещенные точки экрана и негатива; *г* – ввести децентрацию

Совмещение точек считается достигнутым, если несовпадение проектируемых с аэронегатива опорных точек с их положением на экране не превышает 0,4 мм. После совмещения точек объектив диафрагмируют, закрывают светофильтром, опорный планшетик с подложкой заменяют фотобумагой, выравнивают ее покровным стеклом и выполняют экспонирование.

Фотографическая обработка отпечатков заключается в их проявлении, фиксировании и сушке на специальных стеллажах.

Трансформированные снимки, полученные в результате выполнения рассмотренных операций, используют для монтажа фотоплана.

Учет рельефа при фототрансформировании. Рассмотренная выше технология фототрансформирования является теоретически строгой лишь для точек местности, лежащих в одной плоскости. Практически это условие не выполняется, и точки, имеющие превышение $\pm h$ над средней плоскостью снимка, получают искажения.

Учет влияния рельефа местности при использовании любого способа трансформирования (в том числе фототрансформирования) основан на очевидном положении, заключающемся в том, что масштаб

изображения произвольной точки местности определяется отношением фокусного расстояния съёмочной камеры k высоте фотографирования над этой точкой. Поэтому масштаб изображения точек, лежащих выше средней плоскости аэроснимка, всегда крупнее среднего масштаба, а лежащих ниже нее – мельче. Это обстоятельство и объясняет наличие искажений под влиянием рельефа местности. С учетом изложенного, задача учета влияния рельефа местности при трансформировании сводится к тому, чтобы скорректировать масштабы изображения точек аэронегатива на экране прибора в соответствии с их положением относительно плоскости трансформирования и привести эти масштабы к требуемому.

Механизм учета влияния рельефа местности при фототрансформировании, заключающийся в преобразовании изображения по частям (зонам), предложен австрийским инженером Шеймпфлюгом еще в 1903 г. и сводится к следующему.

Пусть рабочей площади аэроснимка соответствует изображенный на рис. 5.7 фрагмент оригинала рельефа топографической карты; отметки самой низкой и самой высокой точек в пределах рабочей площади равны соответственно Z_{\min} и Z_{\max} , а колебание рельефа $\Delta Z = Z_{\min} - Z_{\max}$.

Найдем высоту зоны (ступени) Q , при которой величина искажения, вызванного влиянием рельефа местности, не превысит заданного допуска δ_h :

$$Q = 2h_{\text{пред}} = \frac{2\delta_h fM}{1000r}. \quad (5.7)$$

Очевидно, что трансформирование на одну плоскость даст приемлемые по точности результаты только при $\Delta Z < Q$.

Если же $\Delta Z > Q$, то фототрансформирование на одну плоскость даст грубые результаты. Во избежание этого необходимо разделить местность по высоте на несколько зон так, чтобы разности высот в пределах каждой из них не превышали Q (рис. 5.8). Каждую из таких зон необходимо трансформировать отдельно, используя исправленные соответствующим образом трансформационные точки. При этом переход от одной зоны к другой осуществляется путем изменения только масштаба проектирования на величину, пропорциональную высоте зоны. В последующем, при монтаже фотоплана, из каждого отпечатка используют лишь часть изображения, в которой располагается соответствующая зона.

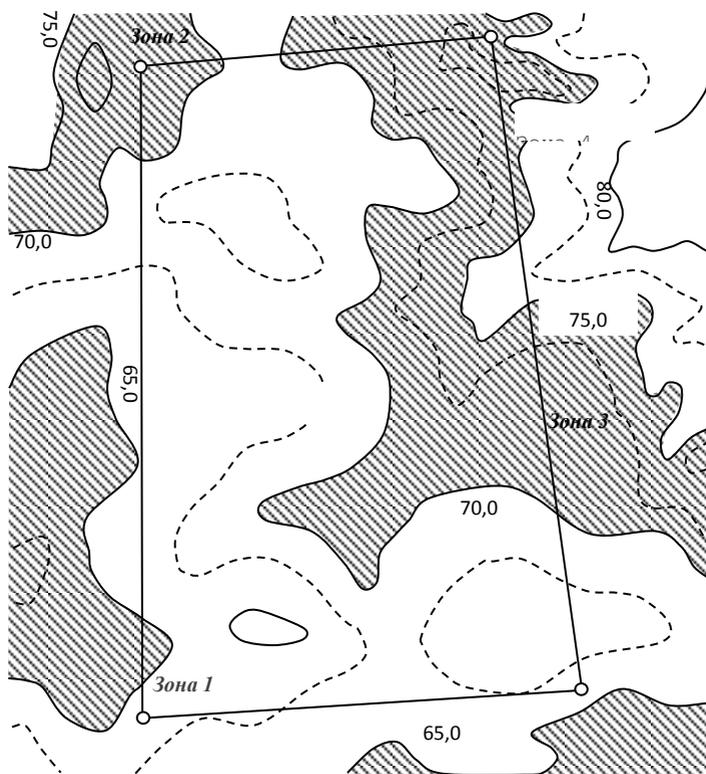


Рис. 5.7. Фрагмент топографической карты, соответствующий рабочей площади снимка

Для фототрансформирования на средние плоскости зон необходимо соответствующим образом исправить положение точек основы, сместив нанесенные на нее по координатам трансформационные точки A^0 , B^0 и др. в положение A' , B' (рис. 5.8). При этом величина поправки Δ_h определяется по формуле, вытекающей из зависимости 5.7:

$$\Delta_h = \frac{R_i h_i}{H_{\text{абс}} - Z_{\text{ср. пл}}}, \quad (5.8)$$

где

$$h_i = Z_i - Z_{\text{ср. пл.}} \quad (5.9)$$

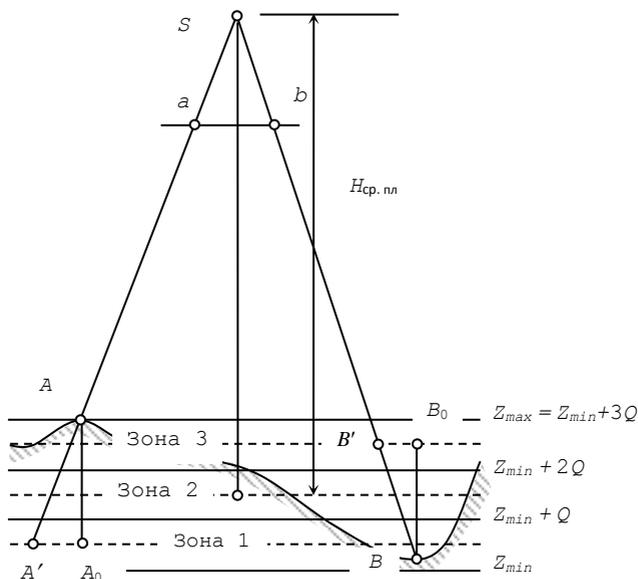


Рис. 5.8. Зоны трансформирования

В формулах (5.8) и (5.9):

$Z_{cp.пл}$, $H_{абс}$ – отметка средней плоскости зоны и абсолютная высота фотографирования;

Z_i , R_i , h_i – отметка трансформационной точки, ее удаление от центра снимка на основе превышения над средней плоскостью зоны.

Положительные поправки Δh откладываются от центральной точки снимка, а отрицательные – к центральной.

С учетом изложенного, технология фототрансформирования дополняется следующими операциями:

1. Определение по карте высот опорных (трансформационных) точек Z_i , округление их высот до отметок ближайших горизонталей и расчет колебания рельефа в пределах рабочей площади снимка:

$$\Delta Z = Z_{min} - Z_{max}. \quad (5.10)$$

2. Расчет высоты зоны (ступени) Q , ее округление до сечения рельефа (как правило, в сторону уменьшения) и подсчет числа зон:

$$N = \Delta Z / Q. \quad (5.11)$$

3. Вычисление отметок средних плоскостей каждой зоны $Z_{\text{ср.пл}}$:

$$Z_{\text{ср.пл}} = Z_{\text{min}} + (n - 0,5) Q, \quad (5.12)$$

где n – порядковый номер зоны, считая от наименьшей по высоте.

4. Расчет поправок по формулам (5.9), (5.10) и введение их в положение трансформационных точек опорного планшетика для нескольких зон (как правило, первой, средней и последней). Контролем правильности выполненных расчетов является параллельность фигур трансформации, соответствующих расчетным зонам трансформирования (рис. 5.9).

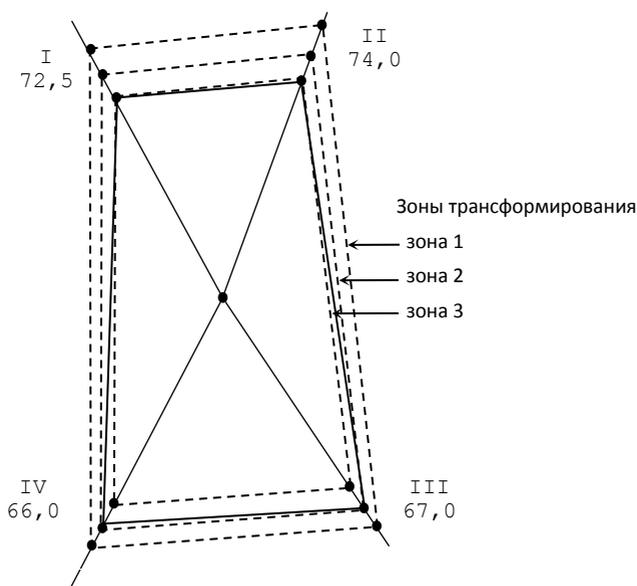


Рис. 5.9. Фигуры трансформирования снимка

Техника совмещения точек при фототрансформировании на первую плоскость первой зоны не отличается от рассмотренной ранее и выполняется с учетом особенностей конструкции фототрансформатора.

Номер зоны, на которую выполнено трансформирование, подписывают на обратной стороне фотоотпечатка.

Изменение масштаба изображения при переходе от одной зоны к другой выполняют по изменению Δl длины какого-либо отрезка, например, расстояния l между изображениями на экране фототрансформатора противоположных координатных меток. При изменении длины Δl при переходе от зоны i к зоне $i + 1$ определяется по формуле

$$\Delta l_{i,i+1} = l_i \frac{Q}{H_i}, \quad (5.13)$$

где Q – высота зоны;

l_i – длина отрезка при трансформировании зоны i ;

H_i – высота фотографирования над средней плоскостью зоны i .

Фототрансформирование по зонам – очень трудоемкий процесс, и поэтому он применяется при числе зон, не превышающем трех. При необходимости использования большего числа зон применяют метод дифференциального трансформирования (ортотрансформирования).

5.2. Фотопланы и фотосхемы

5.2.1. Понятие о фотосхемах и фотопланах

При работе на значительных территориях, покрываемых несколькими маршрутами, использование отдельных аэроснимков влечет ряд неудобств, таких как недостаточная обзорность изучаемой территории, невозможность измерения площадей и линий, части которых расположены на разных аэроснимках, и т. п.

Это заставляет соединять отдельные аэроснимки в единое целое, удаляя их перекрывающиеся части. При этом объединять можно как трансформированные снимки, свободные от влияния угла наклона и рельефа местности, так и контактные отпечатки, содержащие все названные искажения. В первом случае в результате монтажа будет получена доброкачественная топографическая основа (фотоплан), а во втором – фотосхема.

Фотосхемой называется фотографическое изображение местности, полученное в результате монтажа рабочих площадей контактных или увеличенных нетрансформированных снимков. Фотосхемы можно классифицировать по нескольким признакам.

В зависимости от числа маршрутов фотосхемы делятся на:

- *одномаршрутные*, создаваемые из снимков одного маршрута;

- *многомаршрутные*, создаваемые из снимков нескольких маршрутов.

В зависимости от способа монтажа различают фотосхемы, изготовленные по способу *совместной обрезки* (только одномаршрутные) и *индивидуальной обрезки* (одномаршрутные или многомаршрутные).

В зависимости от вида исходных материалов фотосхемы делят на *контактные*, создаваемые из рабочих площадей контактных снимков, масштаб которых равен масштабу снимков, и *приведенные*, создаваемые из предварительно увеличенных или уменьшенных до одного масштаба снимков.

В зависимости от наличия и использования опорных пунктов различают фотосхемы *свободные*, создаваемые без использования данных о геодезической системе координат изображенной на них местности, и *каркасные*, монтируемые на основе редкой сети опорных точек.

Фотосхемы готовят путем наклейки на основу вырезанных тем или иным способом рабочих площадей снимков, как правило, в границах землепользований или трапеций масштабов 1:10 000 – 1:50 000. В качестве основы фотосхем используют картон или тонкую фанеру. Область использования фотосхем достаточно широка – от дешифрирования аэроснимков до предварительных изысканий, приближенных количественных оценок и соответствующих измерений в интересах различных отраслей народного хозяйства – землеустройства, лесоустройства, градоустройства, геологии и т. п.

Фотопланом называют одномасштабное фотографическое изображение местности, изготовленное из рабочих частей трансформированных снимков в избранной системе координат и с требуемой точностью.

В зависимости от целевого назначения фотопланы делятся на топографические и специальные.

Топографические фотопланы составляют в общегосударственной разграфке с соблюдением требований действующих инструкций и наставлений по топографической съемке.

Специальные фотопланы составляют, как правило, в произвольной разграфке и с соблюдением требований по точности, оформлению и т. п., регламентируемых ведомственными инструкциями.

Существенным преимуществом фотоплана по сравнению с топографическим планом является высокая информационная емкость и наглядность. В то же время фотографическое изображение контуров

отличается от условного их изображения на карте, а отсутствие на фотоплане горизонталей и километровой сетки не позволяет определять по нему координаты и высоты точек. В связи с этим на фотоплане часто показывают соответствующими условными знаками некоторые объекты (населенные пункты, основные дороги и др.), наносят координатную сетку и проводят горизонтали. Такой документ, сочетающий в себе преимущества фотоплана и топографической карты, называют *фотокартой*.

5.2.2. Способы изготовления фотосхем

Вне зависимости от вида фотосхемы и способа ее монтажа, к линии пореза смежных снимков предъявляется ряд требований, в частности:

- линия пореза должна проходить по однотонным участкам изображения обоих снимков, по возможности минуя населенные пункты, не далее 1–2 см от средней линии перекрытия;

- линия пореза не должна проходить через мелкие контуры во избежание их выреза;

- линейные контуры должны пересекаться линией пореза под углами, близкими к 90° (не менее 30° и не более 150°).

Способ индивидуальной обрезки применяют только для изготовления одномаршрутных фотосхем. Его сущность заключается в выборе на снимках пары идентичных хорошо читаемых точек вблизи средней линии перекрытия, расположенных по обе стороны от оси маршрута (рис. 5.10) и их наколке тонкой иглой. Желательно, чтобы эти точки имели возможно большие превышения относительно средней плоскости, что позволит избежать вырезов контуров при порезе снимков вдоль намеченной линии. Линия, соединяющая выбранные точки, должна отвечать приведенным выше требованиям к линии пореза.

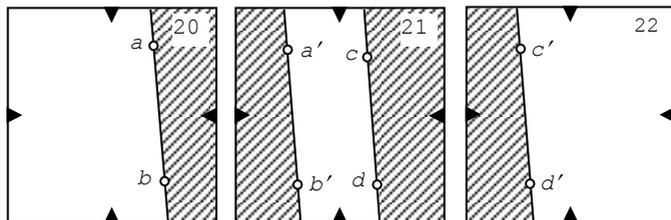


Рис. 5.10. Изготовление фотосхемы способом индивидуальной обрезки

К наколотым точкам прикладывают тонкую металлическую линейку и острым скальпелем разрезают снимки по линиям ab , $a'b'$, cd , $c'd'$ и т. д. (рис. 5.10). Обрезки снимков (на рис. 5.10 они заштрихованы) вдоль каждой линии сохраняют для контроля изготовленной фотосхемы.

Вырезанные центральные части снимков наклеивают на основу. При этом общие точки вдоль линии пореза, как правило, не будут совпадать, поскольку масштаб смежных снимков не одинаков. Поэтому при наклейке рабочей площади каждого последующего снимка ее укладывают таким образом, чтобы совпали элементы ситуации в центральной части снимка.

При *совместной обрезке* снимков предварительно выполняют их монтаж по общим контурам. Совмещение контуров выполняют способом мелькания, путем наложения одного снимка на другой перекрывающимися частями и быстрого и многократного приподнимания верхнего аэроснимка с одновременным его перемещением с целью максимального совмещения общих контуров в средней части перекрытия. Для контроля совмещения на верхнем снимке накальвают несколько точек, отгибают его и оценивают качество монтажа. При наличии систематических расхождений верхний снимок смещают в нужном направлении. В таком положении снимки закрепляют грузиками и выполняют порез (рис. 5.11) с таким расчетом, чтобы оба снимка оказались прорезанными, а приведенные ранее требования к линии пореза были выполнены. Обрезки снимков подписывают и сохраняют для оценки точности.

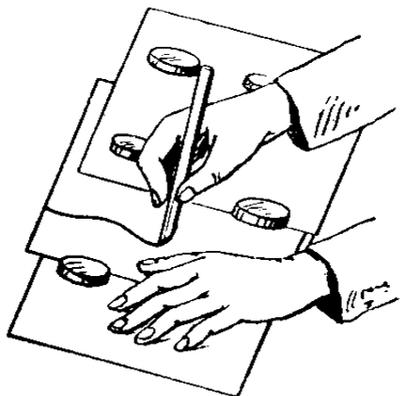


Рис. 5.11. Совместная обрезка снимков

Аналогично выполняют монтаж и обрезку следующих снимков и т. д.

После обрезки всех снимков их наклеивают на основу, точно совмещая линии порезов смежных снимков.

Монтаж *многомаршрутных фотосхем* выполняют способом мельканий и начинают со среднего маршрута. Затем подориентируют к нему снимки верхних и нижних смежных маршрутов, добиваясь максимального совмещения контуров, размещенных в зоне как продольного, так и поперечного перекрытия. Каждый снимок после его укладки закрепляют грузиками.

Обрезку снимков начинают после полного монтажа всех снимков и выполняют по маршрутам. Вначале обрезают снимки маршрутов по средним линиям продольных перекрытий, отгибая и прижимая грузиками смежные маршруты, а затем – по средней линии поперечного перекрытия (рис. 5.12). Полученные при этом обрезки подписывают и сохраняют для оценки качества фотосхемы.

Вырезанные рабочие площади снимков наклеивают на основу, начиная со среднего аэроснимка среднего маршрута.

Приведенные фотосхемы составляют в том же порядке, что и многомаршрутные фотосхемы, но монтажу снимков предшествует их увеличение с целью приведения к заданному масштабу. Коэффициент увеличения каждого снимка K_i определяют как отношение знаменателя масштаба снимка m_i к знаменателю заданного масштаба M .

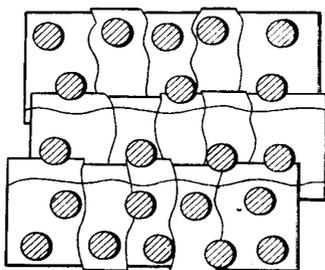


Рис. 5.12. Изготовление многомаршрутной фотосхемы

Масштаб снимка можно определить по показаниям радиовысотомера, используя формулу $1 / m_i = f / H_i$. При отсутствии показаний радиовысотомера масштаб снимков определяют по топографической карте, путем сравнения длин соответствующих отрезков, измеренных

на снимке l_{CH} и на карте l_{K} . С учетом масштаба карты $1:M_{\text{K}}$ масштаб снимка определяют по формуле

$$\frac{1}{m_i} = \left(\frac{l_{\text{CH}}}{l_{\text{K}} M_{\text{K}}} \right)_i. \quad (5.14)$$

Заданный масштаб фотосхемы $1:M$ чаще всего выбирают соответствующим стандартным значениям, принятым для топографических карт: 1:5 000, 1:10 000, 1:25 000 и т. д.

Следует иметь в виду, что фотосхемы, составленные из плановых снимков равнинной местности (особенно приведенные фотосхемы) характеризуются постоянством масштаба и малыми искажениями. Так, при среднем угле наклона гиростабилизированных снимков равнинной местности порядка $10'$ максимальное искажение δ_{α} на краю рабочей площади при $f = 150$ мм не превышает 0,2 мм в масштабе снимка, что вполне сопоставимо с точностью фотоплана. Точность таких фотосхем, однако, будет снижаться по мере увеличения колебания рельефа местности.

Оформление фотосхемы включает подпись ее масштаба, номенклатуры трапеции или наименования землепользования, а также названий населенных пунктов, наименования организации, фамилии исполнителя и даты изготовления.

5.2.3. Технология изготовления фотопланов

Работы по изготовлению фотоплана начинают с подготовки основы, в качестве которой используют листы алюминия или авиационной фанеры толщиной 1–2 мм. Основу оклеивают чертежной бумагой, на которую наносят координатную сетку и опорные пункты, углы рамки трапеции и трансформационные точки.

Далее выполняют подготовку к монтажу фотоплана: подбирают трансформированные снимки, проверяют их фотографическое и метрическое качество, опознают трансформационные точки и пробивают пуансоном отверстия в виде кружков диаметром 1,0 мм. Центры этих отверстий должны точно совпадать с соответствующими точками основы.

Для проверки правильности трансформирования аэроснимок с пробитыми отверстиями укладывается на основу так, чтобы центры отверстий уклонялись от соответствующих точек основы не более чем на

0,5 мм (для равнинных и всхолмленных районов). Если снимки трансформированы по зонам, то проверку выполняют с помощью опорного планшетика путем совмещения центров пробитых на снимке отверстий с точками соответствующей зоны. При недопустимых расхождениях снимки бракуют и трансформируют заново.

Техника монтажа фотопланов в случае фототрансформирования снимков на одну плоскость и по зонам (на несколько плоскостей) различна и заключается в следующем.

Если местность равнинная и *фототрансформирование выполнено на одну плоскость*, то монтаж фотоплана выполняют в такой последовательности.

На основу последовательно, начиная с северо-западного угла, укладывают трансформированные снимки первого маршрута, ориентируют их, совмещая центры пробитых пуансоном отверстий с точками основы, и прижимают грузиками. При укладке очередного снимка проверяют, как и при монтаже фотосхем, сходимость контуров способом мельканий и делают наколы четких контурных точек. При уклонении точки нижнего (предыдущего) снимка от следа накола более чем на 0,5 мм укладываемый снимок разворачивают, одновременно контролируя совмещение точек основы с центрами пробитых пуансоном отверстий. Уложив снимок, выполняют порез обоих снимков, как и при монтаже фотосхемы по способу совместной обрезки. При монтаже фотоплана линия пореза должна отвечать еще одному требованию: ее удаление от центров пробитых пуансоном отверстий должно быть не менее 5 мм.

После этого снимки первого маршрута закрепляют грузиками и приступают к укладке и порезу снимков смежного маршрута в том же порядке. При этом контроль сходимости контуров выполняют в зонах как продольного, так и поперечного перекрытий. После этого выполняют порез снимков смежных маршрутов по средней линии поперечного перекрытия.

По окончании монтажа фотоплана аэроснимки обрезают вдоль рамок трапеции, сохраняя фотоизображение за рамками в пределах полосы шириной 1 см, а по границам обработки – 2 см. Эти обрезки с нанесенными на них линиями координатной сетки сохраняют для контроля фотоплана.

Если *снимки трансформированы по зонам*, то, прежде всего, на каждом из них исправляют положение трансформационных точек путем введения в их положение поправок. При этом положительные по-

правки откладываются по направлению к центру, а отрицательные – от центра. В полученных точках пробивают пуансоном отверстия диаметром 1,0 мм.

Если все отпечатки, полученные с одного аэронегатива при трансформировании его на разные зоны, наложить на основу, то центры пробитых пуансоном отверстий должны совпадать с точками основы.

При монтаже фотоплана вначале по трансформационным точкам укладывают на основу отпечаток первой зоны, а затем – второй зоны и контролируют сходимость контуров вдоль границы зон. Если она удовлетворительна, то выполняют порез снимков по границе первой и второй зон и приклеивают к основе снимок первой зоны. Затем укладывают снимок третьей зоны с контролем сходимости по трансформационным точкам и контурам вдоль границы второй и третьей зон, выполняют порез второго и третьего снимков и т. д.

Особенностью фотопланов, полученных в результате трансформирования по зонам, является вероятность вырезов и дублетов по линиям порезов (границам зон), вызываемых остаточным влиянием рельефа местности. Их величины на краях рабочих площадей снимков могут достигать до 1 мм, что отражается на точности измерений по фотопланам.

Оптический монтаж фотоплана применяют в случаях, когда число зон трансформирования более пяти, и выполняют его в процессе фототрансформирования непосредственно на фототрансформаторе. Фотобумагу наклеивают на жесткую основу, а поверх ее приклеивают светонепроницаемую бумагу («рубашку») с нанесенным на нее трансформационными точками, положение которых исправлено для каждой зоны. На эту же «рубашку» с топографической карты соответствующего масштаба переносят горизонтالي, ограничивающие зоны трансформирования.

Совместив изображения трансформационных точек с их положением в первой зоне, закрывают объектив светофильтром, выполняют порез «рубашки» по границам первой зоны, отклеивают вырезанные части «рубашки» и производят экспонирование. После этого вырезанные части рубашки, прикрывающие первую зону, возвращают на место, и все операции повторяют для очередной (второй, третьей и т. д.) зоны.

Закончив фототрансформирование всех зон обрабатываемого снимка, в фотолаборатории снимают с основы «рубашку» и выполняют фотографическую обработку, результатом которой является готовый фотоплан.

5.2.4. Контроль качества проявления фотосхем и фотопланов

Работы по изготовлению фотосхем и фотопланов завершаются их контролем, выполняемым с помощью обрезков снимков.

Контроль фотоплана выполняют по трем показателям: по точкам, по порезам и по сводкам со смежными фотопланами. Результаты контроля отражаются в корректурном листе (рис. 5.13), на который схематически наносят рамку листа, координатную сетку, линии порезов, трансформационные точки, точки по сводкам, линиям порезов и выполненные контрольные измерения.

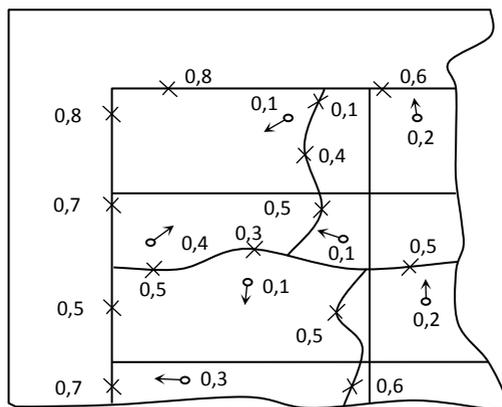


Рис. 5.13. Фрагмент корректурного листа фотоплана

Контроль по точкам заключается в оценке величин и направлений уклонений центров пробитых пуансоном отверстий от соответствующих точек основы. Направление, в котором центр пробитого пуансоном отверстия смещен относительно точки основы, показывают стрелкой и рядом записывают величину этого уклонения, оценивая ее визуально, ориентируясь по диаметру пробитого пуансоном отверстия.

В соответствии с действующими инструкциями величины уклонений точек не должны превышать 0,5 мм в равнинных и всхолмленных районах и 0,7 мм в горных.

Контроль по порезам выполняют с помощью обрезков снимков, полученных при монтаже фотоплана. Обрезок снимка прикладывают к линии пореза так, чтобы он являлся продолжением снимка, от кото-

рого он отрезан, и совмещают изображенные на нем контуры с их продолжениями на фотоплане. Через каждые 2–3 см делают наколы четких контурных точек, после чего, убрав обрезок, выполняют оценку уклонов соответствующих точек фотоплана от следов наколов с помощью палетки с миллиметровыми делениями. Величина уклона в соответствии с требованиями нормативных документов не должна превышать 0,7 мм, а в горных районах при коэффициенте трансформирования – более 1,5 мм и при трансформировании по зонам – 1,0 мм.

Контроль по сводкам со смежными фотопланами выполняют по обрезкам, полученным при обрезке смежного фотоплана по соответствующей рамке. Обрезки совмещают с линиями координатной сетки контролируемого фотоплана и через 2–3 см делают наколы четких контурных точек. Величины уклонов соответствующих точек контролируемого фотоплана от следов наколов измеряют с помощью палетки и заносят в корректурный лист. Допустимыми считаются уклоны, не превышающие 1,0 мм в равнинных, всхолмленных районах и 1,5 мм – в горных.

Контроль фотосхем выполняют только по линиям порезов. Оформляемый при этом корректурный лист не отличается от корректурного листа фотоплана, но содержит только схематические линии порезов снимков, положение контрольных точек и величины расхождений их положения.

При контроле одномаршрутных фотосхем, изготовленных способом индивидуальной обрезки, в процессе контроля выявляют наличие дублетов и вырезов по взаимному положению накалываемой точки, следа накола и линии пореза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Системс, 2006. – 368 с.
2. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

6. ПЛАНОВО-ВЫСОТНАЯ ПРИВЯЗКА АЭРОФОТОСНИМКОВ

- 6.1. Сущность планово-высотной привязки аэрофотоснимков.
- 6.2. Схемы размещения опорных точек.
- 6.3. Оpozнaвание и оформление точек на снимках.
- 6.4. Способы планово-высотной привязки снимков.

6.1. Сущность планово-высотной привязки аэрофотоснимков

Планово-высотная привязка снимков – комплекс топографо-геодезических работ по опознанию на местности и определению геодезических координат избранных контурных точек аэроснимков.

В зависимости от назначения различают три вида привязки:

1) плановую, в результате которой определяют плановые геодезические координаты X и Y точек, необходимых для изготовления контурного фотоплана или плана местности;

2) планово-высотную, в результате которой определяют пространственные геодезические координаты X , Y и Z точек, необходимых для изготовления топографического плана местности;

3) высотную, в результате которой определяют только высоты точек (координата Z), необходимые для камерального сгущения высотной геодезической основы и стереоскопической рисовки рельефа.

Опорной точкой (опознаком) называют любую контурную точку, опознанную на аэроснимке и местности, координаты которой определены по результатам геодезических измерений.

При этом опорные точки могут быть определены только в плане, только по высоте или в плане и по высоте. В первом случае привязку называют плановой, во втором – высотной, а в третьем – планово-высотной.

Планово-высотная привязка снимков включает в себя:

- ✓ подготовку материалов;
- ✓ составление проекта привязки;
- ✓ рекогносцировку и закрепление в натуре опорных точек;
- ✓ полевые измерения, вычислительные работы, оформление материалов и сдачу работ.

Подготовка материалов заключается в том, что на объект работ подбираются репродукции накидного монтажа и комплект снимков (при малых коэффициентах увеличения фотоизображения – контакт-

ных, а при больших – увеличенных примерно до масштаба будущего плана). С имеющихся топографических карт пункты геодезической сети переносятся на репродукцию накидного монтажа, а затем зоны возможного расположения этих пунктов на снимки.

Составление проекта привязки опорных точек и развития съемочного обоснования выполняется на репродукции накидного монтажа. При использовании больших коэффициентов увеличения фотоизображения (порядка 4) применяется обычно сплошная плановая привязка. В прочих случаях – разреженная.

Места расположения запроектированных опорных точек показываются на репродукции накидного монтажа кружками диаметром 5 мм красной тушью, границы зон опознавания отмечаются на одном из перекрывающихся снимков красным карандашом.

Опорные точки размещаются таким образом, чтобы они находились на максимальном числе снимков. Это условие выполняется при размещении опорной точки в середине поперечного и продольного перекрытия снимков.

Точка, выбираемая на аэроснимке в качестве опорной, должна, бесспорно, опознаваться как на местности, так и на всех покрывающих ее аэроснимках. В качестве таких точек используются углы изгородей, низких строений, перекрестков дорог, промоин, резких изгибов тропинок, канав, отдельные кусты и другие точки, которые можно бесспорно опознать и наколоть на аэроснимке с ошибкой не более 0,1 мм.

Лучшие геометрические формы контуров, образующих надежно опознаваемые точки, приведены на рис. 6.1 под номерами 1–6 в желаемом порядке. В качестве опорной точки можно взять центр какой-либо площадки (пятна), но при условии, что форма площадки правильная, диаметр изображения не более 2 мм и есть уверенность в бесспорности его опознавания на аэроснимке и местности.

Точки, получающиеся в результате пересечений линий под углом менее 60°, нежелательны, а менее 30° недопустимы. Точка должна быть доступна на местности для геодезического определения ее координат.

Собственная высота (в метрах) объекта, выбираемого на местности в качестве опорной точки, не должна превышать величины:

$$h = \frac{\delta_0 Mf}{r}, \quad (6.1)$$

где δ_0 – допустимое смещение изображения на фотоплане, вызываемое собственной высотой объекта ($\delta_0 = 0,1$ мм);

r – расстояние от главной точки аэронегатива до угла рабочей площади его, выраженное в миллиметрах.

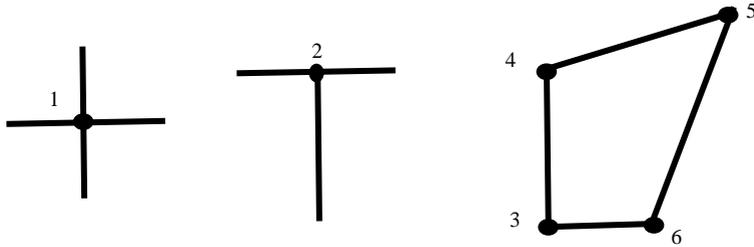


Рис. 6.1. Формы контуров, образующие опознаки

Из формулы видно, что в качестве опорных точек лучше выбирать объекты местности, лежащие возможно ближе к уровню земли (угол земельного участка, пересечение тропинок, угол заборов и т. п.). Если приходится брать высокий объект, то необходимо определить его высоту над уровнем земли для вычисления соответствующей поправки. Нельзя выбирать опорные точки на дне оврага, на склоне обрыва и т. п.

Ошибка в определении координат опорной точки относительно ближайшего пункта геодезической основы не должна превышать 0,2 мм в масштабе плана. Опорная точка должна располагаться на перекрытии возможно большего количества аэроснимков, что улучшает качество.

6.2. Схемы размещения опорных точек

Опорные точки могут обеспечивать либо каждый снимок, либо некоторое их количество. В первом случае речь идет о *сплошной* привязке, используемой для фотограмметрической обработки отдельных снимков или стереопар, а во втором – о *разреженной*. Сеть опорных точек, полученных при разреженной привязке, в дальнейшем сгущают путем построения сетей пространственной фототриангуляции с тем, чтобы в итоге обеспечить геодезическими данными каждый снимок или каждую стереопару.

Опорные точки располагают в углах рабочей площади снимка, в зоне тройного продольного и поперечного перекрытий снимков, не ближе 1 см к их краям.

Так, при создании топографических карт плоскоравнинных, равнинно-пересеченных и всхолмленных районов в соответствии с требованиями действующих инструкций планово-высотные опознаки располагают поперек аэросъемочных маршрутов таким образом, чтобы на каждом маршруте было по одному опознаку каждого ряда (рис. 6.2).

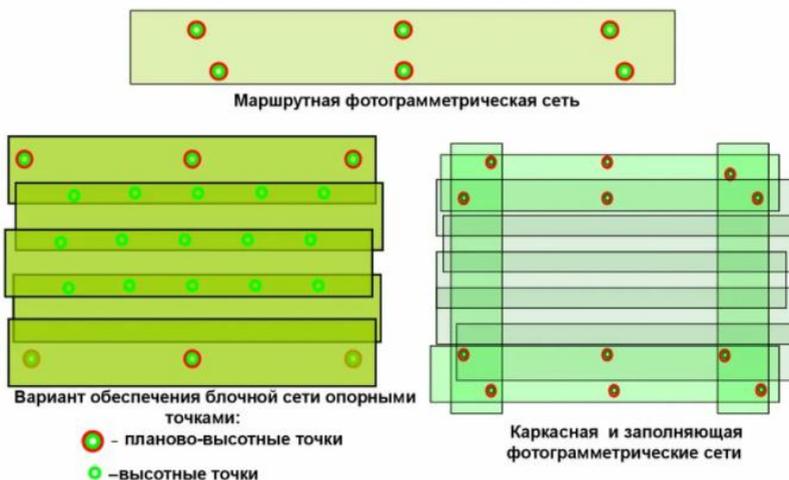


Рис. 6.2. Размещение опорных точек

Высотные опознаки размещают по такой же схеме, но в два раза гуще, чем планово-высотные. Для обеспечения сводок со смежными объектами по границам обработки плановые и высотные опознаки размещают в два раза гуще, чем рекомендовано действующими инструкциями.

Если параметры аэрофотосъемки или точность фотограмметрической обработки отличаются от рекомендуемых инструкциями, то расчет плотности опорных точек выполняют исходя из конкретных значений этих параметров, точности фотограмметрического сгущения.

Практически каждое предприятие, выполняющее фотограмметрическую обработку материалов аэрофотосъемки, располагает типовыми схемами размещения опорных точек, разработанными применительно

к принятой технологии выполнения работ, наличию оборудования, физико-географическим условиям территории и т. д.

6.3. Опознавание и оформление точек на снимках

Рекогносцировка и закрепление в натуре опорных точек начинаются с обследования пунктов триангуляции государственной сети, опознавания и оформления их на снимках. Центр опознанного пункта триангуляции накальвается тонкой иглой, и на обратной стороне снимка зарисовывается в полутонах абрис или прикладывается фотоабрис. Если на пункте не сохранился наружный знак, то над его подземным центром устанавливается веха. Высота вехи должна обеспечивать видимость при выполнении плановой привязки опорных точек.

В процессе рекогносцировки уточняется метод геодезического определения и выбирается окончательное положение опорной точки.

Опознанные плановые опорные точки закрепляются на местности кольями длиной 0,3–0,5 м, вбиваемыми вровень с землей и окапываемыми треугольником со сторонами 1,2–1,5 м.

Погрешность опознавания не должна превышать 0,1 мм в масштабе составляемого плана. Если в зоне опознавания в качестве опорной можно использовать несколько точек, то предпочтение отдается той, геодезическое определение которой будет проще. Опознанная точка накальвается на снимке с погрешностью, не превышающей 0,1 мм. Диаметр накола не должен превышать 0,1 мм.

С обратной стороны основного снимка накол обводится карандашом окружностью с диаметром 2–3 мм. Рядом подписывается номер опорной точки, соответствующий номеру снимка. Если на снимке оформлено две и более опорных точек, то к номеру снимка соответственно добавляются А, Б и т. д. Здесь же рисуется карандашом абрис опорной точки в квадрате со стороной около 4 см, а также дается описание опорной точки по фотоизображению, ставится подпись исполнителя и дата опознавания (рис. 6.3). Абрис рисуется по смежному снимку. Этот абрис нужен для того, чтобы в камеральных условиях фотограмметрист смог безошибочно и без затруднений наколоть на аэронегативе или аэроснимке именно ту точку, которую привязал в поле геодезист. Кроме того, абрис нужен для последующего контроля правильности опознавания. Поэтому на абрисе нужна зарисовка не всей местности, а только ближайших к опорной точке деталей, помогающих опознать на аэронегативе точку, привязанную в поле. Зарисовку производят простым карандашом в тех же светотенях, в каких

получилось фотоизображение, обращая особое внимание на детали, непосредственно окружающие опознанную точку.

Рядом с абрисом указывают стрелкой направление на север и пишут краткое пояснение с указанием, какая именно точка местности привязана, какая была точность опознавания на местности и накола на аэроснимке, дату привязки и фамилию исполнителя. Замечания о точности нужны для камеральных работ, при которых важно знать степень доверия к различным опорным точкам. Зарисовку абриса ведут с аэроснимка, но при этом контролируют рисунок путем сличения его с натурой.

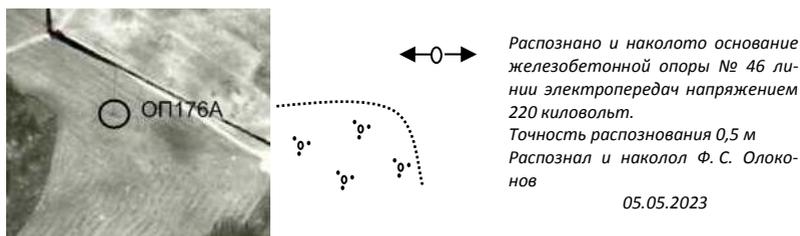


Рис. 6.3. Оформление опорной точки на снимке

На лицевой стороне основного снимка пишется слово «основной», накол опорной точки обводится двумя concentрическими окружностями диаметром 8 и 10 мм красной тушью и подписывается номер опорной точки. При этом под ножку кронциркуля подкладывается резинка, закрывающая накол. На смежных снимках точка не накалывается, а зона размещения ее обводится окружностью красной тушью диаметром 10 мм и подписывается номер.

При изготовлении фотопланов с большими коэффициентами увеличения фотоизображения целесообразно заменить опознаваемые естественные элементы ситуации специально заложенными и замаркированными (до выполнения аэрофотосъемки) опознавательными знаками (опознаками). Их размещают приблизительно в углах рабочей площади аэронегатива.

Одновременно их маркируют, т. е. устраивают вокруг точки полосы, образующие одну из форм, показанных на рис. 6.4. Длина каждой полосы должна быть такой, чтобы в заданном масштабе фотоплана она оказалась не короче 1 мм, а ширина для масштабов 1:2000–1:5000 должна быть на местности 0,3–0,5 м и для масштабов 1:10 000 и 1:25 000 – не менее 1 м. По цвету полосы должны фотографически

контрастировать с фоном, например, белые полосы на зеленом выгоне или черные полосы на белом песке и т. п.

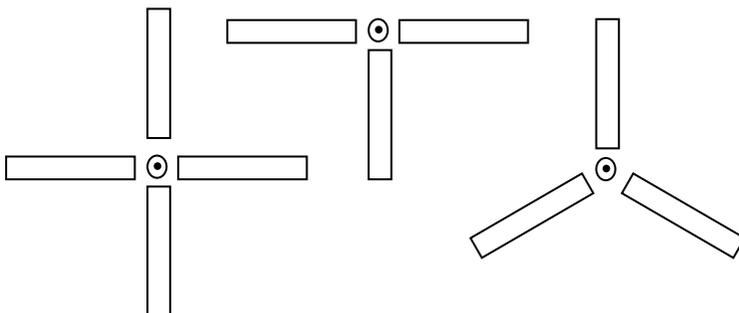


Рис. 6.4. Маркировка опознаков

По структуре они могут представлять либо полосы земли со снятым дерном и засыпкой опилками, белым песком, известью и т. п., либо канавки также с контрастирующей засыпкой, либо настилы из стволов молодой березы или ошкуренных других пород и т. п. Во всех случаях опознаки должны быть расположены так, чтобы они не могли оказаться закрытыми тенью или проекцией смежных высоких объектов (зданий, деревьев, обрывов и т. п.). Прочность маркировки должна обеспечить хорошее состояние опознаков до момента аэрофотосъемки. Возможны различные варианты маркировки в зависимости от местных условий.

После опознавания, закрепления и геодезических измерений для каждой опорной точки на отдельном чертеже составляется схема геодезического определения.

6.4. Способы планово-высотной привязки снимков

Плановые координаты опорных точек определяют геодезическими методами – прямыми, обратными и комбинированными засечками или проложением теодолитных ходов либо по результатам GPS-измерений. Высоты опорных пунктов определяют проложением, в зависимости от требуемой точности, ходов геометрического или тригонометрического нивелирования.

Плановая привязка снимков в закрытой местности выполняется теодолитными ходами, образующими системы замкнутых полигонов

или ходов с узловыми точками, а в открытой – с помощью прямых, обратных и комбинированных засечек. Для выбора метода привязки тщательно изучаются топографические карты, по которым устанавливается возможность видимости с опорных точек на пункты триангуляции и способы обхода местных препятствий.

1. *Привязка аэроснимков обратной засечкой.* Обратная засечка наиболее применима в открытой и частично в закрытой, но всхолмленной местности, когда теодолит можно установить непосредственно на определяемой опорной точке или вблизи нее с передачей координат по точку полярным способом. Обратную засечку применяют при условии решения ее не менее чем по четырем пунктам главной геодезической основы и точкам съемочного обоснования. Расстояние от определяемой точки до исходных пунктов не должно превышать 8 км при условии измерения углов двумя полными круговыми приемами 30'' теодолитом. В случае большей удаленности пунктов необходимо повышать точность измерений углов путем применения способа повторений или замены 30'' теодолита более точным инструментом (малым или средним оптическим теодолитом).

Способ обратных засечек (рис. 6.5) самый производительный и экономичный, но он требует тщательного соблюдения всех технических условий, особенно в отношении правильного взаимного расположения точек, размеров углов и величины расстояний до пунктов основы.

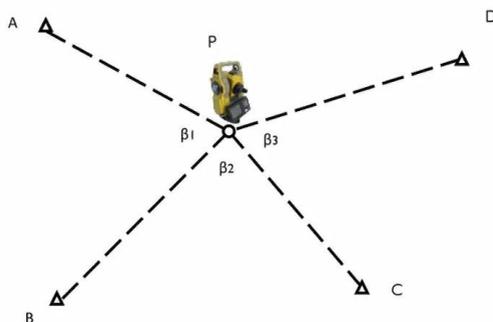


Рис. 6.5. Схема получения координат опорных точек методом обратной засечки

2. *Привязка аэроснимков полярным способом.* Этот способ применяют в тех случаях, когда опорная точка *C* расположена вблизи пунк-

та A главной геодезической основы или когда можно определить прямой или обратной засечкой недалеко от опорной точки произвольно выбранную вспомогательную точку (рис. 6.6). При этом способе привязки аэроснимков также необходимо предварительно восстановить наружные знаки пунктов геодезической основы, включенных в проект привязки. Углы на вспомогательной точке изменяют так же, как при привязке аэроснимков обратной засечкой, но тремя приемами. Обязательное условие – измерение двух примычных углов. Длины линий измеряют дважды.

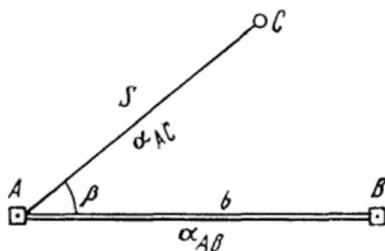


Рис. 6.6. Схема получения координат опорных точек полярным методом

3. *Привязка аэроснимков прямой засечкой.* Прямая аналитическая засечка применима в открытой и полужакрытой, а также в частично закрытой, но гористой местности. Прямая засечка допускается при условии осуществления ее не менее как с трех пунктов A_1, A_2, A_3 геодезической основы (рис. 6.7), причем углы, составляемые смежными направлениями, должны быть не менее 30° и не более 150° .

Расстояние от пунктов основы до определяемой точки N не должно быть более 8–10 км для масштаба 1:10 000 и 12–15 км для масштаба 1:25 000 при условии измерения углов $30''$ теодолитом. При более значительных расстояниях надо соответственно повышать точность измерений углов.

Способ прямых засечек уступает по производительности способу обратных засечек, но его применение менее зависит от местных условий. Он также обладает важным положительным свойством независимости, определения координат одной опорной точки от другой.

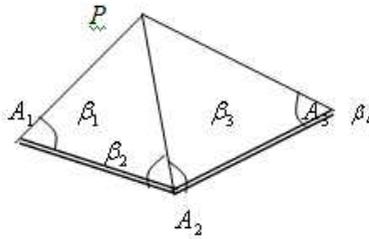


Рис. 6.7. Схема получения координат опорных точек методом прямой засечки

4. *Привязка аэроснимков триангуляционными построениями* (рис. 6.8). Различные варианты триангуляционных построений применяются преимущественно в полузакрытой, а иногда и в закрытой, но всхолмленной местности. При этом способе обычно часть точек являются опорными, а часть – вспомогательными, необходимыми для связи фигур или для определения с них опорных точек.

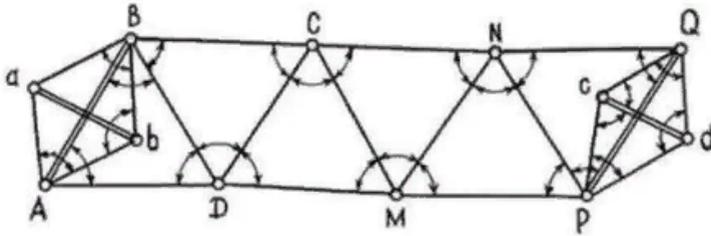


Рис. 6.8. Схема получения координат опорных точек методом триангуляции

5. *Привязка аэроснимков проложением полигональных ходов* (рис. 6.9). Для привязки аэроснимков в закрытой, а частично и в полузакрытой местности целесообразно применять полигонометрические способы, особенно при отсутствии на местности наружных знаков триангуляции. Самый распространенный из этих способов – проложение замкнутых и разомкнутых ходов. При этом особенно важно широко использовать аэроснимки и репродукции накидного монтажа для выбора трассы хода и даже положения будущих станций. Последние намечают так, чтобы как можно большее количество станций распола-

галось на опознаваемых точках местности, но без излишней затраты сил и средств. Выполнение этого условия дает дополнительные опорные точки и позволяет легко обнаруживать грубые промахи в ходе путем контрольных измерений по аэроснимкам линий хода.

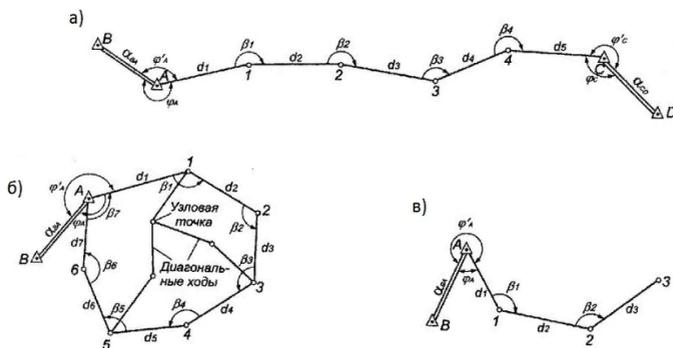


Рис. 6.9. Схема получения координат опорных точек методом проложения полигональных ходов (а – разомкнутый ход; б – замкнутый ход; в – висячий ход)

Длина хода и техника его выполнения должны быть такими, чтобы ошибка координат любой точки хода не превышала 0,2 мм в заданном масштабе фотоплана.

В случае необходимости определения высот опорных точек и использования материалов аэрофотосъемки для рисовки рельефа измеряют и вертикальные углы для передачи высот по ходу.

В настоящее время геодезическое определение координат и высот опорных точек выполняют преимущественно на основе GPS-измерений и их объем перестал быть определяющим. Поэтому опорные точки размещают в 2–4 раза гуще расчетного, что в итоге приводит к тому, что точность фотограмметрического сгущения оказывается сопоставимой с точностью полевых геодезических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Систем, 2006. – 368 с.
2. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

7. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

7.1. Теория дешифрирования аэро- и космических снимков.

7.1.1. Дешифрирование снимков. Классификация дешифрирования.

7.1.2. Визуальный метод дешифрирования. Прямые и косвенные дешифровочные признаки.

7.1.3. Генерализация информации при дешифрировании.

7.1.4. Материалы съемки, используемые при визуальном дешифрировании. Линейные и стереоскопические измерения при визуальном дешифрировании.

7.1.5. Понятие о машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании. Преобразование исходных изображений при машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании.

7.1.6. Дешифровочные признаки, используемые при автоматизированном дешифрировании.

7.2. Дешифрирование аэрофотоснимков для составления кадастровых планов и карт.

7.2.1. Задачи, содержание и особенности дешифрирования для составления кадастровых планов и карт.

7.2.2. Объекты дешифрирования и их признаки.

7.2.3. Требования к качеству дешифрирования. Нормы генерализации информации.

7.2.4. Дешифрирование снимков для целей кадастра. Подготовительные работы. Технология работы при дешифрировании.

7.1. Теория дешифрирования аэро- и космических снимков

Дешифрированием (интерпретацией) называется анализ видеoinформации с целью извлечения сведений о поверхности и недрах Земли (других планет, их спутников); расположенных на ее поверхности объектов; происходящих на поверхности и в близповерхностном пространстве процессах.

В состав сведений входят, например, определение пространственного положения объектов, их качественных и количественных характеристик, выяснение границ простирающихся изучаемых процессов, данные о их динамике и многое другое. В задачи дешифрирования входит также получение из иных источников информации, которая не может

быть считана непосредственно со снимков, например, сведений о наличии, положении и свойствах не отобразившихся объектов, названий населенных пунктов, рек, урочищ. Такими источниками могут служить материалы ранее выполненного дешифрирования, планы, карты, вспомогательные снимки, справочная литература, непосредственно местность. Результаты визуального дешифрирования фиксируются условными знаками на дешифрируемом изображении, машинно-тоновыми, цветовыми, знаковыми или иными условными обозначениями.

Существует и другое определение дешифрирования.

Дешифрирование снимков (интерпретация) – процесс распознавания объектов местности по фотографическому изображению и выявление их содержания с обозначением условными знаками качественных и количественных характеристик.

В зависимости от содержания дешифрирование делят:

- *на общегеографическое;*
- *специальное (тематическое, отраслевое).*

Общегеографическое дешифрирование включает две разновидности:

1) *топографическое дешифрирование* – производится для обнаружения, распознавания и получения характеристик объектов, которые должны быть изображены на топографических картах. Оно является одним из основ процессов технологической схемы обновления и создания карт;

2) *ландшафтное дешифрирование* – выполняется для регионального и типологического районирования местности и решения специальных задач.

Специальное (тематическое, отраслевое) дешифрирование производится для решения ведомственных задач по определению характеристик отдельных совокупностей объектов. Разновидностей тематического дешифрирования очень много: сельскохозяйственное, лесохозяйственное, геологическое, почвенное, геоботаническое и другого ведомственного назначения. Если конечной задачей специального дешифрирования является составление тематических карт, например сельскохозяйственных, почвенных или геоботанических, то при отсутствии подходящей топографической основы специальное дешифрирование сопровождается топографическим.

7.1.1. Дешифрирование снимков. Классификация дешифрирования

Основной методической классификации дешифрирования на его современном уровне развития являются средства считывания и анализа видеoinформации. Исходя из этого, можно выделить следующие основные методы дешифрирования:

- *визуальный*, в котором информация со снимков считывается и анализируется человеком;
- *машинно-визуальный*, в котором видеoinформация предварительно преобразуется специализированными или универсальными интерпретационными машинами с целью облегчения последующего визуального анализа полученного изображения;
- *автоматизированный* (диалоговый), в котором считывание со снимков и анализ или непосредственный анализ построчно записанной видеoinформации выполняются специализированными или универсальными интерпретационными машинами при активном участии оператора;
- *автоматический* (машинный), в котором дешифрирование полностью выполняется интерпретационными машинами. Человек определяет задачи и задает программу обработки видеoinформации.

Во всех методах можно выделить низшие уровни классификации – способы и варианты способов.

Принципиальная схема дешифровочного процесса в любом методе остается неизменной – *распознавание* выполняется путем сопоставления и определения степени близости некоторого набора признаков дешифрируемого объекта с соответствующими эталонными признаками, находящимися в памяти человека или машины. Процессу распознавания при этом предшествует процесс обучения (или самообучения), при котором определяется перечень подлежащих дешифрированию объектов, отбирается совокупность их признаков и устанавливается допустимая степень их различия.

При недостаточном объеме априорной информации о классах объектов и их признаках человек и машина могут поделить изобразившиеся объекты по близости некоторых признаков на однородные группы – кластеры, содержание которых определяется затем человеком или машиной с помощью дополнительных данных.

7.1.2. Визуальный метод дешифрирования. Прямые и косвенные дешифровочные признаки

Дешифрирование представляет собой многоэтапный процесс со сложной структурой. Поэтому, анализируя дешифрирование как познавательный процесс, в нем можно выделить три ступени:

- 1) *обнаружение объектов*;
- 2) *распознавание объектов* (идентификация) и формирование понятий и суждений;
- 3) *интерпретация* (определение характеристик).

Логическая структура процесса дешифрирования не зависит от назначения и объема дешифровочных работ так же, как и от места их производства. Она в равной степени сохраняется и при полевом, и при камеральном дешифрировании.

Обнаружение. В процессе обнаружения выделяются и локализуются самые различные объекты, хорошо отделяющиеся от окружения по признакам изображения без их идентификации. Рассматривая снимки, дешифровщик обнаруживает и дифференцирует объекты, которые отличаются тоном (цветом), размером, формой и рисунком. Обнаружительная способность зависит от остроты зрения, контраста и резкости изображения, освещенности изображения.

Обнаружительная способность для компактных (точечных) объектов и протяженных объектов различна, она определяется по следующим формулам:

$$d_k \geq 1,4l\delta^{-\frac{1}{2}}; \quad (7.1)$$

$$d_n \geq 0,6l\delta^{-\frac{1}{2}}. \quad (7.2)$$

В формулах δ – разность оптических плотностей объекта и фона:

$$\delta = D_o - D_\phi. \quad (7.3)$$

Полоса размытости на краях изображения при нормальных условиях составляет $l \approx 0,1$ мм.

С производственной точки зрения этап обнаружения имеет огромное значение, так как от него в значительной степени зависит скорость дешифрирования. Чем проще и быстрее обнаруживаются объекты дешифрирования на снимках, тем надежнее результаты дешифрирования.

Распознавание (идентификация) также производится по признакам изображения и только видимых на снимках объектов. Этот этап в свою очередь подразделяется на три стадии: *угадывание*, *выделение признаков* (систематизация) и *синтез* (группирование) *признаков*, определяющих объект. У опытных дешифровщиков эти стадии сливаются в трудноразличимый процесс, однако у начинающих они очень заметны. Процесс опознавания может сопровождаться различными замерами.

Обычно безошибочно опознаются на снимках те объекты, которые достаточно хорошо внешне выражены на изображении. Трудности в опознавании, как правило, возникают по следующим причинам: природные искусственные объекты привычно выглядят сбоку, но непривычно сверху; кривые спектральной яркости пленок выше, чем человеческого глаза, поэтому на снимках изображаются такие объекты, которые глазом в естественных условиях не воспринимаются: съемка выполнена не в оптимальные сроки; в результате обобщения контуров на снимках исчезают отдельные детали у объектов.

Интерпретация (определение характеристик). Используя имеющиеся знания и опыт или же установленные в процессе дешифрирования природные закономерности и взаимосвязи, в результате порой довольно сложных умозаключений дешифровщик определяет наличие и свойства объектов и явлений, не изобразившихся непосредственно на аэрофотоснимках, а также получает представление о скрытых сторонах характера объектов и явлений, которые, может быть, и легко опознаются. Если при опознавании объектов основная роль принадлежит прямым демаскирующим признакам: размеру, форме, цвету и тону фотозображения, то на последнем этапе дешифрирования наибольшую роль играют косвенные признаки.

Все рассмотренные этапы дешифрирования переплетаются между собой, образуя единый сложный процесс дешифрирования.

Способы визуального дешифрирования. В визуальном методе дешифрирования можно выделить три основных способа: *полевой*, *камеральный* и *комбинированный* (рис. 7.1).

Полевой способ дешифрирования выполняется путем сличения снимка с местностью. Специалист при этом может находиться на земле (наземный вариант) или на борту летательного аппарата (аэровизуальный вариант). Полевое дешифрирование характеризуется наивысшей полнотой и достоверностью результатов. Однако ввиду сезонности, трудоемкости и повышенной себестоимости применяется оно только в случаях, когда камеральное дешифрирование не обеспечивает

нужного качества результатов. Это бывает в районах со сложными условиями камерального распознавания и со значительным объемом досъемочных работ, например, в районах с большой плотностью населения и интенсивным земледелием, со значительным антропогенным воздействием на природные взаимосвязи элементов ландшафта.

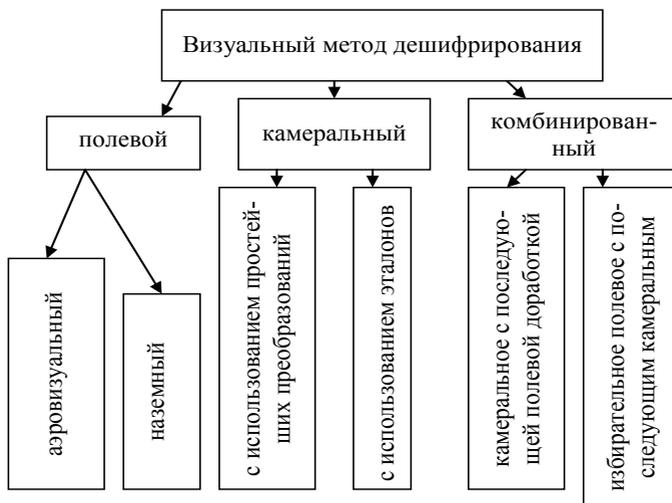


Рис. 7.1. Визуальный метод дешифрирования

Камеральный способ дешифрирования заключается в логическом анализе изображений с использованием всего комплекса дешифровочных признаков (визуально-логический вариант). К дешифрированию могут быть привлечены вспомогательные источники информации: результаты ранее выполненного дешифрирования, картографические материалы, данные о юридических границах объектов, справочники, специальная литература и др.

Достоверность камерального дешифрирования повышается при использовании снимков-эталонов типичных участков, дешифрованных в поле (эталонный вариант). Дешифровочные признаки при этом конкретизируются применительно к определенным снимкам и региональным условиям.

При дешифрировании дополнительно используются простейшие

фотометрические или фотограмметрические измерения, а также некоторые фотографические преобразования исходных изображений с целью повышения их дешифрируемости.

Комбинированный способ дешифрирования сочетает в себе процессы и технологические приемы предыдущих способов.

В зависимости от последовательности чередования их могут быть выделены варианты, в одном из которых предварительно выполняется камеральное дешифрирование, а затем полевая доработка сложных участков с попутным контролем выполненных камеральных результатов; в другом – сначала выполняется избирательное полевое дешифрирование (обычно вдоль транспортных путей), затем камеральное с использованием дешифрованных в поле снимков в качестве эталонов. По завершении работ производится полевой контроль результатов. Могут быть и иные технологические варианты. Комбинированное дешифрирование сочетает в себе достоинства первых двух способов.

Природные объекты, изображающиеся на снимках, могут опознаваться и интерпретироваться дешифровщиком по их свойствам, которые находят отражение в дешифровочных признаках этих объектов. Все дешифровочные признаки можно разделить на две группы: *прямые дешифровочные признаки* и *косвенные*.

К прямым признакам относят те свойства и характеристики объектов, которые непосредственно отображаются на снимках и могут восприниматься визуально или с использованием технических средств.

К прямым дешифровочным признакам относят форму и размеры изображения объектов в плане и по высоте, общий (интегральный) тон черно-белого или цветного (спектрозонального) изображений, текстуру изображения.

Форма в большинстве случаев является достаточным признаком для разделения объектов природного и антропогенного происхождения. Объекты, созданные человеком, как правило, отличаются правильностью конфигурации. Так, например, любые здания и сооружения имеют правильные геометрические формы. То же можно сказать о каналах, шоссеиных и железных дорогах, парках и скверах, пахотных и культурных кормовых угодьях и других объектах. Форма объектов используется иногда как косвенный признак для определения характеристик других объектов.

Размеры дешифрируемых объектов в большинстве случаев оцениваются относительно. Об относительной высоте объектов судят непосредственно по их изображению на краях снимков, полученных с по-

мощью широкоугольных съемочных систем. О размерах, а также и о форме по высоте можно судить по падающим от объектов теням. Разумеется, что площадка, на которую падает тень, должна быть горизонтальной.

Размеры изображения объектов, так же как и форма, искажаются вследствие влияния рельефа местности и специфики используемой в съемочной системе проекции.

Тон изображения является функцией яркости объекта в пределах спектральной чувствительности приемника излучений съемочной системы. В фотометрии аналог тона – оптическая плотность изображения. Непостоянство данного признака связано со следующими факторами: условиями освещения, структуры поверхности, типа фотографического материала и условий его обработки, зоны электромагнитного спектра и других причин. Тон оценивается визуально путем отнесения изображения к определенной ступени нестандартизированной ахроматической шкалы, например тон светлый, светло-серый, серый и т. д. Число ступеней определяется порогом световой чувствительности зрительного аппарата человека.

Опытным путем установлено, что человеческий глаз может различать до 25 градаций серого тона, в практических целях чаще используется серая шкала тонов от семи до десяти ступеней (табл. 7.1).

Таблица 7.1. Количественные характеристики плотности изображения

Плотность	Тон
0,1 и менее	Белый
0,2–0,3	Почти белый
0,4–0,6	Светло-серый
0,7–1,1	Серый
1,2–1,6	Темно-серый
1,7–2,1	Почти черный
2,2 и больше	Черный

С помощью компьютера можно различать до 225 уровней серого тона по снимкам и пленкам. Кроме этого, эти уровни, в зависимости от поставленной задачи, можно группировать по определенным ступеням с их количественными характеристиками. Существенное влияние на тон фотоизображения оказывают фактурные свойства объектов, от которых зависит распределение отраженного от поверхности объекта света в пространство.

Оптическая плотность служит кодом, который передает свойства объектов. Совершенно различные по цвету объекты могут отобразиться на черно-белом фотоснимке или телевизионном изображении одинаковым тоном. Учитывая нестабильность показателя, при дешифрировании фототон оценивают только в сочетании с другими дешифровочными признаками (например, структурой). Тем не менее именно фототон выступает как основной дешифровочный признак, формирующий очертания границ, размеры и структуру изображения объекта.

Тон может быть достаточно информативным признаком при правильно выбранных элементах съемочной системы и условиях съемки.

Тон изображения пашни может значительно изменяться во времени и пространстве, так как существенно зависит от состояния поверхности незанятых полей (перепашанная, боронованная, сухая, влажная и др.), от вида и фазы культуры на занятых полях.

Цвет изображения является спектральной характеристикой и определяет энергию светового потока. Цветовая гамма изображений является существенным признаком дешифрирования. Этот признак следует рассматривать в двух аспектах. В первом случае, когда изображение на воздушных и космических снимках формируется в цветах, близких к естественным цветам (цветные снимки), распознавание и классификация объектов местности не вызывает особых затруднений. В данном случае учитываются такие характеристики цвета, как его светлота и насыщенность, а также различные оттенки одного и того же цвета. В другом случае цветное изображение формируется в производных цветах (псевдоцветах), как это имеет место при спектральной съемке. Смысл этого сознательного искажения цветовой гаммы природы на изображении состоит в том, что на снимках наблюдатель легче воспринимает цветовые контрасты деталей изображения, поэтому цветные воздушные и космические снимки обладают более высокой дешифрируемостью, чем черно-белые. Наилучшие результаты получают при дешифрировании спектральных аэроснимков с более высоким цветовым контрастом.

Цвета спектрального аэроснимка менее стабильны, чем цветного снимка в естественных цветах. При необходимости они могут быть значительно изменены с помощью светофильтров.

Существует особый прием при дешифрировании, когда цвет на изображениях используется для кодирования деталей изображения, имеющих одинаковую оптическую плотность. Этот метод широко используется при дешифрировании зональных снимков, полученных в

результате многозональных съемок. Он весьма эффективен при проведении ландшафтного дешифрирования. В этом случае отдельные элементарные ландшафтные единицы можно закодировать каким-либо цветом исходя из их родственных признаков и свойств.

Пример отображения объектов представлен в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Пример отображения объектов местности на разных снимках

Объекты местности	Цвет (тон) изображения на аэроснимках		
	черно-белых	цветных	спектрональных
			
Лес сосновый	светло-серый	темно-зеленый	темно-пурпурный
Лес еловый	серый	зеленый	коричнево-пурпурный
Лес лиственный	яркий светло-серый	светло-зеленый	синевато- и зеленовато-пурпурный
Лес дубовый	серый	зеленый	зеленовато-голубой с оттенками
Лес березовый	светло-серый	зеленый	
Лес осиновый	яркий светло-серый	светло-зеленый	
Кустарник лиственный	серый	зеленый	зеленовато-синий
Травянистая растительность	серый	зеленый	серовато-голубой, светло-пурпурный
Полевые технические культуры	серый с оттенками	зеленый с оттенками	голубой, кирпичный, вишневый, пурпурный
Закрепленные пески	серый	серовато-желтый	пурпурный
Постройки	серый с оттенками	светло-красный, светло-серый, зеленый	однообразно пурпурный
Дороги с покрытиями	серый	светло-серый	пурпурный

Тень как дешифровочный признак играет важную роль при дешифрировании объектов и их свойств. Падающая тень, отбрасываемая объектом на земную поверхность, расположенную со стороны, противо-

положной Солнцу, подчеркивает объемность объекта и его форму. Ее очертание и размер зависят от высоты Солнца, рельефа местности (участка), на которую падает тень, и направления освещения (рис. 7.2).

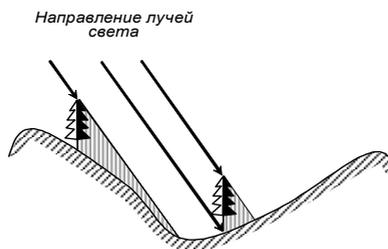


Рис. 7.2. Длина объекта и рельеф местности

По форме падающей тени можно распознавать как искусственные объекты (постройки, столбы, пункты триангуляции), так и естественные объекты. Падающие тени в качестве признаков дешифрирования широко используются при изучении растительности. Падающие тени отображают вытянутую форму силуэта объекта. Это свойство используют при дешифрировании изгородей, телеграфных столбов, водонапорных и силосных башен, наружных знаков пунктов геодезической сети, отдельных деревьев, а также резко выраженных форм рельефа (обрывов, промоин и пр.). При этом следует иметь в виду, что на размер тени оказывает влияние рельеф местности. Для каждой породы характерна своя специфическая форма кроны, что находит отражение в ее тени и позволяет определить ее видовой состав. Например, форма падающей тени ели напоминает остроугольный треугольник, тогда как у сосны она овальная. Однако следует помнить, что тень – весьма динамичный дешифровочный признак (изменяется в течение суток). Она может превышать размер объекта при низком положении Солнца над горизонтом.

Текстура (структура изображения) – характер распределения оптической плотности по полю изображения объекта. Структура изображения – наиболее устойчивый прямой дешифровочный признак, практически не зависящий от условий съемки. Структура представляет собой сложный признак, объединяющий некоторые другие прямые дешифровочные признаки (форму, тон, размер, тень) компактной группы однородных и разнородных деталей изображения местности на сним-

ке. Повторяемость, размещение и количество этих деталей приводят к выявлению новых свойств и способствуют повышению достоверности дешифрирования. Важность этого признака повышается с уменьшением масштаба снимка. Например, текстура массива леса образуется изображением на снимках крон отдельных деревьев, а при высоком разрешении съемочной системы – изображением также элементов крон – ветвей или даже листьев; текстура чистой пашни формируется отображением пахотных борозд или отдельных комьев.

Имеется достаточно большое число структур, образованных сочетаниями точек, площадей, узких полос различной формы, ширины и длины (рис. 7.3).



Рис. 7.3. Виды текстур

Более подробно текстуры рассмотрены далее.

Зернистая структура характерна для изображения лесов. Рисунок создается серыми пятнами округлой формы (кронами деревьев) на более темном фоне, создаваемом затененными промежутками между деревьями. Аналогичную структуру имеет изображение культурной растительности (садов).

Однородная структура образуется однотипной формой микрорельефа и характерна для низинных травянистых болот, степной равнины, глинистой пустыни, водоемов при спокойном состоянии воды.

Полосчатая структура характерна для изображений огородов и распаханых пашен и является следствием параллельного расположения борозд.

Мелкозернистая структура характерна для изображения кустарников различных пород.

Мозаичная структура образуется растительностью или почвенным покровом неодинаковой влажности и характерна для беспорядочно расположенных участков различного тона, размеров и форм. Аналогичная структура, создаваемая чередованием прямоугольников различного размера и плотности, характерна для изображения приусадебных участков.

Пятнистая структура характерна для изображений садов и болот.

Квадратная структура характерна для некоторых типов лесных болот и населенных пунктов городского типа. Она образуется сочетанием участков леса, разделенных светлыми полосами болота, и читается как сочетание площадей однородного тона. Такую же структуру создают изображения многоэтажных зданий (относительно крупные прямоугольники) и элементов внутриквартальной застройки в населенных пунктах.

По мере уменьшения масштаба текстура создается более крупными элементами местности, например отдельными полями пашни. Текстура относится к наиболее информативным признакам. Именно по текстуре человек безошибочно опознает леса, сады, населенные пункты и многие другие объекты. Для перечисленных объектов текстура сравнительно устойчива во времени.

Косвенные признаки можно разделить на три основные группы: *природные, антропогенные и природно-антропогенные*. Косвенные дешифровочные признаки достаточно устойчивы и зависят от масштаба в меньшей степени.

К *природным* относятся взаимосвязи и взаимообусловленности объектов и явлений в природе. Их называют также *ландшафтными*. Такими признаками могут быть, например, зависимость вида растительного покрова от типа почвы, ее засоленности и увлажненности или связь рельефа с геологическим строением местности и их совместная роль в почвообразовательном процессе.

С помощью *антропогенных* косвенных признаков опознают объекты, созданные человеком. При этом используются функциональные связи между объектами, их положение в общем комплексе сооружений, зональная специфика организации территории, коммуникационное обеспечение объектов. Например, животноводческая ферма сельскохозяйственного предприятия может быть опознана по совокупности основных и вспомогательных построек, внутренней планировке территории, интенсивно выбитым прогонам, положению дешифрируемого комплекса сооружений относительно жилой зоны, характеру дорожной сети. Аналогично ремонтные мастерские опознаются по изображению расположенных на территории машин, конный завод надежно опознается по примыкающему к его территории манежу. При этом каждое из сооружений комплекса отдельно, вне связи с прочими, не дешифрируется. Например, соединяющая населенные пункты светлая извилистая линия почти наверняка является изображением проселочной дороги; с той же вероятностью теряющиеся в лесу или в поле светлые извилистые линии – полевые или лесные дороги; постройка вблизи пересечения светлой извилистой полосы (грунтовой дороги) с железной дорогой свидетельствует о наличии здесь переезда; обрывающаяся на берегу реки дорога и ее продолжение на другом берегу указывает на наличие брода или парома; группа построек вблизи многократно разветвляющейся железной дороги подсказывает о наличии железнодорожной станции. Логический анализ прямых и косвенных дешифровочных признаков значительно повышает достоверность дешифрирования.

К природно-антропогенным косвенным признакам относятся: зависимость хозяйственной деятельности человека от определенных природных условий, проявление свойств природных объектов в деятельности человека и др. Например, по размещению некоторых видов культур можно составить определенное суждение о свойствах почв, их увлажненности, по изменению влажности поверхности в местах расположения дрен дешифрируют элементы закрытой осушительной системы. Объекты, используемые при опознавании и определении характеристик не дешифрирующихся непосредственно объектов, называются *индикаторами*, а дешифрирование – *индикационным*. Такое дешифрирование может быть многоэтапным, когда непосредственные индикаторы дешифрируемых объектов опознаются с помощью вспомогательных индикаторов. Приемами индикационного дешифрирования реша-

ются задачи по обнаружению и определению характеристик неотображенных на снимках объектов. Важнейшими индикаторами различных явлений при косвенном дешифрировании служат растительность, рельеф и гидрография.

Растительность является хорошим индикатором почв, четвертичных отложений, увлажненности почвогрунтов и т. д. При дешифрировании могут использоваться следующие индикационные признаки растительности.

Морфологические признаки позволяют различать на аэрокосмических снимках древесную, кустарниковую и луговую растительность.

Флористические (видовые) признаки позволяют дешифрировать видовой состав, например, сосновые насаждения приурочены к песчаным автоморфным почвам, черноольховые – к дерново-глеевым почвам.

Физиологические признаки основаны на связи гидрогеологических и геохимических условий места произрастания с химическими свойствами пород. Например, на известняках лишайники имеют оранжевый цвет, а на гранитах – желтый.

Фенологические признаки базируются на различиях в ритмах развития растительности. Особенно это хорошо проявляется осенью у листовых пород растительности в изменении окраски листьев. На цветных аэрокосмических снимках хорошо различается видовой состав растительности, который подчеркивает условия произрастания.

Фитоценотические признаки позволяют дешифрировать типы лесной растительности и ассоциации луговой растительности, которые приурочены к определенным условиям произрастания. Например, сосняки-лишайники произрастают на повышенных элементах рельефа с автоморфными рыхло-песчаными почвами, сосняки-долгомошники приурочены к пониженным элементам рельефа и дерново-подзолисто-затопочным почвам.

Рельеф является одним из важнейших индикаторов. Связь рельефа с другими компонентами природных комплексов, его большая роль в формировании внешнего облика ландшафтов и возможность непосредственного дешифрирования позволяют использовать рельеф как индикатор самых разнообразных природных объектов и их свойств. Такими индикаторами могут быть следующие морфометрические и морфологические особенности рельефа:

а) абсолютные высоты и амплитуды колебаний высот на данном участке;

- б) общая расчлененность рельефа и углы наклона склонов;
- в) ориентировка отдельных форм рельефа и экспозиция склонов (соллярная, ветровая), которые вместе с абсолютными высотами определяют климатические условия и водный режим на данной территории;
- г) связь рельефа с геологией;
- д) генезис рельефа, его возраст и современная динамика и др.

Гидрография является важным индикатором физико-географических и геологических условий. Тесная связь структуры и густоты гидрографической сети (озер, рек и болот) с геологией и рельефом позволяет использовать аэрофоторисунок, особенно речной сети, как прямой ландшафтный признак при анализе местности в геоморфологическом, геологическом и палеографическом отношениях.

Дешифровочные признаки обычно используются совокупно, без подразделения их на какие-либо группы. Изображение на дешифрируемом участке обычно воспринимается человеком как единое целое – модель местности. На основе анализа модели создается предварительная гипотеза о сути объекта (явления) и его свойствах. Правильность гипотезы подтверждается или отвергается (иногда многократно) с помощью дополнительных признаков.

7.1.3. Генерализация информации при дешифрировании

Методика генерализации информации при дешифрировании базируется на методике картографической генерализации.

Картографическая генерализация – процесс выявления, отбора и обобщения типичных свойств объектов (явлений), обобщения их границ в соответствии с назначением и масштабом карты (плана).

Индивидуальные характеристики объектов обобщают, т. е. переходят от индивидуальных количественных и качественных характеристик к типичным (обобщенным) для повышения наглядности карты. При этом должна сохраняться достоверность и достаточность информации. Также обобщают границы площадных объектов и формы линейных объектов. При выполнении картографической генерализации используется в основном три способа: *способ обобщения качественных и количественных показателей, способ отбора и способ обобщения контуров*. Используемые способы позволяют достаточно объективно решать задачу отображения объектов и явлений местности и общества (на тематических картах) с необходимой полнотой, подробностью и точностью.

Нормами отбора при генерализации информации являются:

1) минимальные размеры и количество отдельных объектов, подлежащих дешифрированию;

2) минимальные проявления частных особенностей объектов и др.

Нормы генерализации устанавливаются действующими инструкциями и другими нормативными документами.

При правильном выборе съемочной системы и параметров аэрофотосъемки происходит естественная генерализация границ. Укрупнение масштаба приводит к усложнению процесса генерализации.

Для определения качества дешифрирования используют два критерия:

1) *полнота дешифрирования;*

2) *достоверность дешифрирования.*

Полнота дешифрирования характеризует полноту использования снимков как источника информации. Она определяется как отношение числа дешифрированных объектов K к общему числу объектов, изобразившихся на снимках $K_{\text{сн}}$.

$$\Pi_{\text{сн}} = \frac{K}{K_{\text{сн}}}. \quad (7.4)$$

Однако величину $K_{\text{сн}}$ сложно или даже невозможно получить.

Абсолютная полнота дешифрирования – отношение числа дешифрированных объектов K к числу объектов местности, подлежащих дешифрированию $K_{\text{м}}$.

$$\Pi_{\text{абс}} = \frac{K}{K_{\text{м}}}. \quad (7.5)$$

Величину $K_{\text{м}}$ определяют после полевого контроля как сумму дешифрированных и пропущенных объектов:

$$K_{\text{м}} = K + K_{\text{пр}}.$$

Под *достоверностью* дешифрирования понимают правильность опознавания объектов, определения их характеристик и положения. Достоверность определяют как отношение количества правильно дешифрированных объектов K_0 к общему числу дешифрированных объектов K .

$$Д = \frac{К_0}{К}. \quad (7.6)$$

Полнота и достоверность дешифрирования часто выражается в процентах.

Для оценки информационных свойств снимка используют две характеристики:

- 1) *информативность*;
- 2) *дешифрируемость*.

Информативность – экспертная оценка потенциальной возможности получения с данных снимков необходимых сведений об объектах. Подбор количественного критерия для оценки информативности снимка невозможен. Информативность обычно оценивается словесно: высокая информативность, недостаточная информативность и т. д. В зависимости от целей дешифрирования (решаемых задач) одни и те же снимки могут быть признаны высокоинформативными и недостаточно информативными.

В основу формальной оценки объема информации, содержащейся в снимке, может быть положена ее связь с разрешающей способностью. Чем выше разрешающая способность снимков, тем больший объем информации в них содержится. На основе смысловой информации можно определить ценность ее для исследователя. Например, четкое изображение на инфракрасных аэроснимках породного состава лесной растительности указывает на эффективность использования данных снимков для дешифрирования ее видового состава. Путем дешифрирования аэрокосмических снимков можно получить самые разнообразные сведения, факты. Однако к информации относятся только те из них, которые отвечают поставленной задаче, цели.

Для определения максимального количества информации введено понятие «*полная информация*», под которой следует понимать ту информацию, которую в каждом конкретном случае можно извлечь из снимков, полученных при оптимальных технических и погодных условиях съемки, а также масштабе. Однако часто используются снимки, обладающие свойствами, отличными от оптимальных. Содержащееся в них количество информации в общем случае меньше полной информации и составляет *оперативную* информацию. В оперативную информацию входят те из необходимых сведений, которые можно рассчитывать: получить путем дешифрирования данных снимков. Однако извлеченная информация почти всегда меньше оперативной из-за

ошибок дешифрирования. Ошибки при дешифрировании объектов могут возникать по следующим причинам: при дешифрировании слабо-контрастных объектов; ложное опознавание объектов из-за совпадения дешифровочных признаков (например, известняки и снежники). Однако часто дешифровщик сталкивается с помехами и шумом, которые не представляют ценности для исследователя. К помехам можно отнести наличие бликов, а также изображение на снимках толщи атмосферы, которая в виде дымки накладывается на изображение, или таких атмосферных явлений, как туман, пыльные бури и др. Качественное разнообразие и количество извлеченной информации в значительной степени определяются свойствами информационного поля снимков.

Простота сопоставления снимков с местностью, внешнее совпадение изображения объектов с тем, как мы их видим, определяют наглядность снимков. Объекты узнаются на снимках, если их изображение соответствует непосредственному зрительному образу и если оно хорошо известно из практики, например, облачность. Наглядность снимков всегда особенно ценилась. Предполагалось, что именно возможность прямого визуального распознавания является главным достоинством снимков с летательных аппаратов. Но по мере развития метода большое значение стали придавать выразительности изображения. Изображение тем выразительнее, чем интенсивнее и контрастнее выделены на нем объекты и явления, являющиеся предметом дешифрирования.

Таким образом, *выразительность* изображения характеризуется простотой дешифрирования объектов и явлений, наиболее существенных для решения поставленной задачи. *Наглядность и выразительность* в известном смысле противоположные, взаимоисключающие свойства аэрокосмического изображения. Так, наибольшей наглядностью обладают цветные в натуральных цветах снимки. Меньшая наглядность у цветных спектральных снимков, но зато при дешифрировании, например, лесной растительности они имеют большую выразительность. Наглядность и выразительность изображения связаны с его масштабом, но оптимальные по выразительности и наглядности масштабы снимков не совпадают друг с другом. Наглядность возрастает с укрупнением масштаба.

Дешифрируемость аэрокосмических снимков – это сумма их свойств, определяющих количество информации, которую можно получить путем дешифрирования снимков для решения данной задачи.

Известно, что одни и те же снимки обладают разной дешифрируемостью по отношению к разным объектам и задачам. Количественно ее можно выразить через отношение оперативной информации (I_0), содержащейся в данных снимках, и I_n полной информации:

$$R_{\text{деш}} = \frac{I_0}{I_n}. \quad (7.7)$$

Однако часто для определения дешифрируемости снимков используется *относительная дешифрируемость*, которая характеризуется через отношение полезной информации (I), которую несет аэроснимок, к полной информации, которая может быть получена по аэроснимку:

$$D_c = \frac{I}{I_{\text{max}}}. \quad (7.8)$$

Величина D_c называется *коэффициентом дешифрируемости*. Понятие «полная информация» может быть истолковано по-разному, в соответствии с этим относительная дешифрируемость может характеризовать различные свойства аэроснимков. Если за полную информацию принять максимальную информационную емкость аэроснимков, то коэффициент дешифрируемости будет показывать загруженность аэроснимков бесполезными сведениями, иными словами «уровень шума».

По этой же формуле ($D_c = I / I_{\text{max}}$) может быть вычислена и относительная дешифрируемость отдельных объектов. При соответствующем подходе она позволяет сравнивать аэроснимки, снятые на различной пленке, отпечатанные на различной бумаге и т. д. Таким образом, через коэффициент дешифрируемости выражается ценность аэроснимка как источника информации.

Полнота дешифрирования может быть охарактеризована через отношение использованной (распознанной) полезной информации (I_1) ко всей полезной информации, содержащейся в данных аэроснимках:

$$\Pi_{\text{д}} = \frac{I_1}{I}. \quad (7.9)$$

Полнота дешифрирования в большой мере зависит от подготовки дешифровщиков, их опыта и специальных знаний.

Под *достоверностью дешифрирования* следует понимать вероятность правильного опознавания или истолкования объектов. Она может оцениваться через отношение количества правильно распознанных объектов (n) к сумме всех распознанных объектов.

$$D = \frac{n}{N}. \quad (7.10)$$

Дешифрируемость может быть улучшена путем увеличения изображения, изменения контраста, уменьшения смаза и других преобразований.

7.1.4. Материалы съемки, используемые при визуальном дешифрировании. Линейные и стереоскопические измерения при визуальном дешифрировании

Производительность и качество дешифрирования в значительной степени зависят от вида дешифрируемых материалов, так как их информативность, дешифрируемость, обзорность, удобство стереоскопического наблюдения и выполнения досъемочных работ существенно различаются. Для дешифрирования используют фотоснимки и другие изображения в исходном масштабе, увеличенные изображения, фотосхемы, стереофотосхемы, фотопланы и ортофотопланы, стереоортофотопланы.

Контактные фотоснимки являются основным, наиболее дешевым и быстро изготавливаемым материалом. По ним и визуализированным изображениям, полученным с помощью нефотографических съемочных систем, решаются многие задачи сельскохозяйственного назначения, картографические, поисковые, оперативного управления. Кадровые фото- и телевизионные снимки удобны для стереоскопического наблюдения и выполнения простейших стереофотограмметрических определений высот объектов, уклонов и др.

Увеличенные изображения обладают большей дешифрируемостью. Исходные изображения, особенно фотографические, имеют большую разрешающую способность $R_{\text{сн}}$, чем глаз наблюдателя $R_{\text{гл}}$. Поэтому дешифрируемость их ниже информативности.

$$K = \frac{R_{\text{сн}}}{R_{\text{гл}}}. \quad (7.11)$$

Фотографическое или оптическое увеличение изображения в раз позволяет наблюдателю увидеть самые мелкие элементы, а дополнительное двух-, трехкратное увеличение определить также форму компактных элементов.

Недостатком рассмотренных материалов является их ограниченная обзорность при обычном и стереоскопическом наблюдении, необходимость согласования результатов по границам рабочих площадей (сводка).

Фотосхемы позволяют расширить обзорность, сокращают объем работ по сводкам результатов дешифрирования. По необходимости их изготавливают из увеличенных снимков. С их помощью оперативно решаются многие информационные и поисковые задачи. Недостаток фотосхем – сложность стереоскопического наблюдения.

Стереофотосхемы удобны для стереоскопического наблюдения изображений большой протяженности, что важно при изучении закономерностей почвообразования, развития эрозионных процессов и др.

Дешифрированию одиночных снимков и фотосхем присущи общие недостатки: сложность измерений на них из-за непостоянства и нестандартности масштаба изображения, необходимость переноса результатов дешифрирования на плановую основу, если дешифрирование выполняется в картографических целях.

Фотопланы свободны от недостатков рассмотренных материалов. В ряде случаев, например при крупномасштабной съемке населенных пунктов, дешифрирование выполняется преимущественно на фотопланах или ортофотопланах, так как при этом значительно упрощается досъемка подземных коммуникаций, объектов, оказавшихся в тени зданий и закрытых деревьями, а также исключается сложный в этих условиях процесс переноса результатов дешифрирования.

Стереоскопическое наблюдение фотоплана, смонтированного из рабочих площадей трансформированных снимков – процедура сложная, обзорность при этом ограничена. Если фотоплан изготовлен из снимков, трансформированных по зонам, возможность стереоскопического наблюдения практически исключается. Ортофотоплан без дополнительно построенного изображения стереоскопически не наблюдается.

Стереортофотоплан представляет собой совокупность обычного ортофотоплана и дополнительного, специально изготавливаемого с помощью ортофототрансформатора изображения. Он является идеальной информационной моделью местности для дешифрирования, связанного со стереоскопическим анализом территорий значительной

протяженности и необходимостью выполнения многочисленных до-
съемок.

7.1.5. Понятие о машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании. Преобразование исходных изображений при машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании

В машинно-визуальном методе дешифрирования информация предварительно преобразуется с целью облегчения последующего визуального анализа полученного изображения. Предварительная обработка изображения проводится практически всегда, независимо от того, какие снимки (сканерные, фотографические) подвергаются обработке. Это обусловлено наличием во входном изображении шумов и искажений. Искажение яркости объектов может быть обусловлено условиями фотосъемки, обработки фотоматериалов и условиями сканирования. Кроме того, на снимках могут иметь место локальные искажения плотности изображения, которые проявляются в виде точек и др. Так могут изображаться объекты, которых нет в действительности: например, солнечные блики, тень облаков и т. д. Часто при предварительной обработке изображения сталкиваются с информационным шумом. В роли подобного шума выступают объекты, которые присутствуют как на снимке, так и в действительности. Но их наличие не существенно для поставленной задачи, а лишь затрудняет дешифрирование. Например, при составлении карты растительности несущественную роль играют линии электропередач, мелиоративная сеть и др.

Наиболее распространенными видами предварительного преобразования информации являются следующие.

1. Преобразование контрастности. Основано на регулировании соотношения между яркостью пикселей цифрового снимка в файле и на экране компьютера, которое задается специальной функцией – кривой воспроизведения яркости. По горизонтальной оси кривой откладывают значения яркости в файле, а по вертикали – значение яркости на экране. Программы обработки снимков позволяют вручную задавать произвольную форму кривой. При этом исключают значения яркостей, не входящие в реальный диапазон яркостей снимка. Кроме того, чтобы наиболее важные для дешифрирования объекты отобразились с хорошей проработкой, диапазон яркостей этих объектов необходимо отобразить более широким диапазоном яркостей на экране (рис. 7.4).

Для цветного изображения функция передачи яркости задается для каждой спектральной зоны.

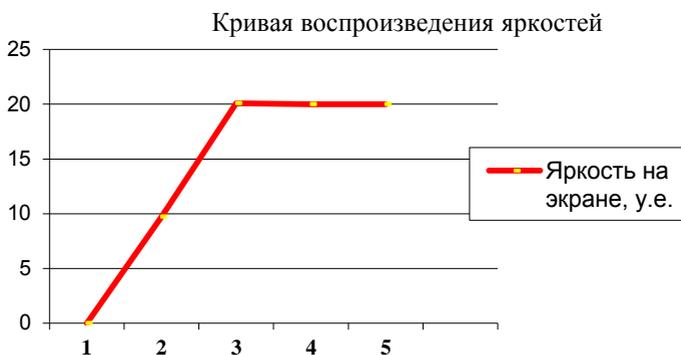


Рис. 7.4. Кривая воспроизведения яркостей

При наличии на изображении больших по площади однотонных объектов (заснеженные участки, пустыня) применяют алгоритм адаптивного преобразования. Алгоритм адаптивного преобразования предусматривает анализ малой окрестности каждого пикселя, в пределах которого меняется контраст. Этот метод эффективен также для устранения шумов сглаживанием контрастов.

На данном этапе обработки изображения осуществляется коррекция гистограммы, фильтрация и устранение шума, что позволяет повысить контрастность изображения, устранить мелкие детали.

Яркостные преобразования изображения выполняются главным образом с помощью аналоговых устройств и позволяют проводить синтезирование цветных изображений, квантование по уровням оптической плотности, изменение контраста, подчеркивание границ контуров.

2. Квантование. Непрерывное полутоновое изображение заменяется дискретным, яркость которого разделена на несколько ступеней. Используют 2 способа квантования.

1. *Равномерное квантование* – диапазон яркостей снимков делится на равные ступени. Используется для дискредитации изображения объектов с плавно изменяющимися характеристиками.

2. *Неравномерное квантование* – для выделения определенных видов объектов, которым соответствуют ступени яркости различной величины. Простейший случай – бинарное квантование на два уровня яркости (белый и черный).

3. **Фильтрация** – преобразование, в процессе которого для решения определенной задачи информация отсеивается, а необходимая приводится к виду, упрощающему ее использование. Этот вид преобразования применяют для подчеркивания контуров, выделения линейных объектов определенной ориентации, для ликвидации различного рода точек (атмосферная дымка). Наибольшее распространение получили два способа фильтрации:

- 1) *изменения яркости в скользящем окне;*
- 2) *преобразование Фурье.*

4. **Синтезирование цветных изображений** (рис. 7.5). Синтезирование цветных изображений осуществляется аддитивным способом, путем смешивания цветов зеленого, синего и красного элементов люминофоров. Для обозначения этого способа применяют аббревиатуру RGB (Red, Green, Blue).

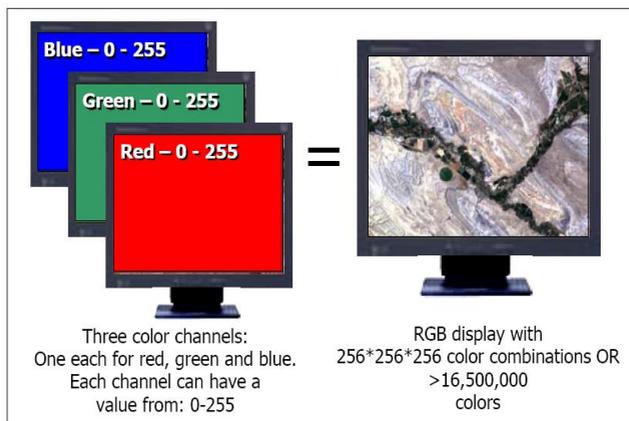


Рис. 7.5. Синтезирование цветных изображений

Обычно сущность объектов по снимкам с натуральной цветопередачей, а разделение объектов и выделение контуров по снимкам с «ложной» цветопередачей.

Например, широко применяют синтез с окрашиванием изображения, полученного в зеленой зоне спектра, синим цветом, в красной – зеленым, а в ближней инфракрасной – красным. В этом случае растительность изображается красным цветом, водные поверхности – синим, открытые почвы – серо-голубым.

Иногда применяют обратный прием: расщепление сканированных цветных изображений на компоненты RGB. При этом для каждого снимка получают три изображения.

6. **Синергизм снимков.** Это слияние различных изображений, приведенных к единой системе координат. Например, сканерных снимков в видимом диапазоне и радиолокационных снимков.

Наиболее часто применяют синергизм панхроматического изображения высокого разрешения с цветным синтезированным (многозональным) более низкого. При этом создается новый снимок с высоким разрешением и цветным синтезированным изображением (рис. 7.6).

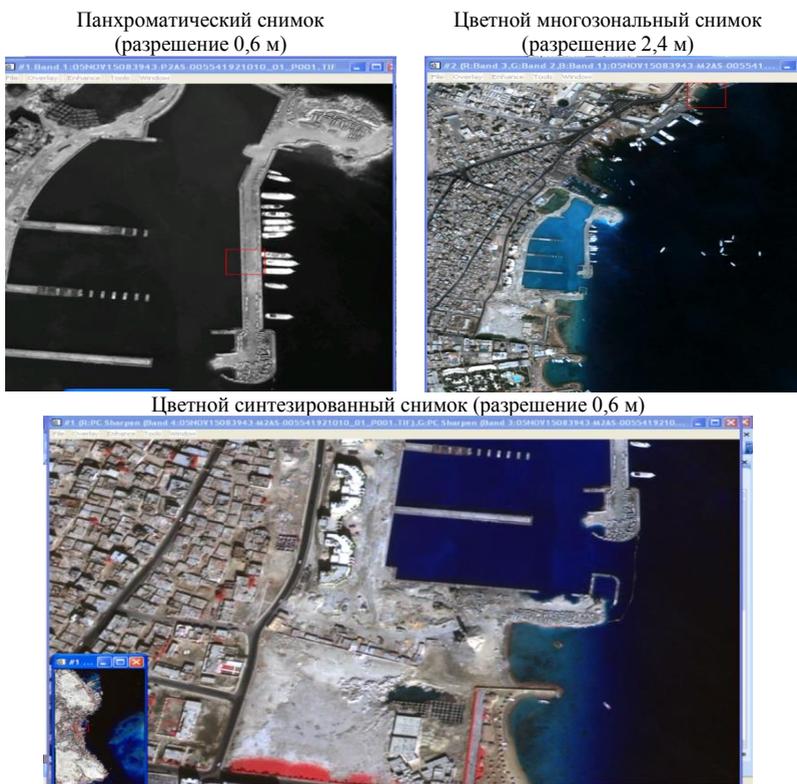


Рис. 7.6. Пример синергизма снимков

Наиболее сложным этапом компьютерной обработки изображения является автоматизированное дешифрирование, т. е. выделение границ объектов, или сегментация. Дешифровщику при работе со снимками постоянно приходится опознавать и выделять однородные объекты, основываясь на дешифровочных признаках. При компьютерном дешифрировании космических снимков одним из распространенных является подход на основе спектральных признаков. Он базируется на том, что яркость хроматических объектов (имеющих определенную окраску) в разных спектральных зонах не одинакова и характеризуется коэффициентом спектральной яркости. Таким образом, каждый элемент раstra (пиксель) соответствует яркости объекта для определенной области электромагнитного спектра. Каждый пиксель раstra записывается как числовой элемент матрицы в файле данных. На этапе сегментации основная задача заключается в дифференциации изображения на области (сегменты) по определенному критерию. В качестве критерия могут служить текстура и тон изображения. После того как изображение будет разбито на однородные области (контуры), приступают к их классификации. В настоящее время разработаны десятки алгоритмов машинного дешифрирования, подразделяемые на алгоритмы с обучением и без обучения, которые осуществляют соответственно контролируруемую и неконтролируемую классификации. Среди алгоритмов классификации с обучением наиболее распространены алгоритмы, учитывающие вероятность присутствия на снимке объектов, относящихся к определенному классу. Для разработки таких алгоритмов используются опытные данные о взаимосвязи спектральной яркости объектов с их свойствами. Например, при дешифрировании почв их спектральная яркость четко коррелирует с гранулометрическим составом почв и содержанием в них гумуса и влаги. Используются и алгоритмы классификации без обучения – кластеризации, позволяющие формально расчленить изображение на отдельные классы, не используя обучающих данных. В этом случае элементы изображения объединяются в группы (кластеры) по формальным признакам без учета их содержательного значения. Выделенные автоматически кластеры в результате группировки пикселей дешифровщик соотносит с определенными объектами.

7.1.6. Дешифровочные признаки, используемые при автоматизированном дешифрировании

Дешифровочные признаки при цифровой обработке видеoinформации должны быть выражены количественно. Поэтому признаком может быть любое регистрируемое дистанционно свойство объекта, поддающееся количественному описанию.

Наиболее удобно использовать *яркость объекта*, так как данный признак легко преобразуется в цифровую форму.

Форма и размеры – достаточно надежные признаки искусственных объектов стандартной конструкции. Для сельхозугодий эти признаки малоинформативны. К наиболее информативным из прямых признаков относятся *цвет и текстура* изображения.

Для машинного распознавания объектов по цвету выбирают наиболее информативные компоненты, т. е. видеoinформацию тех зон многозональной съемки, в которых яркости нужных объектов имеют наибольшие различия. В большинстве случаев к распознаванию привлекаются одновременно данные по нескольким зонам спектра, т. е. дешифровочный признак становится многомерным. Совокупность зональных яркостей некоторого объекта или их функций называется *спектральным признаком* этого объекта. В простейшем случае спектральный признак может быть одномерным. Численное значение признака для некоторого объекта известного нам класса A можно выразить вектором V_{A1} (рис. 7.7).

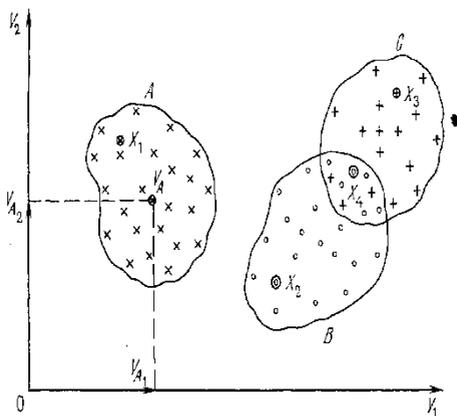


Рис. 7.7. Классификация объектов

Аналогично по результатам регистрации в другой зоне для этого же объекта вдоль оси V_2 можно отложить вектор V_{A2} . Суммируя вектора V_{A1} и V_{A2} получим двухмерный вектор V_A , который выражает количественно спектральный двухмерный объект класса A .

Поверхность большинства объектов с оптической точки зрения не является однородной. Поэтому для других объектов этого же класса (для других площадок того же объекта) получают несколько отличающиеся векторы. Концы векторов образуют двухмерное пространство рассеяния значений спектрального признака объектов класса A .

Аналогично для объектов других известных нам классов, например B и C , можно получить пространства рассеяния их признаков. Такие пространства образуют в процессе обучения системы по данным, полученным при полевом обследовании объектов на тестовых участках. Затем эти пространства используют как эталонные признаки при опознавании неизвестных объектов. Пространства признаков могут не пересекаться (классов A и B , A и C) или пересекаться (классов B и C). Процедура распознавания неизвестных объектов сводится к идентификации их признаков с эталонными признаками. При попадании признака в перекрывающуюся часть пространств признаков нескольких классов X_4 к распознаванию объекта привлекается математический аппарат теории вероятностей.

При этом учитывается, как часто могут встречаться объекты этих классов на дешифрируемых изображениях, т. е. частота появления отдельных реализаций признака каждого класса в зоне перекрытия.

Рассмотрено геометрическое представление процесса машинного формирования эталонных признаков и классификации (опознавания) в двухмерном пространстве. По необходимости размерность пространства увеличивается, к анализу привлекаются дополнительные одномерные признаки, в нашем случае – векторы яркости других спектральных зон.

При недостатке или полном отсутствии данных для получения эталонных признаков интерпретационная обработка может выполняться путем разбивки пространства признаков неизвестных объектов на непересекающиеся области по некоторому критерию внутренней близости признаков. Такая процедура называется *кластеризацией*. Выделенные неопознанные пока совокупности объектов называются *кластерами*.

Допустим, что в двухмерном пространстве признаки (вектора) неизвестных объектов располагаются несколькими компактными скоплениями (рис. 7.8).

Можно предположить, что на анализируемом изображении имеется три кластера. Разграничить их в простейшем варианте можно линиями, проходящими на равных расстояниях от центров скоплений K_1 , K_2 и K_3 . Процедура кластеризации выполняется машиной аналитически. Содержание выделенных кластеров определяется машиной с привлечением дополнительной информации для распознавания по ограниченным выборкам из каждого кластера или человеком непосредственно на местности, с использованием карт, материалов ранее выполненного дешифрирования.

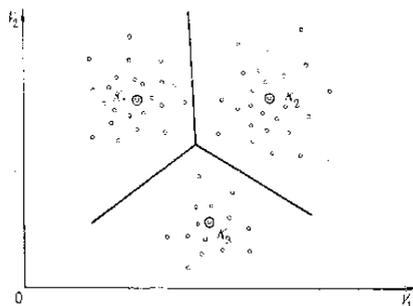


Рис. 7.8. Кластеризация в двухмерном пространстве признаков

Наиболее употребляемыми в настоящее время являются *пороговые признаки*. Для получения их, огибающая отсчеты оптической плотности или уровни видеосигналов, полученные при сканерной съемке, пересекаются некоторым пороговым уровнем D_i (рис. 7.9).

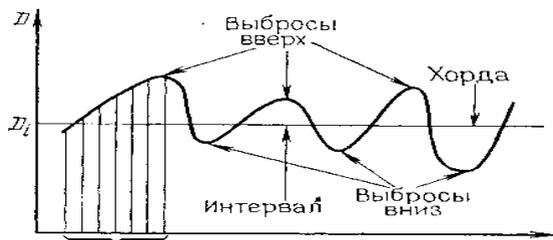


Рис. 7.9. Формализация текстуры изображения

Элементы кривой, расположенные выше порога, называются выбросами вверх, расположенные ниже – выбросами вниз. Длина основания выброса вниз – хорда, выброса вверх – интервал. Длины хорд и интервалов измеряются числом дискретных элементов.

7.2. Дешифрирование аэрофотоснимков для составления кадастровых планов и карт

7.2.1. Задачи, содержание и особенности дешифрирования для составления кадастровых планов и карт

Сельскохозяйственное дешифрирование выполняется в целях создания планов и карт, используемых для районной планировки, организации территории сельскохозяйственных предприятий – межхозяйственного и внутрихозяйственного землеустройства, составления схем землеустройства районов и областей, учета земельного фонда; для проектирования мелиоративных систем; для реконструкции имеющихся и проектирования новых населенных пунктов и др. С помощью сельскохозяйственных планов и карт решаются задачи управления земельными ресурсами и сельскохозяйственным производством, отвода земель под жилищное, промышленное и другие виды строительства. Сельскохозяйственные планы и карты служат топографической основой для создания почвенных и геоботанических планов и карт. Дешифрирование выполняют для создания планов и карт в масштабах 1:10 000 и 1:25 000.

Основные требования к контурно-информационной нагрузке при сельскохозяйственном дешифрировании. Объем топографической информации должен обеспечить достаточно точную пространственную привязку специальной сельскохозяйственной информации; свободное ориентирование на местности при выполнении полевых обследований; возможность принятия правильных проектных решений.

Объем специальной информации должен обеспечивать правильное решение любой из перечисленных задач. На сельскохозяйственные планы наносят подробные сведения о границах землепользований и характеристиках сельскохозяйственных угодий.

Содержание специальной информационной нагрузки, ее полнота и точность показа могут изменяться в зависимости от конкретного назначения создаваемых планов и карт. Например, на аэрофотоснимках при правильном выборе параметров съемочной системы и условий

съемки, по изменению фототона можно получить сведения о микропонижениях на пашне (западинах и блюдцах). Учет таких элементов при проектировании регулирующей осушительной сети повышает эффективность ее действия. В таких случаях переходят к созданию фотокарт. Детальность дешифрирования в таких случаях изменяется.

Создание в Республике Беларусь земельно-информационной системы (ЗИС) потребовало создания картографической основы ЗИС. Одним из этапов ее создания и обновления является выполнение дешифрирования материалов аэрофотосъемки. Его содержание во многом определяется составом слоев ЗИС и содержанием атрибутивных таблиц баз данных. Поэтому при выполнении этих работ сельскохозяйственное дешифрирование дополняется топографическим. Такое дешифрирование называют земельно-кадастровым или «дешифрированием для создания ЗИС». В настоящее время сельскохозяйственное дешифрирование с задачами и содержанием, определенными выше, в Республике Беларусь не выполняется, а сам термин «сельскохозяйственное дешифрирование» не применяется.

7.2.2. Объекты дешифрирования и их признаки

Одним из важнейших объектов сельскохозяйственного дешифрирования являются *границы* землевладений и землепользований, населенных пунктов и земель государственного запаса.

Границы с точки зрения дешифрирования относят к особым объектам, материальным проявлением их на местности являются межевые знаки. Когда часть границы проходит по живому урочищу или совпадает с прямолинейными топографическими объектами, она материализуется в виде берега реки, ручья, дороги и др. Таким образом, дешифровочными признаками границы являются признаки межевых знаков.

При этом возможны три случая:

- 1) межевые знаки сохранились на местности и надежно опознаются на фотоизображении;
- 2) межевые знаки сохранились на местности, но не опознаются на фотоизображении;
- 3) межевые знаки на местности не сохранились.

Дешифрирование *в первом случае* сводится к простому опознаванию, наколке и оформлению опознанных межевых знаков на фотоизображении. Межевые знаки могут отобразиться на фотоизображении светлыми точками при достаточно ярком контрасте окопки столбов на окружающем фоне.

Во втором случае межевые знаки наносят на фотоизображение с использованием геодезических методов. При камеральном дешифрировании (если границы не изменились) данные о положении границ получают с использованием дополнительных материалов: фотопланов прежних лет и дешифрованных снимков. Отождествление межевых знаков (границ) выполняется с помощью линейных засечек от надежно отождествляемых точек фотоизображения.

В третьем случае при отсутствии координат поворотных пунктов границу дешифрируют по указанию смежных землепользователей в поле.

Границы населенных пунктов наносят на фотоизображение по их фактическому положению. Если фактическая граница населенного пункта совпадает с юридической на дешифрируемых материалах, они обозначаются сплошной линией красного цвета. В противном случае, а также при отсутствии юридической границы на местности – точечным пунктиром.

Границы орошаемых и осушенных земель наносят с планов инвентаризации мелиорированных земель, с планов их графического учета.

Пахотные земли – земельные участки, систематически обрабатываемые и используемые под посевы сельскохозяйственных культур, включая посевы многолетних трав, а также пары. Особенность сельскохозяйственного дешифрирования заключается в дифференциации ее по качественным характеристикам. Выделяют пахотные земли с оросительной сетью, осушенные (с указанием способа осушения), заливные, богарные, чистые, засоренные камнями.

Выделяют также приусадебные участки и индивидуальные огороды, расположенные вне населенных пунктов.

Основными дешифровочными признаками *пахотных земель* являются четкость границ и определенная «геометричность» формы полей. Тон *пахотных земель* не может быть достаточно надежным информативным признаком, даже на одном снимке тон различных участков может меняться. Наиболее информативным дешифровочным признаком *пахотных земель* является текстура изображения, но она также неустойчива во времени.

Наиболее вероятными ошибками дешифрирования *пахотных земель* являются: отнесение некоторых участков пашни к залежи и наоборот, а также отнесение к *пахотным землям* луговых земель, распахиваемых с целью коренного улучшения.

Залежи – участок бывших пахотных земель, неиспользуемых более одного года (начиная с осени) для посева сельскохозяйственных культур и неподготовленных под пар. Дешифровочные признаки залежи и пахотных земель очень близки, так как границы и следы обработки сохраняются многие годы, однако со временем появляются признаки прекращения обработки – локальная нечеткая текстура, возникновение в текстуре пятен отображения сорняков и древесной растительности.

Луговые земли (пастбища и сенокосы). При дешифрировании разделяют на заливные, суходольные и заболоченные с последующим разделением на улучшенные, чистые, закустаренные и др. Формы и размеры участков луговых земель неопределенные, так как их границами служат границы пашни, леса, а также топографические объекты. Наибольшую надежность опознавания сенокосов обеспечивает съемка, выполненная в период сенокосения и после него. При дешифрировании луговых земель важную роль играют косвенные признаки: положение относительно населенных пунктов, для пастбищ – наличие скотопрогонов, загонов и др.

Многолетние насаждения – земельные участки под древесными, кустарниковыми и многолетними травянистыми искусственными насаждениями, предназначенные для получения плодово-ягодной или технической продукции.

Основным дешифровочным признаком многолетних насаждений является текстура изображения. Сады на приусадебных участках не дешифрируются. Коллективные сады показываются отдельным землепользованием. Постройки на них не дешифрируются.

Сельские населенные пункты. При дешифрировании индивидуальные постройки показывают поквартально. При рассредоточенной застройке разделяют по группам, если расстояние между группами более 5 м в масштабе плана. Отдельно стоящие строения внутри кварталов не дешифрируют, поквартально условным знаком огорода показывают приусадебные земли. Границы выделенных кварталов образуют улицы и проезды. При односторонней застройке по внешней стороне проезжей части проводят дополнительно тонкую линию.

В населенных пунктах с рассредоточенной застройкой постоянные проезды показывают условными знаками дорог, улицы и площади при этом не выделяют.

Общественные хозяйственные постройки и их границы показывают черным цветом. Выделяют красным цветом участки посторонних землепользователей (школ, больниц и др.) и наносят соответствующие пояснительные подписи.

В населенном пункте дешифрируют сельскохозяйственные объекты общественного пользования и топографические объекты: леса, ручьи, овраги и др.

Населенные пункты имеют специфичные дешифровочные признаки, их невозможно перепутать с другими объектами. Большинство общественных хозяйственных объектов, а также объекты посторонних землепользований (школы, больницы) распознаются по косвенным дешифровочным признакам.

Леса при дешифрировании не разделяют на породы. В лесах выделяют буреломы, вырубки, поросли леса. Дешифрируют полезащитные и садозащитные лесополосы, защитные насаждения вдоль бровок оврагов, берегов водоемов, древесную и кустарниковую обсадку дорог и др.

Основным дешифровочным признаком лесов и кустарников является текстура изображения. По характеру текстуры и высоте насаждений определяют зрелые леса, молодые посадки и поросль.

При сельскохозяйственном дешифрировании показывают все дороги, в том числе и строящиеся. Все сооружения на дорогах показывают обобщенно. Показывают полосу отвода, при ее наличии, красным цветом. Если граница полосы отвода располагается от условного знака дороги ближе 0,5 мм в масштабе плана, границу не показывают, только ширину полосы отвода.

Автогужевые дороги разделяют: на полевые, грунтовые, проселочные и др. Все железные дороги относят к одному классу.

7.2.3. Требования к качеству дешифрирования. Нормы генерализации информации

Дешифрирование в настоящее время в основном выполняется комбинированным способом. В технологии способа можно выделить следующие основные этапы.

1. Подготовительный этап.
2. Камеральное дешифрирование.
3. Полевая доработка и контроль результатов дешифрирования.
4. Оформление и сдача материалов заказчику.

Подготовительному этапу предшествует составление технического проекта и сметы на выполнение комплекса работ по аэрофотосъемке и дешифрированию снимков.

Подготовительные работы к дешифрированию включают сбор, систематизацию, анализ и подготовку материалов аэрофотосъемки, а также юридических, картографических и других материалов. Состав необходимых материалов регламентируется инструкцией.

Таковыми материалами являются:

- районные карты (схемы) землепользования (масштаб 1:50 000);
- планы (выкопировки) границ землепользований в масштабе 1:10 000;
- списки землевладений и землепользований в пределах дешифрируемой территории (района), а также списки сельских (поселковых) советов с указанием площади земель, переданных в их ведение; сведения о наличии полос отвода дорог;
- копии ведомостей координат поворотных пунктов границ землевладений и землепользований, границ населенных пунктов;
- планы осушительных и оросительных систем и сооружений на них; материалы инвентаризации мелиорированных земель;
- материалы по отводу земель и выдаче документов, удостоверяющих право собственности, владения и пользования землей;
- копии официальных документов и графические материалы о переводе одних сельскохозяйственных угодий в другие;
- топографические карты последнего срока обновления наиболее крупного масштаба;
- материалы дешифрирования прошлых лет.

Подбирают снимки на район работ и анализируют их дешифрируемость. Получают репродукции накидного монтажа, паспорт аэрофотосъемки.

При необходимости изготавливают увеличенные снимки (обычно в масштабе плана).

Для удобства использования фотоснимки монтируют в фотосхемы. На фотоснимках и фотосхемах синим цветом показывают рабочие площади. Границы рабочих площадей проводят по идентичным точкам перекрывающихся снимков или фотосхем. Для обеспечения сводок результатов дешифрирования со смежными снимками (фотосхемами) дешифрирование выполняют в полосе шириной 2 см с внешней стороны рабочей площади.

На основе анализа собранных материалов разрабатывают редакционно-технические указания на выполнение работ, в которых дают состав исполнителей, особенности района работ и категорию трудности, рекомендации по технологии камерального дешифрирования, полевого обследования, контроля качества и оформления материалов и сроки

выполнения работ. Исполнителям выдают задания с четким определением границ работ. Границами могут служить рамки планшетов принятой разграфки, границы землепользований, линейные элементы местности.

Камеральное дешифрирование начинают с точного нанесения границ основных землепользователей. Дешифрирование в большинстве случаев выполняется по принципу последовательного перехода от общего к частному. Сначала дешифрируют основные линейные топографические объекты – дороги, гидрографию, затем общие контуры лесных массивов и сельскохозяйственных угодий, а потом анализируют каждый из выделенных массивов. На фотоизображения наносят все надежно опознанные элементы ситуации. Неуверенно дешифрированные (недешифрированные) участки выделяют на снимках (фотосхемах) и переносят на репродукции накидного монтажа. На основе этих материалов, а также с учетом сведений о произошедших на местности изменениях с момента аэрофотосъемки составляют маршруты полевой доработки и контроля результатов камерального дешифрирования.

Руководитель подразделения проводит текущий контроль на всех этапах выполнения работы. Замечания по работе и рекомендации заносятся в текущий акт контроля. После завершения работы формируется дело по дешифрированию. Перечень материалов и документов устанавливается действующей инструкцией и другими нормативными указаниями.

Требование к качеству дешифрирования, нормы генерализации и информации. Частные требования и нормы регламентируются действующими инструкциями и наставлениями, а обоснованные производственной необходимостью отклонения от них – редакционными указаниями (предписаниями).

При дешифрировании материалов аэрофотосъемки для составления сельскохозяйственных планов масштаба 1:10 000 и 1:25 000 установлены следующие требования к точности нанесения элементов ситуации (в масштабе плана):

- ✓ ошибка нанесения четкой границы объекта относительно ее изображения не должна превышать 0,2 мм;
- ✓ отклонение контрольных определений нечетко выраженной в натуре границы (например, сенокос суходольный и заболоченный) не должно превышать 1,5 мм;
- ✓ отклонение контрольных определений инструментально нанесенной на дешифрируемые материалы четкой в натуре границы (положения) объекта не должно превышать 0,3 мм.

В порядке генерализации информации элементы ситуации не дешифрируют, если площадь их в масштабе плана не превышает:

✓ 2 мм^2 – для пашни, многолетних насаждений и культурных пастбищ на орошаемых и осушенных массивах, а также для других угодий и несельскохозяйственных земель, вкрапленных в перечисленные угодья;

✓ 4 мм^2 – для тех же объектов на немелиорированных землях;

✓ 10 мм^2 – для остальных сельскохозяйственных угодий, а также для вкрапленных в них несельскохозяйственных земель;

✓ 50 мм^2 – для различающихся по качественным признакам сельскохозяйственных угодий (например, пашни чистой и засоренной камнями), а также для несельскохозяйственных земель;

✓ 100 мм^2 – для различающихся по характеристикам участков древесной и кустарниковой растительности в общем массиве.

Озера, пруды, мочажины, колки дешифрируют независимо от их площади. Острова на водоемах показывают, если их площадь более 5 мм^2 . Промойны на пашне дешифрируют, если их длина в масштабе плана более 5 мм; длина прочих линейных элементов ситуации должна превышать 10 мм.

7.2.4. Дешифрирование снимков для целей кадастра. Подготовительные работы. Технология работы при дешифрировании

Рассмотрим основные отличия топографического дешифрирования для создания карт масштаба 1:10 000 и 1:25 000.

При топографическом дешифрировании показывают административные границы национальных округов, областей, государств. Эти границы, как правило, совпадают с границами сельскохозяйственных предприятий и других землепользований.

Пашня дешифрируется без деления на подвиды. Залежь включается в общие контуры пашни. Дешифрируют парники.

Луговые земли делят на участки с низкотравной влаголюбивой растительностью и участки с высокотравной растительностью (выше 1 м).

Строения в населенных пунктах показывают отдельно, если расстояние между условными знаками на карте более 0,3 мм. Они подразделяются на жилые и нежилые, а также огнестойкие и неогнестойкие. Особо точно наносят выдающие огнестойкие постройки, имеющие

функции ориентиров. Под названием населенных пунктов указывают число жилых домов и зданий, пригодных для жилья.

Пример дешифрирования аэрофотоснимка представлен на рис. 7.10.

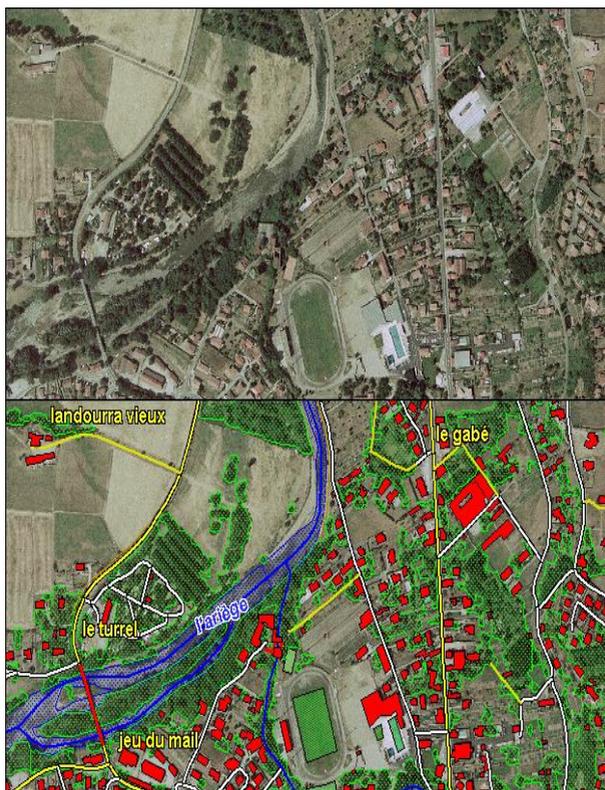


Рис. 7.10. Пример дешифрирования аэрофотоснимка

При дешифрировании древесных насаждений отдельно показывают зрелые леса, низкорослые леса, поросль, молодые посадки и питомники. Все они разделяются на хвойные, лиственные и смешанные. Подписями указывают преобладающие породы деревьев; цифрами указывают среднюю высоту деревьев, среднюю толщину и расстояние между ними. Молодые посадки, лесопитомники и лесополосы характеризуются только высотой деревьев. Породу кустарников и их среднюю

высоту показывают в контурах сплошных зарослей, дешифрируют отдельные стоящие деревья, выполняющие функцию ориентиров.

Дороги делят: на автострადы, усовершенствованные шоссе, шоссе, улучшенные грунтовые дороги, грунтовые дороги, грунтовые проселочные дороги, полевые и лесные. Условные знаки автострад и шоссейных дорог сопровождают подписями о материале покрытия, ширине покрытой части, ширине дороги с обочиной. Для грунтовых дорог указывают ширину проезжей части.

Мосты дешифрируют на пересечении дорог с указанием высоты, ширины и ширины проезда под ними.

При дешифрировании железных дорог показывают: число путей, светофоры и семафоры, станционные сооружения.

При дешифрировании гидрографии и сооружений на них указывают: для рек – скорость течения воды, мосты разделяют по материалу изготовления и ярусности.

Подписывают ширину, длину, грузоподъемность мостов и их высоту над уровнем воды. Для бродов указывают ширину, глубину, скорость течения воды, характер грунта, для каналов – ширину, глубину и твердость грунта, для плотин – материал, ширину проезжей части.

Границы полос отвода на дорогах всех видов не дешифрируют.

Болота разделяют по их проходимости.

Дополнительно показывают пункты геодезической сети, линии связи и электропередач с разделением по характеру опор, газо- и нефтепроводы и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Системс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

8. ТЕОРИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ ПАРЫ СНИМКОВ

8.1. Стереоскопическое наблюдение снимков.

8.1.1. Монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое зрение.

8.1.2. Условия возникновения стереоэффекта.

8.1.3. Способы стереоскопических наблюдений.

8.1.4. Стереоскопические наблюдения цифровых изображений.

Жидкокристаллические стереомониторы.

8.1.5. Способы измерения снимков и стереомодели.

8.1.6. Поперечный и продольный параллаксы точек. Принципиальная схема стереокомпаратора. Порядок работы.

8.2. Теория пары снимков.

8.2.1. Геометрическая модель местности (связка, базисная плоскость).

8.2.2. Элементы взаимного ориентирования снимков.

8.2.3. Внешнее (геодезическое) ориентирование модели.

8.1. Стереоскопическое наблюдение снимков

8.1.1. Монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое зрение

Монокулярным зрением называется наблюдение объектов одним глазом. Поле зрения глаза составляет примерно 150° в горизонтальной плоскости и 120° в вертикальной. Сетчатка глаза состоит из клеточек: колбочек (до 7 млн) и палочек (до 130 млн). Колбочки являются органом дневного зрения и позволяют воспринимать детали и цвет объекта.

В центральной части сетчатки расположено желтое пятно, имеющее овальную форму и вытянутое вдоль глазного базиса. Основная масса колбочек сосредоточена на желтом пятне, поэтому объекты, проектировавшиеся на желтое пятно, наблюдаются наиболее четко. В середине желтого пятна имеется центральная ямка – наиболее чувствительное место глаза, состоящая только из колбочек. При рассматривании интересующих точек объекта наблюдатель поворачивает глаз так, чтобы эти точки проектировались в центральную ямку.

Две соседние точки объекта наблюдатель видит отдельно, если они проектируются на отдельные клеточки сетчатки.

Минимальный угол, под которым наблюдатель видит две отдельные точки, называется остротой монокулярного зрения первого рода и

составляет примерно $45''$. При наблюдении линейных объектов острота монокулярного зрения повышается. Объясняется это тем, что при рассматривании протяженных объектов возбуждается не одна, а группа колбочек. Угол, под которым глаз воспринимает две параллельные линии, называется остротой монокулярного зрения второго рода, ее средняя величина составляет $20-25''$. В связи с этим, например, в геодезии визирные марки и сетки нитей измерительных приборов имеют линейчатую форму.

Наблюдение объектов двумя глазами называется бинокулярным зрением. Оно позволяет повысить точность определения их пространственного положения. При рассматривании какой-либо точки объекта F (рис. 8.1) наблюдатель поворачивает глаза так, чтобы изображения этой точки в обоих глазах проектировались в центральные ямки f_1 и f_2 . Эта точка F , в которой пересекаются зрительные оси глаз, называется точкой фиксации. Расстояние b_r между центрами O_1 и O_2 хрусталиков левого и правого глаз называется глазным базисом. Его величина у людей различна и колеблется от 58 до 72 мм при среднем значении 65 мм, что обязательно учитывается в конструкциях фотограмметрических приборов.

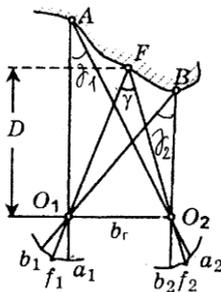


Рис. 8.1. Бинокулярное зрение

Линия Ff_1 (Ff_2), проходящая через заднюю узловую точку хрусталика и середину центральной ямки, называется зрительной осью глаза. Угол γ , под которым пересекаются зрительные оси, называется углом конвергенции. Углы между соответственными лучами Aa_1 и Aa_2 , Bb_1 и Bb_2 называются параллактическими углами γ_1 и γ_2 . Угол конвергенции, как и параллактический угол, величина малая, и для его вычисления можно использовать формулу

$$\gamma = \frac{b_r}{D} \rho, \quad (8.1)$$

где b_r – глазной базис;

D – удаление наблюдателя от рассматриваемой точки.

Для расстояния наилучшего зрения $D = 250$ мм угол конвергенции равен 15° .

Остротой бинокулярного зрения первого рода называется наименьшая разность параллактических углов, при которой наблюдатель видит две отдельные точки, ее средняя величина составляет $20\text{--}30''$. У опытных специалистов, выполняющих фотограмметрические измерения, острота бинокулярного зрения первого рода достигает $10''$.

Минимальная разность параллактических углов, при которой наблюдатель видит две параллельные линии, называется остротой бинокулярного зрения второго рода, ее величина – $10''$. У опытных наблюдателей она может достигать $5\text{--}7''$.

Стереоскопическим зрением называется бинокулярное зрение с постоянным и непосредственным ощущением глубины пространства. Основным фактором оценки глубины пространства является физиологический параллакс.

Рассматривая какую-то точку, например точку A (рис. 8.2), глаза наблюдателя поворачиваются таким образом, что их оптические оси пересекаются в наблюдаемой точке. Размеры желтого пятна глаза позволяют увидеть при данном положении глаз и другие точки, например точку D .

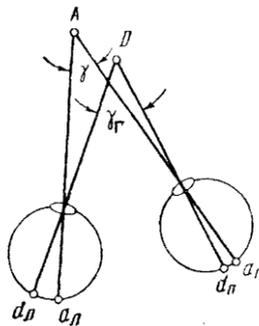


Рис. 8.2. Физиологический параллакс

Так как расстояние точки D от глаз иное, чем до точки A , то в точке D возникает параллактический угол γ_r , не равный углу γ .

Неравенство этих углов вызывает неравенство дуг $a_n d_n$ и $a_n d_n$, получаемых в пределах желтого пятна левого и правого глаза. Разность этих дуг называется *физиологическим параллаксом*

$$\sigma = a_n d_n - a_n d_n. \quad (8.2)$$

Наличие физиологического параллакса, т. е. разного изображения рассматриваемого предмета на сетчатке левого и правого глаз, является причиной пространственного восприятия при стереоскопическом зрении. Физиологический параллакс точки фиксации всегда равен нулю, поскольку ее изображение строится в центральной ямке. Геометрическая природа стереоскопического зрения заключается в том, что на сетчатках глаз строятся изображения различных размеров, и элементы изображения характеризуют различные по величине физиологические параллаксы. Эти различия и позволяют судить о различном пространственном положении отдельных частей наблюдаемого объекта. 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. Острота стереоскопического зрения равна $\approx 30''$.

8.1.2. Условия возникновения стереоэффекта

Восприятие глубины возможно при рассматривании не только объектов, но и их изображений, полученных по законам центрального проектирования при выполнении следующих условий, вытекающих из особенностей бинокулярного зрения.

Условия возникновения стереоэффекта.

1. Снимки должны быть получены из двух точек пространства.
2. Разность масштабов снимков не должна превышать 16 % от их величины.
3. Угол конвергенции, под которым пересекаются соответственные лучи, не должен превышать 15° и соответствовать аккомодации (обеспечение получения резкого изображения объектов, удаленных на различные расстояния).

4. Снимки нужно развернуть в своих плоскостях так, чтобы линии, соединяющие одноименные точки, были параллельны главному базису.

5. Каждый глаз должен видеть только один (левый или правый) снимок.

Рассматривая два таких снимка с учетом перечисленных условий, наблюдатель может получить единое пространственное изображение – *стереоскопический эффект*.

Стереозффект – это пространственное восприятие двух плоских изображений.

В зависимости от расположения аэроснимков можно получить прямой, обратный и нулевой стереозффект.

Прямой стереозффект (рис. 8.3, а) возникает при рассматривании левым глазом левого снимка, а правым глазом – правого (их перекрывающиеся части обращены друг к другу), причем начальные направления аэроснимков (прямые O_n' O_n' , O_n' O_n') должны располагаться на прямой, параллельной главному базису наблюдателя. Получаемая стереоскопическая модель соответствует местности: вершины воспринимаются вершинами, низины – низинами.

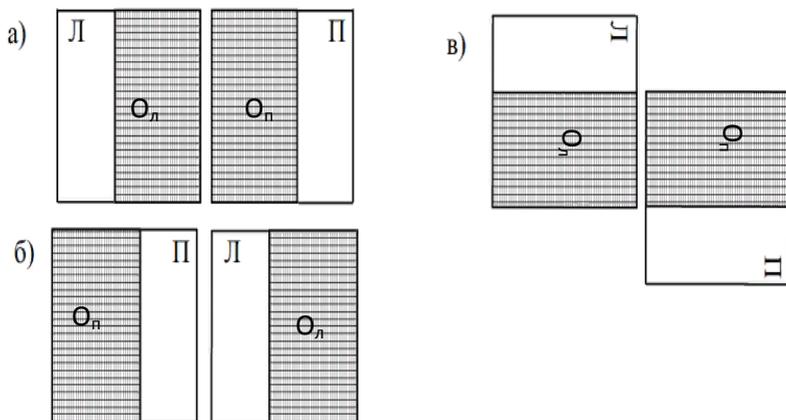


Рис. 8.3. Размещение снимков для наблюдения прямого (а), обратного (б) и нулевого (в) стереоскопического эффекта

При *обратном стереозффекте* (рис. 8.3, б) левый глаз наблюдателя должен рассматривать правый, а правый глаз – левый аэроснимок (их перекрывающиеся части обращены во внешние стороны), причем

начальные направления аэроснимков должны располагаться на прямой, параллельной главному базису наблюдателя. Так как разности продольных параллаксов при этом меняют свой знак, то получающаяся модель дает обратное изображение местности, вершины воспринимаются низинами, низины – вершинами.

Нулевой стереоэффект (рис. 8.3, в) возникает в случае, если снимки развернуты в своих плоскостях на 90° и начальные направления перпендикулярны главному базису. При этом физиологический параллакс обращается в нуль и наблюдатель видит плоскую картину.

При наблюдении действительных объектов невооруженными глазами стереоэффект всегда прямой. Для измерения снимков в фотограмметрии используют прямой и обратный стереоэффект.

8.1.3. Способы стереоскопических наблюдений

Ранее были сформулированы пять условий, при выполнении которых наблюдатель может увидеть по снимкам стереоскопический эффект. Выполнение первых четырех условий не требует применения сложных технических приспособлений. Выполнение пятого условия, требующего, чтобы каждый глаз рассматривал соответствующий снимок, вызывает определенные затруднения, поскольку выполнить его без специальной подготовки нелегко. Это объясняется тем, что при рассматривании снимков зрительные оси должны быть почти параллельны, в то время как аккомодация соответствует их удалению на 25 см. В связи с этим для наблюдения каждым глазом только одного изображения применяют разные способы: *оптический, анаглифический, поляроидный* и др.

Оптический способ основан на применении для наблюдения стереоскопической модели оптических приборов. В них снимки рассматриваются через систему линз, призм и зеркал, благодаря которым левый глаз видит только левое изображение, а правый – правое. Простейшим прибором для наблюдения стереомодели является *зеркально-линзовый стереоскоп* – бинокулярный оптический прибор для рассматривания стереопар.

Стереопара – два частично перекрывающихся снимка, полученных с разных точек фотографирования.

Стереоскоп ЛЗ (рис. 8.4), состоящий из двух пар зеркал 1, 2 и двух линз 3 (рис. 8.5), позволяет видеть изображение объемным.

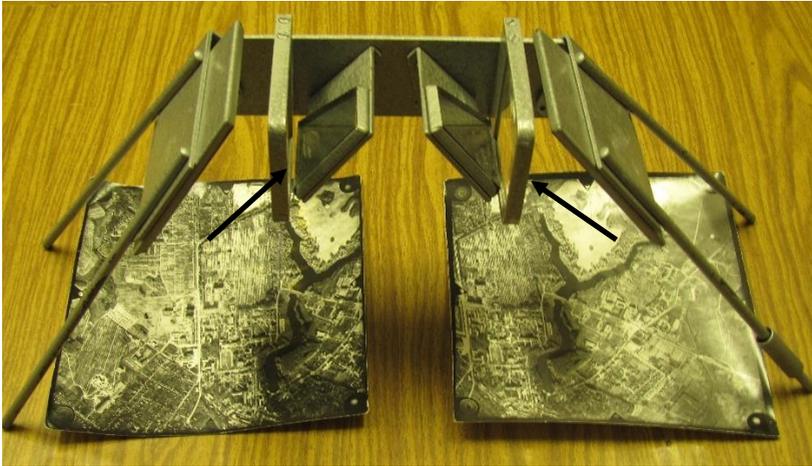


Рис. 8.4. Стереоскоп ЛЗ

Ход лучей в зеркально-линзовом стереоскопе показан на рис. 8.5.

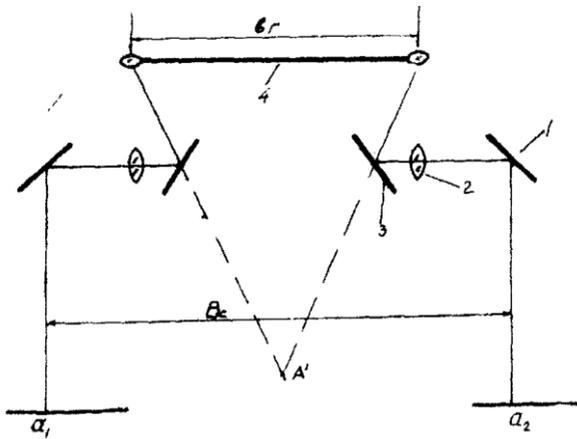


Рис. 8.5. Ход лучей в стереоскопе:
 1, 2 – внешнее и внутреннее зеркала;
 3 – линза; 4 – бинокля

Здесь B_c – расстояние между центрами больших зеркал, называемое базисом стереоскопа, b_r – расстояние между передними узловыми точками глаз, называемое глазным базисом.

Чтобы получить объемное изображение A' точки A (прямой стереоэффект), необходимо под левое зеркало положить левый снимок, а под правое – правый так, чтобы они располагались вдоль оси прибора строго один за другим. Потом необходимо установить их так, чтобы начальные направления были на одной прямой, параллельной базису стереоскопа, а расстояние между какой-либо парой соответственных точек приблизительно равнялось базису стереоскопа.

Передвижением этих снимков вдоль прибора, а также их поперечным перемещением и некоторым вращением в своих плоскостях добиваются совмещения изображений левого и правого снимков, чем достигают объемного изображения местности.

Некоторые конструкции стереоскопов снабжены бинокулярными насадками, измерительными и другими устройствами различного назначения.

Способ поляроидов (Р. Брукхарт, 1942 г.) основан на получении левого и правого изображений в поляризованном свете, образующемся при пропускании светового потока через два поляроида, каждый из которых представляет собой пару плоско-параллельных стеклянных пластинок с заключенной между ними пленкой-поляризатором. Поскольку интенсивность проходящего через систему светового потока изменяется пропорционально косинусу угла между плоскостями поляризации, то для получения стереоэффекта достаточно развернуть плоскости поляризации левого и правого изображений на 90° , наблюдая их через очки-анализаторы с аналогичными поляризаторами. При этом плоскости поляризации левого и правого изображений должны быть параллельны плоскостям поляризации соответствующих анализаторов очков. Наблюдаемая модель имеет нормальные тона, свойственные фотоизображению, поэтому способ позволяет получать модель по черно-белым и цветным снимкам.

Анаглифический способ наблюдения заключается в рассматривании двух совмещенных изображений, исполненных в дополнительных цветах (например, в красном и сине-зеленом). Наблюдение выполняется через анаглифические очки со стеклами таких же цветов. И каждый глаз воспринимает только одно из изображений: красный светофильтр пропускает красный цвет и задерживает сине-зеленый, а сине-зеленый светофильтр пропускает сине-зеленый цвет и задерживает красный.

Пропускаемые через светофильтры изображения суммируются, и наблюдатель воспринимает одноцветное пространственное изображение объекта.

Пространственная картина может быть получена путем сложения дополнительных цветов или на вычитании их из белого.

Способ вычитания применяется для получения объемных изображений. Левое и правое изображения, называемые анаглифами, печатаются на белом фоне прозрачными красками дополнительных (красного и сине-зеленого) цветов и рассматриваются через анаглифические очки. При этом белый тон воспринимается в цветах, соответствующих цветам светофильтров, и поэтому он сливается с изображением соответствующего снимка того же цвета. В итоге наблюдатель увидит пространственную картину черного цвета на белом (светлом) фоне.

Способ сложения предполагает проектирование на общий экран двух изображений, окрашенных в дополнительные цвета, и рассматривание их через анаглифические очки. Поскольку наблюдения выполняются в затемненном помещении, то левым глазом наблюдатель увидит изображение красного цвета на темном фоне, а правым глазом – изображение сине-зеленого цвета на темном фоне. Темный фон создается как черным экраном, так и погашенными изображениями. В итоге наблюдатель воспринимает пространственную картину на темном фоне.

8.1.4. Стереоскопические наблюдения цифровых изображений. Жидкокристаллические стереомониторы

При компьютерной обработке цифровых изображений основными способами построения стереоскопического эффекта являются оптический, анаглифический, затворный и др., получившие в компьютерном исполнении новые возможности.

Их реализация учитывает ряд особенностей работы с цифровыми изображениями, в частности: простота геометрических и фотометрических преобразований, формирование изображения на экране монитора с покадровым (*page-flipping*) или строчным (*interlace*) режимом выводов, наличие видеопамати и др.

Оптический способ стереоскопических наблюдений предполагает вывод зоны стереонаблюдений левого и правого снимков соответственно в левую и правую части экрана. Оба изображения окрашены в естественные цвета, и для их рассматривания и получения стереоско-

пического эффекта нужно выполнить искусственное разделение соответственных лучей, что достигается применением специальной стереоприставки, устанавливаемой перед монитором. Это обеспечивает возможность наблюдения стереоскопической модели местности и ее измерения, минуя неизбежные потери света при использовании некоторых других способов и приспособлений.

Анаглифический способ стереоскопических наблюдений не предполагает наличия какого-либо специального оборудования в виде плат или адаптеров, а требует наличия лишь анаглифических очков. Наблюдаемая при этом стереоскопическая модель формируется по правилам, изложенным ранее для случая наблюдения аналоговых снимков.

Перекрывающиеся части левого и правого изображений, образующие зону стереоскопических наблюдений, окрашиваются в дополнительные цвета и выводятся на экран либо по строкам (четные – левого снимка, а нечетные – правого), либо путем наложения левого на правое. Полученное на экране монитора совмещенное изображение рассматривается через анаглифические очки, стекла которых окрашены в те же цвета, что и соответствующие им изображения снимков. В результате наблюдатель видит пространственную модель местности. В первом случае наблюдатель видит «разреженное» изображение, что снижает точность стереоскопических измерений. Во втором случае цвет и яркость каждого пикселя суммарного изображения, попадающего на элемент монитора, формируются в зависимости от цветов и яркостей накладываемых пикселей изображений. В обоих случаях каждый глаз наблюдателя видит только одно изображение, что и вызывает возникновение стереоскопической модели местности.

Затворный способ получения стереоскопического эффекта основан на специфике представления изображения на экране монитора и предполагает применение специальных затворных (жидкокристаллических) очков с LCD-затворами (Liquid Crystal Display) различных типов (ИБИК, NuVision и др.), в которых стекла становятся прозрачными поочередно в соответствии со сменой видеостраниц на экране монитора. Сущность способа заключается в следующем.

Изображения левого и правого снимков формируются на страницах видеопамати и поочередно выводятся на экран компьютера. Наблюдения выполняются через очки, представляющие собой пару плоскопараллельных пластин с заключенным между ними слоем жидкого кристалла, который при воздействии на него электрического импульса

может изменять интенсивность проходящего через него света так, что в каждый момент времени наблюдатель воспринимает изображение на экране монитора только одним глазом, левым или правым. Смена страниц видеопамати на экране монитора с помощью специального канала связи синхронизирована с изменением прозрачности пластин затворных очков, так что каждый глаз наблюдателя видит только одно изображение. Для смены прямого стереозффекта на обратный и наоборот нужно изменить фазу, управляющую последовательностью вывода страниц видеопамати.

Покадровый (page-flipping) режим стереонаблюдений предполагает поочередный вывод на экран левого и правого изображений синхронно со сменой прозрачности пластин затворных очков, установленных перед левым и правым глазом. Вывод полных изображений обеспечивает получение более высокого качества стереоизображения, но требует в целях обеспечения комфортности наблюдений для глаз достаточно высокой вертикальной частоты монитора (не менее 120 герц).

Построчный (interlace) режим стереонаблюдений предполагает деление кадра на два полукадра с четными и нечетными строками соответственно. Правое и левое изображения стереопары выводятся на экран поочередно в «четном» и «нечетном» полукадре, а синхронизируемые с вертикальной разверткой монитора затворные очки позволяют наблюдать два изображения одновременно и таким образом проводить стереоизмерения. Необходимым условием комфортной для глаз работы в этом режиме является достаточно высокая вертикальная частота монитора (как минимум 75 герц на «каждый глаз», т. е. примерно 150 герц при переключении в интерлейс).

Построчный режим применим только к экрану в целом, что приводит к некоторым неудобствам, например, при работе с меню. Другим недостатком является прореживание картинки и, как следствие, снижение разрешения в связи с использованием полукадров.

Имеются и другие способы стереонаблюдений цифровых изображений, например поляроидный.

Жидкокристаллические стереомониторы. В последние годы все большее признание получают жидкокристаллические мониторы (LCD-мониторы), обладающие целым рядом преимуществ перед традиционными CRT (электронно-лучевыми) мониторами: более высокая четкость изображения, отсутствие мерцаний, компактность и пр. Однако LCD-мониторы не поддерживают необходимую частоту развертки, что исключает возможность временного разделения изображений и

использования затворных очков. Это длительное время сдерживало их промышленное изготовление, и только достижения последних лет в области LCD-технологии позволили создать ряд моделей стереомониторов с приемлемыми техническими параметрами.

В настоящее время разработкой LCD-мониторов занимается ряд компаний США, Кореи, Испании, России и др. и на рынке появилось несколько довольно удачных конструкций.

Пригодные для точной стереоскопической визуализации и высокоточных фотограмметрических измерений LCD-мониторы базируются на использовании специальных поляризационных очков и по способу получения модели местности делятся на интерлейсные, фазово-поляризационные и зеркальные.

Интерлейсные мониторы базируются на использовании построочного режима визуализации, реализованного на CRT-мониторе, но, в отличие от него, предполагают одновременный (а не последовательный) вывод левого и правого снимков. При этом одна половина стереопары выводится на четных строках, вторая – на нечетных, а оба изображения имеют ортогональную или круговую поляризацию, которая создается с помощью специального полосчатого фильтра и обеспечивает их разделение через поляризационные очки.

К недостаткам интерлейсных мониторов относят потерю разрешения при выводе изображения через строку, повышенную утомляемость оператора при наблюдении полосчатого изображения, плохую читаемость элементов интерфейса обрабатываемой программы и др.

Представляющие рассматриваемую группу стереомониторы Hyundai корейской компании выпускаются с диагональю 24" и 46" и стоят 3100–7000 долл. США.

Среди других интерлейсных мониторов можно отметить Zalman и Migasube, выпускаемых корейскими компаниями с диагональю от 19 до 46 дюймов и стоимостью от 700 до 7000 долл. США.

Фазово-поляризационные LCD-мониторы используют уникальный способ получения стереоэффекта. Конструктивно они состоят из пары параллельных панелей LCD с установленными перед ними поляризационными фильтрами. Одна из этих панелей используется для регистрации в каждом пикселе суммарной интенсивности, а вторая – направления поляризации. Необходимые для этого преобразования исходных изображений осуществляются с помощью расположенного в мониторе процессора или специального видеодрайвера. На выходе из монитора, после прохождения через поляризационные очки, световые

сигналы формируют изображения для левого и правого глаза наблюдателя.

К достоинствам фазово-поляризационных мониторов относят повышенную яркость и контрастность изображения, сохранение разрешения исходных изображений по вертикали и по горизонтали, возможность визуализации стереоэффекта одновременно несколькими наблюдателями и пр. Одним из представителей монитора этого класса является Perceiva DSD 190 с диагональю 19" американской компании MacNaughton, однако его существенным недостатком является высокая цена, достигающая 7000 долл. США.

Зеркальные стереомониторы реализуют принцип совмещения с помощью полупрозрачного зеркала двух ортогонально поляризованных изображений LCD-дисплеев и последующего их разделения с помощью пассивных поляризационных очков.

Важным достоинством зеркальных стереомониторов является поддержка их имеющимся программным обеспечением, в том числе с оконным стереоскопическим режимом и на уровне драйверов.

8.1.5. Способы измерения снимков и стереомодели

Разрешающая способность стереоскопического зрения дает возможность с большой точностью фиксировать совмещение одноименных точек. Поэтому стереоскопическое наблюдение широко используется для измерения координат одноименных точек.

Стереоскопический способ предполагает измерение геометрической модели, построенной по паре смежных снимков. Способ пригоден для измерения координат как контурных, так и неконтурных точек.

Для совместного измерения пары снимков и модели местности в фотограмметрии используется два способа – *способ действительной марки* и *способ мнимой марки*. Наиболее распространенным является способ *мнимой марки* (двух марок), предложенный в 1899 г. Пульфрихом. Он пригоден для измерения как снимков, так и модели. В нем используются две реальные марки, имеющие Т-образную форму и накладывающиеся на изображения левого ($P_{л}$) и правого ($P_{п}$) снимков (рис. 8.6).

Допустим, что два перекрывающихся снимка $P_{л}$ и $P_{п}$ получены с некоторого базиса фотографирования B и установлены в приборе так, что создана стереоскопическая модель участка местности. Если одновременно рассматривать модель и марки T_1 и T_2 , то они сольются в од-

ну пространственную марку T , произвольно расположенную относительно ближайших точек модели. Если марки T_1 и T_2 совмещены с одноименными a_1 и a_2 , то видимая пространственная марка T в этот момент совмещена с точкой A модели.

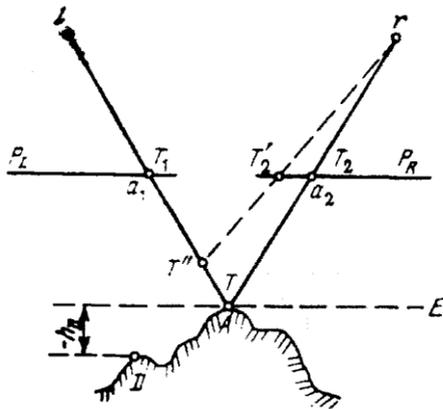


Рис. 8.6. Измерение снимков мнимой марки

Если правая марка T_2 не совмещена с точкой a_2 , то видимая пространственная марка T'' не совместится с точкой A модели, а будет казаться выше или ниже точки A . Для того чтобы правая марка из положения T_2' перешла в положение T_2 , необходимо ее (или снимок) передвигать в соответствующем направлении до тех пор, пока пространственная марка T'' не совпадет с точкой A модели.

Стереофотограмметрические приборы имеют отсчетные приспособления, позволяющие измерять движения марок по осям X и Y прибора, а тем самым измерять и координаты любой точки модели в системе координат прибора.

Если прибор имеет три оси измерения X , Y , Z , то разность отсчетов по Z при последовательном совмещении видимой пространственной марки с точками A и D модели определит превышение между этими точками в масштабе модели.

Стереофотограмметрические приборы, используемые для измерения координат точек снимков или модели способом мнимой марки, различны по конструкции: в одних перемещаются снимки относительно марок, в других – марки относительно снимков.

8.1.6. Поперечный и продольный параллаксы точек. Принципиальная схема стереокомпаратора. Порядок работы

Стереокомпаратор является наиболее высокоточным стереофотограмметрическим прибором, предназначенным для определения положения соответственных точек на смежных снимках, которое характеризуется координатами их изображения, т. е. величинами x_1, y_1, x_2 и y_2 (рис. 8.7) или величинами p и q , причем

$$p = x_1 - x_2,$$

$$q = y_1 - y_2.$$

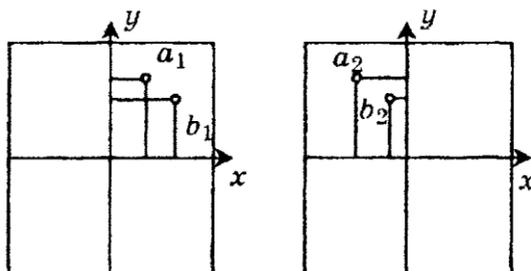


Рис. 8.7. Координаты соответственных точек на паре снимков

Величина p называется *продольным параллаксом* точки, а величина q – *поперечным параллаксом*. Для измерения этих координат и параллаксов и предназначен *стереокомпаратор*.

В настоящее время существует много типов стереокомпараторов, различающихся между собой по конструкции, точности измерения координат точек и степени автоматизации процесса регистрации результатов измерений. Общим для всех типов стереокомпараторов является то, что измерение координат точек всегда выполняется при стереоскопическом рассматривании снимков и использовании способа мнимой марки. Для каждого снимка имеется отдельная измерительная система, а для стереоскопического наблюдения – бинокулярная система, с помощью которой человек наблюдает стереоскопическую модель местности.

На рис. 8.8 представлена принципиальная схема стереокомпаратора.

На массивной станине С расположена общая каретка К. При вращении ручного штурвала Х каретка К перемещается вдоль оси абсцисс прибора. Величина этих перемещений может быть определена по шка-

ле K_x до 0,02 мм. На общей каретке K имеются левая и правая кассеты L, R , в которые закладывают аэронегативы.

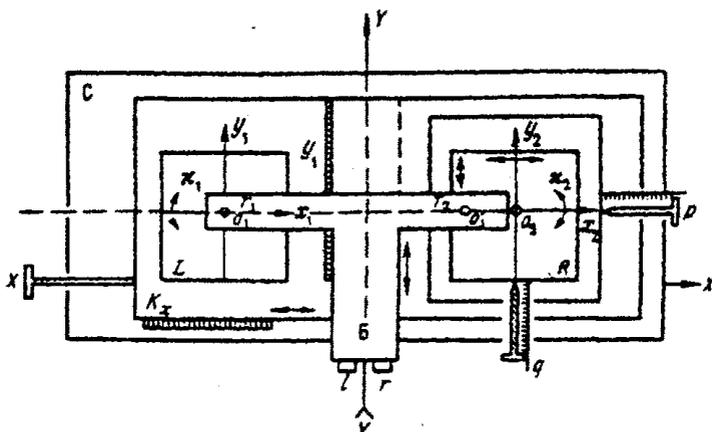


Рис. 8.8. Принципиальная схема стереокомпаратора

Кассеты могут поворачиваться вокруг своих центров соответственно на углы K_L и K_R . Правая кассета R с кареткой K_R может перемещаться относительно общей каретки K вдоль осей абсцисс и ординат прибора. Перемещение вдоль оси абсцисс осуществляется винтом продольных параллаксов q , а перемещение вдоль оси ординат – винтом поперечных параллаксов q . Величины перемещений определяются отсчетами по параллактическим винтам. Барабан параллактического винта имеет 100 делений. При одном обороте барабана каретка K_R перемещается относительно общей каретки на 1 мм. По параллактическим винтам можно снять отсчеты до 0,01 мм.

Наблюдательная система стереокомпаратора состоит из бинокулярного микроскопа, который при вращении штурвала $У$ перемещается вдоль неподвижных направляющих $у$, расположенных над общей кареткой K . Расстояние между окулярами L и r наблюдательной системы устанавливается в соответствии с глазным базисом наблюдателя. Резкое изображение марок достигается фокусировкой окуляров, а резкое изображение аэронегативов – смещением всей наблюдательной системы по высоте. Величина перемещения наблюдательной системы может быть определена по шкале $у$ до 0,02 мм.

Измерение координат и параллаксов точек аэроснимков на стереокомпараторе выполняют при прямом стереоэффекте, на аэронегативах или диапозитивах.

Аэронегативы с наколотыми главными точками закладывают в кассеты эмульсией вниз, перекрывающимися частями друг к другу, покрывают стеклами и закрепляют зажимами. Затем ориентируют их по начальному направлению. Для этого штурвалами X и Y монокулярно совмещают левую марку с главной точкой левого аэронегатива. Штурвалом X и винтом поперечных параллаксов q монокулярно совмещают правую марку с главной точкой правого аэронегатива. Далее, наблюдая двумя глазами, поворотом левой кассеты на угол $K_{\text{л}}$ и винта продольных параллаксов p добиваются стереоскопического восприятия модели.

После этого движением винта продольных параллаксов p опускают марку вниз («под землю») до тех пор, пока не будут видны на небольшом расстоянии друг от друга две марки (рис. 8.9).

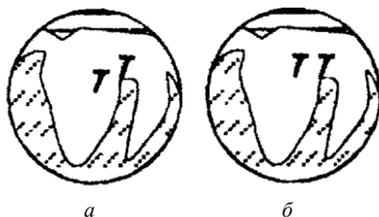


Рис. 8.9. Ориентирование аэроснимков

Именно при этом положении хорошо воспринимается поперечный параллакс как двоение марок по оси ординат.

Поворотом левой кассеты на угол $K_{\text{л}}$ уничтожают на точке 2 поперечный параллакс, располагая марки на одном уровне.

То же делают на точке 1, используя поворот правой кассеты на угол $K_{\text{п}}$. При этом необходима фиксация внимания на стереоскопической модели, а не на марке, относительно которой наблюдатель видит положение марки, что и позволяет проводить измерения.

Обработку результатов измерений выполняют после их завершения. Порядок этой обработки зависит как от назначения получаемых результатов, так и от способа ориентирования снимков. В случае ориентирования снимков по начальным направлениям координаты X и Y ,

как правило, не вычисляются, а измеренные параллаксы находят по отсчетам на точке:

$$p = P_i - P_{\text{нач}}, \quad q = Q_i - Q_{\text{нач}}, \quad (8.3)$$

где P_i , $P_{\text{нач}}$, Q_i , $Q_{\text{нач}}$ – отсчеты по шкалам продольных и поперечных параллаксов, полученные при визировании на текущую и начальную точки соответственно.

При стереоскопических измерениях, совмещая измерительную марку с точкой стереомодели, наблюдатель допускает ошибку Δx в плане и ошибку Δh по высоте, величины которых зависят от остроты бинокулярного зрения первого рода $\Delta \gamma_v$.

Современные стереокомпараторы характеризуются высокой точностью измерений.

8.2. Теория пары снимков

8.2.1. Геометрическая модель местности (связка, базисная плоскость)

Для определения пространственного положения точек данных одного снимка недостаточно, можно определить лишь их плановые координаты при некотором фиксированном значении высоты фотографирования. Определение же пространственного положения точек возможно только по результатам обработки пары снимков.

Стереофотограмметрия – раздел фотограмметрии, изучающий методы и приемы полного описания объектов путем определения их формы, размеров и пространственного положения по фотографическим изображениям этих объектов. Методы стереофотограмметрии находят применение не только в топографии, но и для решения широкого круга задач нетопографического характера – изучения деформации сооружений, при архитектурных обмерах и т. п.

Методы стереофотограмметрии предполагают построение геометрической (стереоскопической, фотограмметрической) модели по двум и более снимкам, ее измерение и обработку (рис. 8.10).

Пусть участок АКТ местности изобразился на двух снимках p_1 и p_2 , полученных при разных положениях центров фотографирования S_1 и S_2 . Снимки p_1 и p_2 занимают такое же положение, какое они занимали во время фотографирования.

Базис фотографирования B – расстояние между центрами фотографирования S_1 и S_2 .

Связка проектирующих лучей – совокупность проектирующих лучей, принадлежащих какому-либо центру проекции S_1 или S_2 .

Соответственные лучи – лучи, проходящие через центры проекции S_1 и S_2 и идентичные точки стереопары (S_1a_1 и S_2a_2).

Базисная плоскость фотографирования – плоскость, проходящая через базис фотографирования B и один любой проектирующий луч.

Главная базисная плоскость – плоскость, проходящая через базис фотографирования и главный луч S_1o_1 или S_2o_2 .

Каждая пара соответственных лучей (S_1a_1 и S_2a_2) лежит в одной и той же базисной плоскости.

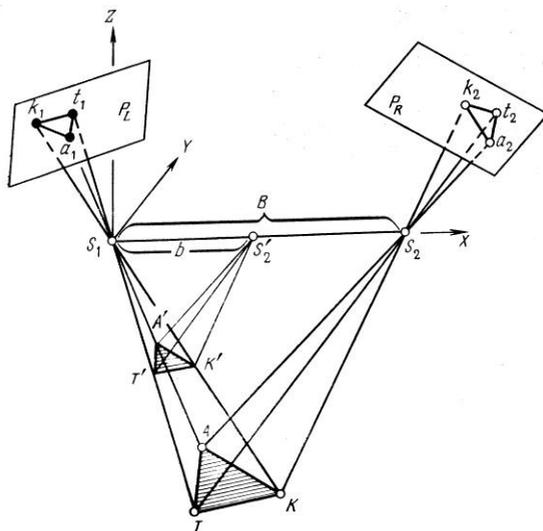


Рис. 8.10. Схема построения геометрической модели местности

Если оставить один снимок неподвижным (например левый p_1) и перемещать правый снимок p_2 по направлению базиса фотографирования B , при этом связка проектирующих лучей будет перемещаться параллельно самой себе (т. е. каждый проектирующий луч подвижной связки будет все время параллелен своему исходному положению, а следовательно, будет находиться в одной и той же базисной плоско-

сти). Таким образом, пересечение одноименных связок лучей нигде не будет нарушено. Полученная модель будет подобна реальному объекту съемки. Такая модель называется *геометрической (стереоскопической, фотограмметрической)* моделью.

Геометрическая (стереоскопическая, фотограмметрическая) модель – совокупность точек пересечения соответствующих проектирующих лучей, полученных по стереопаре.

Базис проектирования $b_{пр}$ – расстояние между центрами проекции S_1 и S_2 двух связок, по которым построена модель.

Масштаб модели – равен отношению базиса проектирования $b_{пр}$ к базису фотографирования B .

$$1 / t = b_{пр} / B. \quad (8.4)$$

Базис проектирования можно выбрать произвольно, в этом случае масштаб модели будет произвольным.

Элементы ориентирования пары снимков – величины, определяющие их положение во время фотографирования. Так же, как для одиночного снимка, их можно разделить на внутренние и внешние элементы ориентирования.

Элементы внутреннего ориентирования – фокусное расстояние аэрофотокамеры f и координаты главной точки снимка.

Положение снимков, образующих модель местности, относительно системы координат местности *характеризуется элементами внешнего ориентирования*: величинами $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \alpha_1, \omega_1, \chi_1$ для левого снимка и $X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}, \alpha_2, \omega_2, \chi_2$ для правого, т. е. шестью линейными элементами и шестью угловыми.

Если известны элементы ориентирования пары снимков, то по ним можно установить снимки в то положение, которое они занимали в момент фотографирования, и сориентировать их относительно наземной системы координат.

Как правило, элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны или известны с недостаточной точностью для фотограмметрической обработки.

С учетом этого для построения модели и определения по ней пространственных координат точек используют *двойную обратную фотограмметрическую засечку*. Она включает следующие этапы:

- *внутреннее ориентирование снимков* (восстановить связки проектирующих лучей, существовавших во время фотографирования);

- *взаимное ориентирование снимков* (переместить снимки относительно друг друга так, чтобы соответственные лучи пересекались);
- *построение модели местности*;
- *внешнее ориентирование модели* (ориентирование модели относительно системы координат местности по опорным точкам);
- *измерение пространственных координат точек* аэроснимков в системе координат местности.

8.2.2. Элементы взаимного ориентирования снимков

Элементы взаимного ориентирования – величины, определяющие взаимное положение пары снимков в избранной системе координат. Эти величины не связаны с системой координат местности и могут определяться только совместно.

При обработке результатов фотограмметрических измерений применяют *две основные системы элементов взаимного ориентирования*, различающиеся способом ориентирования:

- 1) наклонами и вращениями обоих снимков при неподвижном базисе;
- 2) наклонами и вращениями одного снимка и базиса фотографирования.

В базисной системе (рис. 8.11) неподвижным (горизонтальным) считается базис фотографирования. Начало фотограмметрической системы координат совмещено с центром проекции левого снимка S_1 , ось абсцисс $S_1X'_1$ совмещена с базисом фотографирования S_1S_2 , а плоскость $S_1X'_1Z'_1$ – с главной базисной плоскостью левого снимка. Элементами взаимного ориентирования являются:

α'_1 – *продольный угол наклона левого снимка* (угол в плоскости $S_1X'_1Z'_1$ между главным оптическим лучом So и осью $S_1Z'_1$);

χ'_1 – *угол поворота левого снимка в своей плоскости* (угол в плоскости левого снимка P_1 между осью o_1u_1 и следом сечения снимка плоскостью $S_1o_1Y'_1$);

α'_2 – *продольный угол наклона правого снимка* (угол в плоскости $S_1X'_1Z'_1$ между осью $S_1Z'_1$ ($S_2Z'_2$) и проекцией правого главного оптического луча S_2o_2 на плоскость $S_1X'_1Z'_1$);

ω'_2 – *взаимный поперечный угол наклона* (угол в плоскости $S_2Y'_2o_2$ между главным оптическим лучом правой связки S_2o_2 и плоскостью $S_1X'_1Z'_1$);

χ'_2 – угол поворота правого снимка в своей плоскости (угол в плоскости правого снимка P_2 между осью o_2y_2 и следом сечения снимка плоскостью $S_2o_2Y'_2$).

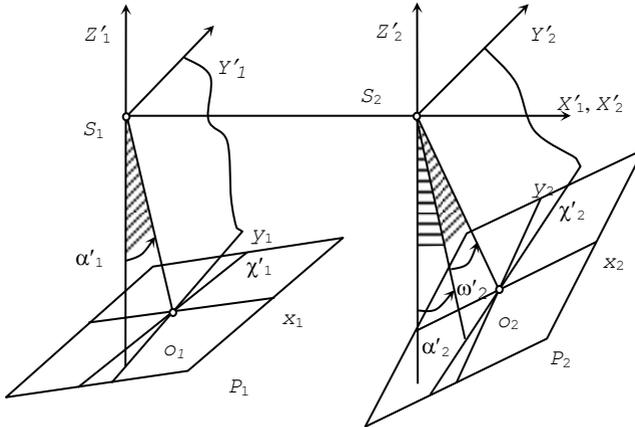


Рис. 8.11. Первая (базисная) система элементов взаимного ориентирования

В *линейно-угловой системе* (система координат левого снимка) (рис. 8.12) неподвижным считается левый снимок. Начало фотограмметрической системы координат совмещено с центром проекции левого снимка S_1 , координатные оси X'_1 и Y'_1 направлены параллельно осям координат x_1 и y_1 левого снимка, а ось Z'_1 является продолжением главного оптического луча левой связки. Система координат $S_2X'_2Y'_2Z'_2$ параллельна системе $S_1X'_1Y'_1Z'_1$. Элементами взаимного ориентирования являются:

τ' – угол в плоскости P_1 между осью x_1 и следом сечения главной базисной плоскостью левого снимка;

ν' – угол наклона базиса фотографирования в плоскости $S_1S_2o_1$ между перпендикуляром к нему и осью $S_1Z'_1$;

$\Delta\alpha$ – взаимный продольный угол наклона (угол плоскости $S_2X'_2Z'_2$ между осью $S_2Z'_2$ и проекцией главного луча правой связки на плоскость $X'_2Z'_2$);

$\Delta\omega$ – взаимный поперечный угол наклона (угол в плоскости $S_2Y'_2o_2$ между главным оптическим лучом правой связки S_2o_2 и его проекцией на плоскость $X'_2Z'_2$);

$\Delta\chi$ – взаимный угол поворота (угол в плоскости правого снимка P_2 между осью y_2 и следом плоскости $S_2O_2Y_2'$).

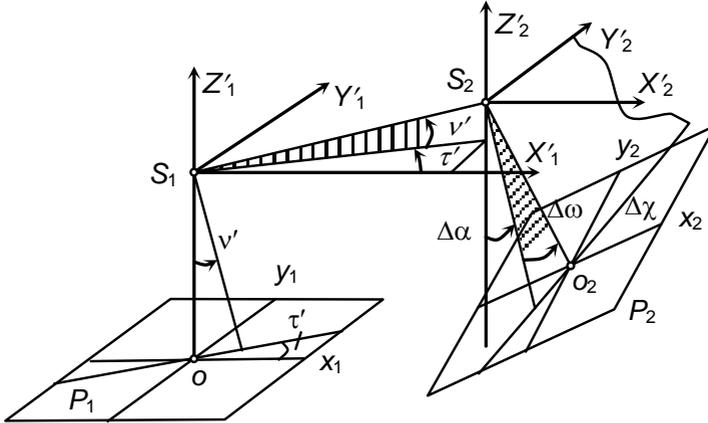


Рис. 8.12. Вторая (линейно-угловая) система

Обе системы отсчетов элементов взаимного ориентирования точно соответствуют системе отсчета угловых элементов внешнего ориентирования снимков.

8.2.3. Внешнее (геодезическое) ориентирование модели

Модель, полученная в результате взаимного ориентирования, построена в некоторой произвольно выбранной системе координат $OXYZ$ (рис. 8.13). В общем случае ее масштаб и положение в пространстве относительно системы координат местности $O_T X_T Y_T Z_T$ произвольны и должны быть определены в процессе внешнего ориентирования. При этом нужно принять во внимание, что система координат местности $O_T X_T Y_T Z_T$ – левая, а фотограмметрическая $OXYZ$ – правая.

Величины, определяющие положение модели в пространстве относительно системы координат местности и ее масштаб, называют *элементами внешнего ориентирования*. Таких элементов семь:

X_0, Y_0, Z_0 – геодезические координаты начала фотограмметрической системы координат;

t – масштабный коэффициент;

ξ – продольный угол наклона в плоскости OY_rZ_r между проекцией на нее оси Z фотограмметрической системы и осью Z_r ;

η – поперечный угол наклона в плоскости OZX_r между осью Z фотограмметрической системы и ее проекцией на плоскость Y_rZ_r ;

θ – угол поворота модели в плоскости OXY между осью Y и следом сечения плоскости OZX_r .

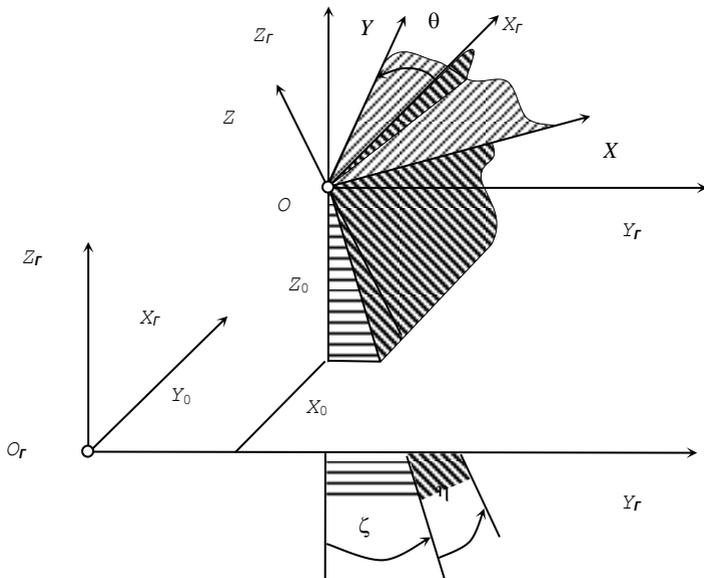


Рис. 8.13. Элементы внешнего ориентирования модели

Поскольку системы отсчета угловых элементов внешнего ориентирования модели и снимка полностью идентичны, для установления связи между координатами точек в системах $O_rX_rY_rZ_r$ и $OXYZ$ можно воспользоваться следующими формулами с учетом положения координатных осей:

$$\left. \begin{aligned} X_r &= X_0 + (b_1X + b_2Y + b_3Z) \cdot t = X_0 + \Delta X_r \\ Y_r &= Y_0 + (a_1X + a_2Y + a_3Z) \cdot t = Y_0 + \Delta Y_r \\ Z_r &= Z_0 + (c_1X + c_2Y + c_3Z) \cdot t = Z_0 + \Delta Z_r \end{aligned} \right\}, \quad (8.5)$$

где a_i, b_i, c_i ($i = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы с заменой углов α, ω, χ на углы ξ, η и θ .

Для решения задачи нужно иметь как минимум три опорных точки, из которых две должны быть определены в плане и по высоте, а третья – только по высоте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: Тетра-Системс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

9. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ

9.1. Сущность пространственной фототриангуляции. Классификация методов. Понятие об аналоговой фототриангуляции.

9.2. Аналитическая маршрутная фототриангуляция.

9.3. Способ независимых моделей. Внутреннее ориентирование снимков.

9.4. Уравнивание связей проектирующих лучей.

9.5. Точность триангуляционных сетей.

9.6. Программы построения и уравнивания сетей фототриангуляции.

9.1. Сущность пространственной фототриангуляции.

Классификация методов. Понятие об аналоговой фототриангуляции

Пространственной фототриангуляцией называют метод определения планового или пространственного положения точек местности путем фотограмметрических засечек точек по перекрывающимся снимкам.

Метод применяют для определения координат опорных точек с целью последующего их использования при фототрансформировании снимков, внешнем ориентировании модели, съемке рельефа и контуров, получении ортофотоснимков и др. Сущность метода заключается в следующем.

Пусть из точек S_1, S_2, S_3 и S_4 (рис. 9.1) получены снимки P_1, P_2, P_3 и P_4 .

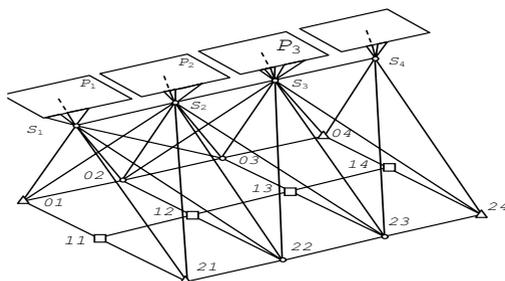


Рис. 9.1. Пространственная фототриангуляция

Установим эти снимки в то положение, которое они занимали в момент фотографирования, и обратим внимание на следующее.

1. Все проектирующие лучи проходят через центры фотографирования и точки аэроснимков. Значит, *связки внутренне ориентированы*.

2. Пары соответственных проектирующих лучей S_121 и S_221 , S_101 и S_201 , S_222 и S_322 и др. пересекаются в точках 01, 02, ..., 24, т. е. все они компланарны, лежат в базисных плоскостях, следовательно, *пары снимков взаимно ориентированы*.

3. Тройки проектирующих лучей S_102 , S_202 и S_302 , S_112 , S_212 и S_312 и т. п. пересекаются в точках 02, 12, 22, ..., 04, 14, 24. Значит, построенные по стереопарам P_1 и P_2 , P_2 и P_3 , P_3 и P_4 и др. фотограмметрические модели в едином масштабе представляют нечто единое – *модель маршрута*.

4. Проектирующие лучи S_101 , S_121 , S_404 и S_424 проходят через опорные точки 01, 21, 04 и 24. Следовательно, *маршрутная сеть ориентирована по опорным точкам* и фотограмметрическая система координат совпадает с геодезической.

Для построения фототриангуляционной сети нужно выполнить следующие операции:

- внутреннее ориентирование снимков;
- взаимное ориентирование снимков;
- определение фотограмметрических координат точек модели (построение начального звена);
- построение следующего звена (взаимное ориентирование, определение фотограмметрических координат точек) и объединение его с предыдущим по точкам связи в зоне тройного продольного перекрытия;
- внешнее (геодезическое) ориентирование маршрутной сети по опорным точкам и перевычисление фотограмметрических координат точек в систему местности.

При построении и уравнивании фототриангуляционной сети на снимках предварительно намечают ряд точек, в частности:

- точки в стандартных зонах 1–6 для взаимного ориентирования снимков;
- связующие точки в тройном продольном перекрытии снимков для связи смежных звеньев маршрута и в поперечном перекрытии снимков для связи смежных маршрутов между собой;
- опорные точки для внешнего ориентирования сети;
- характерные точки рельефа, урезы вод и др., отображаемые на топографической карте.

Кроме того, для внутреннего ориентирования снимков используются координатные метки, а с целью повышения точности взаимного ориентирования в стандартных зонах выбирают по 3–5 точек. С учетом этого в пределах стереопары размещается 20 и более точек.

Классификация методов фототриангуляции. Методы построения фототриангуляционных сетей могут быть классифицированы по нескольким основаниям.

В зависимости от назначения различают два вида фототриангуляции: *заполняющая* и *каркасная*. *Заполняющая фототриангуляция* строится по снимкам площадной аэрофотосъемки, а каждый маршрут обеспечивается опорными точками. *Каркасная фототриангуляция* строится по снимкам каркасных маршрутов, представляющих собой одиночные маршруты по краям основных, с целью обеспечения опорными точками снимков площадной аэрофотосъемки и заполняющей фототриангуляции.

В зависимости от количества маршрутов, используемых для построения фототриангуляционной сети, различают фототриангуляцию *маршрутную* и *блочную*.

Маршрутная фототриангуляция строится по снимкам одного маршрута, обеспеченного опорными точками для его внешнего (геодезического) ориентирования.

Блочная фототриангуляция строится одновременно по двум и более маршрутам, поэтому необходимое число опорных точек для внешнего ориентирования такой сети значительно меньше, чем при построении отдельных маршрутов.

В зависимости от получаемых результатов сгущения различают фототриангуляцию *плановую*, задачей которой является получение только плановых координат точек X и Y , и *пространственную*, позволяющую получить не только плановые координаты, но и высоты точек. Способы построения плановой фототриангуляции в настоящее время потеряли актуальность и практически не используются.

В зависимости от применяемых технических средств различают фототриангуляцию *аналоговую* и *аналитическую*.

Аналоговая фототриангуляция основана на использовании универсальных стереофотограмметрических приборов, позволяющих создавать не только одиночные модели, но общую модель маршрута. Возможности учета систематических ошибок в аналоговой фототриангуляции ограничены.

9.2. Аналитическая маршрутная фототриангуляция

Аналитическая фототриангуляция основана на использовании строгих математических зависимостей между точками аэроснимка и местности. Построению аналитической фототриангуляции предшествует измерение координат и параллаксов точек снимков на высокоточных стереокомпараторах, а использование ЭВМ для их обработки открывает возможности учета всех искажений точек, выражающихся математическими зависимостями, и применения строгих методов уравнивания результатов измерений методом наименьших квадратов.

Методы аналитической фототриангуляции можно разделить на группы в зависимости от математической формулировки задачи построения фототриангуляционной сети:

✓ *способы полузависимых моделей*, предполагающие построение маршрутной сети в единой системе координат и ее последующее ориентирование по опорным точкам;

✓ *способы независимых моделей*, предполагающие построение отдельных моделей в локальных системах координат, последующее их объединение и ориентирование по опорным точкам;

✓ *способы построения блока из отдельных маршрутов*, основанные на построении маршрутов способами полузависимых моделей, объединении их в блок по связующим точкам и последующем ориентировании всего блока по опорным точкам;

✓ *способы уравнивания связей проектирующих лучей*, основанные на построении маршрутной или блочной сети непосредственно в системе координат местности с использованием условия коллинеарности соответствующих векторов.

С точки зрения точности и производительности фотограмметрического сгущения наиболее эффективными являются способы аналитической пространственной фототриангуляции, особенно при уравнивании связей проектирующих лучей и использовании бортовых измерений.

9.3. Способ независимых моделей. Внутреннее ориентирование снимков

Сущность способа заключается в том, что каждая фотограмметрическая модель (звено) строится в локальной координатной системе (чаще всего – в базисной, начало которой совмещено с левым центром,

ось абсцисс – с базисом фотографирования, а ось аппликат размещена в главной базисной плоскости левого снимка). Таким образом, одно звено строится в системе $S_{i-1} X'Y'Z'$, другое – в системе $S_i X''Y''Z''$ и т. д. (рис. 9.2), и эти системы различаются масштабом, положением начала и ориентированием координатных осей. После внутреннего ориентирования снимков выполняют обработку каждого звена в порядке:

- взаимное ориентирование снимков;
- трансформирование координат точек на плоскость SXY базисной системы; вычисление направляющих косинусов с заменой углов $\alpha = \alpha'_1$, $\omega = 0$, $\chi = \chi'_1$ для левого снимка и $\alpha = \alpha'_2$, $\omega = \omega'_2$, $\chi = \chi'_2$ для правого;
- определение фотограмметрических координат точек для идеального случая съемки (так как в базисных системах координат плоскости снимков параллельны базису фотографирования).

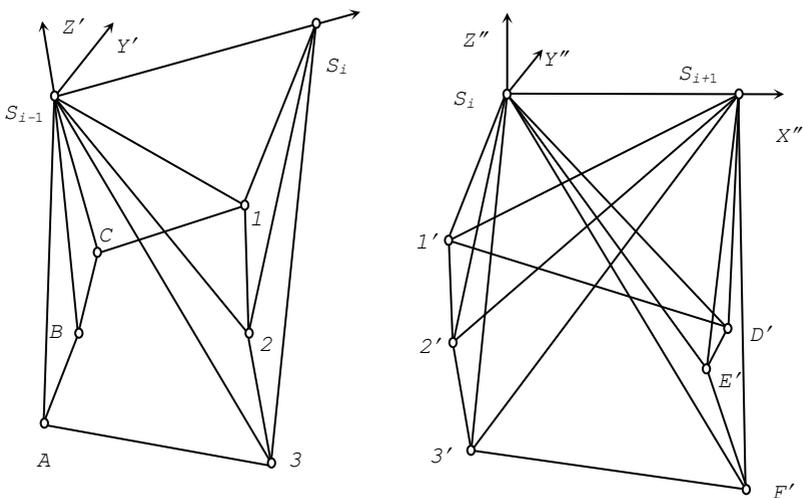


Рис. 9.2. Способ независимых моделей

После построения всех звеньев маршрута (блока) в локальных системах координат выполняют их преобразование в систему координат местности одним из рассмотренных далее способов.

Первый способ предусматривает построение сети в свободной системе координат путем объединения всех звеньев, после чего выполняется внешнее ориентирование сети по опорным точкам.

С этой целью координаты точек каждого звена преобразуют в систему координат центрального звена 2.3 (рис. 9.3): сначала – звеньев 1.3, 2.2, 2.4, 3.3, затем – звеньев 1.2, 1.4, 3.2, 3.4 и т. д. Элементы ориентирования каждой модели относительно центральной находят по связующим точкам в зоне тройного продольного перекрытия l и l' , 2 и $2'$, 3 и $3'$ и общему центру S ; (рис. 9.3) и по точкам C , l , A , 3 в зоне поперечного перекрытия. При этом учитывают, что координатные системы всех моделей – правые (фотограмметрические). В результате этих преобразований будет построена единая модель маршрута (блока) в свободной системе координат. После этого выполняют внешнее ориентирование всей сети (маршрута или блока) по опорным точкам.

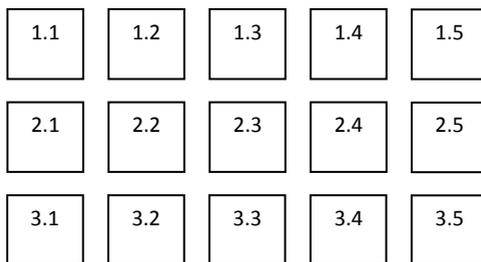


Рис. 9.3. Построение блока из независимых моделей

Второй способ обработки независимых моделей основан на определении элементов внешнего ориентирования каждого звена относительно системы координат местности, минуя объединение их в свободную сеть. Формируемая при этом система уравнений включает по 7 неизвестных для каждого звена: для сети из m маршрутов по n звеньев возникает система, содержащая $7mn$ уравнений. Для их определения составляют две группы уравнений, вытекающих из различных математических условий.

Первая группа уравнений составляется для опорных точек и соответствует условию равенства их координат, найденных по результатам геодезических измерений и путем преобразования фотограмметрических координат звена i по формулам (9.1):

$$\begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \cdot t^i - \begin{vmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{vmatrix} = 0, \quad (9.1)$$

где верхний индекс группы элементов обозначает принадлежность их звену с номером i .

Это соответствует условию

$$\left. \begin{aligned} \varphi_X^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - X_r &= 0 \\ \varphi_Y^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - Y_r &= 0 \\ \varphi_Z^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - Z_r &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (9.2)$$

Аналогичные уравнения можно составить для центров фотографиярования, координаты которых определены в полете.

Вторая группа уравнений составляется для связующих точек смежных звеньев и соответствует условию равенства их координат, перевычисленных в систему местности путем преобразования фотограмметрических координат связующих точек звеньев i и j с учетом направления координатных осей (все системы фотограмметрические) и элементов внешнего ориентирования соответствующих моделей:

$$\left[\begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \right]^i - \left[\begin{vmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \end{vmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \right]^j = 0 \quad (9.3)$$

(верхний индекс группы элементов по-прежнему обозначает принадлежность их звеньям с номерами i и j). Это условие в общем виде представляется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_X^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_X^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \\ \varphi_Y^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_Y^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \\ \varphi_Z^i(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) - \varphi_Z^j(X_0, Y_0, Z_0, \xi, \eta, \theta, t, X, Y, Z) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (9.4)$$

Полученная система уравнений решается методом наименьших квадратов, под условием $[vvp] = \min$, причем вес точки, по которой составляется уравнение, связывается с надежностью ее опознавания на

снимке и точностью определения координат в системе местности. Неизвестные находят методом последовательных приближений, пока поправки к неизвестным или свободные члены уравнений не окажутся меньше заданного допуска. Точность внешнего ориентирования характеризуется величинами остаточных невязок на опорных точках и характером их распределения.

Пусть блок из m маршрутов по n моделей в каждом опирается на k опорных точек, в каждой модели имеется по шесть стандартно расположенных точек, а каждая из этих точек является связующей с предыдущей, последующей моделью или смежным маршрутом. В таком блоке возникает $16mn - 6(n + 2m) + 3k$ уравнений и $7mn$ неизвестных. При уравнивании блока из трех маршрутов по 10 снимков в каждом, опирающемся на 12 опорных точек ($m = 3, n = 10, k = 12$), возникает 420 уравнений с 210 неизвестными.

9.4. Уравнивание связей проектирующих лучей

Важнейшей особенностью рассматриваемого способа, предложенного профессором А. Н. Лобановым в 1963 г., является одновременное построение и уравнивания фотограмметрической сети по всем снимкам обрабатываемого маршрута или блока. Сущность способа заключается в использовании математической зависимости между координатами X, Y, Z точки местности, координатами x, y ее изображения на снимке и элементами внешнего ориентирования снимка $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi$, выражающейся формулами:

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X_M - X_S) + b_1(Y_M - Y_S) + c_1(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \\ y &= -f \frac{a_2(X_M - X_S) + b_2(Y_M - Y_S) + c_2(Z_M - Z_S)}{a_3(X_M - X_S) + b_3(Y_M - Y_S) + c_3(Z_M - Z_S)} \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

где a_i, b_i, c_i ($i = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы, вычисляемые по угловым элементам внешнего ориентирования снимка;

f – фокусное расстояние съёмочной камеры.

В общем случае эти формулы содержат 9 неизвестных, в том числе 6 элементов внешнего ориентирования снимка и 3 координаты точки. Обозначив приближенные значения этих неизвестных через

$X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0$, а поправки к ним – через $\delta X_S, \delta Y_S, \delta Z_S, \delta \alpha, \delta \omega, \delta \chi, \delta X, \delta Y, \delta Z$, запишем уравнения (9.5) в виде двух условий

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x \left(X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0 \right) - x &= 0 \\ \varphi_y \left(X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \chi^0, X^0, Y^0, Z^0 \right) - y &= 0 \end{aligned} \right\}$$

и приведем их к линейному виду разложением в ряд Тейлора

$$\left. \begin{aligned} a_x \delta X_S + b_x \delta Y_S + c_x \delta Z_S + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \chi + \\ + g_x \delta X + h_x \delta Y + i_x \delta Z + l_x = v_x; \\ a_y \delta X_S + b_y \delta Y_S + c_y \delta Z_S + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + f_y \delta \chi + \\ + g_y \delta X + h_y \delta Y + i_y \delta Z + l_y = v_y \end{aligned} \right\}, \quad (9.6)$$

где $l_x = (x) - x$;

$l_y = (y) - y$;

a, b, \dots, i – элементы разложений в ряд Тейлора, представляющие собой частные производные от функций (9.5) по соответствующим неизвестным;

$(x), (y)$ – координаты определяемой точки на снимке, найденные по формулам (9.5) с использованием приближенных значений неизвестных;

v_x, v_y – поправки к измеренным координатам.

Если известны координаты центров фотографирования, полученные с помощью систем GPS, то для каждого из них составляют три уравнения поправок вида

$$\delta X_S + l_x = v_x, \quad \delta Y_S + l_y = v_y, \quad \delta Z_S + l_z = v_z, \quad (9.7)$$

где l – разности приближенных и полученных с помощью GPS координат центров фотографирования.

Уравнения (9.6) составляют для всех точек снимков, включенных в фотограмметрическую сеть, а уравнения (9.7) – только для центров фотографирования с известными координатами. Если сеть состоит из m маршрутов по n снимков в каждой и в нее включено k исходных точек различного назначения, то всего в системе возникает $6mn + 3k$ неизвестных. Поскольку каждая из k точек изображается на снимках от двух до шести раз и каждый раз для нее составляется два уравнения

(9.6), то общее число уравнений всегда больше числа неизвестных. Следовательно, система переопределена и возможно ее решение под условием $[vvp] = \min$ методом наименьших квадратов. Веса измерений устанавливаются в зависимости от надежности опознавания точек снимков, качества изображения и точности геодезического определения их координат.

Коэффициенты a, b, \dots, i уравнений (9.6) зависят от определяемых величин, поэтому при существенных уклонениях их начальных значений от уравненной система должна решаться методом приближений, в каждом из которых нужно уточнять как свободные члены уравнений, так и коэффициенты при неизвестных.

Таким образом, сходимость итерационного процесса определяется величинами уклонений начальных значений неизвестных от их точных (или уравненных) значений. По этой причине технология аналитической обработки фотограмметрических измерений предусматривает предварительное определение начальных значений неизвестных с точностью, достаточной для начала итераций. В различных ситуациях это достигается различными средствами. Так, уравниванию связей предшествует построение маршрута (блока) способом полузависимых моделей или объединением независимых маршрутов; внешнему ориентированию маршрута или блока – определение приближенных значений неизвестных по ограниченному числу стандартно расположенных точек и т. д.

9.5. Точность триангуляционных сетей

Отступления реальных изображений снимков от центральной проекции, погрешности нанесения точек на снимки и их измерений, несовершенство вычислительной обработки (например, плохая обусловленность систем уравнений) и др. неизбежно ведут к возникновению ошибок случайного и систематического характера. Однако основными в настоящее время остаются ошибки отождествления точек и их измерения, в той или иной степени деформирующие все компоненты фотограмметрических построений – элементы взаимного ориентирования, фотограмметрическую модель и, как следствие, фототриангуляционную сеть. Общие закономерности накопления этих ошибок, установленные профессором Г. В. Романовским еще в 1945 г., справедливы и для применяемых ныне аналитических и цифровых технологий построения фотограмметрических сетей.

Для установления характера влияния *случайных* (независимых) ошибок в маршрутной сети, состоящей из n звеньев, допустим, что при построении первого из них возникает случайная ошибка δ_1 , которая скажется на масштабном коэффициенте, изменит величину второго и всех последующих базисов фотографирования, т. е. сохранится во всех последующих звеньях сети. Такая же ошибка появится во втором звене (δ_2), третьем (δ_3) и т. д., причем каждая из них сохранится во всех последующих. Таким образом, ошибки будут накапливаться (табл. 9.1).

Таблица 9.1. Накопление суммарной ошибки при фототриангуляции

Порядковый номер звена	1	2	3	...	n
Ошибка звена	δ_1	$\delta_1 + \delta_2$	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3$...	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n$
Суммарная ошибка	δ_1	$2\delta_1 + \delta_2$	$3\delta_1 + 2\delta_2 + \delta_3$...	$n\delta_1 + (n-1)\delta_2 + (n-2)\delta_3 + \dots + \delta_n$

Примем ошибки всех звеньев одинаковыми ($\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = \delta$) и найдем среднюю квадратическую ошибку положения точки последнего звена фототриангуляции в соответствии с правилами теории ошибок измерений:

$$m_n^2 = \delta^2 [1^2 + 2^2 + \dots + n^2] = \delta^2 (n^3 + 3n^2 + n) / 6 \approx 0,333n^3 \delta^2. \quad (9.8)$$

Накопление случайных ошибок в рассмотренном порядке происходит по всем трем координатным осям.

Характер накопления ошибок δ в соответствии с полученной формулой отражает кривая на рис. 9.4, где отрезок mm' соответствует ошибке в положении конечной точки, а lk' – средней точки сети. После внешнего ориентирования сети по опорным точкам на ее концах точки m и m' (рис. 9.4) совместятся, кривая $ok'm$ займет положение $ol'm'$, а положение средней точки сети получит поправку, равную половине ошибки конечной точки.

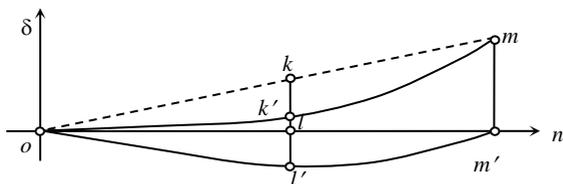


Рис. 9.4. Накопление ошибок в сети фототриангуляции

Поэтому для определения ожидаемых ошибок в середине ряда фототриангуляции в формуле (9.8) заменим n на $n/2$, результат разделим пополам и заменим δ ошибками, возникающими при построении одиночной модели:

$$m_D = 0,30m_q \sqrt{n^3}, \quad m_Z = 0,23m \frac{f}{b} m_q \sqrt{n^3} \}, \quad (9.9)$$

где m_D, m_Z – ошибки построения сети в плане и по высоте;

m – знаменатель масштаба аэрофотосъемки;

m_q – средняя квадратическая ошибка измерения поперечного параллакса;

f – фокусное расстояние съёмочной камеры;

b – базис фотографирования на снимке.

При $n = 10$, $m_q = 0,01$ мм, $f = b = 70$ мм получим, что $m_x = m_z = 0,08$ мм, $m_d = 0,11$ мм и $m_y = 0,05$ мм в масштабе снимка.

Более строгие формулы оценки точности фототриангуляционных построений учитывают метод построения сети, число и схему размещения опорных точек, число точек на стереопаре при взаимном ориентировании и т. д. То же относится и к блочной фототриангуляции, точность которой в 1,5–2 раза выше точности маршрутной фототриангуляции.

Рассмотренный механизм накопления ошибок характерен как для аналитических, так и аналоговых сетей, построенных методом продолжений. Основой этого метода является последовательное подориентирование каждого последующего звена к предыдущему. Наиболее ясно и естественно этот метод реализован в способе полузависимых моделей, хотя та же идея в менее явном виде реализована и в способе независимых моделей.

Принципиально иной метод реализован в способах уравнивания связок проектирующих лучей, где накопление ошибок происходит по иным законам, что и приводит к повышению точности блочных построений в 1,5 и 2 раза в сравнении с маршрутными сетями.

Накопление *систематических* ошибок в сетях фототриангуляции происходит по тем же законам, что и при построении одиночной модели. Искажения, возникающие при построении пространственных фототриангуляционных сетей, описываются полиномами того или иного типа и устраняются по опорным точкам, размещенным парами в начале, середине и в конце секций расчетной длины. Технология их использования следующая: вначале выполняется внешнее ориентирова-

ние сети по всем точкам, а затем устраняется систематическая деформация по остаточным невязкам на этих точках.

Эффективность применения полиномов определяется возможностями учета искажений изображения при внутреннем ориентировании. С появлением средств цифровой обработки таких изображений, повышением точности определения координат точек и учетом различного рода искажений применение полиномов потеряло смысл.

Требования к густоте опорных точек. Требования к числу и размещению опорных точек детально представлено в разделе б.

Действующие инструкции по топографическим съемкам устанавливают, что средняя ошибка в положении четкой контурной точки равна 0,5 мм в масштабе карты (средняя квадратическая ошибка 0,6 мм). Ожидаемая средняя квадратическая ошибка планового сгущения должна быть в 2 раза меньше, т. е. $m_D \leq 0,3$ мм. Подставив эту величину, коэффициент увеличения m/M и ошибку измерения m_q в формулу (9.9), легко определить число базисов фотографирования n между плановыми опорными точками. Например, при $m = 20\ 000$, $M = 10\ 000$, $m_q = 0,02$ мм найдем, что $n = 8$.

Густоту высотных точек подсчитывают исходя из установленной нормативными документами средней ошибки определения высот точек по топографической карте, равной $1/3$ сечения рельефа. Исходя из этого, легко найти среднюю квадратическую ошибку сгущения m_Z высот и расчетную густоту высотных опорных точек по формуле (9.9).

Так, при сечении рельефа через 2,5 м средняя квадратическая ошибка сгущения высот должна быть $m_Z \leq 0,52$ м ($0,5 \times 2,5/3 \times 1,25$). При $m = 20\ 000$, $M = 10\ 000$, $f = b = 100$ мм и $m_q = 0,02$ мм по формуле (9.9) получим, что высотные опорные точки следует размещать через 2–3 базиса фотографирования.

9.6. Программы построения и уравнивания сетей фототриангуляции

Для **аналитической фототриангуляции** могут использоваться программные средства двух типов.

1. Фототриангуляция встроена в общую автоматизированную фотogramметрическую систему обработки снимков на аналитическом или цифровом приборе (он-лайн). При этом программы фототриангуляции жестко связаны с внутренней информационной базой системы, и состав программ диктуется технологическими решениями, реализуемы-

ми в этой системе. Целесообразно, чтобы информационная база системы содержала файлы измеренных координат точек снимков и других исходных данных, относящихся к фототриангуляции, в текстовом формате. Это позволит при необходимости переносить информацию в другие программные продукты для независимого контроля результатов обработки, сравнения различных систем и объективной оценки их. Отсутствие таких файлов в какой-либо системе должно служить предостерегающим сигналом в отношении принятия решения о ее использовании.

2. Комплексы программ для технологической обработки фотограмметрических измерений общего назначения, не накладывающие ограничения на приборы и методы сбора информации по снимкам (оффлайн). Окончательные результаты вычислений должны быть пригодны для использования в любых обрабатывающих фотограмметрических приборах. Состав процедур и модулей таких комплексов должен позволять компилировать исполняемые файлы применительно как к задачам топографической съемки, так и к другим специальным задачам, в том числе и к проектированию работ.

Комплексы программ второго типа должны складываться, в свою очередь, из нескольких взаимно связанных компонентов. В минимальный перечень должны входить следующие компоненты:

- библиотечный, объединяющий программы составления и ведения библиотек геодезических проекций, измерительных приборов и съёмочных камер;

- маршрутной фототриангуляции с программами подготовки исходных данных или заимствования их из других систем (аналитических или цифровых) и самой маршрутной фототриангуляции (с построением свободной и внешне ориентированной сети); сюда же могут входить дополнительные программы, обеспечивающие удобство анализа протоколов маршрутной фототриангуляции и сопоставления смежных маршрутных сетей;

- блочной фототриангуляции, включающей программы подготовки заданий на уравнивание блока, самого уравнивания различными способами и анализа протоколов счета;

- сервисный, включающий программы составления различных каталогов координат точек уравненной фототриангуляционной сети, а также программы подсчета установочных данных, упрощающих процедуры ориентирования одиночных снимков и стереопар на фотограмметрических приборах.

В комплексы программ могут входить и другие компоненты, например, исследовательский, позволяющий проверить, как влияет изменение каких-либо параметров фототриангуляционной сети на ее точность, и подобрать оптимальный вариант сети.

Программы аналитического построения и уравнивания фотограмметрических сетей в соответствии с требованиями действующих нормативных документов должны базироваться на строгих математических зависимостях (где они существуют), реализовывать всю геометрическую точность исходных аэроснимков или иных изображений и гарантировать решение задачи во всех случаях, где оно теоретически возможно. Эти программы должны обеспечивать:

- максимальную автоматизацию всех основных процессов – внутреннего, взаимного, внешнего ориентирования, построения сети и т. п. по произвольному числу точек;
- использование опорных точек, заданных в различных системах координат, а также представление в этих системах результатов обработки данных;
- обработку результатов неравноточных измерений;
- построение одномаршрутных, многомаршрутных сетей различными способами;
- получение возможно более полных протоколов обработки результатов измерений снимков и диагностики ошибок данных;
- использование данных, полученных в результате уравнивания, для дальнейшей обработки снимков с помощью любых обрабатывающих приборов и систем;
- построение фототриангуляционных сетей любых размеров;
- получение стабильных результатов при построении сетей независимо от масштаба снимков, физико-географических условий района и условий аэрофотосъемки.

Точность фотограмметрического сгущения должна определяться только геометрией уравниваемой сети и погрешностями исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильинский, М. Д. Фотограмметрия и дешифрирование снимков / М. Д. Ильинский, А. И. Обиралов, А. А. Фостиков. – М.: Недра, 1986. – 375 с.
2. Назаров, А. С. Фотограмметрия: учеб. пособие / А. С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Обиралов, А. И. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учеб. пособие / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Л. А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2006. – 336 с.

10. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ

10.1. Основные характеристики цифрового изображения. Фотометрические и геометрические преобразования.

10.2. Цифровые фотограмметрические системы (ЦФС) и их основные характеристики.

10.3. Требования к ЦФС. Преобразование цифровых изображений.

10.4. Цифровая фотограмметрическая система «Photomod» (структура, основные модули).

10.5. Фотограмметрическая обработка цифровых изображений (внутреннее ориентирование, взаимное ориентирование, внешнее ориентирование).

10.6. Построение и уравнивание фототриангуляционной сети.

10.7. Цифровые модели рельефа (ЦМР). Способы представления цифровых моделей рельефа.

10.8. Принцип цифрового трансформирования.

10.9. Построение ортофотоизображения в ЦФС «Photomod».

10.1. Основные характеристики цифрового изображения. Фотометрические и геометрические преобразования

Растровое изображение характеризует его геометрическое и радиометрическое разрешение.

Геометрическое разрешение цифрового изображения определяет линейный размер пиксела и представляется либо его линейной величиной (в метрах, если размер отнесен к местности, или в мкм, если речь идет о снимке) или числом точек на дюйм (*dpi*).

Величина геометрического разрешения определяет качество изображения, точность вычислительной обработки, возможности увеличения и др. В соответствии с требованиями действующей инструкции по фотограмметрическим работам размер элемента геометрического разрешения определяют в зависимости от назначения цифровых снимков, с учетом нескольких критериев, в частности:

✓ требуемой точности определения плановых координат точек:

$$P_{xy} = 0,5V_s M / m = 0,5V_s / K_t ; \quad (10.1)$$

✓ требуемой точности определения высот точек:

$$P_z = 0,5fV_z/(bm); \quad (10.2)$$

✓ сохранения разрешающей способности исходного снимка (изображения):

$$P_R = 0,4/R; \quad (10.3)$$

✓ обеспечения требуемого разрешения графических фотопланов (ортофотопланов):

$$P_p = 70M/m = 70/K_t, \quad (10.4)$$

где M , m – знаменатели масштабов создаваемого плана и аэроснимка;

V_s , V_z – требуемая точность определения плановых координат (порядка 0,2 мм в масштабе плана) и высот точек (1/5 сечения рельефа) в метрах;

R – разрешающая способность исходного снимка (линий на мм);
 f , b – фокусное расстояние съёмочной камеры и базис фотографирования в масштабе снимка (мм).

Если цифровые снимки создаются для фотограмметрического сгущения в плане и по высоте, изготовления ортофотопланов и при этом нужно сохранить разрешающую способность исходных материалов, то сканировать нужно с разрешением 10 мкм или $25\ 600/10 = 2600$ dpi.

Заметим, что разрешающая способность современных как аэрогативов, так и объективов достигает 350–400 линий на миллиметр (порядка 1,5–2,0 мкм), что соответствует суммарной разрешающей способности изображения порядка 4–5 мкм. Эта величина соответствует рекомендациям Международного общества фотограмметрии и дистанционного зондирования (МОФДЗ) и рассматривается как минимальная.

Радиометрическая характеристика определяет число уровней квантования яркости исходного изображения (бинарное, многоградиентное) и фотометрическое содержание элемента изображения (одноцветное, полутоновое, цветное, спектрозональное).

Для обозначения плотности (степени потемнения) элемента изображения весь диапазон полутонов от белого до черного делится на 2^n частей (2, 4, 8, ..., 256, ...), называемых *уровнями квантования*. Радиометрическое разрешение изображения обозначают числом бит на пиксел (т. е. показателем степени n).

При формировании бинарного (черно-белого) изображения используется всего два уровня квантования, и в нем представлены только белый и черный цвета.

В полутоновом изображении используется 256 уровней квантования, для представления которых в описании элемента изображения резервируется 8 бит (1 байт).

Черному цвету всегда соответствует уровень 0, а белому – уровень 1 бинарного изображения и уровень 255 полутонового.

Цветное изображение формируется с использованием той или иной палитры (RGB, CMYK и др.), в которых цвет создается путем смешивания основных цветов в пропорциях, соответствующих уровням их квантования.

Палитра RGB – наиболее распространенная. При ее использовании цвета и их оттенки передаются путем смешивания трех основных цветов различной интенсивности: красного (**Red**), зеленого (**Green**) и синего (**Blue**). Так, сочетание красного цвета с зеленым дает желтый цвет; зеленого с синим – голубой; синего с красным – оранжевый, а всех трех цветов – белый.

Палитра CMYK обеспечивает более качественную передачу оттенков при смешивании четырех цветов: голубого (**Cyan**), сиреневого (**Magenta**), желтого (**Yellow**) и черного (**black**). Палитра CMYK находит широкое применение в издательских системах.

В связи с этим для представления одного элемента бинарного изображения необходим 1 бит; полутонового с 256 уровнями квантования – 8 бит (1 байт), а цветного с тем же числом уровней квантования по каждому каналу – 24 бита (3 байта) при использовании палитры RGB или 32 бита (4 байта) палитры CMYK. Требуемый для хранения цифрового снимка объем памяти, в зависимости от формата кадра (I), геометрического (P) и радиометрического разрешения изображения, можно подсчитать по формуле

$$O_p = \left(\frac{I}{P}\right)^2 R, \quad (10.5)$$

где R – число байтов для записи радиометрической характеристики (1, 2, 3 или 4 байта).

Фотометрические и геометрические преобразования цифровых снимков. В процессе фотোগрамметрической обработки снимков возникает необходимость различного рода их преобразований, связанных как с улучшением читаемости, так и с изменением размеров изображе-

ния (например, при уменьшении или увеличении снимков в процессе их трансформирования). В первом случае говорят о фотометрической коррекции (оптических преобразованиях) цифрового изображения, а во втором – об изменении его геометрического разрешения или о геометрических преобразованиях.

Фотометрическая коррекция изображения, или оптические его преобразования, основаны на использовании связи между его компонентами, описываемой уравнением

$$\rho_i = a\rho_{\text{исх}} + b, \quad (10.6)$$

где $\rho_{\text{исх}}$, ρ_i – оптические плотности элемента изображения до и после фотометрической коррекции;

a – функция, определяющая соотношение между оптическими плотностями исходного и преобразованного изображений;

b – параметр яркости.

Преобразования, описываемые уравнением (10.6), можно представить в виде графика (рис. 10.1), отражающего связь оптических плотностей элементов изображения до их коррекции (вертикальная ось) и после коррекции (горизонтальная ось).

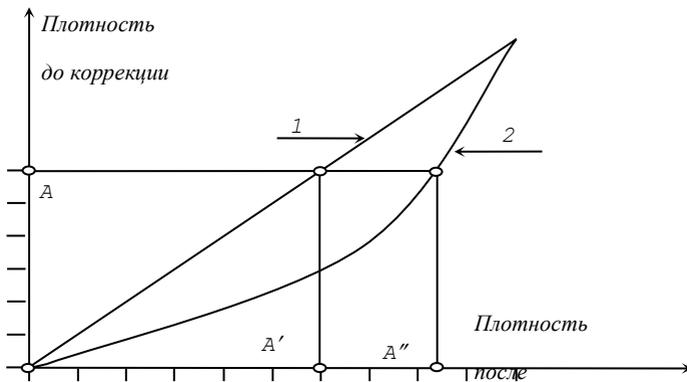


Рис. 10.1. График фотометрической коррекции изображения

Фотометрическая коррекция выполняется путем изменения яркости изображения, его контрастности и характера соотношений между оптическими плотностями до и после их преобразования.

Изменение яркости выполняется путем уменьшения или увеличения параметра b каждого пиксела на одну и ту же величину, что приводит к тому, что все элементы корректируемого изображения становятся более светлыми или более темными. Изменение яркости группирует плотности к какому-либо одному (светлому или темному) краю спектра. На графике (рис. 10.1) это иллюстрируется смещением прямой 1 (или кривой 2) вдоль горизонтальной оси.

Изменение контрастности изображения выполняется с целью изменения различий между плотностями смежных элементов и улучшения таким образом читаемости границы между ними. Увеличение контрастности изображения выполняется следующим образом. Если оптическая плотность $\rho_{\text{инх}}$ некоторого элемента превышает среднее значение, то она увеличивается пропорционально уровню квантования, а если она менее среднего, то уменьшается. При этом значения плотностей пикселей как бы смещаются к краям спектра: темные тона становятся еще темнее, светлые – светлее, некоторые их значения исчезают, но границы между элементами изображения становятся более четкими. При уменьшении контрастности большие плотности уменьшаются, а малые – увеличиваются; при этом плотности группируются вблизи центра. Чрезмерное увеличение контрастности преобразует полутоновое изображение в бинарное, а чрезмерное уменьшение – ведет к его исчезновению.

На графике (рис. 10.1) рассмотренные преобразования соответствуют вращению прямой 1 (кривой 2) вокруг центральной точки.

Гамма-коррекция (тональная коррекция) изображения выполняется с целью увеличения или уменьшения его детальности, что достигается изменением передаточной функции a уравнения (10.6), определяющей характер преобразования. На графике (рис. 10.1) гамма-коррекция соответствует изменению кривизны и общего наклона линии 1 (или 2).

При равномерной передаче оптической плотности (прямая 1 под углом 45° к координатным осям) их значения, соответствующие точкам A и A' , одинаковы. Изменим передаточную функцию a уравнения (10.6) так, чтобы ей соответствовало уравнение кривой 2 . Теперь плотности исходного изображения (точка A) будут соответствовать плотности скорректированного изображения A'' , причем $A \neq A''$.

Заметим, что неправильное использование гамма-коррекции может привести к уменьшению числа полутонов и преобладанию областей одного тона.

При обработке цветных изображений можно выполнить не только изменение яркости, контрастности или гамма-коррекцию, но и, меняя соотношение цветов, получить нужные оттенки.

Геометрические преобразования растрового изображения изменяют его геометрическое разрешение и корректируют радиометрические характеристики. Необходимость таких преобразований возникает, например, при трансформировании цифрового снимка по элементам внешнего ориентирования, в процессе которого изменяется масштаб изображения и положение его элементов относительно координатных осей. Сходная по характеру задача возникает при внутреннем ориентировании цифрового изображения.

В общем случае геометрические преобразования можно условно разделить на простые, требующие изменения только геометрического разрешения, и сложные, в результате которого выполняется изменение масштаба и поворот изображения.

Простые преобразования выполняются при изменении масштаба изображения путем соответствующего изменения геометрического разрешения, когда каждому пикселу исходного изображения соответствует пиксел преобразованного с тем же или иным геометрическим разрешением. При этом формируется новая матрица, элементам которой присваивается радиометрическое разрешение соответствующего ему исходного изображения (рис. 10.2).

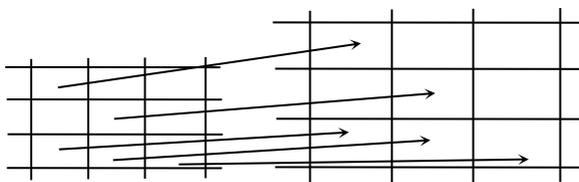


Рис. 10.2. Простые геометрические преобразования

Сложные преобразования выполняются при трансформировании изображения, когда коэффициент увеличения различных его частей неодинаков или когда выполняется разворот на некоторый угол. Первая ситуация возникает при восстановлении, например, сетки квадра-

тов по ее перспективе, а вторая – при внутреннем ориентировании снимка. В обоих случаях (рис. 10.3) каждому пикселу формируемого изображения соответствует несколько пикселов или их частей исходного изображения, или наоборот.

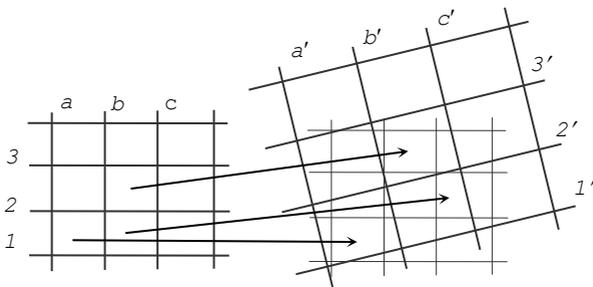


Рис. 10.3. Сложные геометрические преобразования

Сущность выполняемых при этом геометрических оптических преобразований можно видеть на рис. 10.3, где элементы строк и столбцов исходного изображения обозначены цифрами 1, 2, 3 и буквами a , b , c . Соответствующие элементы формируемого изображения обозначены цифрами $1'$, $2'$, $3'$ и буквами a' , b' , c' .

Совместим левые нижние углы изображений и предположим, что элементу $1'a'$ соответствуют фрагменты четырех элементов исходного раstra: $1a$ (45 %), $1b$ (35 %), $2a$ (15 %) и $2b$ (5 %). В этом случае оптическая плотность ρ' формируемого элемента $1'a'$ зависит от оптических плотностей ρ_{1a} , ρ_{1b} , ρ_{2a} , ρ_{2b} элементов $1a$, $1b$, $2a$ и $2b$, причем:

$$\rho' = 0,45\rho_{1a} + 0,35\rho_{1b} + 0,15\rho_{2a} + 0,05\rho_{2b}.$$

Координаты элемента формируемого изображения находят по координатам соответствующего ему элемента исходного изображения, подставляя их в нужную формулу преобразования – трансформирования координат точек наклонного снимка, связи координат точек снимка и местности, внутреннего ориентирования снимка или иную.

Источники цифровых изображений. Цифровые изображения получают двумя способами, один из которых предполагает сканирование аналоговых фотоснимков (аэронегативов), полученных в процессе аэрофотосъемки, а второй – использование цифровых съемочных си-

стем (сенсоров) непосредственно в процессе съемки. В обоих случаях цифровое изображение формируется с помощью либо *фотодиодов*, либо *приемников с зарядовой связью* (ПЗС) в форме ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки с примерно одинаковыми техническими возможностями. Применение ПЗС-матрицы предполагает формирование всего кадра изображения по схеме, аналогичной фотокамере, где в фокальной плоскости вместо фотопленки располагается ПЗС-матрица. Применение ПЗС-линейки предполагает сканирование местности или изображения параллельными маршрутами с шагом, равным размеру элемента геометрического разрешения.

Сканирование фотоснимков выполняется с помощью оптико-электронных приборов – сканеров, которые по принципу исполнения можно разделить на роликовые, планшетные и барабанные, а по точности и назначению – на офисные и фотограмметрические.

Роликовые сканеры имеют малый формат, неподвижную считывающую головку и низкую точность. *Планшетные* сканеры более точные, но низкоскоростные; столбцы и строки изображения задаются перемещениями источника света и считывающей головки. *Барабанные* сканеры не без оснований считаются наиболее точными; строки формируемого изображения задаются вращением барабана, а столбцы – перемещением считывающей головки.

Офисные сканеры характеризуются относительно низким геометрическим разрешением (от 10 мкм с использованием фотодиодов до 100 мкм на основе ПЗС-линеек), существенными геометрическими ошибками положения элементов растра и используются для сканирования фотоснимков только в исключительных случаях.

Фотограмметрические сканеры характеризуются высоким геометрическим разрешением (не менее 10 мкм при использовании ПЗС-матриц и ПЗС-линеек) и высокой геометрической точностью, определяемой величиной ошибки сканирования и повторяемостью (изменением ошибки в десяти сканированиях). С их помощью можно сканировать черно-белые (штриховые) или цветные снимки.

Некоторые фотограмметрические сканеры (например, «Дельта» и др.) предусматривают возможность сканирования аэронегативов с неразрезанного аэрофильма, как это практикуется в фотограмметрическом производстве.

Затраты времени на сканирование характеризуются следующими данными для сканера «Дельта»: черно-белый снимок формата 23×23 см с геометрическим разрешением 8 мкм сканируется за 12 мин, а с

геометрическим разрешением 30 мкм – за 4 мин. Для получения цветного растрового изображения того же формата и с той же геометрической точностью требуется 30 и 9 мин соответственно.

Важнейшим элементом формирования цифрового изображения является *эталонирование сканера*, особенно в случае, если он не является фотограмметрическим. Сущность эталонирования заключается в сканировании контрольной сетки с нанесенными на нее горизонтальными и вертикальными штрихами, расстояния между которыми известны с точностью 1–2 мкм. На полученном изображении измеряют «пиксельные» координаты x_p, y_p крестов контрольной сетки в системе $o_{px}y_p$, преобразуют их в линейную меру с учетом заданного геометрического разрешения и сравнивают полученные значения с точными координатами, отсчитанными по контрольной сетке. По найденным разностям координат соответствующих точек строят *поле искажений*, характеризующее все виды геометрических искажений, вносимых сканером в той или иной точке поля сканирования.

В последующем изображении, полученные с помощью этого сканера, могут быть исправлены в соответствии с параметрами поля искажений. Имеющиеся публикации свидетельствуют, что искажения фотограмметрического сканера можно уменьшить до 1 мкм.

Цифровые съёмочные системы (сенсоры) появились только на рубеже веков. К этому времени было достигнуто сопоставимое с фотоснимками геометрическое разрешение (5–6 мкм), появились средства хранения громадных объемов информации (порядка 1 Гб на каждый снимок), создана аппаратура стабилизации съёмочной камеры в полете и высокоточного определения координат центров фотографирования.

В настоящее время успешно эксплуатируются несколько цифровых камер, в частности: ADS40 (фирм LH-System, Швейцария), DMC2001 (фирма Z/I Imaging, США, Германия), HRSC (центр космических исследований Германии DLR) и др., обеспечивающие возможность получения изображений как в видимой части спектра, так и в инфракрасном диапазоне. Имеются данные о российских цифровых съёмочных комплексах ЦТК-140 и ЦТК-70. Некоторые характеристики этих камер приведены в табл. 10.1.

С точки зрения фотограмметрической обработки цифровых изображений, получаемых с помощью цифровых съёмочных систем на ПЗС-линейках, чрезвычайно важны два обстоятельства:

1. Изображения формируются в результате сканирования местности в направлении, перпендикулярном направлению полета. Поэтому

результатом съемки являются не кадровые снимки, а полосы изображений, так что стереоскопические наблюдения и измерения возможны только по полосе перекрытия со смежным маршрутом (рис. 10.4, *а*).

2. Геометрия сканерных снимков не соответствует центральной проекции, поскольку каждая их строка формируется из собственного центра. Фотограмметрической обработке таких изображений предшествует преобразование их в форму, соответствующую законам построения изображений при центральном проектировании.

Отсутствие продольных перекрытий сканерных снимков и невозможность создания по ним стереопар существенно снижают точность их фотограмметрической обработки, поэтому современные съемочные системы предусматривают одновременное применение нескольких ПЗС-линейек, каждая из которых формирует изображение по определенному направлению (рис. 10.4, *б*).

Таблица 10.1. Технические характеристики цифровых камер

Наименование характеристики	Характеристика камеры				
	ADS40	DMC	HRSC	ЦТК-140	ЦТК-70
Фокусное расстояние, мм	62,5	120	47÷175	140	70
Размер пиксела, мкм	6,5	6	6÷7	7	7
Число спектральных каналов	6	12	5	1	4
Радиометрическое разрешение, бит	8	8	8 ÷ 12	8	10/8
Светочувствительный ПЗС-элемент	Линейка	Матрица	Линейка	Линейка	Линейка

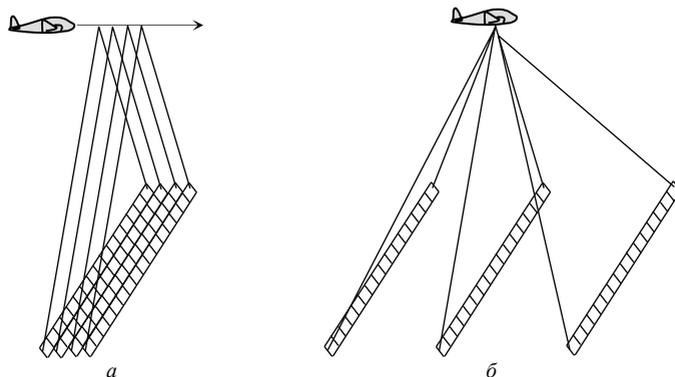


Рис. 10.4. Сканирование местности с записью результатов на одну (*а*) и три (*б*) ПЗС-линейки

Так, цифровая система ASD40 имеет в фокальной плоскости три ПЗС-линейки, одна из которых обеспечивает съемку полосы по направлению «вперед», вторая – в направлении точки надира («вниз»), а третья – «назад». Совместная обработка трех полос изображений позволяет получить продольные перекрытия и выполнить стереоскопические наблюдения.

Цифровая съемочная система HRSC (High Resolution Stereo Camera) с помощью девяти ПЗС-линеек в фокальной плоскости объектива выполняет съемку одновременно девяти перекрывающихся полос, пять из которых используется для стереообработки, а остальные четыре обеспечивают получение изображения в том или ином оптическом диапазоне.

10.2. Цифровые фотограмметрические системы (ЦФС) и их основные характеристики

Применение цифровых методов фотограмметрии в практике топографических, кадастровых и других съемок, как и картографического обеспечения геоинформационных и кадастровых систем, в настоящее время стало реальностью. И нет никаких сомнений в том, что вытеснение классических аналоговых методов обработки материалов аэрофотосъемки – задача уже ближайшего будущего. Это обстоятельство и послужило основанием для того, чтобы в действующих инструкциях по фотограмметрическим работам были обозначены как основные задачи, решаемые цифровыми методами, так и критерии их эффективности.

Под цифровой *фотограмметрической системой* понимается совокупность программных и технических средств, связанных общей функцией и обеспечивающих выполнение комплекса технологических процессов и операций, необходимых для получения продукции аэрофототопографической съемки в цифровом виде по цифровым изображениям.

Под продукцией понимают цифровой ортофотоплан (или фотоплан в картографической проекции) и цифровую карту.

Цифровая карта является результатом выполнения всех процессов аэрофототопографического производства, а не только фотограмметрической обработки, так как для ее создания по данным, непосредственно собранным на фотограмметрической станции, требуется достаточно кропотливая работа по обработке цифровой картографической информации. Таким образом, под продукцией, получаемой непосредственно

от цифровой фотограмметрической системы, будем понимать *цифровой ортофотоплан и векторную модель контуров снятых объектов*. При этом векторные данные могут обладать, а могут и не обладать некоторыми графическими атрибутами (слой, стили линий, цвет, значок), могут иметь, а могут и не иметь соответствующих семантических атрибутов (данные, указывающие на тип объекта, которому принадлежит данный контур или точка). Таким образом, в качестве системы далее будут рассматриваться средства, которые позволяют выполнить все или почти все необходимые процессы и операции, с целью получения по исходным цифровым изображениям указанных результатов или хотя бы одного из них. Для анализа необходимы критерии или система характеристик, с помощью которых можно оценить систему.

Опыт работы по тестированию, приемке и практическому применению цифровых фотограмметрических систем позволяет предложить следующие критерии их оценки:

- *характеристика технических средств*, включающая требования к вычислительной платформе, ее минимальной конфигурации, используемые средства для стереонаблюдений и управления измерительной маркой, операционную систему;

- *интеграционные свойства* – входные и выходные форматы растровых и векторных данных, совместимость с ГИС и другими фотограмметрическими пакетами с возможностью экспорта-импорта элементов внешнего ориентирования, результатов измерений координат точек; возможности ввода исходных данных из файлов, открытость форматов, используемые графические пакеты (используется оригинальная графическая среда для работы с векторными данными или какой-либо коммерческий программный продукт);

- *общие технологические характеристики* – модульность (возможность конфигурации состава программного обеспечения рабочего места по функциональному признаку), возможности обработки цветных изображений, компрессии и декомпрессии изображения или работы с компрессированными форматами непосредственно, число обрабатываемых снимков (оперирует система стереопарой, маршрутом, блоком), возможности пакетной обработки на рутинных процессах, работы с изображениями нецентральной проекции, обработки блоков из изображений, полученных различными камерами, производительность на рутинных процессах, необходимость построения эпиполярных изображений как отдельного процесса;

- *функциональность* – наличие основных технологических компонентов: управление проектом, измерения для фототриангуляции, уравнивание фототриангуляции, создание ЦМР, ортофототрансформирование, монтаж ортофотоплана, стереоскопическая съемка, съемка в монорежиме, а также развитость функций каждого технологического компонента и уровень автоматизации; *системы, обеспечивающие все перечисленные технологические процессы, далее будут называться полнофункциональными*;

- *эргономичность интерфейса* – удобства и богатство возможностей манипуляции с изображениями на экране: автоматический скроллинг, оконное увеличение изображения, расположение окон, а также удобства с точки зрения минимизации нажатий кнопок и очевидности их функционального значения;

- *точность* – погрешности положения пикселей изображения, вносимые в процессе обработки, а также определения (измерения) координат точек;

- *надежность* – устойчивость к сбоям программы, развитость системы диагностических сообщений при некорректных действиях оператора и удобство их обработки, наличие средств контроля качества;

- *возможность* развития пользовательских приложений.

Следует заметить, что такая характеристика, как функциональность, является одной из важнейших и сложных и содержит иерархическую систему характеристик функциональных компонент.

10.3. Требования к ЦФС. Преобразование цифровых изображений

Требования к цифровым фотограмметрическим системам (ЦФС) делятся на *общие, технические и технологические*.

Общие требования к ЦФС включают такие условия, как строгость алгоритма, максимальная автоматизация процессов обработки, гарантированное решение задачи при наличии теоретической возможности, использование всей геометрической точности исходных изображений, насыщенность алгоритмов логическими операциями контроля полноты и корректности данных, авторская поддержка программных средств и др.

Технические требования определяют главные условия функционирования цифровых систем, в частности: возможность обработки черно-белых и цветных снимков в сжатых и несжатых форматах, от-

сутствие ограничений на объем памяти и быстродействие ПЭВМ, реализация оптических и электронных средств стереоизмерений и ряд других.

Технологические требования к цифровым системам определяют перечень функциональных возможностей систем, наличие которых обеспечивает их эффективную эксплуатацию, в частности:

- автоматическое распознавание и измерение изображений координатных меток и выполнение внутреннего ориентирования;
- автоматическое стереоотождествление и измерение идентичных опорных и фотограмметрических точек перекрывающихся снимков;
- автоматическое построение по стереопарам цифровых моделей рельефа;
- ортотрансформирование изображений с использованием информации о рельефе, представленной в виде горизонталей, отдельных точек (пикетов), регулярной или нерегулярной ЦМР, формирование выходного ортоизображения с заданным геометрическим разрешением и автоматическое выравнивание его плотности;
- внутреннее, взаимное и внешнее ориентирование снимков и моделей (маршрутов) по произвольному числу исходных точек (меток, крестов);
- сбор цифровой информации об объектах местности в процессе стереоскопической (по эпиполярным снимкам) и моновекторизации (по ортоизображению) с использованием настраиваемого классификатора, а также редактирование этой информации с использованием автоматизированных процедур и представление ее в распространенных форматах.

В настоящее время имеется достаточно большое число цифровых фотограмметрических систем, из которых наибольшее распространение в специализированных предприятиях Республики Беларусь получили системы Photomod , ТАЛКА и RealisticMap.

В первую очередь предлагается рассмотреть наиболее известные зарубежные системы, нашедшие практическое применение в России. При этом целесообразно ограничиться анализом продуктов, работающих на РС, т. е. в операционной среде Windows. В качестве известных следует перечислить продукты следующих фирм: Intergraph Corporation, LH-systems LLC, ISM, ERDAS Inc., Vexcel Imaging Corporation.

10.4. Цифровая фотограмметрическая система «Photomod» (структура, основные модули)

ЦФС Photomod разработана ОАО «Ракурс» в содружестве с ведущими специалистами России. Система создана в 1993 г. и в настоящее время используется более чем в 40 странах мира (в том числе около 40 инсталляций в предприятиях и организациях республики), а также в ведущих учебных заведениях России и Беларуси.

Photomod – полнофункциональная система с богатейшими возможностями и оригинальным графическим интерфейсом. Используемые системой математические модели позволяют обрабатывать не только наземные и воздушные снимки, полученные по законам центрального проектирования, но и сканерные, радиолокационные изображения, а также снимки, полученные неметрическими камерами. Это одна из немногих фотограмметрических систем на рынке СНГ, позволяющая обрабатывать космические и иные цифровые изображения, полученные с помощью различных сенсоров.

ЦФС Photomod имеет модульную структуру, функционирует в локальной сети и совместно с другими фотограмметрическими системами имеет в наличии настраиваемый классификатор картографических объектов.

Широкое распространение и профессиональное признание системы обеспечили ее богатейшие технологические возможности, основные из которых сводятся к следующему:

- возможность формирования ЦМР на регулярной сетке (DEM) с переменным разрешением и использования ее при ортотрансформировании;
- наличие эффективных средств редактирования графической (векторной) информации, оцифровки в монокулярном и стереоскопическом режимах;
- применение графических и статистических методов оценки достоверности данных;
- наличие интерфейса, обеспечивающего эксплуатацию системы в среде ГИС «Карта 2000» (ГИС «Панорама»), Micro Station/95/SE/I (модуль Stereo Link), экспорта данных в геоинформационные и картографические системы и др.;
- оригинальная графическая среда и доступный интерфейс;
- поддержка наиболее распространенных форматов сканерных спутниковых изображений, включая «точную» модель ASTER, ICONOS, QuickBird;

- возможность использования при построении и уравнивании фотограмметрических измерений полного набора систем координат, картографических проекций и данных GPS-измерений;

- наличие эффективных средств калибровки планшетных полиграфических сканеров.

Структура системы и основные функции ее компонентов показаны на рис. 10.5.

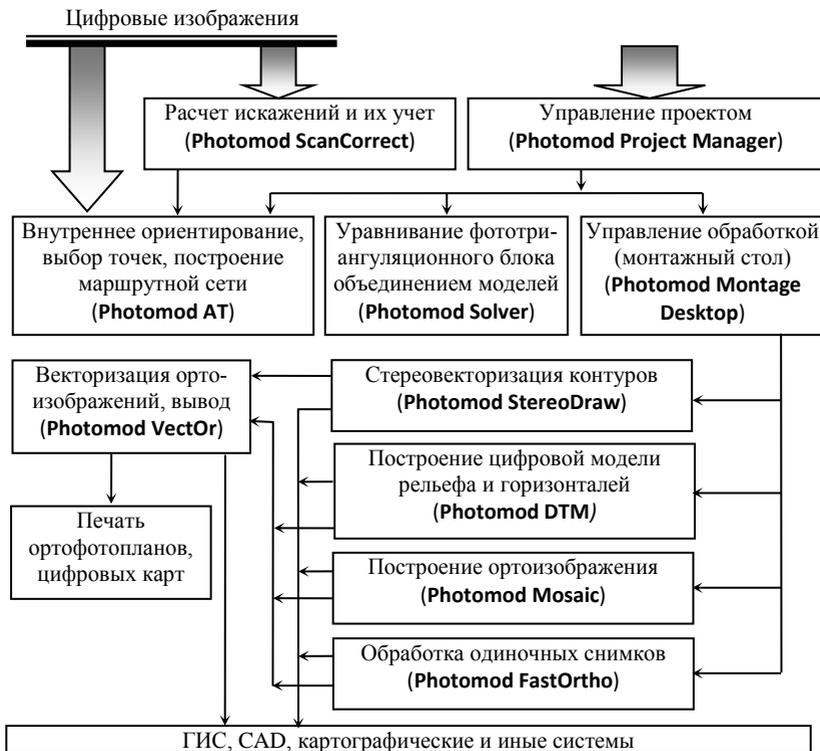


Рис. 10.5. Взаимодействие программных компонентов

Система постоянно совершенствуется (в год появляется 2–3 новых версии), пополняется новыми инструментальными средствами и технологическими возможностями.

10.5. Фотограмметрическая обработка цифровых изображений (внутреннее ориентирование, взаимное ориентирование, внешнее ориентирование)

Важнейшей особенностью цифровой обработки снимков является объединение вычислительной обработки (внутреннее, взаимное, внешнее ориентирование и т. п.) со сбором нужной для этого информации – измерением координат необходимых точек и автоматической их идентификацией на смежных снимках. Это обстоятельство в сочетании с максимальной автоматизацией технологических процессов делают цифровую фотограмметрическую обработку высокоэффективной и технологичной, не требующей высокой квалификации исполнителей.

Ниже рассмотрены некоторые элементы вычислительной обработки цифровых снимков, аналогичные процессам аналитической обработки данных.

1. Внутреннее ориентирование снимков. Внутреннее ориентирование цифровых изображений (снимков) выполняется с целью установления соответствия между координатной системой снимка oxy (рис. 10.6), в которой должны быть представлены результаты измерений для их последующей обработки, и системой растрового изображения $o_p x_p y_p$, в которой представлены точки.

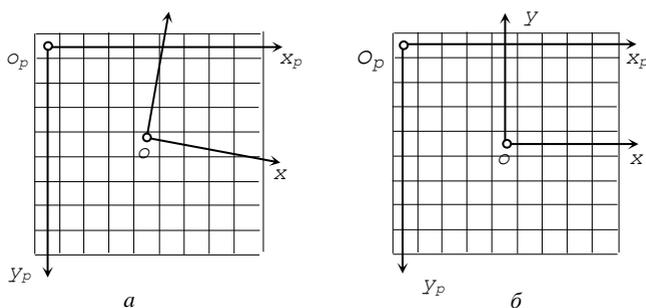


Рис. 10.6. Изображение исходное (а) и идеальное (б)

Математическая модель внутреннего ориентирования цифрового изображения аналогична той, которая применяется при аналитическом построении сетей фототриангуляции. Применяемое для этого решение заключается в определении параметров ортогонального, аффинного или проективного преобразования по избыточному числу измерений

методом наименьших квадратов. Однако в цифровых фотограмметрических системах технология обработки имеет некоторые особенности в связи с возможностями автоматизации измерений и заключается в следующем.

Оператор выполняет идентификацию первых двух координатных меток (крестов), для чего наводит на них измерительную марку и выполняет регистрацию координат в системе $OPXpYp$. После этого программа выполняет расчет положения последующих координатных меток (крестов) и подводит к ним измерительную марку, а оператор выполняет необходимые уточнения и регистрацию координат точки. По завершении измерений всех меток программа запрашивает метод преобразований, выполняет расчет параметров и выводит расхождения между эталонными и вычисленными координатами меток (крестов). В случае несоответствия полученных расхождений, требуемых нормативными документами (4–5 пикселей), оператор может повторить все выполненные измерения или их часть.

Внутреннее ориентирование остальных снимков выполняется в автоматическом режиме, для чего оператор определяет прямоугольную область метки, область ее поиска, допустимый коэффициент корреляции и величину расхождения эталонных и вычисленных координат.

Снимки, для которых автоматическое внутреннее ориентирование завершилось неудовлетворительно, обрабатываются оператором вручную.

Полученное в результате такой обработки изображение иногда называют *идеальным*, так как координатные оси его внутренней координатной системы $OPXpYp$ параллельны осям системы OX плоскости прикладной рамки съемочной камеры (рис. 10.6, б).

2. Выбор точек и построение фотограмметрических моделей.

Последующая фотограмметрическая обработка внутренне ориентированных снимков включает:

- перенос на изображения **опорных точек** с известными координатами X, Y, Z в системе местности;
- ввод элементов внешнего ориентирования снимков $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \chi$ (при их наличии);
- выбор **связующих точек в зоне поперечного перекрытия**, необходимых для связи смежных маршрутов;
- выбор **связующих точек в зоне тройного продольного перекрытия**, используемых для связи смежных моделей маршрута;

- выбор точек для подписи на карте высот, урезов вод и др. в соответствии с требованиями действующих нормативных документов;
- выбор дополнительных точек в шести стандартных зонах для повышения точности взаимного ориентирования и соединения смежных моделей.

Все точки, положение которых не может быть произвольным (опорные, связующие, урезы вод и др.), наносят только на один снимок; перенос их на другие снимки того же или смежного маршрута выполняют либо в стереорежиме, либо с помощью коррелятора.

Точки, положение которых на снимке не является жестким (например, дополнительные точки в стандартных зонах для определения элементов взаимного ориентирования или в зонах тройного продольного перекрытия для связи смежных моделей), могут быть нанесены на снимки автоматически, по заданному размеру стандартной зоны и числу точек в ней.

Координаты всех нанесенных на снимки точек автоматически převычисляются в систему координат плоскости прикладной рамки аэрокамеры по найденным параметрам ортогонального, аффинного или проективного преобразования и исправляются поправками, учитывающими влияние:

- кривизны Земли и атмосферной рефракции;
- дисторсии объектива съёмочной камеры путем интерполяции соответствующих величин по точкам ее определения или применением соответствующего полинома;
- искажений сканера интерполяцией поправок по данным поля его искажений или по полиномам.

После выбора точек выполняют *взаимное ориентирование* снимков строгим способом с применением метода наименьших квадратов.

Критерием качества отождествления точек на смежных снимках является среднее квадратическое значение остаточного поперечного параллакса, величина которого не может превышать 10 мкм. Более значительные расхождения свидетельствуют о наличии ошибок прежде всего в отождествлении точек. Их устранение требует проверки качества отождествления и измерения точек в стереорежиме. Менее вероятны ошибки внутреннего ориентирования изображений и паспортных данных съёмочной камеры (фокусного расстояния, координат главной точки и др.).

Для повышения точности взаимного ориентирования и надежности определения неизвестных в каждой стандартной зоне намечают по две-

четыре точки (желательно контурных, надежность измерения которых несколько выше); часть таких точек должна располагаться в зонах тройного продольного и поперечного перекрытий. Важным условием достижения оптимальной точности взаимного ориентирования является одинаковое число точек в стандартных зонах.

Перечисленные операции завершаются *построением одиночной модели и подориентированием ее к предыдущей или к последующей*. Полученные при этом разности координат связующих точек смежных моделей маршрута позволяют судить о качестве их измерения и отождествления. Величины таких расхождений не должны превышать 15 мкм в плане и $15(f/b)$ мкм по высоте.

10.6. Построение и уравнивание фототриангуляционной сети

Построение фототриангуляционной сети в пределах маршрута или блока выполняется в автоматическом режиме с использованием различных методов. Задача оператора на этом этапе фотограмметрической обработки сводится к выбору метода уравнивания (независимые или полузависимые модели, уравнивание маршрутов, подблоков, связей проектирующих лучей и т. п.), а также определению критериев для подготавливаемого программой отчета. Критерием качества построения и уравнивания фотограмметрической сети служат величины расхождений исходных и найденных по результатам уравнивания координат, которые не должны превышать:

- для опорных точек, по которым выполнено внешнее ориентирование, – 0,2 мм в масштабе карты в плановом положении и 0,15 сечения рельефа по высоте;
- для контрольных опорных точек – не более 0,3 мм в масштабе создаваемого плана и 0,1–0,25 м по высоте при сечении рельефа 0,5–1,0 м;
- связующих точек смежных маршрутов – не более 0,5 мм в масштабе создаваемого плана (карты).

Надежность уравнивания фотограмметрического блока повышается, если число использованных опорных точек в 1,5–2 раза превышает минимально необходимое.

При этом наиболее достоверную оценку получают по **контрольным опорным точкам**, координаты которых использовались при уравнивании. Важно, чтобы эти точки располагались в наиболее сла-

бых местах фототриангуляционной сети, примерно посередине между опорными точками, по которым выполнялось уравнивание.

Окончательное уравнивание фототриангуляционных сетей часто выполняют с помощью специализированных программ типа ORIMA, в которых реализованы более строгие алгоритмы обработки, а также имеются широкие графические и статистические возможности диагностики ошибок. Поэтому обработка аэроснимков средствами цифровых фотограмметрических систем нередко ограничивается измерением координат и параллаксов точек, исключением грубых ошибок и экспортом результатов измерений снимков в эти специализированные программы.

10.7. Цифровые модели рельефа (ЦМР). Способы представления цифровых моделей рельефа

Известно, что топографическая поверхность в общем случае может быть представлена как в аналоговой форме, так и в цифровой. В первом случае имеют в виду изображение поверхности горизонталями или отмывками, а во втором – в виде каталога координат определенным образом упорядоченных точек, описания связей между ними и алгоритма определения высот точек в зависимости от их местоположения. С учетом этого можно дать следующее определение цифровой модели рельефа (поверхности).

Цифровая модель рельефа (ЦМР) представляет собой математическое описание земной поверхности с помощью совокупности расположенных на ней точек, связей между ними, а также метода определения высот произвольных точек, принадлежащих области моделирования, по их плановым координатам.

Применяемые в настоящее время способы построения цифровой модели рельефа, в зависимости от принятой схемы размещения точек и типа математической модели, можно условно разделить на две группы.

Первая группа объединяет способы, основанные на нелинейной интерполяции высот с использованием полиномов, сплайнов, корреляционных функций и т. п., различающиеся видом используемой функции, способом отбора исходных пунктов и пр.

Параметры применяемой математической модели вычисляют по исходным точкам, а затем используют для интерполяции высот произвольных точек области моделирования по их плановым координатам.

Полиномиальные способы предполагают представление моделируемой поверхности в виде полинома второй или третьей степени вида

$$A_i = Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 Y_i^2 + \dots \quad (10.7)$$

Для отыскания неизвестных коэффициентов полинома для каждой опорной точки составляют уравнение поправок, в котором в качестве неизвестных приняты коэффициенты полинома $a_0 \dots a_5$. Коэффициенты при неизвестных определяют как функции координат в соответствии с уравнением (10.7), а свободные члены находят как разности между отметками опорных точек и их вычисленными значениями при начальных значениях неизвестных. Полученную систему решают последовательными приближениями, в каждом из которых неизвестные находят методом наименьших квадратов, под условием $[pv^2] = \min$. Найденные таким образом коэффициенты $a_0 \dots a_5$ используют для интерполяции высот произвольных точек области моделирования в соответствии с уравнением (10.7).

Кусочно-полиномиальные способы (рис. 10.7) предполагают деление области моделирования на участки, подбор для каждого участка своего локального полинома вида и последующую связь локальных полиномов с помощью переходных уравнений. Во всех случаях возникают переопределенные системы, решение которых выполняют методом наименьших квадратов, под условием минимума суммы квадратов расхождений высот точек реальной и аппроксимирующей поверхностей.

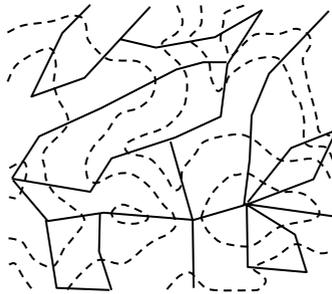


Рис. 10.7. Структурная модель рельефа

Сходные по характеру решения используют способы, основанные на применении *рядов Фурье* (разложения по сферическим гармоникам), различного рода *сплайнов* (кубические, бикубические, на многообразиях и др.) и т. п.

Вторая группа объединяет способы, основанные на построении геометрически упорядоченной (регулярной или нерегулярной) модели, элементами которой являются либо определенным образом упорядоченные линии, либо поверхности многогранников (треугольников, четырехугольников или иных фигур). Во втором случае поверхность задается точками в вершинах геометрически правильных фигур (треугольников, квадратов и др.) исходя из предположения, что ограничиваемая ими поверхность имеет одинаковый и однообразный уклон.

В зависимости от схемы расположения исходных точек и характера связей между ними выделяют следующие типы ЦМР.

1. Структурная модель (см. рис. 10.7) местности представляется отметками точек, размещенных в характерных точках рельефа – на линиях водоразделов, тальвегов, в точках локального экстремума. Такая модель наиболее точно отражает поверхность минимальным числом точек, однако ее использование затруднено. Она называется структурно-цифровой моделью, или структурно-лингвистической моделью.

2. Нерегулярная ЦМР. Известна как *модель TIN* (Triangulated Irregular Network), или модель на нерегулярной сетке (рис. 10.8).

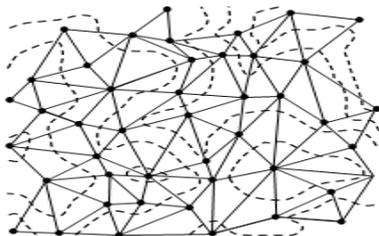


Рис. 10.8. Модель TIN

В своем пространственном выражении это сеть треугольнико-элементов триангуляции Делоне. Сеть треугольников с высотными отметками в узлах позволяют представить моделируемую поверхность как многогранную.

Теоретические основы и алгоритмы решения задачи построения триангуляции Делоне связаны с задачей построения полигонов Тиссена (диаграмм Вороного).

Использование модели TIN для получения высот новых точек не вполне удобно, поскольку для этого необходимо не только определить принадлежность точки конкретному треугольнику, но и, что особенно важно, выполнить линейную интерполяцию высот по отметкам его вершин. Недостатком данной модели также является «эффект террас» – появление плоских участков в заведомо невозможных местах (морфологических артефактов). Для устранения этого недостатка модель TIN расширяют путем ее структурирования, т. е. введение в нее сети тальвегов водоразделов и линий разрывов.

3. Модель на регулярной сетке. Более удобна для практического использования. Модель на регулярной сетке (обычно квадратной) представляет собой сеть высотных отметок в ее узлах, расстояние между которыми (шаг) определяет ее пространственное разрешение. Такая модель известна как модель DEM (Digital Elevation Model), или матрица высот (рис. 10.9).

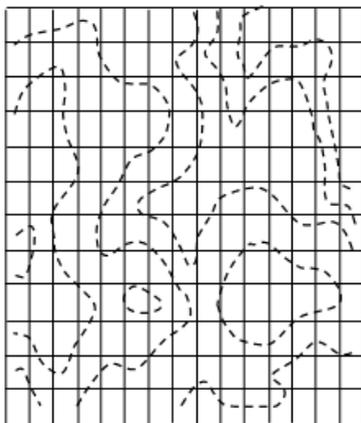


Рис. 10.9. Модель DEM

Регулярная модель к представлению рельефа называется «гридом».

Эта модель не может быть построена непосредственно по точкам с известными отметками. Для ее получения модели другого типа (TIN, горизонтали) преобразуются с использованием интерполяции, аппрок-

симации (полиномиальное сглаживание). Операцию по пересчету нерегулярных данных в узлы регулярной модели называют «гридингом».

Создание цифровой модели рельефа в ЦФС (для ЦФС Photomod). Фотограмметрические методы цифрового моделирования рельефа основаны на использовании полиномов, нерегулярной сети треугольников TIN и регулярной сети DEM. Причем непосредственно по аэроснимкам строится модель рельефа на треугольниках, а для ортотрансформирования, проведения горизонталей, стереовекторизации и других операций она преобразуется в регулярную модель DEM. Обязательным условием создания ЦМР является наличие элементов взаимного и внешнего ориентирования снимков, получаемых в процессе предварительного построения фототриангуляционной сети.

Некоторое представление о размере сторон нерегулярной сети треугольников TIN и шаге регулярной сети DEM могут дать следующие данные, имеющиеся в специальной литературе: для правильного отображения рельефа на плане масштаба 1:2000 путем линейной интерполяции между точками с известными высотами необходимо, чтобы среднее расстояния между ними были не менее:

20 м – для плоскоравнинной местности со слабой расчлененностью;

10 м – для волнообразной поверхности с гладкими формами;

5 м – для сильно расчлененной местности с большим числом оврагов и промоин.

Один из возможных вариантов построения цифровой модели рельефа по растровым изображениям основан на последовательном выполнении следующих операций:

1. Определение по каждой стереопаре границ области моделирования (глобальных областей).

2. Определение границ подобластей моделирования (локальных областей), различающихся характером рельефа местности и возможностями применения того или иного метода построения ЦМР.

3. Построение регулярной сети с шагом, зависящим от наличия исходных точек, характера местности, рельефа и др.

4. Построение сети неперекрывающихся треугольников с вершинами в узлах регулярной сетки на основе алгоритма Делоне.

5. Присвоение всем узлам высот, равных отметке средней плоскости снимка, и вычисление их координат $x_{л}$, $y_{л}$ на левом снимке по формулам связи координат точек наклонного снимка и местности.

6. Идентификация узлов сети треугольников с помощью коррелятора, определение их координат $x_{п}$, $y_{п}$ на правом снимке и вычисление

пространственных координат X , Y , Z точек по формулам прямой фотограмметрической засечки.

Операции 4–6 выполняются в автоматическом режиме, без участия оператора.

Границы подобластей моделирования определяют главным образом в зависимости от характера рельефа и наличия опорных точек. В пределах рабочей площади стереопары можно выбрать несколько таких локальных зон. Для последующей их увязки в границах глобальной зоны и объединения последних в область, покрывающую всю обрабатываемую территорию, зоны должны перекрываться между собой или, по крайней мере, между ними не должно быть разрывов.

При построении цифровой модели узлы регулярной сетки и совпадающие с ними вершины сети треугольников намечаются автоматически, без учета характера местности, и могут оказаться на крышах домов, на крутых склонах, на водной поверхности и т. д. Это предопределяет необходимость корректировки построенной сети треугольников путем изменения положения ее вершин в процессе стереоскопических наблюдений *эпиполярных изображений*, полученных путем трансформирования левого и правого снимков на плоскость SXY базисной системы координат по формулам связи координат точек наклонного и горизонтального снимков. Особенностью таких изображений является отсутствие на них поперечных параллаксов, что создает несомненные удобства для ее наблюдений и измерений и повышает надежность работы коррелятора.

Современные средства построения ЦМР по цифровым изображениям обладают достаточно мощными технологическими средствами ее визуального и статистического контроля. Это могут быть и преобразование сети в 3D-объекты с последующим их вращением и визуальной оценкой, и расчет уклонов с их анализом, и анализ экстремальных высот, и, наконец, оценка точности моделирования по отклонениям высот контрольных точек от аппроксимирующей поверхности.

Построение цифровой модели завершается увязкой локальных моделей TIN по границам локальных областей, общей модели в границах обработки, интерполированием горизонталей с заданным шагом и редактированием их положения по стереомодели, наблюдаемой по эпиполярным изображениям.

Модуль Photomod DTM предназначен для создания и редактирования (в том числе в стереорежиме) цифровых моделей рельефа (ЦМР), а именно:

- построения и визуализации ЦМР исследуемого объекта в виде пространственной сети триангуляции TIN (Triangulated Irregular Network);
- возможности работы с ЦМР в различных видах (пикеты, структурные линии, TIN, DEM, горизонтали);
- анализа и редактирования модели в режимах моно- и стереоскопического отображения;
- формирования в автоматическом режиме ортофототрансформированных изображений;
- расчета и визуализации горизонталей;
- использования импортируемых векторных объектов (точек и полилиний) в качестве линий разрыва при создании моделей рельефа.

Основным представлением ЦМР в системе Photomod является нерегулярная триангуляционная сеть TIN, представляющая собой кусочно-линейную интерполяционную модель поверхности.

При необходимости возможно преобразование TIN в регулярную матрицу высот DEM.

TIN строится по набору точечных объектов (пикетов), которые используются в качестве узлов триангуляционной сети и структурных линий – 3D векторных линий вдоль характерных вытянутых форм рельефа, таких, например, как хребты и тальвеги. По TIN или DEM возможно построение горизонталей, которые являются выходным продуктом, а также могут использоваться для контроля качества TIN и DEM.

Определение типа модели рельефа и ее построение производится при выборе команды **Создать модель** меню **Модель**. Можно выбрать четыре типа модели:

Регулярная;

Адаптивная;

Гладкая;

Оптимизация.

Независимо от способа построения, модель представляет собой TIN, полученную с помощью вычисления реальных пространственных координат точек изображения, расположенных в узлах (или в некоторой их окрестности) регулярной сетки, заданной в растровом окне. Во всех вариантах, кроме варианта, соответствующего опции **Гладкая**, вычисление пространственных координат всех вершин произво-

дится с помощью полученной в результате абсолютного ориентирования пространственной модели и корреляционного алгоритма. При использовании опции **Гладкая** корреляционный алгоритм и пространственная модель используются только для получения реальных координат небольшого числа «характерных» точек (пикетов), используемых для построения интерполяционной функции. Координаты точек изображения в узлах регулярной сетки в этом случае вычисляются с помощью полученной интерполяционной функции.

Типы моделей.

Регулярная модель. Выбор пункта **Регулярная** предусматривает определение искомых трехмерных координат рельефа (объекта) во всех заданных точках координатной сетки. При этом в точках, где невозможно определение трехмерных координат поверхности в автоматическом режиме, значение третьей координаты определяется интерполированием по соседним точкам с автоматически рассчитанными координатами. Возникающие при этом ошибки могут быть скорректированы впоследствии в режиме редактирования модели. Результатом построения модели является TIN, вычисленная по узлам пространственной координатной сетки. Данный вариант построения модели рекомендуется при работе с сильно неоднородными изображениями, характеризующимися мелкозернистой текстурой или высокой специфичностью.

Адаптивная модель. Выбор варианта **Адаптивная** рекомендуется использовать при обработке изображений со значительными однородными областями или достаточно гладкими поверхностями. Этот вариант также хорош при решении задач ближней или прикладной фотографии.

Опция **Тип границы** конкретизирует работу алгоритма с граничными вершинами и может принимать следующие два значения:

- **выпуклая** – этот выбор означает, что программа при обработке граничных узлов стремится сохранить выпуклость TIN;
- **прямоугольная** – в этом случае программа при обработке граничных узлов стремится сохранить прямоугольную форму области модели. Если программа не может определить пространственные координаты в углах прямоугольной области, она получает их путем интерполяции по соседним граничным вершинам.

Опция **Узлы** определяет, какие точки изображения используются для вычисления пространственных координат вершин TIN. Возможны следующие два значения этой опции:

- **фиксированные** – означает, что программа использует для определения пространственных координат только узлы сетки. Если вычисление пространственных координат в каком-либо узле невозможно, узел пропускается;

- **подвижные** – означает, что программа использует для определения пространственных координат наиболее характерную точку изображения в окрестности каждого узла размером 1/3 от шага сетки.

Пространственная триангуляция поверхности осуществляется только по точкам с рассчитанными координатами согласно модифицированному алгоритму Делоне.

Гладкая модель. Вариант **Гладкая** предусматривает построение интерполяционной поверхности по набору точек (пикетов), заданных на растровом изображении. Этот вариант удобен для работы с относительно гладкими поверхностями, которые могут быть описаны сравнительно небольшим числом «характерных» точек.

Для построения гладкой модели необходимо задать в растровом окне набор пикетов (не более 1000), по которым будет производиться интерполяция. Пикеты могут задаваться на всем изображении как в моно-, так и в стереорежиме.

Оптимизация модели. Вариант **Оптимизация** рекомендуется использовать в качестве дополнительного при внесении значительных изменений в модель при ручном ее редактировании. В случае выбора этого пункта программа проведет дополнительную оптимальную пространственную триангуляцию по пространственным точкам, предварительно рассчитанным или определенным в ручном режиме.

10.8. Принцип цифрового трансформирования

Фотоплан представляет собой одномасштабное фотографическое изображение местности, изготовленное в избранной единой системе координат и с точностью, предъявляемой к топографическим планам (картам). При его изготовлении влияние угла наклона снимков δ_α устранено полностью, а влияние рельефа местности уменьшено до допустимых пределов: величины остаточного искажения δ_h не превышают 0,4 мм.

Ортофотоплан отличается от фотоплана только способом его формирования. Если он является результатом дифференциального трансформирования, то форма представления ортофотоплана – аналоговая; в случае применения современных компьютерных технологий

ортоизображение может быть представлено как в аналоговом, так и цифровом виде. Точностные характеристики ортофотоплана те же, что и фотоплана: ортофотопланы полностью свободны от перспективных искажений δ_{α} , а остаточное влияние рельефа местности δ_h не превышает 0,3 мм в масштабе плана.

Современные технологии изготовления цифровых ортофотопланов предполагают возможность получения их с заданным размером элемента геометрического разрешения. Если целью цифрового орто-трансформирования является получение результатов в аналоговом виде, то установленный нормативными документами размер элемента геометрического разрешения составляет 70 мкм, что допускает не более чем 2-кратное увеличение.

Применяемый в фотограмметрии принцип учета влияния рельефа местности при изготовлении плана (фотоплана) местности остается неизменным уже около 100 лет и заключается в делении изображения на отдельные участки, называемые зонами трансформирования, в соответствии с их положением по высоте, и последующем установлении для каждой такой зоны своего индивидуального масштаба проектирования. Причем колебание рельефа в пределах такой зоны не может превышать расчетного при заданных масштабе M создаваемого плана, фокусном расстоянии съемочной камеры f , допустимом искажении точек под влиянием рельефа $\delta_h = 0,3$ мм на плане и расстоянии от центра снимка до угла рабочей площади $r_{\text{сн}}$:

$$Q = 2h = \frac{2\delta_h f M}{1000 r_{\text{сн}}}. \quad (10.8)$$

До 1970-х гг. понятие «зона трансформирования» отождествлялось с фрагментами изображения, которым соответствовали участки местности между расчетными горизонталями. Преобразование таких зон выполнялось фотомеханическим способом с помощью фототрансформаторов. Для изменения масштаба проектирования зон использовалась информация о рельефе местности, представленная в виде горизонталей.

С 1973 г. с серийным выпуском ортофотопроекторов зону трансформирования стали отождествлять со щелью, через которую проектируются фрагменты изображения снимка в масштабе, согласованном с профилем местности. Такое трансформирование, называемое дифференциальным (ортогональным), требовало наличия косвенной информации о рельефе местности.

С середины 1980-х гг. с появлением и массовым внедрением цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) зону трансформирования

стали отождествлять с фрагментом изображения, трансформируемым как единое целое, – с пикселем или группой пикселей. Размер такого фрагмента устанавливается так же, как и ширина щели при дифференциальном трансформировании. Такое преобразование изображения, называемое ортотрансформированием, подразумевает наличие цифровой модели рельефа, как правило, на регулярной сетке.

Сущность ортотрансформирования заключается в следующем.

На рис. 10.10 изображены точки местности A и B , профиль цифровой модели рельефа по линии AB , снимок P и изображения a, b точек местности A и B , соответствующие центрам фрагментов исходного изображения. Пусть также известны элементы внешнего ориентирования снимка в той же системе координат, что и ЦМР.

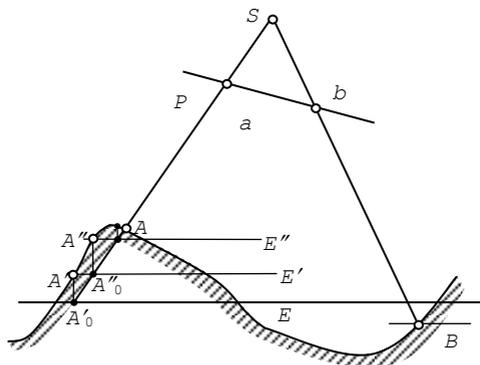


Рис. 10.10. Определение координат точки по аэроснимку и цифровой модели рельефа

Требуется по координатам центра фрагмента на снимке x_a, y_a и его отметке Z_A по цифровой модели рельефа найти плановые координаты в системе местности X_A, Y_A и сформировать соответствующий фрагмент ортоизображения.

Для определения координат центра фрагмента исходного изображения воспользуемся формулами связи координат точек снимка и местности, записав их в виде:

$$\left. \begin{aligned} X_A &= X_S + (Z_A - Z_S) \frac{X_a}{Z_a} = X_S + (Z_A - Z_S) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \\ Y_A &= Y_S + (Z_A - Z_S) \frac{Y_a}{Z_a} = Y_S + (Z_A - Z_S) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

Пусть в первом приближении искомая точка лежит на средней плоскости снимка E , т. е. $Z_A = Z_E$. Тогда расчет по формулам (10.9) даст точку A'_0 с координатами X'_A, Y'_A , лежащую в пересечении проектирующего луча SaA'_0 с плоскостью E (см. рис. 10.10).

Однако точка A'_0 имеет отметку Z'_A , не равную отметке средней плоскости Z_E , а ее плановым координатам X'_A и Y'_A соответствует точка цифровой модели A' , не лежащая на проектирующем луче SaA .

Для установления проективного соответствия между точками S, a и A' нужно вновь воспользоваться формулами (10.9), подставляя в них элементы внешнего ориентирования аэроснимка, координаты точки a и отметку Z'_A . В результате будут найдены координаты X''_A, Y''_A новой точки A''_0 , ее отметка Z''_A по цифровой модели местности, а также новая точка этой модели A'' , не лежащая на проектирующем луче SaA . Это потребует выполнения второго, третьего и т. д. приближений, пока изменение отметки точки в двух последовательных приближениях не будет пренебрегаемо малым.

Полученные в последнем приближении координаты X_A и Y_A определяют положение центра трансформируемого фрагмента в системе координат местности, а найденная по ЦМР отметка Z_A используется для определения коэффициента его увеличения K_u :

$$K_u = Mf / (Z_S - Z_A), \quad (10.10)$$

где Z_S – абсолютная высота фотографирования (элемент внешнего ориентирования снимка);

M – знаменатель масштаба ортоизображения.

По координатам X_A, Y_A трансформируемый фрагмент переносится на растровую сетку (рис. 10.11), предназначенную для формирования ортоизображения в границах обрабатываемого участка, и разворачивается на угол χ .

При этом влияние угла наклона снимка преобразует квадратный фрагмент в трапецию, что легко прогнозировать на основе анализа перспективы сетки квадратов (рис. 10.12).

Наиболее известными алгоритмами при получении трансформированного изображения являются:

1) метод ближайшего соседа, при котором значение пиксела трансформированного растра приравнивается значению ближайшего пиксела исходного растра;

2) метод билинейной интерполяции – значение пиксела растра вычисляется с помощью билинейной функции как взвешенное от четырех ближайших к нему пикселов исходного снимка;

3) метод кубической свертки – значение пиксела растра вычисляется с помощью полинома третьего порядка как взвешенное среднее от четырех ближайших к нему пикселей исходного растра.

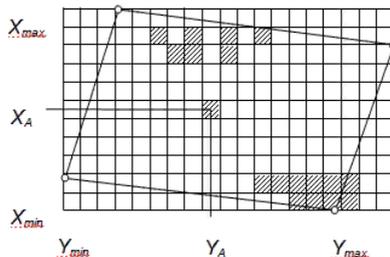


Рис. 10.11. Фрагменты по координатам их центров переносятся на растр заданного разрешения

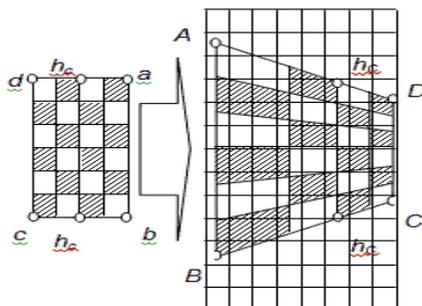


Рис. 10.12. Преобразование рабочей площади снимка при ортоформировании

Таким образом, ортоизображение формируется в результате несложных вычислений с использованием зависимостей (10.9) и последующих геометрических и фотометрических преобразований исходного растра, в том числе и определение оптической плотности отдельных пикселей, на которые «не попадают» элементы исходного изображения. Фотометрические преобразования существенно упрощаются, если фрагмент исходного изображения соответствует одному пикселу.

При этом возрастает объем вычислений по определению координат и высот центра каждого пиксела.

Как и при фототрансформировании, из каждого снимка преобразуется в ортоизображение только его центральная часть – рабочая площадь, ограниченная средними линиями продольного и поперечного перекрытий. Границы этой площади в принципе могут быть установлены автоматически, однако в этом случае «порезы» могут пройти через постройки, по осевым линиям дорог и т. п., что нежелательно.

10.9. Построение ортофотоизображения в ЦФС «Photomod»

На основе изложенного можно наметить такую последовательность выполнения технологических операций по изготовлению ортофотоплана.

1. Построение и уравнивание фотограмметрической сети.
2. Определение элементов внешнего ориентирования снимков фотограмметрической сети на основе формул.
3. Построение цифровой модели рельефа TIN в границах локальных и глобальных зон и объединение их в единую модель в границах ортотрансформирования.
4. Преобразование нерегулярной модели рельефа TIN в регулярную модель DEM.
5. Разметка на снимках границ формируемых по ним ортоизображений, соответствующих рабочим площадям этих снимков.
6. Определение размера одновременно трансформируемого фрагмента цифрового изображения исходя из фактических углов наклона реальных снимков и уклона местности (аналогично расчету ширины щели при ортотрансформировании).

Размер фрагмента изображения местности с уклоном v при заданном перспективном искажении $\delta_{\text{орто}}$ вычисляется по формуле

$$l \leq \frac{2f\delta_{\text{орто}}}{r \operatorname{tg} v}. \quad (10.11)$$

7. Выделение на исходном изображении фрагмента расчетного размера $n \times n$ пикселей, определение его геометрического центра.
8. Определение пространственных координат X, Y, Z центров фрагментов (каждого пиксела) с учетом цифровой модели рельефа DEM и формирование из них ортоизображения с заданным геометрическим разрешением на всю территорию.
9. Фотометрическая коррекция сформированного ортоизображения по границам снимков.

10. Нарезка ортоизображений по планшетам заданного масштаба по координатам их углов и зарамочное оформление.

Все операции, за исключением размещения точек, определения границ локальных и глобальных зон моделирования, выполняются в автоматическом режиме, по заданным параметрам обработки.

Модуль Photomod Mosaic предназначен для построения непрерывных ортофотопланов из отдельных растровых изображений. В процессе построения корректируются геометрические и фотометрические искажения. Результат ортотрансформирования в виде единого кадра или набора листов представляется в заданной картографической проекции.

В качестве модели рельефа могут быть использованы:

- постоянная высота (значение задается пользователем);
- точки сгущения сети фототриангуляции (может быть построена как гладкая поверхность, так и TIN);
- множество XYZ-точек в текстовом формате;
- регулярная матрица высот в одном из следующих форматов: Surfer ASCII grid, ArcInfo ASCII grid, GeoTIFF DEM, USGS DEM, VectOr MTW, BCGIS DEM.

Для повышения точности ортотрансформирования в существующую модель рельефа могут быть встроены вектора, описывающие рельеф местности и возвышающиеся объекты (мосты, здания). При этом могут быть использованы пикеты, структурные линии и вектора, созданные (импортированные) в Photomod DTM и Photomod StereoDraw.

Параметры создаваемого ортофотоплана:

- размер элемента (пиксела);
- масштаб создаваемой карты. При этом в заголовок файла записывается требуемое разрешение для вывода на печатающее устройство;
- коэффициент сжатия результирующего растра с целью снижения объема занятой дисковой памяти (доступно только для форматов TIFF, GeoTIFF, JPEG);
- произвольный цвет фона (рекомендуется для просмотра в электронном виде использовать черный, а для вывода на печатающее устройство – белый).

Для устранения различий между исходными снимками и получения визуально непрерывного растра предусмотрена возможность как глобального, так и локального выравнивания яркостных и цветовых характеристик. В первом случае производится преобразование снимка в целом, а во втором цвет и яркость выравниваются внутри каждого снимка. Кроме того, для окончательного устранения различий может быть использовано локальное сглаживание вдоль линий совмещения отдельных снимков. Процесс выравнивания яркости является полно-

стью автоматическим и лишь в отдельных случаях требует дополнительной настройки параметров.

Окончательно ортофотоплан представляется в виде единого растра либо в виде набора листов. При разбивке на листы может быть задан как регулярный блок листов с заданными параметрами (размеры, количество, величина взаимного перекрытия), так и каждый лист в отдельности. Во втором случае форма листов задается произвольным замкнутым многоугольником, т. е. может отличаться от прямоугольной.

По умолчанию в качестве областей трансформирования задаются центральные части снимков с регулируемым отступом от краев. Пользователь может редактировать области на каждом снимке и задавать порядок их нанесения на результирующий ортофотоплан.

В связи с тем, что области трансформирования жестко привязываются к исходным растрам, их построение можно вести до того, как получена окончательная модель рельефа.

Для отображения и экспорта области трансформирования могут быть преобразованы в множество непересекающихся порезов, определяющих, с какого исходного снимка взята та или иная часть ортофотоплана. Это значительно облегчает последующий визуальный контроль качества совмещения.

На любой стадии пользователь может сохранить результаты работы в виде проекта мозаики, а затем продолжить работу с того же самого места при последующем запуске.

Для численной оценки качества геометрического совмещения используется пересчет точек триангуляции, измеренных на отдельных снимках, в геодезическую систему координат и сравнение результата с известными координатами на местности. Затем на основе множества расхождений строится статистика и выдается отчет.

На построенный ортофотоплан могут быть наложены векторные объекты с целью контроля геометрической точности. Для количественной оценки расхождения существует инструмент, позволяющий измерять расстояния в окне ортофотоплана.

Особенности фотограмметрической обработки данных дистанционного зондирования.

Цифровые снимки, полученные с помощью съемочных систем, поступают в центры приема информации, где и проходит первичную обработку, содержание которой зависит от типа съемочной системы, качества данных.

Требования к составу и содержанию предварительной обработки материалов дистанционного зондирования пока не стандартизированы, и каждая фирма, владеющая данными, устанавливает их исходя из специ-

фики получения изображений и своих собственных представлений об уровнях их обработки.

Предварительная обработка данных дистанционного зондирования заключается в том, чтобы освободить пользователя от необходимости учета тонкостей конструкции съемочной системы, исправления дефектов изображения, возникающих из-за ее локальных отказов или неисправностей.

В содержании предварительной обработки выделено геометрическая и радиометрическая коррекции.

Геометрическая коррекция изображения выполняется с целью преобразования его к виду, позволяющему выполнять измерительные действия и последующую фотограмметрическую обработку. К числу таких операций относятся:

- формирование участка местности из отдельных строк или матриц панорамы с учетом их перекрытия;
- восстановление отдельных пикселей изображения при случайном «выпадении» отдельным детекторов;
- восстановление по какой-либо причине пропущенных строк изображения;
- преобразование изображения с целью устранения ошибок, вызванных перемещением носителя в процессе формирования строки, изменения углового положения сенсора.

Формирование участка местности выполняется с учетом конструктивных особенностей съемочной аппаратуры, нередко формирующей перекрывающиеся на заданную величину изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров, А. С. Средства получения цифровых снимков и методы их фотограмметрической обработки / А. С. Назаров. – Минск: Учеб. центр повышения квалификации и переподготовки кадров землеустроительной и картографо-геодезической службы, 2009. – 263 с.
2. Система Photomod 5.0. Создание проекта: Руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 91 с.
3. Система Photomod 5.0. Измерение сети: Руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 126 с.
4. Система Photomod 5.0. Уравнивание сети: Руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 82 с.
5. Система Photomod 5.0. Обработка проекта: Руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 208 с.
6. Система Photomod 5.0. Создание ортофото: Руководство пользователя. – М.: Ракурс, 2009. – 108 с.

11. МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ИХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

11.1. Технические средства дистанционного зондирования.

11.2. Влияние параметров орбит и атмосферы на качественные характеристики материалов дистанционного зондирования.

11.3. Свойства космических снимков и их классификация по отдельным показателям.

11.4. Цифровые съемочные системы (ЦСС).

11.5. Основные типы космических снимков.

11.6. Космические системы дистанционного зондирования.

11.7. Предварительная обработка материалов дистанционного зондирования.

11.8. Методы классификации изображений. Алгоритмы классификации изображений.

11.9. Использование программного комплекса ENVI для обработки данных дистанционного зондирования.

11.10. Использование материалов дистанционного зондирования для целей кадастра и решения землеустроительных задач.

11.1. Технические средства дистанционного зондирования

По способу формирования изображения ЦСС классифицируют:

- цифровые съемочные системы с использованием ПЗС-матриц (кадровые системы);

- цифровые съемочные системы с использованием ПЗС-линеек (сканирующие системы) (ПЗС-приемник с зарядовой связью CCD – Charge Coupled Device).

Преимущества использования цифровых съемочных систем.

1. Отсутствуют расходы на аэрофотопленку и фотолабораторные работы.

2. Контроль качества снимков в полете.

3. Высокое радиометрическое разрешение (12 бит на пиксел и выше).

4. Одновременная съемка в разных спектральных диапазонах.

5. Отсутствие процесса внутреннего ориентирования при обработке в цифровых фотограмметрических системах.

6. Возможность создавать неограниченное количество копий снимка с качеством оригинала.

7. Отсутствие деформации при хранении.

8. Большие объемы устройств хранения, позволяющие получить большое количество снимков за один залет.

Цифровые съемочные системы с использованием ПЗС-линеек: ADS 40 (фирма LH-System, Швейцария); 3-DAS1 НПП «Геосистема»; HRSC (центр космических исследований Германии DLR).

При фотограмметрической обработке цифровых изображений, получаемых с помощью сканирующих ЦСС, необходимо учитывать следующее:

1. Результатом съемки являются полосы изображений, поэтому стереоскопические наблюдения и измерения возможны только по полосе перекрытия со смежным маршрутом.

2. Геометрия сканерных снимков не соответствует центральной проекции, поскольку каждая их строка формируется из собственного центра.

3. Отсутствие продольных перекрытий сканерных снимков и невозможность создания по ним стереопар существенно снижают точность их фотограмметрической обработки.

4. Современные ЦСС используют несколько ПЗС-линеек, каждая из которых формирует изображение по определенному направлению.

В настоящее время на предприятии БелПСХАГИ активно используют сканерный авиационный сенсор ADS 100, который имеет три линейных сенсора, направленных вперед, назад и в нади́р и состоящих из нескольких спектральных линеек, т. е. формируют «цифровой ковер».

Основное отличие ADS100 – увеличение полосы захвата до 20 000 пикселей поперек маршрута для всех линеек и, соответственно, увеличение производительности. В ADS100 отсутствует панхроматический канал, все цветные каналы имеют наивысшее разрешение (20 000 пикселей). Надирный сенсор имеет дополнительную линейку в зеленом канале: две зеленые линейки смещены друг относительно друга на полпикселя, что позволяет в результате интерполяции реализовать так называемый режим высокого разрешения.

Следующее важное усовершенствование – это наличие режима временной задержки и накопления сигнала (TDI – time-delay integration) для компенсации сдвига изображения. Все используемые CCD-линейки являются матрицами с 16 строками, что позволяет применять различные режимы TDI (от 1 до 15 пикселей). Наличие TDI-режима дает возможность летать на больших скоростях при худших условиях освещения (рис. 11.1).

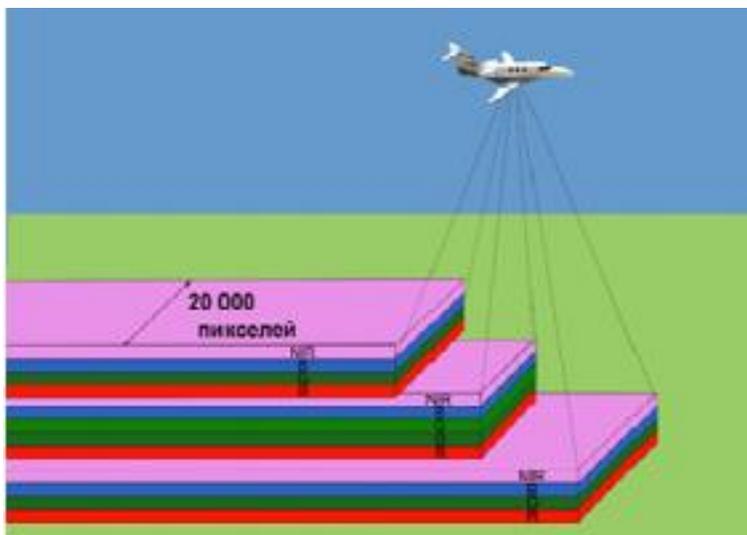


Рис. 11.1. Принципиальная схема расположения сенсоров и CCD-линеек

В современных условиях при аэрофотосъемке используют цифровую камеру ADS 100, которая имеет следующие характеристики:

- тип камеры – сканерный авиационный сенсор;
- вес – 100–120 кг;
- число CCD-сенсоров SH100 составляет 13 линеек (4 линейки R, G, B, N вперед, 4 линейки R, G, B, N назад, 5 линеек R, G, G, B, N в надир);
- фокусное расстояние (для результирующего кадра) – 62,5 мм;
- радиометрическое разрешение 12 бит/пиксел;
- компенсация сдвига (смаза) изображения;
- геометрия результирующего изображения – центральная проекция каждой строки изображения;
- формат растрового изображения – TIFF.

При съемке сканирующими ЦСС на самолете устанавливают интегральный навигационный комплекс GPS/IMU (Inertial Measurement Unit). Совместная обработка данных, полученных с помощью GPS и инерциальной системы, позволяет с достаточной точностью определять значения шести параметров внешнего ориентирования каждой строки изображения. Это позволяет устранить геометрические искажения снимка.

11.2. Влияние параметров орбит и атмосферы на качественные характеристики материалов дистанционного зондирования

Космическая съемка, т. е. съемка с высоты более 150 км, выполняется со спутника, который в соответствии с законами небесной механики перемещается по строго установленной орбите. Поэтому возможности его маневрирования по сравнению с самолетом весьма ограничены.

С точки зрения космических съемок земной поверхности важны следующие параметры орбит: форма, высота, наклонение, положение ее плоскости по отношению к Солнцу.

Форма орбиты (рис. 11.2) определяет постоянство высоты съемки на разных участках орбиты. Космические носители с установленной на них съемочной аппаратурой движутся по круговым или эллиптическим орбитам. Для наблюдения из космоса целесообразнее использовать круговые орбиты, поскольку на них спутник движется примерно на одинаковом расстоянии от Земли. Для эллиптических орбит расстояние до земной поверхности изменяется от минимального в перигее до максимального в апогее.

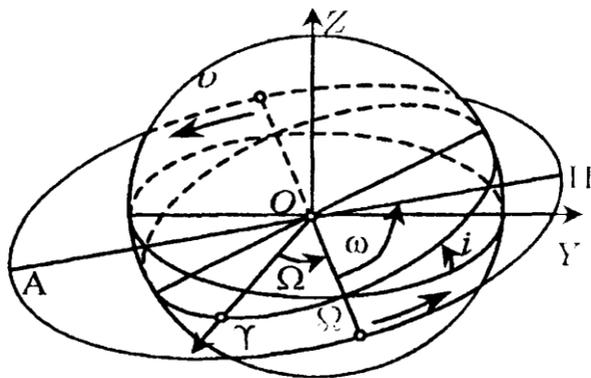


Рис. 11.2. Элементы орбиты носителя съемочной аппаратуры

Высота орбиты вместе с параметрами съемочной системы определяет масштаб получаемого изображения, его метрические характеристики и ширину полосы обзора. Спутники работают на различных высотах. При низких орбитах существенно сказывается сопротивление

атмосферы: при высоте менее 100 км прогрессивно возрастающее торможение столь велико, что спутник не может совершить даже одного витка и, сгорая, падает вниз. По мере увеличения высоты увеличивается время активного существования спутников, охват съемкой, но при этом обычно уменьшается разрешение снимков.

По высоте можно выделить три группы наиболее часто используемых для съемки Земли орбит:

100–500 км – орбиты для пилотируемых кораблей, орбитальных станций и космических систем;

600–2000 км – орбиты искусственных спутников Земли, используемые для ресурсных и метеорологических съемок с помощью электронной аппаратуры;

36000–40000 км – орбиты геостационарных спутников, используемых для постоянного наблюдения за районом. Скорость движения таких спутников равна скорости вращения Земли, поэтому они постоянно находятся над одной ее точкой, т. е. при такой высоте спутник, как бы зависая над определенной территорией, обеспечивает ее постоянное наблюдение.

Наклонение орбиты (i) – это важная характеристика, которая определяется углом между плоскостью орбиты и плоскостью экватора.

Различают орбиты **экваториальные**, где отклонение отсутствует, **полярные** (с наклоном 90°) и **наклонные**, занимающие промежуточное положение. Наклонные орбиты могут быть прямыми (имеют северо-восточное направление входящего витка) и обратными (имеют северо-западное направление восходящего витка). С известного космодрома Плисецк спутники выводятся на орбиты с наклоном от 72° до полярных орбит. Наклонение определяет широтный пояс, охватываемый съемкой. Сравнительно небольшие метеорологические и ресурсные спутники запускают на полярные орбиты.

Положение орбиты по отношению к Солнцу – это угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце. Для получения снимков при постоянных условиях освещенности используют солнечно-синхронные орбиты. У таких орбит угловая скорость смещения относительно Солнца соответствует скорости вращения Земли вокруг Солнца (360° в год). Находясь на солнечно-синхронной орбите, спутник появляется над одним и тем же местом в одно и то же время, и условия освещенности зависят только от времени года.

11.3. Свойства космических снимков и их классификация по отдельным показателям

При работе с различными типами снимков специалистов в первую очередь интересует спектральный диапазон съемки, который определяет биогеофизические характеристики объектов, передаваемые снимками и технология получения изображения, от которой зависят изобразительные, радиометрические и геометрические свойства снимков. Эти две характеристики представляют основу классификации космических снимков.

Спектральный диапазон съемки определяет первый, фундаментальный уровень этой классификации, учитывающий отражательные и излучательные характеристики объектов, воспроизводимых на снимках. По этому признаку выделяют три основные группы снимков:

- снимки в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, который называют также световым;
- снимки в тепловом инфракрасном диапазоне;
- снимки в радиодиапазоне.

Классификация космических снимков по трем показателям, важнейшим для дешифрирования.

По обзорности:

- глобальные (планета) – $\Theta > 10\,000$ км;
- крупнорегиональные – $\Theta = 500\text{--}3000$ км;
- региональные – $\Theta = 50\text{--}500$ км;
- локальные – $\Theta = 10\text{--}50$ км.

По масштабу:

- сверхмелкомасштабные – $1:1\,000\,000\text{--}1:10\,000\,000$;
- среднемасштабные – $1:10\,000\,000\text{--}1:100\,000\,000$;
- мелкомасштабные – $1:100\,000\text{--}1:1\,000\,000$;
- крупномасштабные – $1:10\,000\text{--}1:100\,000$.

По пространственному разрешению:

- низкого разрешения – $L_R = n1000$ м;
- среднего разрешения – $L_R = n100$ м;
- высокого разрешения – $L_R = n10$ м;
- а) $L_R = 30\text{--}100$ м – относительно высокого;
- б) $L_R = 10\text{--}3$ м – высокого;
- очень высокого разрешения – $L_R = n1$ м;
- сверхвысокого разрешения $L_R \leq 1$ м.

⊗ – ширина полосы охвата; L_R – разрешение на местности.

Основные характеристики космических снимков.

Спектральное разрешение характеризует количество регистрируемых спектральных зон, их ширину и размещение по электромагнитному спектру. Спектральное разрешение измеряется в нанометрах (нм) или микрометрах (мкм). Такая зона может быть достаточно широкой, как, например, единственная зона панхроматического снимка (0,4–0,7 мкм), или узкой, как например, красная зона (0,63–0,69 мкм). Наиболее высокое спектральное разрешение (порядка 10 нм) имеют снимки, полученные с помощью гиперспектрального радиометра. Чем шире зона, тем ниже спектральное разрешение, тем меньше вероятность обнаружения интересующего объекта.

Радиометрическое разрешение определяет диапазон различных на снимке яркостей или число градаций сигнала в каждой спектральной зоне. Большинство радиометров обладает радиометрическим разрешением 6 или 8 бит, что достаточно близко к динамическому диапазону зрения человека. Имеются радиометры и с более высоким разрешением (10–11 бит/пиксел), позволяющим различать больше деталей в очень ярких или очень темных областях снимка. Это важно при съемке объектов, находящихся в тени, а также, когда на снимке одновременно находятся большие водные поверхности и суша.

11.4. Цифровые съемочные системы

Космический снимок, являющийся результатом дистанционного зондирования исследуемой поверхности, представляет собой изображение объекта, построенное путем его проектирования из одной или нескольких точек пространства на ту или иную поверхность по заданному закону. Принцип формирования изображения зависит от используемой съемочной аппаратуры – чаще всего это фотографические камеры, сканеры, радиолокаторы, которые иногда объединяют общим названием сенсоры. Съемочная аппаратура, позволяющая одновременно получать снимки в нескольких спектральных зонах, называется многозональной, а в десятках и сотнях очень узких спектральных зон – гиперспектральной.

В зависимости от физического принципа формирования изображения, типа его развертки и вида поверхности проектирования съемочные системы делятся на *фотографические, телевизионные, радиолокационные, лазерные, сканирующие, оптико-электронные* и др.

Краткие сведения о фотографических съемочных системах.

Рассмотрим принцип действия некоторых из них.

Телевизионные съемочные системы используют в качестве датчика видеoinформации передающие телевизионные трубки. Полученное изображение транслируется на Землю по радиотелевизионным каналам в режиме реального времени либо предварительно записывается на магнитный носитель. Если телевизионное изображение вначале строится в фокальной плоскости приемной оптики, то оно соответствует законам центрального проектирования. Если же оно формируется путем линейно-однострочного сканирования, то его геометрия аналогична геометрии сканерных снимков.

Лазерные сканирующие системы основаны на использовании полупроводникового лазера ближнего инфракрасного диапазона, работающего в импульсном режиме. Одна из возможных схем такой системы предполагает лазерное облучение полосы местности и последующий прием отраженных сигналов, интенсивность которых определяется отражательной способностью объектов местности. Причем в каждом элементарном измерении регистрируется наклонная дальность и значения углов, определяющих направление распространения зондирующего луча в системе координат локатора.

Лазерное сканирование характеризуется узкой направленностью пучка, его высокой энергетической мощностью, узким спектральным диапазоном излучения и малым угловым разрешением системы. Это позволяет считать лазерное сканирование одним из наиболее перспективных средств дистанционного зондирования, но в настоящее время в силу ряда причин применение таких сканеров ограничивается наземным сканированием и сканированием с самолета.

Сканирующие съемочные системы основаны на использовании оптико-механических устройств, представляющих собой быстро качающееся зеркало (около 1000 колебаний в секунду). Попадающие на его поверхность фрагменты изображения местности направляются через зеркальный объектив на точечный приемник, который преобразует лучистую энергию в электрический сигнал. Этот сигнал заносится на магнитный носитель в виде цифрового кода, зависящего от амплитуды сигнала, и в последующем передается на Землю. Как правило, различается 256 уровней видеосигнала, соответствующих изменению яркости объектов.

Различают несколько типов оптико-механических сканирующих систем, базирующихся на использовании линейной, конической горизонтальной и конической вертикальной разверток.

Геометрия сканера в линейно-однострочной (а), вертикальной (б) и горизонтальной (в) конечной развертке представлена на рис. 11.3.

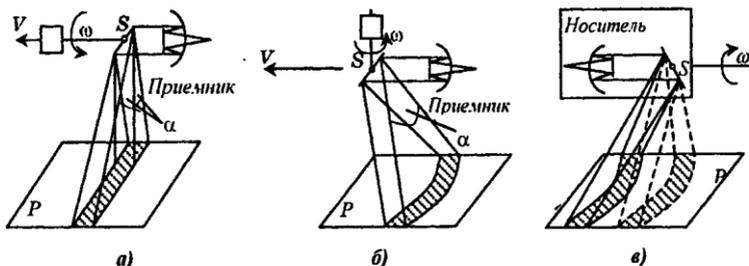


Рис. 11.3. Геометрия сканера в линейно-однострочной (а), вертикальной (б) и горизонтальной (в) конечной развертке

Опико-электронные съемочные системы получили в последние пять лет наибольшее распространение, что объясняется простотой их конструкции, отсутствием подвижных элементов и стабильностью, высокой точностью обработки. Строка изображения в таких системах формируется одновременно, с помощью линеек, построенных на основе приборов с зарядной связью (ПЗС), располагающихся в фокальной плоскости приемной оптики перпендикулярно к направлению движения носителя.

Сформированная в приемнике строка изображения преобразуется в цифровые сигналы, характеризующие отражательную способность элементов объекта в том или ином диапазоне волн, и запоминается на магнитных устройствах. Несколько тысяч фотоприемников (детекторов) размером в несколько мкм каждый создают строку первичного изображения. Развертка в панораму (рис. 11.4) осуществляется за счет движения носителей съемочной аппаратуры.

Одним из основных узлов опико-электронной съемочной системы является радиометр (фотометр, видеоспектрометр), с помощью которого измеряется интенсивность излучения, зарегистрированного в пределах каждого пиксела.

Геометрическая особенность материалов опико-электронного сканирования заключается в том, что строки изображения, состоящие из детекторов $0, 1, 2, \dots, n$, формируются по законам центрального проектирования из точки S , расположенной на удалении f от главного детек-

тора. Панорама, построенная путем объединения строк, соответствует законам линейно-строчного сканирования.

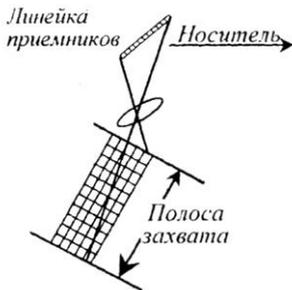


Рис. 11.4. Развертка в панораму

Изображение в оптико-электронной съемочной системе строится с помощью зеркального объектива, размер которого в 2–3 раза меньше, чем линзового. Такие системы характеризуются высокой радиометрической точностью, малым углом зрения и большим фокусным расстоянием (рис. 11.5).

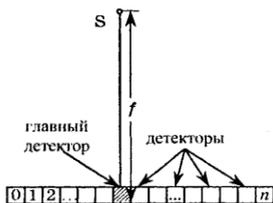


Рис. 11.5. Изображение в оптико-электронной съемочной системе

Например, для получения снимков QuickBird использована аппаратура с фокусным расстоянием порядка 10 м и углом зрения около 2° .

В общем случае сканирующая система состоит из сканера, датчиков и входящих в них детекторов. Датчик собирает отраженную от Земли солнечную энергию, преобразует ее в виде кода, удобного для передачи по каналам связи. Детектор – это часть датчика, осуществляющая регистрацию электромагнитного излучения.

Материалы космической съемки поступают в центры приема информации, где выполняется их предварительная обработка, предусматривающая геометрическую и радиометрическую коррекцию, восстановление искаженных и утерянных строк, привязку изображений по параметрам орбиты космического аппарата или по опорным точкам, – ортофототрансформирование.

Радиолокационные съемочные системы (РЛС) формируют изображение путем облучения полос местности с угловыми размерами $\Phi \times \Delta\Phi$, размещенных по обе стороны от оси полета перпендикулярно его направлению, последующего приема отраженных сигналов и их регистрации. Интенсивность отраженных сигналов соответствует радиояркости соответствующих элементов местности, а фаза определяет наклонную дальность. Развертка изображения в панораму выполняется за счет поступательного движения носителя.

Важнейшее преимущество снимков этого класса – их всепогодность. Поскольку радар регистрирует собственное, отраженное земной поверхностью излучение, для его работы не требуется солнечный свет.

Важной особенностью радиолокационной съемки является ее высокая чувствительность к влажности почвы, что важно для сельскохозяйственных и экологических приложений. В принципе с помощью радарной съемки можно обнаружить подземные объекты, например, трубопроводы, утечки из них.

11.5. Основные типы космических снимков

Характеристика основных типов космических снимков.

Фотографические снимки – снимки, полученные с помощью фотоаппарата, находящегося на борту авиационного или космического носителя и обработанные после приземления спускаемого аппарата.

Они делятся (в зависимости от использования фотоматериалов):

- на черно-белые;
- цветные;
- спектрзональные;
- многозональные;
- синтезированные.

Для получения цветных снимков используют 2–3-слойные фотоматериалы (синий, красный, зеленый).

Спектрзональные снимки получают на 2–3-слойных фотоматериалах, но на таких пленках отсутствует слой, чувствительный к синей

зоне спектра, вместо него помещен слой, чувствительный к ИК-лучам. Такие снимки обеспечивают хорошее цветное разделение изучаемых объектов, но дают изображение в преднамеренно ложных цветах.

Многозональные снимки получают с помощью специальных фотоаппаратов, имеющих от 4 до 6 объективов. Каждый объектив ведет съемку в определенной зоне спектра. В результате на одну и ту же территорию приходится 6 зональных снимков, каждый из которых содержит изображение в заданном спектральном диапазоне, что облегчает анализ и интерпретацию фотоизображения.

Из многозональных снимков можно получить цветные снимки, которые называют синтезированными. При этом каждому зональному снимку с помощью светофильтра придают определенный цвет, а затем соединяют изображения. Цвета на снимке могут соответствовать реальности либо быть ложными.

Сканерные снимки, получаемые при оптико-механическом сканировании в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и передаваемые по радиоканалам, как и фотографические, отображают оптические характеристики объектов, но такую съемку отличает оперативность вплоть до получения изображений в реальном масштабе времени. В отличие от фотографических, сканерные снимки представляют дискретные изображения, детальность которых определяется размером пиксела. Пространственное разрешение сканерных снимков долгое время было существенно ниже, чем фотографических, измерялось километрами, но в последние годы их получают с разрешением 15–30 м. Охват снимков варьирует от 180 км до 2–3 тыс. км.

Сканерные снимки поступают с метеорологических и ресурсных спутников и используются для оперативных целей (прогноз погоды, гидрологические прогнозы) и тематического картографирования. Как правило, сканерные снимки многозональные.

ПЗС-снимки, получаемые с помощью оптико-электронных сканеров с линейными ПЗС-приемниками излучения и передаваемые со спутников по радиоканалам, характеризуются высоким разрешением. Как и фотографические снимки, они регистрируют оптические характеристики исследуемой территории.

Высокая чувствительность детекторов и их миниатюрные размеры вместе с использованием длиннофокусных объективов обеспечивают высокое разрешение, которое составляет от первых десятков метров (10–45 м) до метра и даже менее. Таким образом, теперь эти снимки по разрешению достигли лучших фотографических снимков. Однако

охват снимков невелик – 40–70 км, а у снимков наиболее высокого разрешения – всего 10–15 км. Наилучшим разрешением отличаются панхроматические снимки, а разрешение многозональных снимков в 2–4 раза хуже.

ПЗС-снимки делают с ресурсно-картографических спутников и специализированных спутников для детальной съемки; используют их для тематического и топографического картографирования.

Снимки в тепловом ИК диапазоне. Этот диапазон достаточно широк и охватывает зону от 3 до 1000 мкм. Имеются только три окна прозрачности: 3–5; 8–14; 30–80 мкм, и первые два используются для съемки. Пространственное разрешение снимков – до сотен метров. Температурное разрешение составляет десятые доли градусов. Съемку можно вести ночью на затемненной стороне Земли, а также в условиях полярной ночи. Тепловые снимки можно рассматривать как псевдоцветные, так как в них фактически осуществляется сдвиг спектрального диапазона в зону видимого спектра, в результате холодные объекты выглядят светлыми, а теплые – темными.

Съемка в тепловом диапазоне обычно используется при изучении различных явлений, связанных с выделением тепловой энергии, например, при мониторинге лесных пожаров, тепловых или атомных электростанций.

Снимки в радиодиапазоне. Для дистанционного зондирования может быть использован ультракоротковолновый диапазон радиоволн с длинами волн 1 мм – 10 м (точнее 1 мм – 1 м). Он называется сверхвысокочастотным (СВЧ) в отечественной литературе и микроволновым – в американской. Этот диапазон в значительной степени свободен от влияния атмосферы.

Различают пассивную радиометрию, при которой фиксируется собственное излучение Земли (получают **радиометрические** снимки), и активную радиометрию, когда фиксируется отраженное искусственное излучение (получают **радиолокационные** снимки).

Радиометрические снимки позволяют выявить почвы с различной влажностью, воды с разной степенью солености, определить степень промерзания грунтов, возраст морских льдов и т. п.

Метод пассивной радиометрии перспективен, но пока находится в стадии разработки и применяется ограниченно.

Для получения **радиолокационных** снимков на носителе устанавливается активный источник радиоизлучения с антенной, действующей по принципу просмотра местности поперек маршрута. Посылае-

мый к Земле сигнал по-разному отражается поверхностью и улавливается регистрирующей аппаратурой. На полученных снимках отражается шероховатость поверхности, микрорельеф, состав пород.

Радиолокационные снимки могут применяться в океанологических исследованиях для изучения волнения и приповерхностных ветров, в геологии – для поиска подземных вод, в сельском хозяйстве – для изучения состояния растительности, а также для картографирования земель.

11.6. Космические системы дистанционного зондирования

Методы дистанционного зондирования базируются на использовании спутниковых систем, которые включают достаточно сложную инфраструктуру, обеспечивающую функционирование спутников на орбите, прием информации от спутников, ее первичную обработку, хранение и распространение.

Первыми национальными системами природо-ресурсного направления были системы первого поколения «Ресурс» (1970-е гг., СССР), Landsat (1972 г., США) и SPOT (1986 г., Франция).

Космическая система «Ресурс» создавалась как общегосударственная, постоянно действующая система для изучения природных ресурсов и контроля окружающей среды.

В систему входили автоматические космические аппараты фотографической съемки Ресурс-Ф и оперативного наблюдения за сушей Ресурс-О и океаном Океан-О.

За 16 дней спутник может покрыть сканерной многозональной съемкой всю поверхность Земли. Цифровая информация со спутников по радиоканалам передается на наземные пункты приема, которые оборудованы во многих странах. Результаты съемок, прошедшие предварительную компьютерную обработку, представляют в цифровом виде. Спутники системы «Ресурс» прекратили свое существование в 1999 г. Служба распространения архивированных снимков через сеть Интернет делает их доступными потребителям разных стран.

Снимки со спутников Landsat, на которых отчетливо изображаются природно-территориальные комплексы – сельскохозяйственные поля, городские населенные пункты, применяются во многих странах мира для геологических, географических, экологических исследований и тематического картографирования.

Американская система Landsat предусматривала поочередный вывод на орбиту по одному спутнику с расчетным сроком функционирования несколько лет.

Информация, передаваемая по радиоканалам, принимается двумя основными (во Франции и в Швеции) и более чем двадцатью региональными станциями приема. Снимки имеют сравнительно высокое разрешение – на них можно распознать отдельные городские здания.

Космическая система SPOT обеспечивает значительную часть мировой потребности в снимках такой детальности, которые используются для обновления топографических карт средних масштабов, для инвентаризации земель, водных и лесных ресурсов.

В результате функционирования в течение четверти века космических систем первого поколения оказалось, что фотографические снимки не выдерживают конкуренции с новыми типами космической видеоинформации. Большие перспективы имеют снимки, оперативно получаемые цифровыми и мультиспектральными сканерами и всепогодными радиолокаторами.

Французская система SPOT (рис. 11.6) начала функционировать в 1986 г. Съёмка выполняется с высоты 800 км двумя сканерами в надир или в сторону от трассы полета спутника, что позволяет чаще производить повторную съёмку.

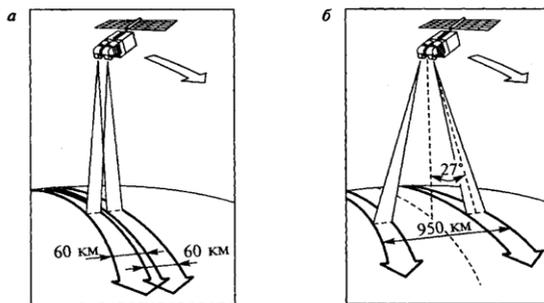


Рис. 11.6. Космическая съёмка земной поверхности со спутника SPOT:
а – в надир; б – с отклонением направления съёмки

Беспорным лидером на рынке материалов дистанционного зондирования являются США, лидирующие по числу космических систем, пространственному и спектральному разрешению снимков. Фундамент

этих успехов был заложен запуском ИСЗ Landsat-1 (1972 г.), разработкой аппаратуры гиперспектральной съемки, обеспечивающей прием до 384 спектральных каналов с относительно высоким разрешением (1997 г.), и запуском первых успешно функционирующих спутников, оснащенных аппаратурой сверхвысокого разрешения ICONAS (1999 г.), QuickBird и OrbView. Круг стран, обладающих собственными космическими системами высокого разрешения, существенно расширился за счет Индии и Израиля, Франции и Канады, Великобритании и Китая, Южной Кореи и Японии, Германии и Италии. По состоянию на 2000 г. из 734 космических аппаратов 398 (54,2 %) были запущены США, 113 – Россией, 24 – Европейским космическим агентством, по 10–12 – Индией, Китаем, Францией и Германией.

В последнее десятилетие четко обозначились основные тенденции развития средств и методов дистанционного зондирования и, в первую очередь, – высокого пространственного разрешения, а имеющийся опыт позволил сформулировать основные требования к ним, в частности:

- высокое пространственное разрешение (не хуже 1 м в панхроматическом диапазоне);
- высокое радиометрическое разрешение (не менее 11 бит на пиксел в панхроматическом диапазоне);
- наличие не менее четырех спектральных каналов, в том числе одного инфракрасного;
- пространственное разрешение ультраспектральной съемки не хуже 4 м;
- возможность выполнения стереоскопической съемки;
- возможность использования полученных материалов для обновления картографических материалов масштаба 1:5000 и мельче и создание топографических карт масштаба 1:10 000 и мельче;
- периодичность получения данных на одну и ту же область не более трех суток на широте 54–56°;
- возможность осуществления мониторинга определенных территорий и районов не менее четырех раз в год;
- ширина полосы захвата не менее 8 км;
- возможность выполнения съемки с отклонением визирной оси от отвесной линии на угол до 30°.

В настоящее время на орбите находится три космических спутника высокого разрешения, полностью удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям: QuickBird, ICONAS и OrbView и до 2007 г. планировался запуск еще нескольких.

Современная система дистанционного зондирования представлена рядом спутников высокого и среднего разрешения.

Sentinel-2 – семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности «Коперник». Спутники предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, также могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий.

Первый спутник, Sentinel-2A, запущен 23 июня 2015 г. Запуск второго спутника, Sentinel-2B, произведен 7 марта 2017 г.

Программа Landsat – наиболее продолжительный проект по созданию спутниковых снимков Земли. Первый из спутников в рамках программы был запущен в 1972 г.; последний, на настоящий момент, Landsat 9 – 27 сентября 2021 г. Оборудование, установленное на спутниках Landsat, сделало миллиарды снимков. Снимки, полученные в США и на станциях получения данных со спутников по всему миру, являются уникальным ресурсом для проведения множества научных исследований в области сельского хозяйства, картографии, геологии, лесоводства, образования. Landsat 7 предоставляет снимки в 8 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 60 м на точку; периодичность сбора данных для всей планеты изначально составляла 16–18 сут.

В Республике Беларусь активно используется система дистанционного зондирования Земли, которая тесно связана с Российской Федерацией (рис. 11.7).

Первые работы над космическим аппаратом в Республике Беларусь начались в 2003 г. в сотрудничестве с российскими ЗАО «ЦНИИ-МАШ-Экспорт» и РКК «Энергия» (спутник «БелКА»). Проект был белорусским, но спутник создан на российских производственных мощностях, произошло это к 2006 г. Запуск произошел 26 июля 2006 г., но он оказался неудачным из-за ракеты-носителя, и аппарат был разрушен.

С запуском спутника БКА 22 июля 2012 г. Беларусь вошла в число космических государств. 1 ноября 2013 г. Генеральная ассамблея ООН приняла Республику Беларусь в Комитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях.

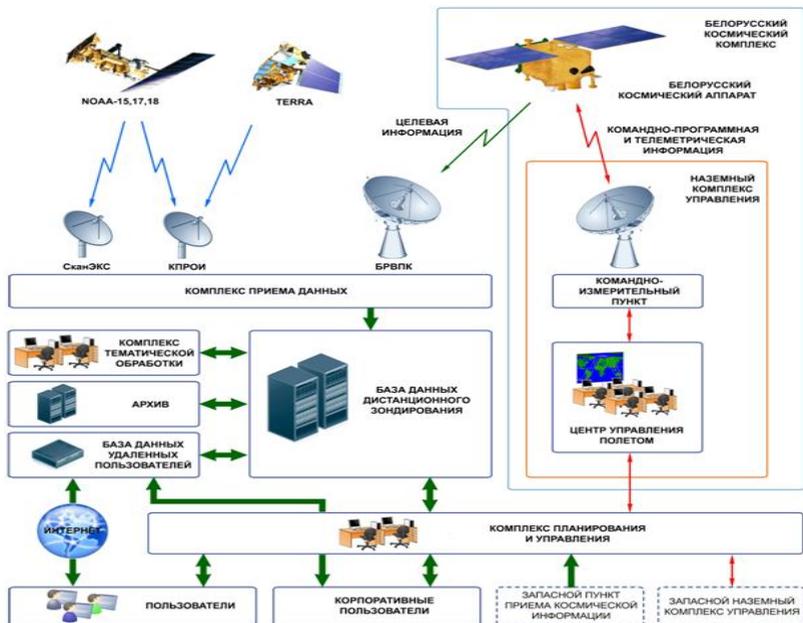


Рис. 11.7. Схема белорусской космической системы дистанционного зондирования (БКСДЗ)

11.7. Предварительная обработка материалов дистанционного зондирования

Цифровые снимки, полученные с помощью съемочных систем, поступают в центры приема информации, где и проходят первичную обработку, содержание которой зависит от типа съемочной системы, качества данных и включает сенсорную, геометрическую и радиометрическую коррекцию. В некоторых случаях отдельные элементы первичной обработки выполняются непосредственно на борту спутника. Практически все поставщики информации заинтересованы в том, чтобы иметь возможность предложить пользователю готовую продукцию. Поэтому общий смысл предварительной обработки заключается в том, чтобы освободить пользователя от необходимости учета тонкостей конструкции съемочной системы, исправления дефектов изображения,

возникающих из-за ее локальных отказов или неисправностей, а также перемещения носителя по орбите.

Геометрическая коррекция изображения выполняется с целью преобразования его к виду, позволяющему выполнять измерительные действия и последующую фотограмметрическую обработку.

К числу таких операций относятся:

- формирование участка местности, называемого сценой, из отдельных строк или матриц панорамы с учетом их перекрытия (сшивка изображения);

- восстановление пропущенных по какой-либо причине строк изображения;

- восстановление отдельных пикселей изображения при случайном выпадении отдельных детекторов;

- преобразование изображения с целью устранения ошибок, вызванных перемещением носителя в процессе формирования строки, изменения углового положения сенсора и др.

Формирование сцены выполняется с учетом конструктивных особенностей съемочной аппаратуры, нередко формирующей перекрывающиеся на заданную величину изображения. Причем это могут быть перекрывающиеся строки пикселей либо прямоугольных матриц, каждая из которых представляет собой несколько линеек.

Восстановление пикселей или целых строк изображения выполняется при их утрате при съемке или передаче изображения и сводится к присвоению пропущенным пикселям яркостей, либо соседних пикселей, либо каким-нибудь образом вычисленных с учетом яркостей окружающих пикселей. Эта операция, конечно, не восстанавливает пропущенную информацию, а лишь облегчает использование изображений.

Преобразования с целью устранения искажений космических снимков выполняются с целью придания изображенным на нем объектам местности правильной формы, искаженной вследствие перемещения спутника во время экспонирования строки, вращения Земли, ее сферичности.

В некоторых случаях в процессе предварительной обработки устраняются искажения, вызванные не только влиянием названных источников, но и кривизны Земли, рефракции, рельефа местности, причем влияние рельефа местности учитывается путем ортотрансформирования цифровых изображений с использованием грубой цифровой

модели рельефа или модели, предоставленной пользователем. Такие преобразования можно отнести к фотограмметрическим.

Радиометрическая коррекция изображения выполняется с целью улучшения их изобразительных свойств и в общем случае включает изменение яркостей пикселей с целью:

- учета параметров калибровки радиометра K_λ и C_λ ;
- устранения оптических последствий влияния аэросферы и воздушной дымки;
- исправления последствий сбоев, неисправностей или неправильной калибровки детекторов и др.

Учет параметров калибровки радиометра выполняется по коэффициентам K_λ и C_λ , поставляемым в дополнительном файле или публикуемым в сети Интернет. Чувствительность датчиков современных сканеров обеспечивает возможность выделения 250 уровней яркости и регистрации их в пределах одного снимка с погрешностью $\pm 1-2\%$; для разных снимков ошибка регистрации достигает $\pm 4-5\%$. Такая точность вполне достаточна для решения большинства задач.

Устранение влияния атмосферы выполняется на основе реальных или априорных данных о ее состоянии на момент получения изображений. Применяемые для этой цели модели атмосферы требуют данных о высоте объекта наблюдения, давлении, температуре, наличии водяных паров, озона, аэрозолей, зенитном угле Солнца, угле обзора датчика. Точное моделирование влияния атмосферы возможно только для узких спектральных зон шириной до 0,01 мкм.

Наиболее простые и менее точные методы устранения влияния атмосферы основаны на использовании некоторых допущений, позволяющих определить реальные яркости объектов путем вычитания из их измеренных значений некоторой априорно устанавливаемой величины. Например, считается, что влияние атмосферной дымки проявляется в завышении регистрируемых значений яркостей. Вследствие этого для некоторых объектов (глубоких и чистых водоемов, глубоких теней и др.) фактически регистрируется не нулевая яркость, а некоторое ее значение. Полагая, что это объясняется влиянием атмосферы, измеренное значение яркости этих объектов вычитается из значений яркостей всех пикселей снимка соответствующей спектральной зоны.

Исправления последствий сбоев радиометрических показателей детекторов проявляются в виде «выпадения» в цифровой записи отдельных строк или полосчатости изображения. В первом случае выполняются замену дефектной строки или ее отдельных фрагментов данными

из соседней строки, а во втором применяют алгоритмы фильтрации. Их сущность заключается в преобразовании яркости каждого пиксела на основе анализа информации в пределах скользящего по изображению окна, представляющего собой матрицу размером $q \times q$ (3×3 , 5×5 и т. п.) пикселов. Окно перемещается от одного пиксела изображения к другому, при этом яркости центральных пикселов каждый раз пересчитываются в соответствии с общей формулой

$$B_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{i=1}^q f_{ij} B'_{ij}}{F}, \quad (11.1)$$

где B_{ij} – преобразованная яркость пиксела;

f_{ij} – численные значения элемента фильтра;

B'_{ij} – яркость пиксела изображения в пределах скользящего окна;

q – размер фильтра;

$F = \sum f_{ij}$ – сумма элементов фильтра, если сумма равна нулю.

В случае, если после наложения фильтра яркость преобразуемого пиксела оказывается меньше нуля, она принимается равной нулю.

В зависимости от конкретной ситуации и желаемого эффекта могут использоваться различные фильтры: средне-арифметический, медианный, адаптивный, модальный, высокочастотный и др.

Метод фильтрации применяется также для увеличения пространственной частоты, представляющей собой максимальную разность между яркостями смежных пикселов или «число изменений значений яркости на единицу расстояния в любой части изображения», что позволяет повысить «читаемость» границ объектов, а вместе с этим – и надежность их выделения и отождествления.

Методы радиометрической коррекции изображений широко применяются не только в процессе предварительной обработки материалов дистанционного зондирования на пунктах их приема, но и при последующем их использовании. Более того, эти методы применяются и при улучшении любых изображений сканеров. По этой причине эти и многие другие методы улучшения изображений являются составной частью программной поддержки многих распространенных ГИС, предусматривающих обработку растра.

Центры приема дистанционного зондирования, выполняющие перечисленные выше и некоторые иные виды обработки изображений, предоставляют пользователям различные виды продукции, различаю-

щиеся ее уровнями и включающими результаты как коррекции изображений, так и их более глубокой, фотограмметрической обработки. При этом каждый из уровней может поставляться в нескольких вариантах, представляющих собой различные комбинации спектральных диапазонов того или иного уровня обработки.

Уровни обработки материалов дистанционного зондирования не стандартизированы, и каждый поставщик устанавливает их самостоятельно. Число таких уровней для различных систем не одинаково, однако минимально выполняется два уровня, включающих геометрическую и радиометрическую коррекцию.

Так, снимки SPOT имеют два уровня обработки (1A и 1B), EROS – три (0A, 1A, 1B), IRS – четыре (1A, 1B, 2A, 2B), ICONAS – четыре и т. д., причем внутри каждого уровня может быть несколько подуровней, характеризующихся видом выполненной коррекции или ее глубиной. Характеристики продукции, получаемой с помощью космических систем, представлены в табл. 11.1.

Варианты продукции, поставляемой пользователям, различаются комбинацией спектральных диапазонов.

Так, компания Digital Globe, поставляющая снимки QuickBird, представляет пользователю следующие виды продукции.

Черно-белая (панхроматическая) продукция представляет собой информацию в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах 450–900 нм и имеет пространственное разрешение от 0,61 м (в надире) до 0,72 м (при отклонении от надира до 250 нм).

Цветная продукция доступна в двух 3-диапазонных цветных вариантах: натуральная цветная (синий, зеленый и красный) или цветная инфракрасная (зеленый, красный, инфракрасный). Геометрическое разрешение такой продукции составляет 0,61 м.

Мультиспектральная продукция поставляется в четырех непрерывающихся диапазонах с радиометрическим разрешением 11 бит и охватывает видимый и ближний инфракрасный спектр. Геометрическое разрешение поставляемой продукции определяется уровнем ее обработки и составляет 2,4–2,9 м.

Таблица 11.1. **Продукция, получаемая с помощью космических систем**

QuickDird		ICONAS		IRS (Индия)	
Продукт	Характеристика	Продукт	Характеристика	Продукт	Характеристика
Basic*	Изображения, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию	Geo: Geo Ortho Geo Kit*	Радиометрическая, геометрическая коррекция, приведение к заданной проекции без учета влияния рельефа	1A, 1B	Изображения, прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекцию
Standard*	Геопривязка и геометрическая коррекция точек по ЦМР низкой точности	Reference Stereo	Стереопара, полученная с одного витка, ориентированная по орбитальным данным (точность в плане 25 м)	2A, 2B	Геопривязка по элементам орбиты или опорным точкам
Ortho	Ортофототрансформирование по представленным ЦМР и опорным точкам	Precision Stereo	Та же стереопара, но ориентированная по предоставленным опорным точкам (точность 0,9 м в плане и 1,8 м по высоте)	–	Ортоизображения, ортофотопланы, ортофотокарты
Standard Ortho Ready*	Аналогично Standart, но без коррекции ЦМР низкой точности	Ortho	Отображение с ошибками, зависящими от точности предоставленных данных (0,9–11 м в плане)	–	Композитные изображения (совмещенные панхроматические и многозональные)

*В состав поставки входят данные точной фотограмметрической обработки.

Синтезированная (Pan-Sharpned) продукция представляет собой комбинацию информации четырех мультиспектральных диапазонов (синий, зеленый, красный, инфракрасный) с информацией панхроматического диапазона. Геометрическое разрешение продукции – 0,61 м.

Основные этапы обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли.

Отображение – представление данных (изображений), полученных непосредственно из их источника в удобном для пользователя наглядном виде без потерь и искажений.

Улучшение – изменение параметров изображения (яркость, контрастность, цветовой баланс, фильтрация помех и т. д.), направленное на улучшение его читаемости и облегчение дальнейшего анализа.

Географическая привязка – идентификация участка земной поверхности, отображенного на изображении, и присвоение каждой точке изображения координат в соответствии с координатами данных точек на местности.

Геометрическое трансформирование – приведение изображения к заданному масштабу и картографической проекции с устранением смещений из-за выполнения съемки с отклонением от надира, рельефа местности, кривизны поверхности Земли и геометрических искажений.

Классификация – распознавание на изображении участков, соответствующих различным категориям объектов, и построение на этой основе нового (тематического) изображения, на котором объекты, принадлежащие к одной категории, отображаются одинаково (одним цветом).

ГИС-анализ – анализ взаимного пространственного положения различных объектов на изображениях и атрибутивной (описательной) информации о них, производимой с целью решения разнообразных прикладных задач.

Подготовка отчета – создание качественных отчетных информационных материалов, содержащих результаты обработки и анализа данных и сопровождающихся необходимыми иллюстрациями, пояснениями и т. д.

11.8. Методы классификации изображений.

Алгоритмы классификации изображений

Автоматизированное дешифрирование (классификация) – наиболее сложный этап компьютерной обработки цифровых снимков. При автоматизированном дешифрировании снимков одним из распространенных является подход на основе спектральных признаков. Он базируется на том, что яркость хроматических объектов (имеющих определенную окраску) в разных спектральных зонах не одинакова и характеризуется коэффициентом спектральной яркости.

Классификация – это компьютерное дешифрирование снимков или процесс автоматизированного подразделения всех пикселей снимка на группы (классы), которые соответствуют разным объектам.

Существуют разные виды классификаций:

- 1) классификация с обучением;
- 2) классификация без обучения.

Классификация с обучением – это процесс, при котором происходит сравнение значения яркости каждого пикселя с эталонами, в результате каждый пиксел относится к наиболее подходящему классу объектов.

Классификацию с обучением можно применять, если:

- заранее известно, какие объекты есть на снимке;
- на снимке имеется небольшое количество (до 30) классов;
- эти классы четко различаются на снимке.

Процесс классификации с обучением включает в себя несколько этапов:

- определение задач обработки снимка и выбор способа классификации;
- выбор эталонных участков;
- проведение классификации и оценка качества результатов.

Алгоритмы классификации изображений.

Непараметрический алгоритм (правило параллелепипедов).

Параметрические алгоритмы (минимального спектрального расстояния, расстояния Махаланобиса, правило максимального правдоподобия, метод спектрального угла, двоичное кодирование и др.).

Рассмотрим более подробно каждый из вышеперечисленных методов классификации с обучением.

1. Метод **параллелепипедов** используют, когда области значения яркости объектов не пересекаются. Границы решения формируют n -мерную классификацию параллелепипедов в пространстве данных изображения. Измерения классификации параллелепипедов основываются на пороге стандартного отклонения от среднего из каждого отобранного класса. Если значение пикселя находится выше низкого порога и ниже высокого порога для всех n классифицируемых групп, то это указывает на принадлежность к этому классу. Области, которые не находятся в пределах ни одного из классов параллелепипеда, определяются как нераспознанные.

2. Классификация методом **минимального расстояния** использует средние векторы каждого класса и вычисляет евклидово расстояние от каждого неизвестного пикселя до среднего вектора для каждого клас-

са. Все пиксели классифицируются к самому близкому классу. Если порог стандартного отклонения или расстояния не определен, тогда некоторые пиксели могут быть нераспознанные.

3. Классификация методом *расстояний Махаланобиса* аналогична методу минимального расстояния, но в нем измеряется не евклидово, а взвешенное по корреляционной матрице значение признаков.

4. Метод *максимального правдоподобия* рассчитывает вероятность, с которой данный пиксел принадлежит к какому-либо классу. Количество и параметры классов задаются пользователем путем указания обучающих выборок. Каждый пиксел относится к тому классу, к которому он может принадлежать с наибольшей вероятностью. При расчете вероятности учитывается яркость пиксела и яркости окружающих его пикселов.

5. Метод *спектрального угла* – физическая спектральная классификация. Алгоритм определяет спектральное подобие между двумя спектрами, вычисляя угол между спектрами и рассматривая их как векторы в пространстве с размерностью, равной числу групп спектров.

Способ спектрального угла дает хорошие результаты, когда нужно провести классификацию для объектов, которые имеют схожие значения яркости во всех спектральных диапазонах. Кроме того, поскольку этот способ не учитывает значения яркости пикселов, на результаты не влияют и эффекты засветки снимков.

6. Метод *расхождения спектральной информации* – спектральный метод классификации, который использует меру расхождения спектральных яркостей, пикселов. Чем меньше расхождение, тем более вероятно пиксели подобны. Пиксели с расхождением, больше чем указанный максимальный порог, остаются нераспознанными.

7. Классификация по методу *двоичного кодирования* применяется в случае, если на снимке все пиксели нужно разделить на два класса, например, вода – суша. При двоичном кодировании всем пикселям присваивается одно из двух значений (0 или 1) на основе сравнения со значениями эталонных выборок.

Классификации без обучения – это процесс, при котором распределение пикселов изображения происходит автоматически, на основе анализа статистического распределения яркости пикселов.

Следует отметить, что перед началом классификации неизвестно, сколько и каких объектов есть на снимке, а после проведения классификации необходимо дешифрирование полученных классов, чтобы определить, каким объектам они соответствуют.

Классификацию без обучения применяют в случае, если:

а) заранее неизвестно, какие объекты есть на снимке;

б) на снимке большое количество объектов (более 30) со сложными границами;

в) также можно применять как предварительный этап перед классификацией с обучением.

Наиболее распространенными методами классификации без обучения являются ISODATA и K-средних.

Классификация без учителя используется для того, чтобы сгруппировать пиксели в наборе данных, основанном на статистике, только без любых определенных пользователями учебных классов. Методами классификации без обучения являются ISODATA и K-mean.

Метод **ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)** – реализует итеративный самоорганизующийся метод анализа данных. Данный метод основан на кластерном анализе с использованием метода последовательных приближений, в котором рассматриваются яркости пикселей, как векторов в пространстве спектральных признаков. Для каждой спектральной зоны идет расчет статистических параметров распределения яркостей. Все пиксели делятся на некоторое число равных диапазонов, внутри каждого из которых находится среднее значение. Для каждого пикселя определенного диапазона рассчитывается спектральное расстояние до среднего значения. Все пиксели, расстояние между которыми наименьшее, определяются в один кластер. Так проходит первая итерация.

При второй итерации и последующих идет расчет уже реальных средних значений для каждого кластера. Каждая новая итерация уточняет границы будущих классов. На каждой итерации переопределяются критерии созданных классов, при этом происходит постепенное слияние образцов, созданных на основе спектральных расстояний.

Метод **K-mean (K-средних)** выполняется методом итераций. На первой итерации находятся центры кластеров (задаются случайным образом), рассчитываются расстояния от центров кластеров до всех объектов, используя евклидово расстояние. Затем объекты присоединяются к тем кластерным центрам, к которым они ближе. Далее переисчисляются новые координаты центров для следующей итерации. Вычисления продолжают до тех пор, пока центры кластеров не перестанут изменяться. Особенностью данного метода является необходимость изначально определить количество классов.

Настоящие методы являются алгоритмами обучения с поддержкой без учителя.

Им присущи следующие недостатки:

- не гарантируется достижение глобального минимума суммарного квадратичного отклонения, а только одного из локальных минимумов;

- результат зависит от выбора исходных центров кластеров, их оптимальный выбор неизвестен;
- число кластеров надо знать заранее.

11.9. Использование программного комплекса ENVI для обработки данных дистанционного зондирования

Программный комплекс ENVI – это профессиональное решение для визуализации, исследования, анализа и представления всех видов данных дистанционного зондирования, который выполняет отображение 2D и 3D-изображений, привязку и ортотрансформирование, классификацию, создание мозаик. Есть возможность получения необходимой информации со снимка, модификации пользовательского интерфейса, а также ряд дополнительных возможностей.

В ПК ENVI присутствуют инструменты автоматической регистрации:

- автоматическое определение точек привязки (tie points) между изображениями, составляющими стереопару;
- автоматическая привязка изображений, полученных с разных сенсоров в разное время с помощью функции layer stacking;
- функции (change detection), ускоряющие регистрацию мультиспектральных изображений.

При выполнении ортотрансформирования применяются:

- коэффициенты RPC, которые поставляются вместе со снимком (QuickBird, Ikonos) или рассчитываются (SPOT, ASTER);
- цифровая модель рельефа (ЦМР);
- наземные точки привязки (GCP);
- коэффициенты RPC, которые дают возможность ортотрансформирования изображений в псевдопроекциях для любых сенсоров.

11.10. Использование материалов дистанционного зондирования для целей кадастра и решения землеустроительных задач

Одним из видов работ, производимых предприятиями Белгипрозема, является создание земельно-информационных систем (далее – ЗИС), содержащих пространственные и атрибутивные данные землеустроительного, земельно-кадастрового и топографического содержания. Система предназначена для информационного обеспечения и автоматизации землеустроительной деятельности и содержит информа-

цию о современном, перспективном состоянии и использовании земельных ресурсов республики. Она имеет трехуровневую структуру и включает:

- локальные земельно-информационные системы (в границах административных районов или крупных населенных пунктов);
- региональные земельно-информационные системы (в границах областей);
- центральную земельно-информационную систему (в границах Республики Беларусь).

Эксплуатацию локальных ЗИС выполняют отделы (управления) по землеустройству совместно с РУП «Проектный институт Белгипрозем»; региональный ЗИС – областные дочерние РУП «Проектный институт Белгипрозем».

Земельно-информационные системы создаются по материалам аэрофотосъемки на территории районов с точностью топографических карт масштаба 1:10 000 и территории крупных населенных пунктов с точностью топографических карт масштаба 1:2000.

Работы по созданию ЗИС включают следующие основные мероприятия:

- аэрофотосъемку;
- полевую плано-высотную привязку снимков;
- фотограмметрическую обработку цифровых снимков;
- создание цифровой модели рельефа с использованием данных топографических карт или в стереорежиме (при создании ЗИС населенных пунктов);
- создание ортофотопланов;
- создание цифровой модели местности путем стереовекторизации снимков, моновекторизации ортоизображений;
- сбор информации о почвах и мелиоративном состоянии земель;
- создание, оцифровку зон ограничений в использовании земель;
- сбор информации (создание слоя) о земельных участках.

ЗИС содержит ряд слоев, в которых представлена информация о земельных участках, их границах и административно-территориальной принадлежности, землевладельцах и землепользователях, зонах ограничений по использованию земель, распределении их по категориям и видам прав на землю, о коммуникациях, почвах, мелиоративном состоянии земель, почвах, дорогах, улицах, каналах и др.

Информация ЗИС используется при изготовлении землеустроительной документации:

- схем землеустройства административно-территориальных и территориальных единиц;
- карт и планов землепользований;
- материалов предварительного согласования места размещения объектов и установления (восстановления) границ земельных участков;
- подготовке государственной статистической отчетности о наличии и распределении земельного фонда административно-территориальных и территориальных единиц;
- составлении проектов межхозяйственного и внутрихозяйственного землеустройства, рекультивации нарушенных земель, защите почв от эрозии и других проектов, связанных с использованием и охраной земель и др.

Сегодня данные дистанционного зондирования Земли являются оперативным источником пространственной информации, которые позволяют не только обновлять планово-картографическую информацию, но и создавать новые картографические изображения в кратчайшие сроки.

Дистанционное зондирование наиболее часто применяется в сельском хозяйстве, геодезии, картографировании, мониторинге поверхности земли и океана, а также слоев атмосферы.

Сельское хозяйство.

С помощью спутников можно с определенной цикличностью получать изображения отдельных полей, регионов и округов. Пользователи могут получать ценную информацию о состоянии угодий, в том числе идентификацию культур, определение посевных площадей сельскохозяйственных культур и состояние урожая. Спутниковые данные используются для точного управления и мониторинга результатов ведения сельского хозяйства на различных уровнях. Эти данные могут быть использованы для оптимизации фермерского хозяйства и пространственно-ориентированного управления техническими операциями. Изображения могут помочь определить местоположение урожая и степень истощения земель, а затем могут быть использованы для разработки и реализации плана мелиоративных мероприятий, для локальной оптимизации использования сельскохозяйственных химикатов. Основными сельскохозяйственными приложениями дистанционного зондирования являются следующие:

- растительность;
- классификация типа культур;

- оценка состояния посевов (мониторинг сельскохозяйственных культур, оценка ущерба);
- оценка урожайности;
- почва;
- отображение характеристик почвы;
- отображение типа почвы;
- эрозия почвы;
- влажность почвы;
- отображение практики обработки почвы.

Мониторинг лесного покрова.

Дистанционное зондирование также применяется для мониторинга лесного покрова и идентификации видов. Полученные таким способом карты могут покрывать большую площадь, одновременно отображая детальные измерения и характеристики территории (тип деревьев, высота, плотность). Используя данные дистанционного зондирования, возможно определить и разграничить различные типы леса, что было бы трудно достичь, используя традиционные методы на поверхности земли. Данные доступны в различных масштабах и разрешениях, что вполне соответствует локальным или региональным требованиям. Требования к детальности отображения местности зависят от масштаба исследования. Для отображения изменений в лесном покрове (текстуры, плотности листьев) применяются:

- мультиспектральные изображения: для точной идентификации видов необходимы данные с очень высоким разрешением;
- многоцветные снимки одной территории, используются для получения информации о сезонных изменениях различных видов;
- стереофотографии – для разграничения видов деревьев, оценки плотности и высоты деревьев. Стереофотографии предоставляют уникальный вид на лесной покров, доступный только через технологии дистанционного зондирования.

Радары широко применяются в зоне влажных тропиков благодаря их свойству получать изображения при любых погодных условиях.

Лидары позволяют получать 3-мерную структуру леса, обнаруживать изменения высоты поверхности земли и объектов на ней. Данные лидара помогают оценить высоту деревьев, области крон деревьев и количество деревьев на единице площади.

Мониторинг поверхности.

Мониторинг поверхности является одним из наиболее важных и типичных применений дистанционного зондирования. Полученные

данные используются при определении физического состояния поверхности земли, например, леса, пастбища, дорожного покрытия и т. д., в том числе результатов деятельности человека, таких как ландшафт в промышленных и жилых зонах, состояние сельскохозяйственных территорий и т. п. Первоначально должна быть установлена система классификации земельного покрова, которая обычно включает в себя уровни и классы земель. Уровни и классы должны быть разработаны с учетом цели использования (на национальном, региональном или местном уровне), пространственного и спектрального разрешения данных дистанционного зондирования, запроса пользователя и т. д.

Обнаружение изменения состояния поверхности земли необходимо для обновления карт растительного покрова и рационализации использования природных ресурсов. Изменения, как правило, обнаруживаются при сравнении нескольких изображений, содержащих несколько уровней данных, а также, в некоторых случаях, при сравнении старых карт и обновленных изображений дистанционного зондирования. При обновлении выявляют *сезонные изменения* (сельскохозяйственные угодья и лиственные леса изменяются посезонно) и *годовые изменения* (изменения поверхности земли или территории землепользования, например, районы вырубki леса или разрастания городов).

Информация о поверхности земли и изменениях характера растительного покрова необходима для определения и реализации политики защиты окружающей среды и может быть использована совместно с другими данными для проведения сложных расчетов (например, определения рисков эрозии).

Геодезия.

Сбор геодезических данных с воздуха впервые был использован для обнаружения подводных лодок и получения гравитационных данных, используемых для построения военных карт. Эти данные являются собой уровни мгновенных возмущений гравитационного поля Земли, которые могут быть использованы для определения изменений в распределении масс Земли, что в свою очередь может быть востребовано для проведения различных геологических исследований.

Для создания точных карт на основе данных дистанционного зондирования необходима трансформация, устраняющая геометрические искажения. Снимок поверхности Земли аппаратом, направленным точно вниз, содержит неискаженную картинку только в самом центре. При смещении к краям расстояния между точками на снимке и соответствующие расстояния на Земле все более различаются. Коррекция

таких искажений производится в процессе фотограмметрии. С начала 1990-х большинство коммерческих спутниковых изображений продается уже скорректированными.

Кроме того, может требоваться радиометрическая или атмосферная коррекция. Радиометрическая коррекция преобразует дискретные уровни сигнала, например от 0 до 255, в их истинные физические значения. Атмосферная коррекция устраняет спектральные искажения, внесенные наличием атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров, А. С. Средства получения цифровых снимков и методы их фотограмметрической обработки / А. С. Назаров. – Минск: Учеб. центр повышения квалификации и переподготовки кадров землеустроительной и картографо-геодезической службы, 2009. – 263 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ВВЕДЕНИЕ В ДИСЦИПЛИНУ «ФОТОГРАММЕТРИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ»	4
1.1. Понятие о дисциплине «Фотограмметрия и дистанционное зондирование Земли». Задача курса, связь с другими дисциплинами	4
1.2. Физическая сущность дистанционного зондирования. Активное зондирование. Пассивное зондирование	5
1.3. Исторический обзор развития аэрофотогеодезических методов дистанционного зондирования	7
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ЗЕМЛИ	11
2.1. Понятие об аэро- и космических съемках Земли. Классификация аэрофотосъемок	11
2.2. Схема получения видеoinформации при аэро- и космических съемках	12
2.3. Электромагнитное излучение, используемое при аэро- и космических съемках земной поверхности	13
2.4. Роль атмосферы при проведении аэро- и космических съемок	14
2.5. Оптические свойства элементов ландшафта и их использование в съёмочном процессе	16
2.6. Аэро- и космические съёмочные системы. Классификация съёмочных систем	19
2.7. Фотографические съёмочные системы и их характеристики. Кадровые топографические аэрофотоаппараты. Аэрофотоаппараты, их устройству и типы	22
2.8. Характеристики фотографического объектива	26
2.9. Специальное аэросъёмочное оборудование: радиовысотомер, статоскоп, гиростабилизирующая установка	32
2.10. Цифровые съёмочные системы (ЦСС) и их классификация	34
3. ПРОИЗВОДСТВО АЭРОФОТОСЪЕМКИ	45
3.1. Аэрофотосъемка. Носители съёмочной аппаратуры	45
3.2. Технические требования к топографической аэрофотосъемке: высота фотографирования, продольное и поперечное перекрытие снимков, рабочая площадь снимка	48
3.3. Составление проекта летно-съёмочных работ	55
4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЭРОФОТОСНИМКА. ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОГО СНИМКА	59
4.1. Центральная проекция как геометрическая основа аэрофотоснимка. Основные элементы центральной проекции	59
4.2. Главная точка аэрофотоснимка, точка надира, точка нулевых искажений. Их положение в проекции и на аэрофотоснимке	64
4.3. Перспектива точки и прямой на пространственном чертеже	65
4.4. Теорема Шаля. Понятие об эпюрах	70
4.5. Перспектива сетки квадратов на эпюре	72
4.6. Системы координат, применяемые в фотограмметрии	73
4.7. Элементы внутреннего и внешнего ориентирования снимка	76
4.8. Связь координат соответствующих точек наклонного снимка и местности	84
4.9. Зависимость между координатами точек наклонного и горизонтального снимков	87
4.10. Масштаб изображения на аэрофотоснимке	89

4.11. Главный, средний и частный масштабы аэрофотоснимка	93
4.12. Смещение изображения контурной точки на аэрофотоснимке из-за влияния рельефа местности	95
4.13. Смещение контурных точек на снимке за угол наклона	97
4.14. Искажение изображения площадей на наклонном снимке	100
5. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОСХЕМ И ФОТОПЛАНОВ	103
5.1. Трансформирование снимков	103
5.1.1. Понятие о трансформировании снимков. Виды трансформирования. Аналитическое трансформирование	103
5.1.2. Устройство фототрансформатора	105
5.1.3. Оптические и геометрические условия трансформирования	107
5.1.4. Трансформирование снимков на фототрансформаторе: трансформирование по опорным точкам, учет рельефа при фототрансформировании	111
5.2. Фотопланы и фотосхемы	119
5.2.1. Понятие о фотосхемах и фотопланах	119
5.2.2. Способы изготовления фотосхем	121
5.2.3. Технология изготовления фотопланов	124
5.2.4. Контроль качества проявления фотосхем и фотопланов	127
6. ПЛАНОВО-ВЫСОТНАЯ ПРИВЯЗКА АЭРОФОТОСНИМКОВ	129
6.1. Сущность планово-высотной привязки аэрофотоснимков	129
6.2. Схемы размещения опорных точек	131
6.3. Опознавание и оформление точек на снимках	133
6.4. Способы планово-высотной привязки снимков	135
7. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ АЭРО- И КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК	140
7.1. Теория дешифрирования аэро- и космических снимков	140
7.1.1. Дешифрирование снимков. Классификация дешифрирования	142
7.1.2. Визуальный метод дешифрирования. Прямые и косвенные дешифровочные признаки	143
7.1.3. Генерализация информации при дешифрировании	155
7.1.4. Материалы съемки, используемые при визуальном дешифрировании. Линейные и стереоскопические измерения при визуальном дешифрировании	160
7.1.5. Понятие о машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании. Преобразование исходных изображений при машинно-визуальном и автоматизированном дешифрировании	162
7.1.6. Дешифровочные признаки, используемые при автоматизированном дешифрировании	167
7.2. Дешифрирование аэрофотоснимков для составления кадастровых планов и карт	170
7.2.1. Задачи, содержание и особенности дешифрирования для составления кадастровых планов и карт	170
7.2.2. Объекты дешифрирования и их признаки	171
7.2.3. Требования к качеству дешифрирования. Нормы генерализации информации	174
7.2.4. Дешифрирование снимков для целей кадастра. Подготовительные работы. Технология работы при дешифрировании	177
8. ТЕОРИЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ ПАРЫ СНИМКОВ	180
8.1. Стереоскопическое наблюдение снимков	180
8.1.1. Монокулярное, бинокулярное и стереоскопическое зрение	180

8.1.2. Условия возникновения стереоэффекта	183
8.1.3. Способы стереоскопических наблюдений	185
8.1.4. Стереоскопические наблюдения цифровых изображений. Жидкокристаллические стереомониторы	188
8.1.5. Способы измерения снимков и стереомодели	192
8.1.6. Поперечный и продольный параллаксы точек. Принципиальная схема стереокомпаратора. Порядок работы	194
8.2. Теория пары снимков	197
8.2.1. Геометрическая модель местности (связка, базисная плоскость)	197
8.2.2. Элементы взаимного ориентирования снимков	200
8.2.3. Внешнее (геодезическое) ориентирование модели	202
9. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИЯ	205
9.1. Сущность пространственной фототриангуляции. Классификация методов. Понятие об аналоговой фототриангуляции	205
9.2. Аналитическая маршрутная фототриангуляция	208
9.3. Способ независимых моделей. Внутреннее ориентирование снимков	208
9.4. Уравнивание связок проектирующих лучей	212
9.5. Точность триангуляционных сетей	214
9.6. Программы построения и уравнивания сетей фототриангуляции	217
10. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СНИМКОВ	220
10.1. Основные характеристики цифрового изображения. Фотометрические и геометрические преобразования	220
10.2. Цифровые фотограмметрические системы (ЦФС) и их основные характеристики	230
10.3. Требования к ЦФС. Преобразование цифровых изображений	232
10.4. Цифровая фотограмметрическая система «Photomod» (структура, основные модули)	234
10.5. Фотограмметрическая обработка цифровых изображений (внутреннее ориентирование, взаимное ориентирование, внешнее ориентирование)	236
10.6. Построение и уравнивание фототриангуляционной сети	239
10.7. Цифровые модели рельефа (ЦМР). Способы представления цифровых моделей рельефа	240
10.8. Принцип цифрового трансформирования	248
10.9. Построение ортофотоизображения в ЦФС «Photomod»	253
11. МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ИХ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	257
11.1. Технические средства дистанционного зондирования	257
11.2. Влияние параметров орбит и атмосферы на качественные характеристики материалов дистанционного зондирования	260
11.3. Свойства космических снимков и их классификация по отдельным показателям	262
11.4. Цифровые съемочные системы (ЦСС)	263
11.5. Основные типы космических снимков	267
11.6. Космические системы дистанционного зондирования	270
11.7. Предварительная обработка материалов дистанционного зондирования	274
11.8. Методы классификации изображений. Алгоритмы классификации изображений	280
11.9. Использование программного комплекса ENVI для обработки данных дистанционного зондирования	284
11.10. Использование материалов дистанционного зондирования для целей кадастра и решения землеустроительных задач	284