

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет  
имени А.А. Ежевского»

Кафедра Землеустройства, кадастров и сельскохозяйственной мелиорации

*О.В. Глухов*

## **Фотограмметрия и дистанционное зондирование**

Учебно-методическое пособие и контрольная работа для студентов заочной  
формы обучения по направлению подготовки  
21.03.02 – Землеустройство и кадастры

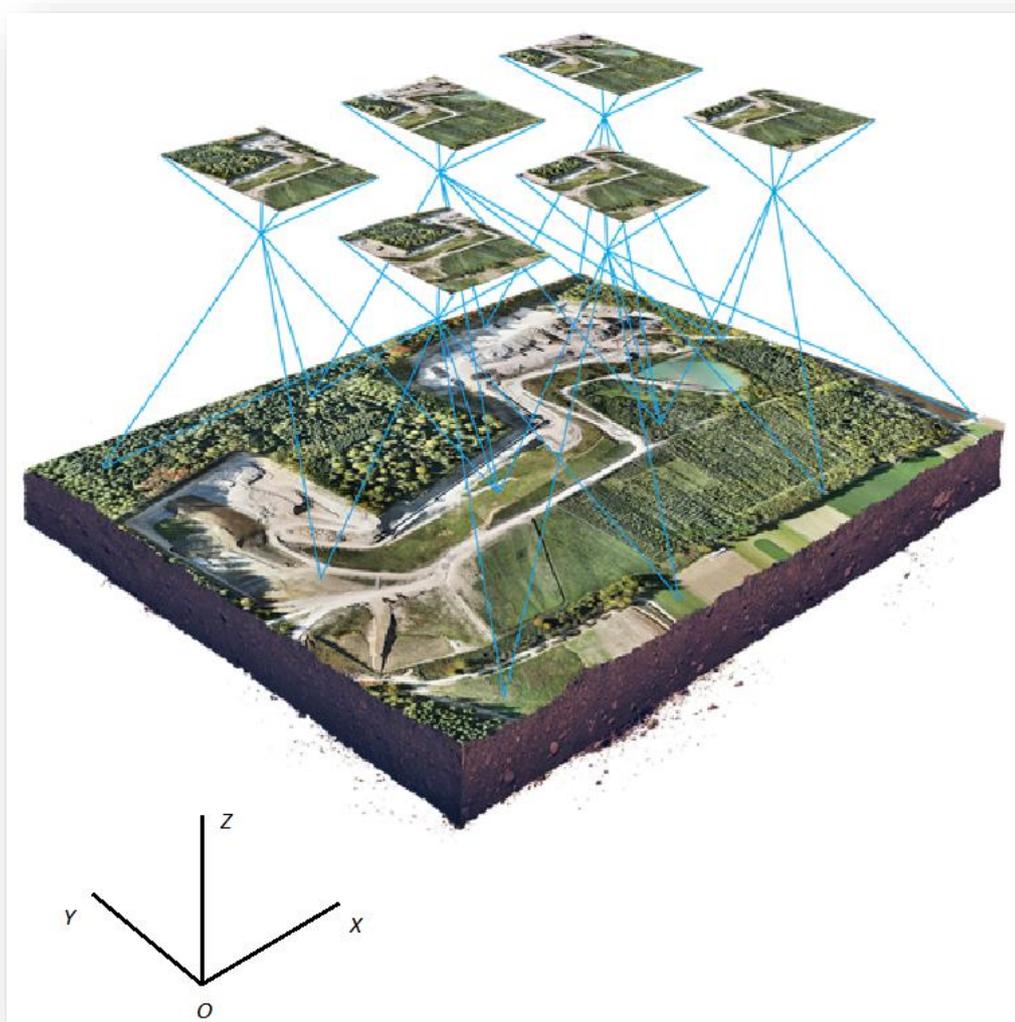
**Молодежный 2020**



## 1. Стереофотограмметрический метод определения координат и высот точек объектов на земной поверхности

Основная цель аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ – создание карт и планов земной поверхности для использования в различных областях человеческой деятельности, в том числе – в сфере землеустройства и для ведения кадастров.

Стереофотограмметрический метод позволяет по двум (и более) снимкам определять координаты и высоты точек сфотографированного объекта/земной поверхности в пространственной системе координат  $OXYZ$ . Основное условие - аэрофотоснимки должны быть сняты фотоаппаратом не из одной точки пространства, а находиться на определенных расстояниях друг от друга (см. рис.1):



*Рис.1 – Схема аэрофотосъемки участка местности с целью создания картографической продукции*

Используя современные технологии цифровой аэрофотосъемки и методы фотограмметрической обработки снимков, основанные на компьютерных алгоритмах, сегодня создаются такие виды картографической продукции, как цифровые модели рельефа и местности, цифровые ортофотопланы, цифровые

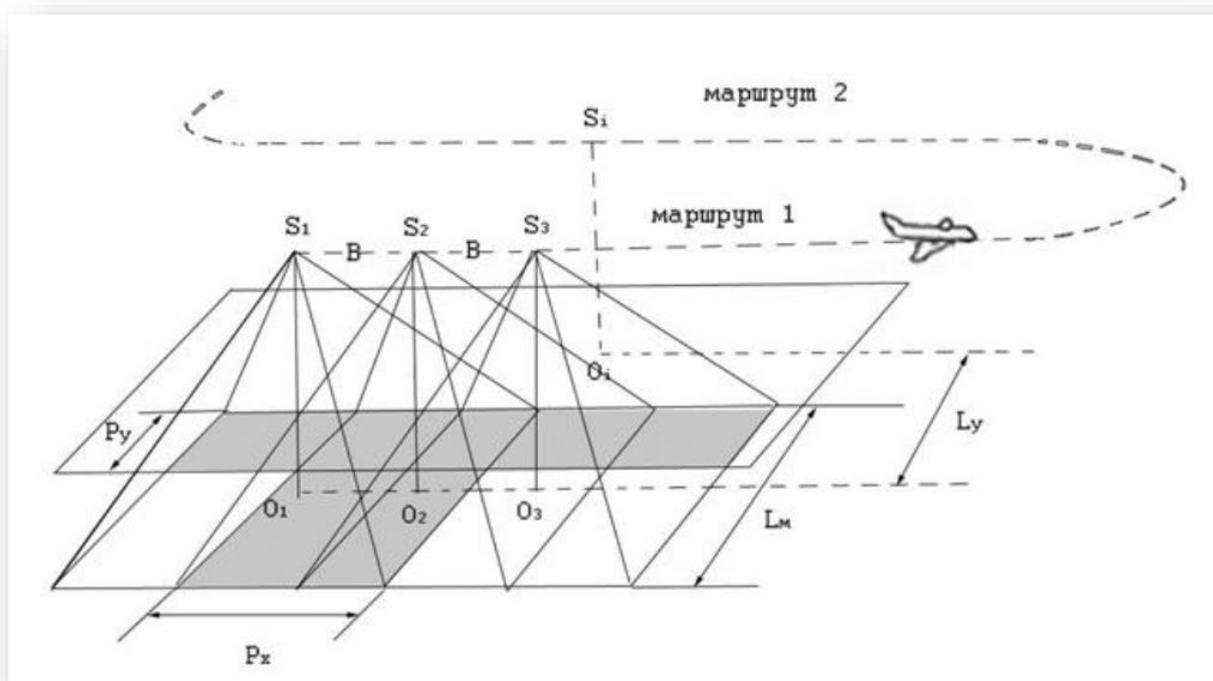
топографические планы и карты, 3D- текстурированные пространственные модели городов и инженерных объектов.

Для аэрофотосъемки используются различные воздушные средства – как пилотируемые, так и беспилотные: самолеты, вертолеты, аэростаты, мультикоптеры и пр.

В настоящее время при аэрофотосъемке применяются абсолютно различные по качеству фотоаппараты – от очень дорогих, специализированных исключительно под аэрофотосъемку, до обыкновенных «мыльниц» и веб-камер, поставляемых продавцами на дешевых беспилотных летательных средствах.

Кроме фотоаппарата, на борту воздушного судна может быть дополнительно установлен спутниковый геодезический приемник, а также инерциальная навигационная система. Благодаря этим устройствам, можно рассчитать траекторию полета, координаты и высоты центров фотографирования, а также углы наклона фотоаппарата во время фотографирования местности. Знание и использование этих параметров существенно упрощают последующую фотограмметрическую обработку.

Рассмотрим основные параметры аэрофотосъемки (см. рис.2):



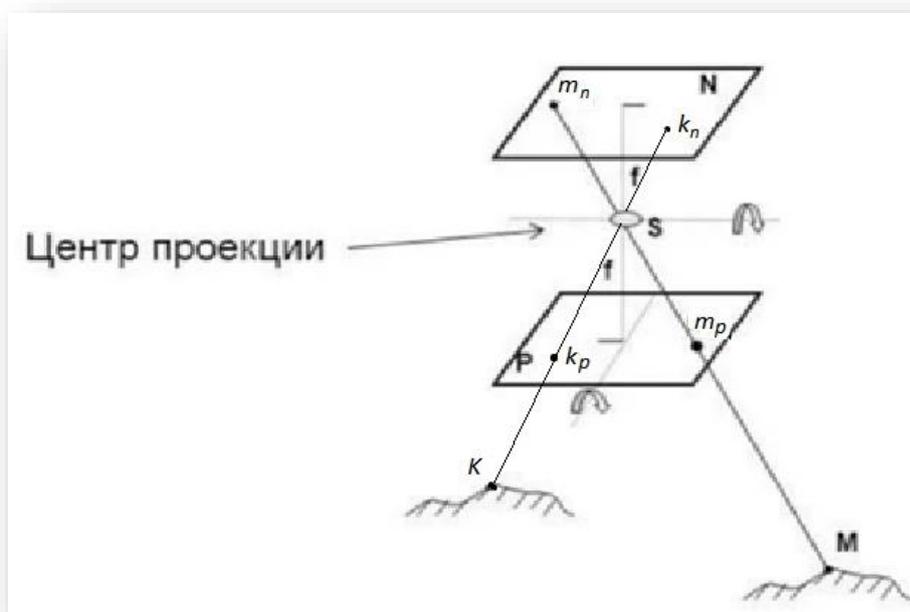
*Рис.2 – Основные параметры аэрофотосъемки*

При аэрофотосъемке участка земной поверхности воздушное судно, выполняющее съемку, летит по заранее запланированным маршрутам на строго установленной высоте фотографирования  $H$  (на схеме  $H$  – это расстояние между точками  $O_i$  и  $S_i$ ). Кроме высоты фотографирования и траектории полета, требуется соблюдение расчетного времени между экспозициями снимков (между центрами фотографирования снимков) - для равномерного покрытия участка местности аэрофотоснимками с требуемыми значениями зон продольного  $P_x$  и поперечного  $P_y$  перекрытия снимков.

Обычно  $P_x$  и  $P_y$  принимают равными 60% и 40% соответственно. Расстояние между центрами фотографирования (между точками  $S_1$  и  $S_2$ ,  $S_2$  и  $S_3$  и т.д.) называется базисом фотографирования  $B$ . Величина базиса фотографирования зависит от размера кадра снимка в направлении полета, продольного перекрытия и высоты фотографирования.

Ширина одиночного маршрута  $L_M$  пропорциональна размеру стороны аэрофотоснимка (светочувствительной матрицы аэрофотоаппарата), ориентированной поперек съемочного маршрута. Расстояние между маршрутами  $L_y$  зависит от ширины одиночного маршрута  $L_M$  и поперечного перекрытия снимков  $P_y$  между маршрутами.

Теперь рассмотрим одиночный аэрофотоснимок и принципы формирования изображения точек местности на позитивном и негативном снимках:

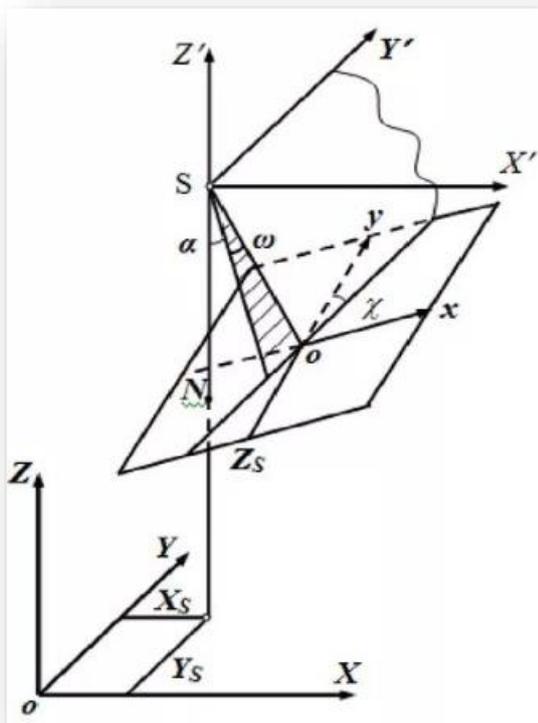


*Рис.3 – Изображение точки местности на позитивном и негативном снимках*

Изображение участка местности формируется на аэрофотоснимке через систему линз объектива аэрофотоаппарата в виде растровой «картинки». При этом все проектирующие лучи от точек земной поверхности проходят через одну точку – узловую точку объектива  $S$  (или иначе – через центр проекции; или иначе – через центр фотографирования) и попадают на светочувствительную матрицу, состоящую из множества микроскопических ячеек (пикселей), каждая из которых способна «запомнить» поступивший на неё свет. В результате кратковременного открытия затвора фотоаппарата (экспозиции) светочувствительная матрица формирует общее растровое изображение – аэрофотоснимок. Этот исходный фотоснимок  $N$  является негативным, т.к. первоначально полученное изображение является перевернутым относительно того позитивного снимка  $P$ , что мы обычно видим при фотографировании. Мы не обращаем на это внимания, потому что «компьютер» цифрового фотоаппарата сохраняет и показывает нам сразу

позитивный снимок. В фотограмметрии так же принято на схемах показывать позитивные аэрофотоснимки, как будто снимки расположены до центра проецирования  $S$ , а не наоборот (см. рис. 4).

Координаты центра фотографирования (центра проекции) аэрофотоснимка  $X_s, Y_s, Z_s$  и углы наклона снимка  $\alpha, \omega, \chi$  в пространственной системе координат и высот  $OXYZ$  называют соответственно линейными и угловыми элементами внешнего ориентирования снимка:



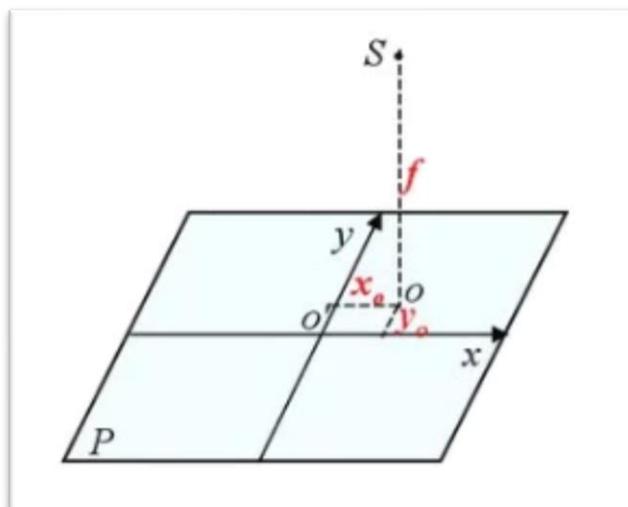
*Рис.4 – Элементы внешнего ориентирования аэрофотоснимка*

Измерение координат точек местности, изобразившихся на аэрофотоснимках, производится в плоской системе координат снимка  $oxу$ . Точка  $o$  называется главной точкой снимка, т.к. через неё проходит главный оптический луч  $So$  – луч, проходящий из узловой точки объектива  $S$  перпендикулярно светочувствительной матрице цифрового фотоаппарата. Расстояние от центра фотографирования  $S$  до главной точки снимка  $o$  называется **фокусным расстоянием объектива** фотоаппарата  $f$ .

Современные цифровые аэрофотоаппараты обычно имеют в комплекте несколько сменных объективов с различными фокусными расстояниями.

На схеме (рис.4) показана плоская система координат снимка  $oxу$ , где главная точка снимка  $o$  совпадает с центром светочувствительной матрицы цифрового фотоаппарата. В реальности изготовить идеальную систему **объектив - светочувствительная матрица** невозможно, главная точка и физический центр матрицы никогда не совпадают в одной точке (см. рис.5). Учет этого смещения производится вводом дополнительных параметров – координат главной точки снимка  $x_o$  и  $y_o$  в системе координат снимка  $o'xу$ . Три параметра – фокусное расстояние  $f$  и координаты главной точки снимка  $x_o$  и

$u_0$  называют в фотограмметрии *элементами внутреннего ориентирования снимка*.

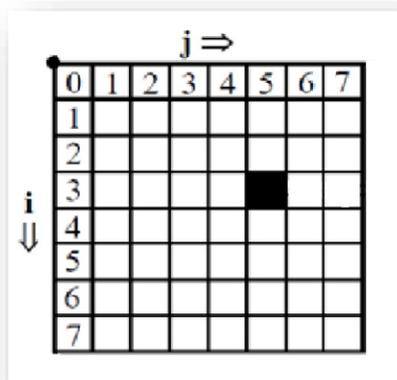


*Рис.5 – Элементы внутреннего ориентирования аэрофотоснимка (фокусное расстояние  $f$  и координаты главной точки снимка  $x_0$  и  $y_0$ )*

Изображение цифрового снимка, полученное в результате фиксации светочувствительной матрицей отраженного от земной поверхности света, представляют в виде прямоугольной матрицы из элементарных ячеек - **пикселей**. Каждая ячейка светочувствительной матрицы фотоаппарата фиксирует интенсивность и цвет попавшего на неё света и передает оцифрованный код в «компьютер» фотокамеры. Миллионы таких ячеек (пикселей) формируют общее цифровое изображение фотоснимка.

Каждый пиксель имеет информацию только об одном цвете (правильнее сказать – оттенке цвета). В модели кодировки RGB на каждый пиксель выделяется 24 бита информации. Таким образом, эта система кодировки позволяет отобразить в одном пикселе один из  $2^{24}$  (~16 млн.) оттенков цвета.

Положение пикселя на цифровом снимке определяется номером столбца  $j$  и номером строки  $i$  светочувствительной матрицы (см. рис. 6).



*Рис.6 – Система нумерации пикселей на цифровом снимке (показан только верхний левый угол снимка)*

Первая верхняя строка и первый левый столбец матрицы имеют номера 0, 0. Поэтому центр какого-либо пикселя на цифровом снимке от левого верхнего угла светочувствительной матрицы в метрической системе измерений будет находиться на расстоянии

$$dx_j = (j + 0.5) \times \Delta_{pix}, \quad (1)$$

$$dy_i = (i + 0.5) \times \Delta_{pix},$$

где  $j$  и  $i$  – номер столбца и номер строки матрицы снимка;  
 $\Delta_{pix}$  – физический размер пикселя светочувствительной матрицы, в микрометрах (1000 мкм = 1 мм или иначе 1 мкм = 0.001 мм).

Например, если  $\Delta_{pix} = 6$  мкм, то для закрашенного пикселя ( $j = 5, i = 3$ )  $dx_5 = (5+0.5) \times 6 = 33$  мкм = 0.033 мм,  $dy_3 = (3+0.5) \times 6 = 21$  мкм = 0.021 мм.

Для перехода к системе координат снимка  $o'xy$  (см.рис.5) необходимо сделать дополнительный пересчет на центр светочувствительной матрицы:

$$x'_j = -\left(\frac{l_x}{2} \times \Delta_{pix} - dx_j\right) \quad (2)$$

$$y'_i = \frac{l_y}{2} \times \Delta_{pix} - dy_i$$

где  $l_x$  и  $l_y$  – размер цифрового аэрофотоснимка по направлению съемки и в поперечном направлении, в пикселях.

В продолжение примера, когда  $dx_5 = 33$  мкм,  $dy_3 = 21$  мкм, если принять, например, что  $l_x = 6708$  пикселей,  $l_y = 8956$  пикселей (см. параметры аэрофотокамеры RCD 30, таблица 1), измеренные координаты точки  $ij$  в системе координат цифрового аэрофотоснимка будут равны:

$$x'_5 = -\left(\frac{6708}{2} \times 6 - 33\right) = -20091 \text{ мкм} = -20.091 \text{ мм}$$

$$y'_3 = \frac{8956}{2} \times 6 - 21 = 26847 \text{ мкм} = 26.847 \text{ мм}.$$

Размеры прямоугольной светочувствительной матрицы аэрофотокамеры RCD 30, выраженные в микрометрах и миллиметрах по направлению съемки и в поперечном направлении, при размере 1 пикселя светочувствительной матрицы  $\Delta_{pix} = 6$  мкм, составляют:

$$lx_{\text{мм}} = lx \times \Delta_{pix} = 6708 \times 6 = 40248 \text{ мкм} = 40.248 \text{ мм}$$

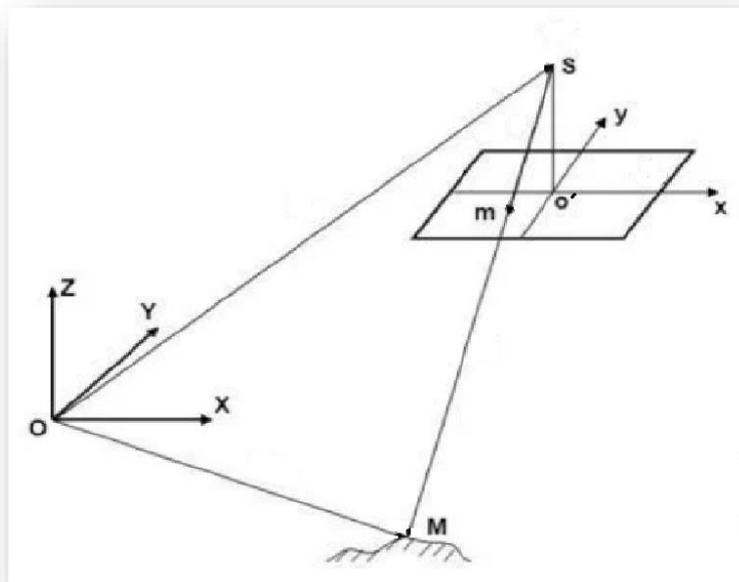
$$ly_{\text{мм}} = ly \times \Delta_{pix} = 8956 \times 6 = 53736 \text{ мкм} = 53.736 \text{ мм}.$$

Координаты главной точки цифрового аэрофотоснимка и фокусное расстояние объектива фотокамеры обычно так же представляют как в мм, так и в пикселях. Например, если известно, что фокусное расстояние объектива фотоаппарата RCD 30 (см. таблицу 1) равно 50 мм, то зная размер 1 пикселя светочувствительной матрицы  $\Delta_{pix} = 6$  мкм, можно рассчитать фокусное расстояние объектива в пикселях:

$$f_{pix} = f_{\text{мм}} \div \Delta_{pix} \times 1000 = 50 \div 6 \times 1000 = 8333.3 \text{ пикселей}.$$

А теперь разберем одну из основных задач фотограмметрии – **определение пространственных прямоугольных координат точек местности по их фотографическим изображениям на снимках.**

Рассмотрим одиночный снимок (рис.7):



**Рис7. – Схема взаимосвязи пространственных координат точки местности (M) с координатами изображения этой точки (m) на снимке**

Математические формулы связи координат точки местности (M), изобразившейся на снимке (m), с координатами этой точки в пространственной системе координат **OXYZ** называют **уравнениями коллинеарности проектирующих лучей**, представляют их в виде системы двух нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - f \frac{a_{11}(X - X_s) + a_{21}(Y - Y_s) + a_{31}(Z - Z_s)}{a_{13}(X - X_s) + a_{23}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} \\ y &= y_0 - f \frac{a_{12}(X - X_s) + a_{22}(Y - Y_s) + a_{32}(Z - Z_s)}{a_{13}(X - X_s) + a_{23}(Y - Y_s) + a_{33}(Z - Z_s)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где **x, y** - измеренные координаты точки **m** на аэрофотоснимке в плоской прямоугольной системе координат снимка **o'xy**;

**x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, f** - элементы внутреннего ориентирования снимка;

**X, Y, Z** – координаты точки местности **M** в пространственной системе координат **OXYZ**;

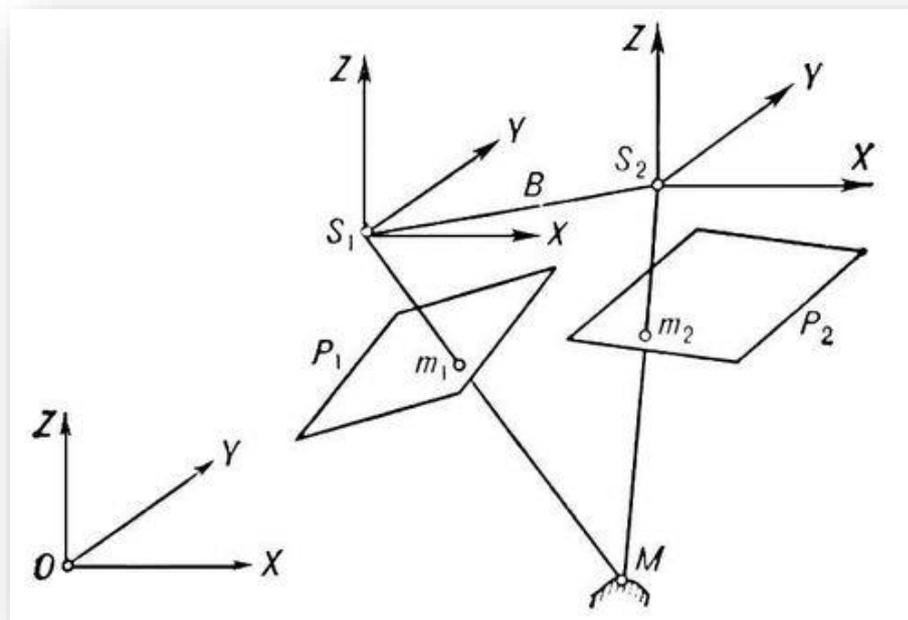
**X<sub>s</sub>, Y<sub>s</sub>, Z<sub>s</sub>** – координаты центра фотографирования снимка **S** в пространственной системе координат **OXYZ** (линейные элементы внешнего ориентирования снимка);

**a<sub>11</sub>, a<sub>21</sub>, ... a<sub>33</sub>** – девять коэффициентов (направляющих косинусов), вычисляемых через три угловых элемента внешнего ориентирования снимка **α, ω, χ** (углы наклона и разворота снимка).

Элементы внутреннего ориентирования ( $x_o, y_o, f$ ), как правило, известны из лабораторной калибровки фотоаппарата. Они одинаковы для всех снимков, снятых одной и той же аэрофотокамерой.

Предположим, что также известны все шесть элементов внешнего ориентирования снимка ( $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \chi$ ). Неизвестными являются координаты  $X, Y, Z$  точки местности  $M$  в пространственной системе координат  $OXYZ$ . Координаты изображения этой точки на аэрофотоснимке  $m$  мы можем измерить ( $x, y$  в системе координат  $o'xy$ ), что позволяет составить два уравнения коллинеарности с тремя неизвестными (координатами  $X, Y, Z$  точки местности  $M$ ). Но система уравнений решения не имеет, т.к. количество уравнений меньше количества неизвестных. Увеличением измеренных точек на снимке ситуация не улучшится – каждая новая измеренная точка будет привносить еще большее количество неизвестных. **Вывод: по одиночному снимку невозможно определить координаты и высоты точек местности, измеренных на аэрофотоснимке, даже если известны все элементы ориентирования аэрофотоснимка.**

Рассмотрим теперь не один, а два снимка – стереопару (см. рис. 8). Снимки  $P_1$  и  $P_2$  получены в результате фотографирования земной поверхности с перекрытием снимков, таким образом, чтобы изображение точки местности ( $M$ ) было и на левом ( $m_1$ ), и на правом ( $m_2$ ) снимках.



*Рис.8 – Схема взаимосвязи пространственных координат точки местности  $M$  с координатами изображения этой точки на двух снимках  $m_1$  и  $m_2$*

Измерив координаты точек  $m_1, m_2$  на левом и правом снимках, мы можем составить уже не два, а четыре уравнения коллинеарности (3) для одной точки местности  $M$  с тремя её неизвестными пространственными координатами

$X, Y, Z$ . Количество уравнений больше количества неизвестных. Система имеет решение.

**Вывод:** *если известны все элементы ориентирования аэрофотоснимков, то в зоне перекрытия двух и более снимков можно определить пространственные координаты любой точки сфотографированной местности.* Или иначе - для определения пространственных координат точки местности достаточно измерить координаты её изображения на всех фотоснимках, составить и решить систему уравнений коллинеарности. При этом линейное (координатное) и угловое положение снимков в пространстве системы координат  $OXYZ$  должно быть известно.

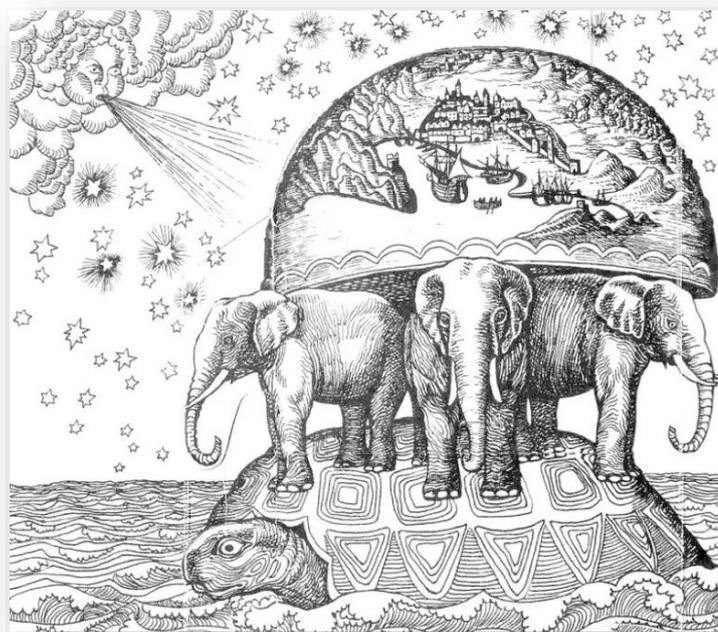
Изображение точки  $M$  на паре аэрофотоснимков – точки  $m_1$  и  $m_2$  – результат пересечения проектирующих лучей  $S_1M$  и  $S_2M$  с плоскостями соответственных аэрофотоснимков  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис.8). Если соединить два центра фотографирования  $S_1$  и  $S_2$  ( $/S_1 S_2/$  - базис фотографирования  $B$ ), то увидим, что проектирующие лучи  $S_1M$  и  $S_2M$ , а так же  $S_1m_1$  и  $S_2m_2$ , находятся в одной плоскости. Это – в идеале. В реальности, положение изображений точек  $m_1$  и  $m_2$  на снимках  $P_1$  и  $P_2$ , искажено вследствие различных ошибок: из-за искривления проектирующих лучей при прохождении через объектив аэрофотоаппарата (дисторсия объектива), из-за рефракции при прохождении световых лучей от снимаемого объекта до фотоаппарата, из-за погрешностей измерения координат точек  $m_1$  и  $m_2$  на аэрофотоснимках и т.д. Поэтому решение системы уравнений коллинеарности производится с уравниванием измеренных координат  $x, y$  методом наименьших квадратов, с оценкой точности вычисленных пространственных координат точек местности  $X, Y, Z$ .

Замечательно, когда на борту воздушного судна, выполняющего аэрофотосъемку, установлен спутниковый приемник геодезического класса - для определения точных координат и высот центров фотографирования  $S_i$ , а также высокоточная инерциальная система - для определения углов наклона снимков  $\alpha_i, \omega_i, \chi_i$ . Такое оборудование имеет немалую массу и очень дорого стоит, как правило, им оснащают специализированные аэросъемочные комплексы с хорошими дорогими аэрофотоаппаратами. Задача определения пространственных координат точек местности  $X_i, Y_i, Z_i$  при этом решается достаточно просто – измерением координат необходимых точек на всех аэрофотоснимках  $x_i, y_i$  (как правило, в автоматическом, не ручном режиме) и уравниванием измерений.

Что делать в случае, если при аэрофотосъемке используется бортовое оборудование низкого, навигационного класса точности ( $M_{X_s Y_s Z_s} = 3 \div 5$  м)? Либо вообще отсутствует? Например, в случае использования легкого беспилотного самолета или мультикоптера? Как определить элементы внешнего ориентирования аэрофотоснимков, чтобы вычислить пространственные координаты измеренных на снимках точек?

В классической фотограмметрии эта задача (обратная фотограмметрическая засечка) решается с использованием геодезических опорных точек – точек, которые хорошо распознаются на всех

аэрофотоснимках, а пространственные координаты их получены геодезическими наземными методами, например, с использованием спутниковых определений. Если в уравнениях коллинеарности (3) неизвестными являются шесть элементов внешнего ориентирования снимка  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \chi$ , а координаты точки местности  $X, Y, Z$  в пространственной системе координат  $OXYZ$  наоборот известны, то для решения системы уравнений (3) потребуется не менее трёх опорных точек (каждая измеренная на снимке точка – 2 уравнения, три точки – 6 уравнений при 6 неизвестных). И задача становится решаемой. Недаром древнее представление об устройстве Земли – три слона держат Земную сферу:

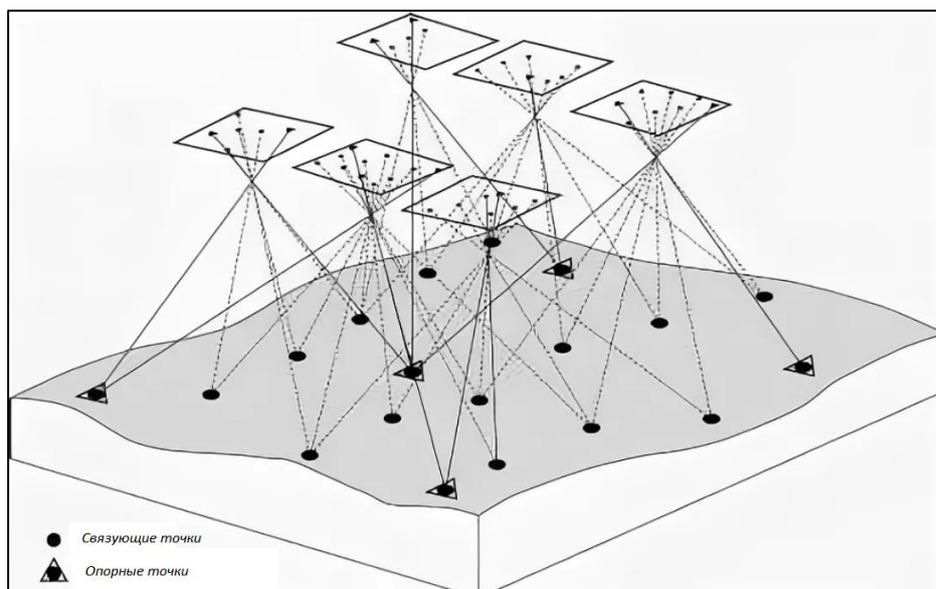


*Рис.9 – Древнее представление о Земле*

А черепаха в нашем понимании – опорная система отсчета – пространственная прямоугольная система координат  $OXYZ$  (см. рис.8).

Таким образом, использование опорных геодезических точек в системе координат  $OXYZ$  решает вопрос определения элементов внешнего ориентирования аэрофотоснимков, и дальнейшее определение пространственных координат всех измеренных на снимках точек становится уже тривиальной, простой задачей.

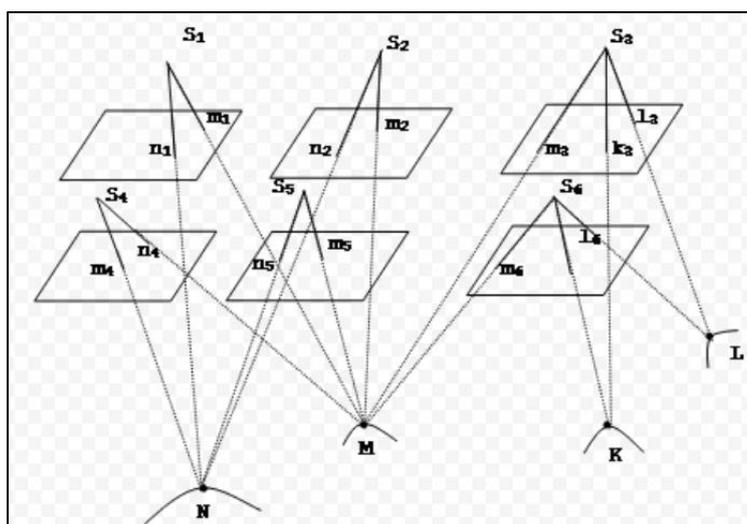
Есть только один нюанс – для обеспечения каждого аэрофотоснимка тремя опорными точками требуется достаточно трудоемкая и дорогостоящая работа геодезистов. Такое плано-высотное обоснование аэрофотосъемки называют сплошным и создают его при изготовлении крупномасштабных планов крупных городов и/или с целью получения высокой точности фотограмметрических определений. Обычно используется разряженная полевая подготовка – опорными точками обеспечиваются углы фотограмметрического блока снимков и центральная часть – по схеме «конверт» (см. рис.10). Дополнительно на блок снимков определяются 1-2 контрольные точки.



**Рис.10 – Схема расположения опорных и связующих точек в фотограмметрическом блоке**

В случае значительных размеров фотограмметрического блока схема размещения опорных точек предусматривает их равномерное расположение по блоку с обеспечением углов и края блока. Опорные точки внутренней части блока стараются расположить так, чтобы они находились в зонах поперечного перекрытия маршрутов и продольного перекрытия снимков. Расстояния между рядами опорных точек регламентируются требованиями нормативно-технической документации или определяются из предрасчета точности, могут составлять несколько базисов фотографирования.

Определение элементов внешнего ориентирования снимков в блоке с разряженным плано-высотным обоснованием становится уже не тривиальной задачей. Сначала нужно собрать в условной системе координат общую фотограмметрическую модель из всех снимков блока по внутренним связям (по связующим точкам, см. рис.10 и 11).



**Рис.11 – Схема измерения на снимках фотограмметрического блока связующих точек K,L,M,N**

Количество связующих точек для взаимного ориентирования двух снимков относительно друг друга должно быть не менее пяти в зоне перекрытия снимков (теорию рассматривать не будем).

В современных фотограмметрических программах связующие точки измеряются в автоматическом режиме, без участия человека, а их количество практически не ограничено. Блок снимков (или иначе – фотограмметрическая модель, или иначе - сеть фототриангуляции) уравнивается сначала только по связующим точкам (без опорных), в условной системе координат.

Далее собранная из всех снимков фотограмметрическая модель сначала предварительно ориентируется относительно опорных точек, а потом окончательно уравнивается путём составления всё тех же уравнений коллинеарности (3) для всех измеренных и связующих, и опорных точек всех снимков фотограмметрического блока.

Теперь, зная элементы внешнего ориентирования снимков  $X_s, Y_s, Z_s, \alpha, \omega, \chi$ , переходят к этапу стереофотограмметрических измерений и определению пространственных координат и высот  $X_i, Y_i, Z_i$  «плотного облака» точек - для создания цифровой модели рельефа земной поверхности, а так же, если требуется создание цифровых топографических планов и карт, для отрисовки (векторизации) контуров ситуации: природных объектов – урезов воды, бровок уступов оврагов и т.п.; зданий, сооружений, дорожной инфраструктуры и т.д.

## 2. Цифровые ортофотопланы

Особое место среди всех видов картографической продукции, создаваемых стереофотограмметрическим методом, занимают цифровые ортофотопланы (далее - ЦОФП). При небольшой себестоимости (по сравнению с цифровыми топографическими планами, качественными 3D-моделями), ортофотопланы имеют свою, достаточно хорошо востребованную нишу применения. Эффективно используются ЦОФП в деятельности Росреестра для визуализации, анализа и контроля данных кадастра объектов недвижимости. По заказу этого ведомства на городские и сельские поселения Российской Федерации создаются цифровые ортофотопланы, как правило, в масштабе 1:2000, на межселенные территории – в масштабе 1:10000.

ЦОФП масштаба 1:5000 и мельче могут создаваться с использованием данных как аэро-, так и космической фотосъемки. ЦОФП масштаба 1:2000 и крупнее – только методом аэрофотосъемки.

На рис.12 представлен образец цифрового ортофотоплана с разной степенью увеличения его цифрового изображения.

По своей сути, ЦОФП является фотореалистичным планом земной поверхности, причем геопривязанным в заданной Заказчиком системе координат и не имеющий искажений, которые присущи искажениям на аэрофотоснимке (из-за наклона снимка, разномасштабности, за рельеф). Так как ЦОФП это план, то он создается в ортогональной проекции в заданном масштабе и с соответствующей масштабу точностью (0.5 мм в масштабе плана).



*Рис.12 – Образец цифрового ортофотоплана с разной степенью увеличения цифрового изображения*

При создании ЦОФП аэрофотоснимки проходят этап цифрового ортотрансформирования с преобразованием координат каждого пикселя цифрового изображения из центральной проекции, в которой получены снимки, с учетом углов наклона снимков, а так же с учетом рельефа местности. Далее производится сшивка отдельных ортотрансформированных снимков в единое цифровое изображение – мозаику. Границы сшивки называются линиями порезов трансформированных снимков. Требованиями нормативно-технических документов предусмотрена ручная корректировка линий порезов в специализированном программном обеспечении, так, чтобы линии порезов не пересекали здания и другие высотные сооружения, а дорожную инфраструктуру линии порезов должны пересекать под прямым углом.

С использованием специальных программ, например ГИС «Карта-20xx», при работе с ЦОФП можно производить любые измерительные операции: определять длины и расстояния между объектами, векторизовать объекты и определять их периметр и площадь, проверять по загруженным координатам объектов недвижимости правильность и точность определения их местоположения. Не надо только забывать, что точность созданного ЦОФП соответствует его масштабу, поэтому измерения координат каких-либо точек на ЦОФП будут иметь аналогичную точность.

Всё вышесказанное раскрывает только основные моменты и общие положения методологии и практики современного фотограмметрического производства. Перейдем теперь к практической части работы.

### 3. Расчет основных параметров аэрофотосъемки

Перед выполнением аэрофотосъемочных работ в обязательном порядке производится расчет параметров аэрофотосъемки. При расчете необходимо, в первую очередь, исходя из требований к фотограмметрическим работам при создании цифровой картографической продукции, определить **максимально допустимую высоту фотографирования**, при которой обеспечивается требуемая точность определения координат и высот точек местности по аэрофотоснимкам.

3.1. Вначале выясним требования к фотограмметрическим работам при создании цифровой картографической продукции – планов/карт и ортофотопланов.

При создании карт и планов в соответствии с «Инструкцией по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов. ГКИНП(ГНТА)-02-036-02. М.: ЦНИИГАиК, 2002 г.»:

а) средние погрешности плановых координат опорных точек после внешнего ориентирования фотограмметрической сети не должны превышать 0.2 мм в масштабе карты/плана, т.е.  $M_{xy} = 0.2/1000 \times M_k$ , где  $M_k$  - знаменатель масштаба плана/карты;

б) средняя погрешность высот на опорных точках после внешнего ориентирования фотограмметрической сети не должна превышать 0.15, умноженная на высоту сечения рельефа, т.е.  $M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}}$ .

Например, для плана масштаба 1:1000 с сечением рельефа горизонталями  $h_{\text{сеч}} = 1$  м получаем:

$$\begin{aligned} M_{xy} &= 0.2 / 1000 \times M_k = 0.2 / 1000 \times 1000 = 0.20 \text{ м,} \\ M_z &= 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 1 = 0.15 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким образом, если требуется создать топографический план участка местности стереофотограмметрическим методом в масштабе 1:1000 с отображением рельефа горизонталями через 1 м, то нужно выбрать такие параметры аэрофотосъемки (высоту фотографирования, базис фотографирования и т.д.), чтобы средние погрешности определения координат и высот стереофотограмметрическим методом не превышали 0.2 м в плане и 0.15 м по высоте.

При создании ортофотопланов в соответствии с «Инструкцией по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов. ГКИНП(ГНТА)-02-036-02. М.: ЦНИИГАиК, 2002 г.»:

а) средние погрешности плановых координат опорных точек после внешнего ориентирования фотограмметрической сети не должны превышать 0.2 мм в масштабе карты/плана, т.е.  $M_{xy} = 0.2 \times M_k$ , где  $M_k$  - знаменатель масштаба плана/карты;

б) средняя погрешность определения высот при создании ортофотопланов  $M_z$  не должна превышать  $\Delta h_{\text{пред}} / 2$ , где  $\Delta h_{\text{пред}}$  - предельная погрешность определения высоты по цифровой модели рельефа, созданной для устранения искажений на ортофотоплане из-за влияния рельефа.

Формула вычисления предельной погрешности определения высот  $\Delta h_{\text{пред}}$  по ЦМР при создании ортофотопланов в соответствии с «Инструкцией по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов. ГКИНП(ГНТА)-02-036-02. М.: ЦНИИГАиК, 2002 г.»:

$$\Delta h_{\text{пред}} = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{r}, \text{ м} \quad (4)$$

где 0.0003 – коэффициент, определяющий графическую точность ортофотоплана, равный 0.3 мм (0.0003 м) в масштабе создаваемого плана;

$f$  – фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата, в пикселях;

$r$  – расстояние, определяющее размер рабочей площади ортотрансформированного снимка, в пикселях. Величина  $r$  определяется по формуле:

$$r = \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $l_x$  и  $l_y$  – размер цифрового фотоснимка, в пикселях.

Например, если требуется создать ортофотоплан масштаба 1:1000 стереофотограмметрическим методом с использованием аэрофотокамеры RCD 30 с фокусным расстоянием объектива 50 мм, с размерами кадра/ снимка  $l_x = 6708$  пикселей,  $l_y = 8956$  пикселей (см. таблицу 1), средние погрешности определения координат и высот стереофотограмметрическим методом не должны превышать:

$$\text{в плане: } M_{xy} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 1000 = 0.20 \text{ м;}$$

$$\text{по высоте: } M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_K}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 8333.3 \times 1000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{6708}{2}\right)^2 + \left(\frac{8956}{2}\right)^2}} = 0.22 \text{ м.}$$

3.2. Теперь, зная требования к точности изготовления картографической продукции, перейдем к рассмотрению формул расчета средних погрешностей определения координат и высот точек местности стереофотограмметрическим методом, если известны параметры аэрофотосъемки (высота фотографирования и продольное перекрытие снимков в стереопаре).

**Средние погрешности определения плановых координат** точек местности, определяемых стереофотограмметрическим методом по стереопаре аэрофотоснимков, вычисляются по формулам:

$$M_x = GSD \times m_x \quad (6)$$

$$M_y = GSD \times m_y ,$$

где:

$M_x, M_y$  – средние погрешности определения координат X и Y точек местности стереофотограмметрическим методом, м;

$m_x, m_y$  – средние погрешности измерения координат x и y точек на цифровых аэрофотоснимках, в пикселях. В расчете примем, что измерения на снимках равноточные, т.е. средние погрешности измерения координат x и y точек на цифровых аэрофотоснимках равны средней погрешности измерения координат точек на аэрофотоснимках:

$$m_x = m_y = m ; \quad (7)$$

$GSD$  – (от англ. *Ground Sample Distance*) – размер одного пикселя цифрового аэрофотоснимка в пересчете на земную поверхность, м/пиксель. Величина  $GSD$  вычисляется по формуле:

$$GSD = \frac{H}{f}, \quad (8)$$

где  $H$  – высота фотографирования от АФА до земной поверхности при аэрофотосъемке, м;  $f$  – фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата, в пикселях.

Изображения цифровых снимков в фотоаппарате получаются в результате фиксации отраженного света, спроецированного через объектив на светочувствительную матрицу. Естественно, размер одного пикселя изображения цифрового аэрофотоснимка равен размеру одного пикселя светочувствительной матрицы фотоаппарата.

Вычислить фокусное расстояние объектива в пикселях цифрового аэрофотоснимка можно по формуле:

$$f(\text{в пикселях}) = \frac{f(\text{в мм})}{\Delta_{pix}(\text{в мм})}, \quad (9)$$

где  $\Delta_{pix}$  – размер одного пикселя светочувствительной матрицы АФА, в мм.

**Средняя погрешность определения высот** точек местности, определяемых стереофотограмметрическим методом по стереопаре аэрофотоснимков, зависит не только от высоты фотографирования и точности измерения координат на снимках, но и от базиса фотографирования, т.е. от расстояния между центрами фотографирования двух снимков. Она вычисляется по формуле:

$$M_z = \frac{H}{b} \times m_p, \quad (10)$$

где  $b$  – базис фотографирования, в пикселях;

$m_p$  – средняя погрешность измерения параллаксов точек на паре снимков, в пикселях.

Параллакс - это разница координат по оси  $x$  одной и той же точки местности, изобразившейся на левом и правом снимке, т.е.  $p = x_l - x_n$ . В расчетах примем, что точность измерения параллаксов на снимках равна средней погрешности измерения координат точек на аэрофотоснимках:

$$m_p = m \quad (11)$$

Базис фотографирования  $b$  определяется по формуле:

$$b = \frac{100-P}{100} \times l_x, \quad (12)$$

где  $P$  – продольное перекрытие снимков, в %;  $l_x$  – размер стороны аэрофотоснимка вдоль направления полета (по оси  $X$ ), в пикселях.

## Контрольная работа

### Исходные данные:

Исходные данные для расчетов формируются из двух таблиц в соответствии с порядковым номером студента **АВ**. Например, студенту с порядковым номером **АВ = 07** исходные данные из таблицы 1 необходимо взять по варианту **В = 7**, из таблицы 2 – по варианту **А = 0**, соответственно выполнить расчет для аэрофотоаппарата RCD 30 с параметрами аэрофотосъемки: высота фотографирования 1500 м, продольное перекрытие снимков 60 %, средние погрешности измерения координат точек на снимках – 0,5 пикселя.

1) по варианту **В** - наименование и параметры цифрового аэрофотоаппарата (АФА):

Таблица 1

Вариант задания	Наименование АФА	Размер одного пикселя светочувствительной матрицы АФА ( $\Delta_{pix}$ , мкм*)	Фокусное расстояние сменных объективов АФА, мм	Размер аэрофотоснимка $L_x \times L_y$ ( $L_x$ – вдоль направления полета, $L_y$ – поперёк направления полета), в пикселях
0	UltraCamXp	6	27, 70	11310 x 17310
1	DigiCAM-H60	6	50, 150	6708 x 8956
2	DiMAC LiGHT+	6	70, 120	6732 x 8984
3	DMC II	5.6	45, 112	14656 x 17216
4	Hasselblad H4d	6	28, 80	5478 x 7304
5	Rollei	6	35, 50	4080 x 5440
6	Canon 5d Mark II	6.2	35, 50	3168 x 4752
7	RCD 30	6	50, 80	6708 x 8956
8	UltraCam-Lp	6	27, 70	7920 x 11704
9	DSS Wide Angle	6	32, 50	6732 x 8984

\*Примечание: 1 мкм = 0.001 мм

2) по варианту **А**: взять значения высоты фотографирования **Н** и продольного перекрытия снимков в стереопаре **Р**, точность измерения координат и параллакс точек на цифровых аэрофотоснимках **т**:

Таблица 2

Вариант задания	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Высота фотографирования при аэрофотосъемке ( <b>Н</b> , м)	1500	1200	1000	800	1750	1800	1250	650	750	400
Продольное перекрытие снимков ( <b>Р</b> , %)	60	65	70	80	62	64	68	74	76	78
Точность (средняя погрешность) измерения координат и параллакс точек на цифровых аэрофотоснимках ( <b>т</b> , в пикселях)	0.5	0.75	1.0	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0

### ЗАДАНИЕ № 1

**Рассчитать точность (средние погрешности) определения координат и высот точек местности по стереопаре аэрофотоснимков, если аэрофотосъемка выполнена с использованием аэрофотоаппарата с известными параметрами и продольным перекрытием снимков.**

#### **Порядок выполнения работы:**

(Пример вычислений для варианта В = 4 (табл. 1) и варианта А = 5 (табл. 2).

#### **1. Исходные данные:**

- стереофотосъемку предполагается производить цифровой среднеформатной камерой Hasselblad H4d 60 с физическим размером пикселя матрицы  $6 \text{ мкм} = 0.006 \text{ мм}$ ;
- камера имеет возможность установки одного из двух объективов с фокусными расстояниями  $f = 28 \text{ мм}$  и  $f = 80 \text{ мм}$ ;
- формат кадра снимка  $5478 \times 7304$  пикселей;
- короткая сторона кадра направлена вдоль полета по оси X;
- продольное перекрытие  $P = 64\%$ ;
- высота фотографирования  $H = 1800 \text{ м}$ ;
- точность измерения координат и параллаксов точек на цифровых аэрофотоснимках  $m = 1$  пиксель.

#### **2. Расчеты:**

2.1. Размер одного пикселя цифрового аэрофотоснимка в пересчете на земную поверхность составит:

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм:

$$GSD = \frac{H}{f} = \frac{1800}{28/0.006} = 0.39, \text{ м/пиксель}$$

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм:

$$GSD = \frac{H}{f} = \frac{1800}{80/0.006} = 0.14, \text{ м/пиксель}$$

где  $H$  – высота фотографирования при аэрофотосъемке, м;  $f$  – фокусное расстояние объектива аэрофотоаппарата, в пикселях ( $28/0.006 = 4666.7$  пикселей;  $80/0.006 = 13333.3$  пикселей).

2.2. Средние погрешности определения плановых координат точек местности, определяемых стереофотограмметрическим методом по стереопаре аэрофотоснимков будут равны:

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм:

$$M_x = M_y = GSD \times m = 0.39 \times 1.0 = 0.39 \text{ м};$$

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм:

$$M_X = M_Y = GSD \times m = 0.14 \times 1.0 = 0.14 \text{ м,}$$

где:

$M_X, M_Y$  – средние погрешности определения координат X и Y точек местности стереофотограмметрическим методом, м;

$GSD$  – размер одного пикселя цифрового аэрофотоснимка в пересчете на земную поверхность, м/пиксель;

$m$  – средняя погрешность измерения координат x и y точек и параллаксов  $p$  на цифровых аэрофотоснимках, в пикселях.

Абсолютная средняя погрешность определения плановых координат местности стереофотограмметрическим методом будет равна:

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм:

$$M_{XY} = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2} = \sqrt{0.39^2 + 0.39^2} = 0.55 \text{ м;}$$

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм:

$$M_{XY} = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2} = \sqrt{0.14^2 + 0.14^2} = 0.20 \text{ м.}$$

2.3. Базис фотографирования  $b$  при аэрофотосъемке (расстояние между центрами фотографирования):

- в масштабе цифрового снимка:

$$b = \frac{100-P}{100} \times l_x = \frac{100-64}{100} \times 5478 = 1972.1 \text{ пикселя;}$$

- в реальном масштабе:

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм:

$$B = GSD \times b = 0.39 \times 1972.1 = 769.1 \text{ м;}$$

- для АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм:

$$B = GSD \times b = 0.14 \times 1972.1 = 276.1 \text{ м,}$$

где  $P$  – продольное перекрытие снимков, в %;  $l_x$  – размер стороны аэрофотоснимка вдоль направления полета (по оси X), в пикселях;  $GSD$  – размер одного пикселя цифрового аэрофотоснимка в пересчете на земную поверхность, м/пиксель.

2.4. *Средняя погрешность определения высот точек местности, определяемых стереофотограмметрическим методом по стереопаре аэрофотоснимков, для заданных параметров составляет:*

$$M_z = \frac{H}{b} \times m_p = \frac{1800}{1972.1} \times 1.0 = 0.91 \text{ м,}$$

где  $b$  – базис фотографирования, в пикселях;  
 $m_p$  – средняя погрешность измерения параллаксов точек на паре снимков, в пикселях.

### **Выводы:**

Средние абсолютные погрешности определения координат точек местности стереофотограмметрическим методом для исходных параметров аэрофотосъемки (см.п.1 Задания №1) составляют:

-  $M_{XY} = 0.55$  м – при аэрофотосъемке с АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм;

-  $M_{XY} = 0.20$  м - при аэрофотосъемке с АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм.

Средняя погрешность определения высот точек местности стереофотограмметрическим методом для предложенных параметров аэрофотосъемки равна  $M_Z = 0.91$  м вне зависимости от используемого объектива АФА.

### **ЗАДАНИЕ № 2**

**На основе расчетов Задания №1 сделать выводы о том, какие картографические материалы возможно изготовить по материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1.**

### **Порядок выполнения работы:**

(Пример вычислений для варианта В = 4 (табл. 1) и варианта А = 5 (табл. 2).

1. Рассчитаем значения точности в плане, требуемые для создания топографических планов масштабного ряда стереофотограмметрическим методом:

<b>№№</b>	<b>Масштаб</b>	<b>Требуемая средняя погрешность определения плановых координат стереофотограмметрическим способом</b>
1	1:500	$M_{XY} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 500 = 0.1$ м
2	1:1000	$M_{XY} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 1000 = 0.2$ м
3	1:2000	$M_{XY} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 2000 = 0.4$ м
4	1:5000	$M_{XY} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 5000 = 1.0$ м
5	1:10000	$M_{XY} = 0.2 \times M_K = 0.2 \times 10000 = 2.0$ м

2. В результате расчетов, выполненных в Задании №1, установлено, что средние абсолютные погрешности определения плановых координат точек

местности стереофотограмметрическим методом для исходных параметров аэрофотосъемки (см.п.1 Задания №1) составляют:

- $M_{\text{ХУ}} = 0.55$  м – при аэрофотосъемке с АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм;

- $M_{\text{ХУ}} = 0.20$  м - при аэрофотосъемке с АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм.

Исходя из этого и требований к точности изготовления топографических планов (см. Таблицу п.1 Задания №2), можно сделать вывод о том, что по материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, можно создать кондиционные топографические планы:

- в масштабе 1:5000 и мельче (при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм);

- в масштабе 1:1000 и мельче (при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм).

3. Рассчитаем значения точности по высоте, требуемые для создания топографических планов с отображением рельефа горизонталями стереофотограмметрическим методом:

№№	Высота сечения рельефа горизонталями $h_{\text{сеч}}$	Требуемая средняя погрешность определения высот стереофотограмметрическим способом
1	0.5	$M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 0.5 = 0.075$ м
2	1.0	$M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 1.0 = 0.15$ м
3	2.0	$M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 2.0 = 0.30$ м
4	5.0	$M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 5.0 = 0.75$ м
5	10.0	$M_z = 0.15 \times h_{\text{сеч}} = 0.15 \times 10.0 = 1.5$ м

4. В результате расчетов, выполненных в Задании №1, установлено, что средняя погрешность определения высот точек местности стереофотограмметрическим методом для исходных параметров аэрофотосъемки (см.п.1 Задания №1) составляет  $M_z = 0.91$  м вне зависимости от используемого объектива АФА.

Исходя из этого и требований к точности изготовления топографических планов по высоте (см. Таблицу п.3 Задания №2), можно сделать вывод о том, что по материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, можно создать кондиционные топографические планы с отображением рельефа горизонталями с сечением через 10 м и более.

5. Рассчитаем значения точности по высоте, требуемые для создания цифровых ортофотопланов (ЦОФП) стереофотограмметрическим методом для исходных данных Задания №1:

- для объектива с фокусным расстоянием  $f = 28$  мм, формат кадра снимка 5478 x 7304 пикселей:

№.№	Масштаб ЦОФП	Требуемая средняя погрешность определения высот стереофотограмметрическим способом для изготовления ЦОФП (при $f=28$ мм, $l_x=5478$ пикселей, $l_y=7304$ пикселей)
1	1:500	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 4666.7 \times 500}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.08 \text{ м}$
2	1:1000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 4666.7 \times 1000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.15 \text{ м}$
3	1:2000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 4666.7 \times 2000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.31 \text{ м}$
4	1:5000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 4666.7 \times 5000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.77 \text{ м}$
5	1:10000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 4666.7 \times 10000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 1.53 \text{ м}$

6. Рассчитаем значения точности по высоте, требуемые для создания цифровых ортофотопланов (ЦОФП) стереофотограмметрическим методом для исходных данных Задания №1:

- для объектива с фокусным расстоянием  $f = 80$  мм, формат кадра снимка 5478 x 7304 пикселей:

№.№	Масштаб ЦОФП	Требуемая средняя погрешность определения высот стереофотограмметрическим способом для изготовления ЦОФП (при $f=80$ мм, $l_x=5478$ пикселей, $l_y=7304$ пикселей)
1	1:500	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 13333.3 \times 500}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.22 \text{ м}$
2	1:1000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 13333.3 \times 1000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.44 \text{ м}$
3	1:2000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 13333.3 \times 2000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 0.88 \text{ м}$
4	1:5000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 13333.3 \times 5000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 2.19 \text{ м}$
5	1:10000	$M_z = \frac{0.0003 \times f \times M_k}{2 \times \sqrt{\left(\frac{l_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_y}{2}\right)^2}} = \frac{0.0003 \times 13333.3 \times 10000}{2 \times \sqrt{\left(\frac{5478}{2}\right)^2 + \left(\frac{7304}{2}\right)^2}} = 4.38 \text{ м}$

7. В результате расчетов, выполненных в Задании №1, установлено, что средняя погрешность определения высот точек местности стереофотограмметрическим методом для исходных параметров

аэрофотосъемки (см. п.1 Задания №1) составляет  $M_Z = 0.91$  м вне зависимости от используемого объектива АФА.

Исходя из этого и требований к точности изготовления цифровых ортофотопланов в плане (см. Таблицу п.1 Задания №2) и по высоте (см. Таблицы п.5 и п.6 Задания №2), можно сделать следующие выводы:

- по материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, при использовании АФА с фокусным расстоянием  $f = 28$  мм можно создать кондиционные цифровые ортофотопланы масштаба 1:10000 и мельче;

- по материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, при использовании АФА с фокусным расстоянием  $f = 80$  мм можно создать кондиционные цифровые ортофотопланы масштаба 1:5000 и мельче.

### **Выводы:**

1. По материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, можно создать кондиционные топографические планы:

- при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 28 мм: в масштабе 1:5000 и мельче с отображением рельефа горизонталями с сечением через 10 м и более;

- при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием объектива 80 мм: в масштабе 1:1000 и мельче с отображением рельефа горизонталями с сечением через 10 м и более.

2. По материалам аэрофотосъемки, исходные данные которых даны в п.1 Задания №1, можно создать кондиционные цифровые ортофотопланы:

- при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием  $f = 28$  мм: в масштабе 1:10000 и мельче;

- при использовании АФА Hasselblad H4d 60 с фокусным расстоянием  $f = 80$  мм: в масштабе 1:5000 и мельче.

### **ЗАДАНИЕ № 3**

**Рассчитать, при какой высоте фотографирования  $H$  необходимо выполнить аэрофотосъемку участка местности, если необходимо создать кондиционные цифровые топографические планы масштаба 1:500 с высотой сечения рельефа горизонталями через 0.5 м. Исходные данные принять из Задания №1 (кроме высоты фотографирования, которую необходимо найти).**

Самостоятельная работа по заданию №3 гарантирует получение оценки «хорошо».

### **ЗАДАНИЕ № 4**

**Рассчитать, при какой высоте фотографирования  $H$  необходимо выполнить аэрофотосъемку участка местности, если необходимо создать**

**кондиционные цифровые ортофотопланы масштаба 1:500. Исходные данные принять из Задания №1 (кроме высоты фотографирования, которую необходимо найти).**

Самостоятельная работа по заданию №4 гарантирует получение оценки «отлично».

### **Список литературы для изучения:**

1. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. Курс лекций. Учебное пособие. (РО и ОП ФГБОУ ВО АЧИИ ДГАУ, 347740, Зерноград, Ростовской области).
2. Методическое пособие по курсу «Техника и технология аэрокосмической съемки». - М.: МИИГАиК, 201. 58 с. Составители: Севастьянова М.Н., Серебряков С.А.
3. Методическое пособие, программы и контрольная работа по курсу "фотограмметрия". – М.: МИИГАиК, 2012, -74 с. Составители - Краснопевцев Б.В., Курков В.М.