

# Источники, влияющие на точность фотограмметрической обработки снимков

## **ЛИТЕРАТУРА**

Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. М.: МИИГАиК, 2008.  
Запрос в интернете: фотограмметрия краснопевцев.

# Источники погрешностей фотограмметрических измерений

- Погрешности, действующие при фотограмметрических измерениях, можно объединить в пять групп в зависимости от их общего источника возникновения.
- Это погрешности:
  - **1)** снимка;
  - **2)** измерительного прибора;
  - **3)** опознавания точек;
  - **4)** методики обработки;
  - **5)** опорных точек.

Основными источниками **погрешностей снимка** являются источники, вызывающие отклонения в положениях точек на нём от положений, соответствующих идеальной центральной проекции.

Суммарное действие всех источников приводит к тому, что точность построения современных аэро- и космических фотоснимков равна примерно  $m_{XY} = 15-20$  мкм, а наземных фотоснимков 10-15 мкм.

Исключение и учёт погрешностей идет по двум направлениям:

- 1) получение снимков, максимально приближённых к центральной проекции, т.е. на этапе фотографирования стараются исключить или частично ослабить влияние известных источников погрешностей;
- 2) применение такой методики фотограмметрической обработки, при которой будут максимально учтены погрешности снимков.

К источникам погрешностей, вызывающим искажение центральной проекции на реальных снимках, относятся:

- дисторсия объектива фотокамеры,
- неплоскостность поверхности светочувствительного приёмника: матрицы (линейки) ПЗС,
- клинообразность светофильтра,
- атмосферная рефракция,
- деформация иллюминатора,
- внутренняя рефракция

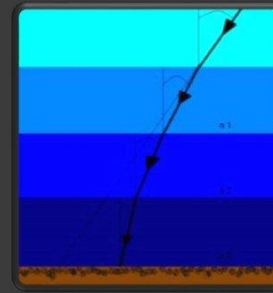
## ФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК СНИМКА

Погрешности снимка условно можно разделить на две группы: первая вызывает смещение изображений точек от центральной проекции, вторая - приводит к снижению качества снимков, и, следовательно, к ухудшению их измерительных свойств.

К группе источников ошибок, вызывающих искажение центральной проекции, относятся атмосферная рефракция, механические и оптические недостатки камеры аэрофотоаппарата, деформация фотоплёнки, клинообразность светофильтра и др. Рассмотрим перечисленные источники ошибок более подробно.

*Атмосферная рефракция.* Искривление хода световых лучей в пространстве вследствие влияния среды переменной плотности приводит к радиальному смещению изображений точек в направлении от точки надира.

## РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В АТМОСФЕРЕ



Рефракция - искривление световых лучей при прохождении в атмосфере, вызванное оптической неоднородностью атмосферного воздуха.

Вследствие искривления лучей наблюдатель видит объект не в том направлении, какое соответствует действительности; объект может представляться искаженным.

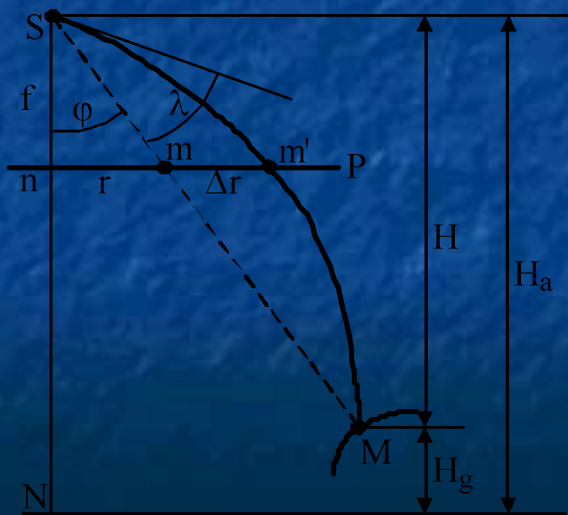


Рис. 2.2

$$\Delta r = - \frac{f^2 + r^2}{f} \lambda.$$

На основании этой формулы и с учётом, что  $r^2 = x^2 + y^2$  и  $\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta y}{y}$ ,

можно получить формулы, по которым можно вводить поправки в измеренные на снимке координаты точек.

$$\Delta x = - \lambda x \frac{f + \frac{x^2 + y^2}{f}}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \Delta y = - \lambda y \frac{f + \frac{x^2 + y^2}{f}}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (2.1)$$

где  $\lambda = 0,000226 \frac{\text{tg} \varphi \sum (H_a - H_g) d\delta}{H}$ ,  $H_a$  - абсолютная высота фотографирования,

$H_g$  - высота точки местности,  $d\delta$  - изменение плотности атмосферы с высотой.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК СНИМКА

Смещения  $\delta r$  увеличиваются пропорционально третьей степени от  $r$ , т.е. по такому же закону, как из-за кривизны Земли, но знаки у них противоположные. Следовательно, рефракция частично компенсирует смещение, вызванное кривизной Земли.

Отклонение фактической атмосферы на момент фотографирования от стандартной, а также пренебрежение в формулах для расчета поправок за наклон снимков, рельефом местности и кривизной Земли приводят к остаточной ошибке измеренных координат точек примерно  $\pm 2$ мм.

Турбулентность воздушных слоёв вблизи съёмочного объектива вызывает дополнительное искажение координат точек снимка. Радиальное смещение точек на краю снимка по этой причине может достигать  $\pm 5$ мм. При наземной стереофотографической съёмке поправки за кривизну Земли и вертикальную рефракцию вводятся непосредственно в высоты точек, определенные по снимкам.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК СНИМКА

Условия центрального проектирования не выполняются также из-за *механических и оптических недостатков аэрокамеры*.

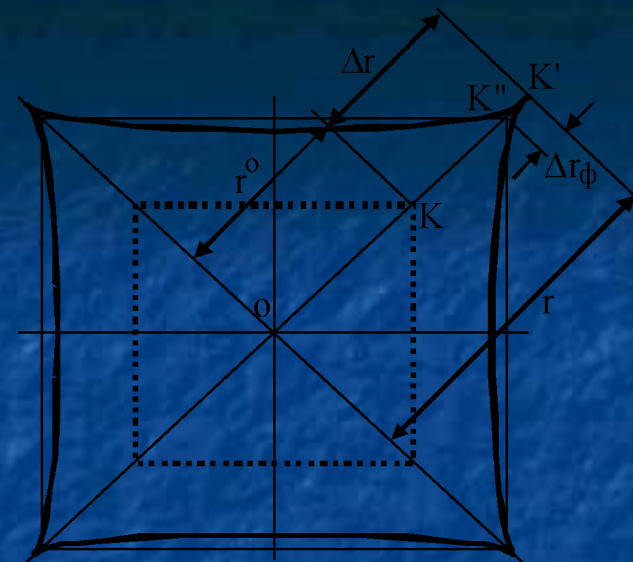
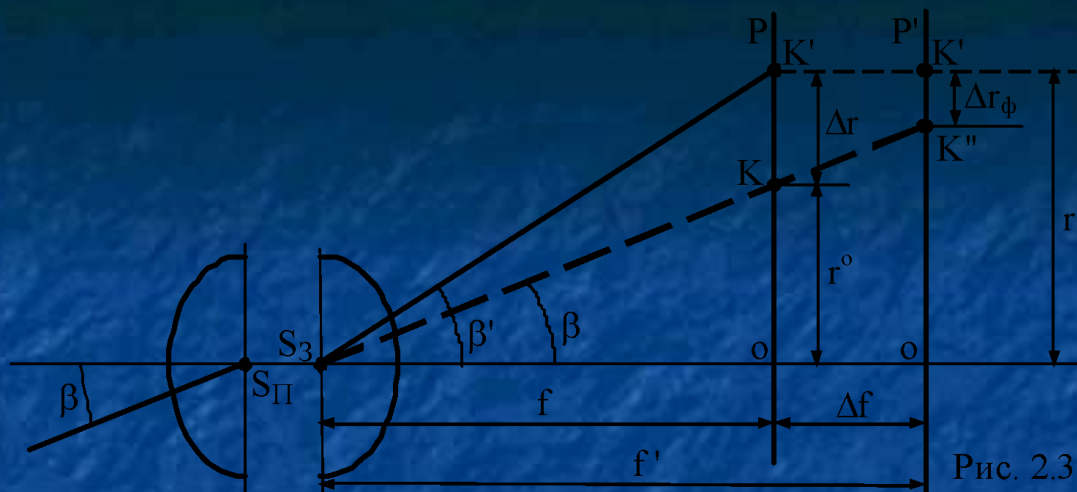
Для каждого снимка существуют погрешности внутреннего ориентирования: смещения снимка по координатным осям относительно центра проекции  $S$ ; ошибки фокусного расстояния  $f$ ; ошибки перпендикулярности плоскости изображения  $P$  к главному лучу камеры; ошибка вращения снимка вокруг оси камеры. В случае плановой съёмки сравнительно равнинной местности аэрокамерой, калиброванной по стандартной методике, перечисленные ошибки в основном компенсируются в процессе обработки модели. В случае перспективной аэросъёмки или плановой аэросъёмки горной местности эта компенсация возможна лишь частично.

# дисторсия объектива

Дисторсия является одним из видов хроматической аберрации объектива и вызывает нарушение подобия между объектом и его изображением, т.е. объектив не обладает **ортоскопией**.

Нарушение ортоскопичности объектива происходит из-за

- 1) невозможности достигнуть её уже на этапе расчёта оптической системы,
- 2) погрешностей при изготовлении отдельных оптических компонентов системы,
- 3) погрешностей при сборке оптической системы



Исключить влияние дисторсии можно двумя путями.

**1. Изготовление фотокамер, у объективов которых практически отсутствует дисторсия.** Достичь пока этого не удаётся, но у топографических фотокамер радиальная фотограмметрическая дисторсия не превышает 20 мкм, а тангенциальная - примерно в 3 раза меньше.

**2. Путём введения поправок в измеренные координаты.** С этой целью применяют таблицы, полиномы типа (2.3), избыточное число опорных точек.



**Таблицы** составляют на основании результатов определения дисторсии при калибровке фотокамеры. В таблице записывают поправки за дисторсию для координат точек с интервалом через 10 мм. Для точек, расположенных внутри этих интервалов, поправки определяются путём интерполяции между ближайшими табличными значениями.

При использовании **полинома** радиус-вектор точки заменяют её координатами согласно зависимостям:  $Dx = x$ ,  $Dy = y$ ,  $r^2 = x^2 + y^2$ . В результате исправленные координаты точек рассчитывают по формулам:  
 $x_0 = x [1 - k_1(x^2 + y^2) - k_2(x^2 + y^2)^2 - \dots]$ ,  
 $y_0 = y [1 - k_1(x^2 + y^2) - k_2(x^2 + y^2)^2 - \dots]$ .  
Значения коэффициентов  $k_i$  берут из паспорта фотокамеры, куда их записывают после определения в ходе калибровки.

Учёт дисторсии с помощью **избыточного числа опорных точек** применяют при обработке снимков, если известно, что фотокамера имеет большую дисторсию, но нет её количественных значений. В этом случае избыточное количество опорных точек позволяет разделить стереопару или снимок на части. Например, добавив к четырем опорным точкам ещё две, делят стереопару на две части: верхнюю и нижнюю, и ведут их обработку отдельно.

# Смещения точек на снимке, вызванные его наклоном

На наклонном снимке точки смещены от положений, которые они должны занимать на горизонтальном снимке, полученном той же фотокамерой из того же центра проекции.

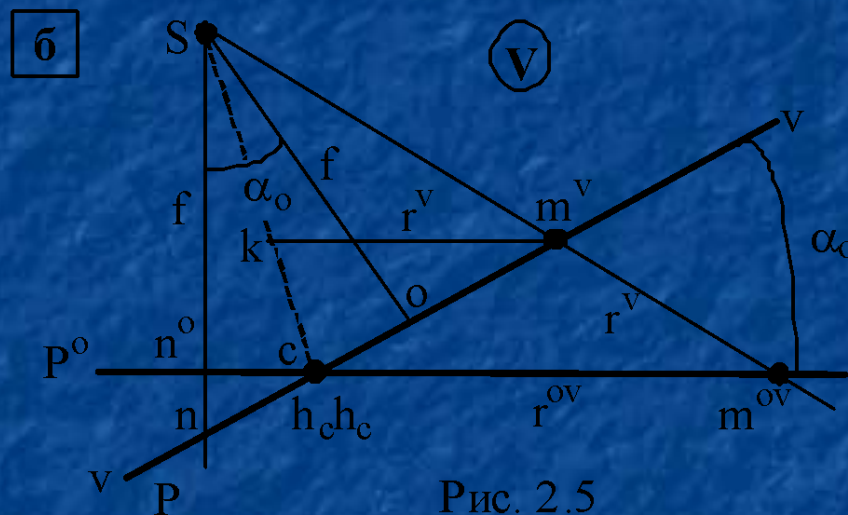
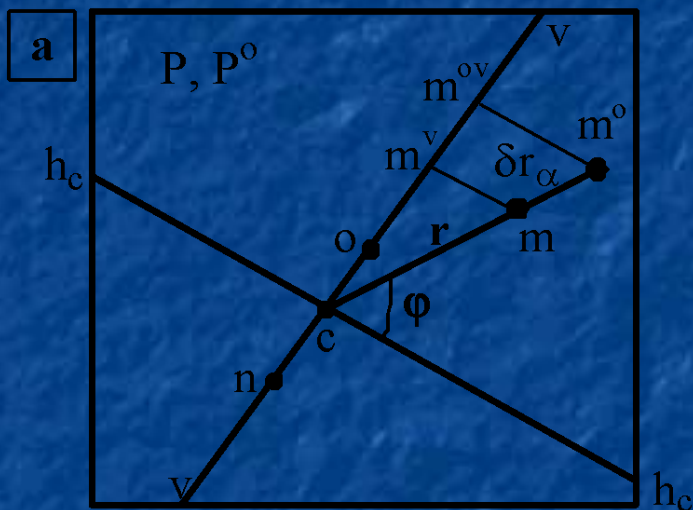


Рис. 2.5

**формула связи координат точек наклонного и горизонтального снимков в полярной системе координат:**

$$r^o = \frac{f r}{f - r \sin \varphi \sin \alpha_o}$$

На наклонном снимке смещения точек происходят вдоль их радиус-векторов на величины  $\delta_{r\alpha} = r - r_0$ .

$$\delta_{r\alpha} = - \frac{r^2 \sin \varphi \sin \alpha_0}{f - r \sin \varphi \sin \alpha_0}. \quad (2.9)$$

Т.к. при плановой аэросъёмке углы наклона снимков не превышают  $3^\circ$ , в знаменателе формулы (2.9) можно опустить член  $r \sin \varphi \sin \alpha_0$  по его малости в сравнении с фокусным расстоянием  $f$ . В результате получим приближённую формулу

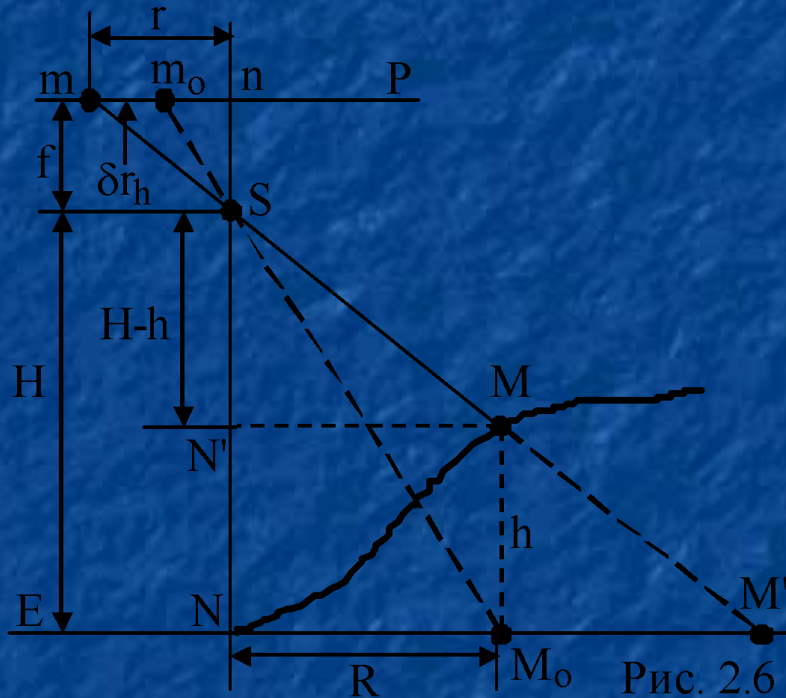
$$\delta_{r\alpha} = - \frac{r^2 \sin \varphi \sin \alpha_0}{f}. \quad (2.10)$$

На основании формулы (2.10) можно сделать вывод, что:

- 1)  $\delta_{r\alpha} = 0$  при  $\varphi = 0$  или  $180^\circ$ , т.е. точки, расположенные на линии неискажённых масштабов, не смещаются под влиянием угла наклона снимка;
- 2)  $\delta_{r\alpha} = \max$  при  $\varphi = 90^\circ$  или  $270^\circ$ , что соответствует линии главной вертикали  $v\bar{v}$ , а при  $r = \max$  на точках, расположенных на главной вертикали на краю снимка.

Из формулы (2.10) также видно, что величина смещения  $\delta_{r\alpha}$  находится в обратной пропорциональной зависимости от величины фокусного расстояния фотокамеры и в прямой квадратичной зависимости от радиус-вектора точки (формата кадра). Поэтому, если нужно получить снимки с минимальными смещениями, вызванными его углом наклона, то фотосъёмку следует выполнять длиннофокусными фотокамерами с небольшим форматом кадра.

## Смещения точек на снимке, вызванные рельефом местности



При создании топографических карт точки местности должны быть спроектированы отвесными линиями на поверхность референц-эллипсоида.

По законам построения изображения в центральной перспективной проекции точка **M** местности изобразится на снимке **P** в точке **m**, отстоящей от **точки надира n** на расстоянии **r**.

Если изображение, полученное на снимке **P**, спроектировать по законам центральной проекции на плоскость **E**, то точка **m** спроектируется в точку **M'**, а не в точку **Mo**.

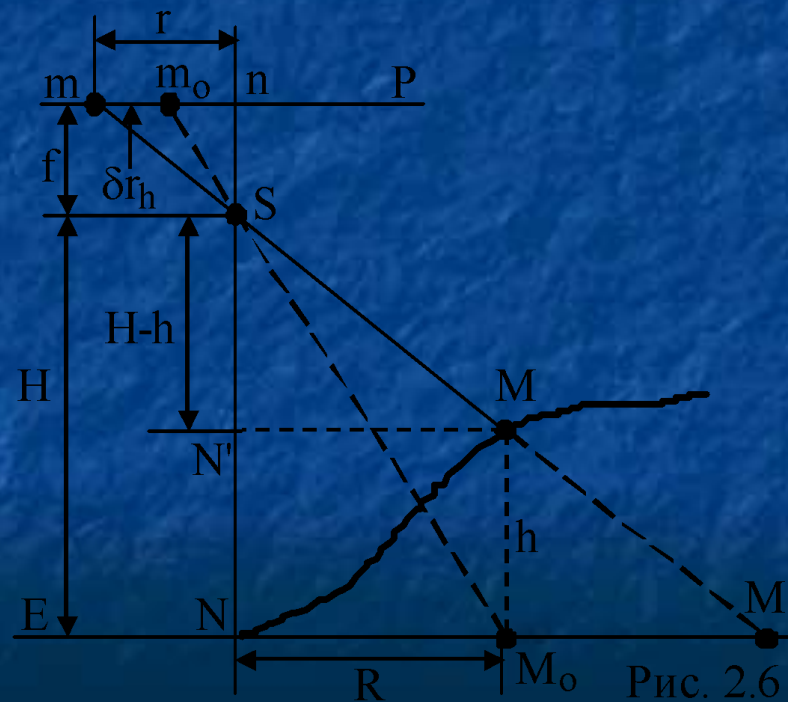
Чтобы точка **m** спроектировалась в точку **Mo**, необходимо сместить её на снимке в точку **mo**. Величину смещения - отрезок **mmo** =  $\delta r_h$  - называют **смещением точки, вызванным рельефом местности**.

Получим формулу, по которой можно рассчитать величину смещения точки на снимке под влиянием рельефа. Из подобия треугольников  $SNM_0$  и  $Snm_0$ , а также  $SN'M$  и  $Snm$  запишем:

$$R = \frac{(r - \delta r_h)H}{f} = \frac{r(H - h)}{f}$$

После преобразований получим **формулу смещений точек на горизонтальном снимке, вызванных рельефом местности**

$$\delta r_h = \frac{rh}{H}$$



## ВЫВОДЫ

Из анализа формулы можно сделать вывод, что  $\delta rh = 0$  при:

1)  $r = 0$ , т.е. в точке надире  $n$  смещение, вызванное рельефом местности, отсутствует. Это объясняется тем, что точка надире является точкой пересечения снимка отвесной линией, т.е. она единственная точка снимка, которая будет соответствовать ортогональной проекции;

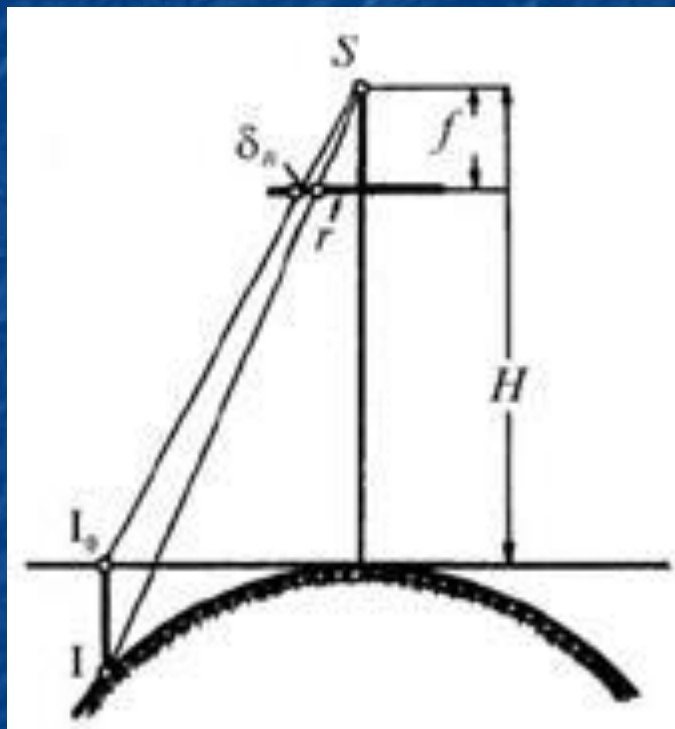
2)  $h = 0$ , т.е. изображение плоской горизонтальной местности преобразуется из центральной проекции в ортогональную проекцию без погрешностей.

Увеличение высоты фотографирования  $H$  приводит к уменьшению величин смещений точек на снимке. Т.к.  $H = fm$ , можно сделать вывод, что на длиннофокусных снимках смещения точек будут меньше, чем на короткофокусных.

В то же время увеличение рельефа и радиус-вектора точек приводит к увеличению их смещений, и наибольшие их величины будут на краю снимка.

**Следовательно, если необходимо получить снимки с минимальными смещениями точек, вызванными рельефом местности, то фотосъёмку следует выполнить с максимально возможной высоты и длиннофокусной фотокамерой с небольшим форматом кадра.**

## Влияние сферичности Земли на фотограмметрические измерения



**максимально допустимая высота фотографирования при заданной величине смещения точки на снимке, вызванного сферичностью Земли.**

$$H = \frac{2Rf^2}{r^3} \delta r_R.$$

Из формулы можно сделать вывод, что **увеличению высоты фотографирования способствуют больший диаметр  $2R$  планеты (линейная зависимость), увеличение фокусного расстояния  $f$  фотокамеры (квадратическая зависимость) и уменьшение формата кадра  $r$  (кубическая зависимость).**

В таблице 2.1 приведены значения высот фотографирования, ниже которых в пределах рабочей площади снимков влияние сферичности Земли ( $R = 6371$  км) при  $\delta r_R \leq 0,01$  мм можно не учитывать. В числителе указаны высоты фотографирования для формата 18x18 см (радиус-вектор угла рабочей площади снимка  $r = 70$  мм), а в знаменателе - для формата 23x23 см ( $r = 90$  мм).

Таблица 2.1

$f$ , мм	70	100	140	200	350	500	1000
H, км	$\frac{1,8}{0,8}$	$\frac{3,7}{1,7}$	$\frac{7,3}{3,4}$	$\frac{14,9}{6,9}$	$\frac{45}{21}$	$\frac{93}{43}$	$\frac{371}{174}$

Топографическая аэросъёмка Земли производится с высот, не превышающих 5 км, и из таблицы можно сделать вывод, что для формата 18x18 см влияние сферичности Земли можно не учитывать для  $f \geq 100$  мм, а для формата 23x23 см - для  $f \geq 140$  мм.

Особенно сильно влияние сферичности Земли и других планет проявляется при фотограмметрической обработке космических снимков, т.к. у них высоты фотографирования на много превышают высоты, указанные в таблице