

УДК 528.71

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК МЕСТНОСТИ ПО СНИМКАМ, ПОЛУЧЕННЫМ АЭРОКАМЕРОЙ ADS-100

канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА;  
канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ  
(Полоцкий государственный университет);  
Е.В. ЛАКОТКА  
(Мозырский нефтеперерабатывающий завод)

Рассматривается аэрофотосъемка, выполняемая аэрокамерой ADS-100. В фокальной плоскости объектива аэрокамеры расположены три ПЗС-линейки, отстоящие друг от друга таким образом, что одна из них обеспечивает съемку в направлении «вперед», другая – в направлении точки надира, третья – в направлении «назад». Таким образом, каждая точка местности оказывается снятой тремя сенсорами, обеспечивая тройное перекрытие, что создает дополнительный контроль при определении координат точек. В работе выполнена оценка точности полученных результатов по эллипсам погрешностей в трех вариантах: при съемке местности линейками ПЗС в направлениях вперед и назад; при съемке – вперед и в надира и при съемке в надира и назад. Самым точным оказался первый способ. Совместное использование всех трех вариантов позволяет повысить точность на 20% при сравнении с первым вариантом.

**Ключевые слова:** аэрокамера, съемка, координаты точек местности, оценка точности, эллипсы погрешностей.

В аэрокамере ADS-100 заложен принцип формирования кадра посредством накопления непрерывной последовательности полос съемки (рисунок 1). Получение изображения реализуется линейным ПЗС-приемником, работающим по принципу классического щелевого фотографирования [1]. В фокальной плоскости объектива расположены три ПЗС-линейки, отстоящие друг от друга таким образом, что одна из них обеспечивает съемку в направлении «вперед», другая – в направлении точки надира, третья – в направлении «назад».

Вдоль маршрута углы отклонения сенсоров от надира равны следующим значениям: передний сенсор (2) –  $25,6^\circ$ ; надириный сенсор (1) –  $0^\circ$ ; задний сенсор (3) –  $17,7^\circ$  (рисунок 1) [2].

Таким образом, каждая точка местности оказывается снятой тремя сенсорами. Известно, что для построения стереоскопического изображения достаточно иметь двойное перекрытие. Однако тройное перекрытие позволяет значительно повысить степень автоматизации при создании цифровых моделей рельефа (ЦМР) [3].

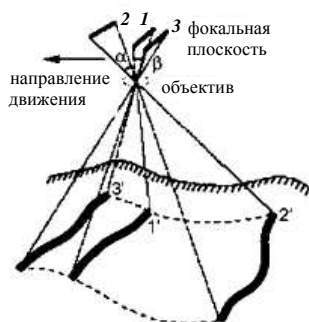


Рисунок 1. – Принцип работы линейного ПЗС-приемника

В таблице 1 представлены основные технические характеристики сканерной съемочной системы ADS100 [2]. В системе ADS100 используется комплексное GPS/IMU-устройство NovAtel SPAN CPT – совместная разработка компаний NovAtel (Канада) и KVH Industries (США) [4]. Это решение объединяет

спутниковые (GPS) и инерциальные (IMU) технологии и реализовано в виде отдельного измерительного блока. Данные GPS и ИНС (IMU) обрабатываются по алгоритму SPAN СРТ. В ходе обработки определяются пространственные координаты, скорость и элементы ориентирования в наиболее сложных условиях, когда спутниковые сигналы блокируются препятствиями [4]. В таблице 2 представлены точностные характеристики IMU-системы в зависимости от модели инерциального блока [5].

Таблица 1. – Технические характеристики аэрокамеры ADS100

Число объективов	1
Число CCD-сенсоров	SH100: 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)
Число фрагментов результирующего кадра	Съемка ведется непрерывно
Размер пиксела, мкм	5
Фокусное расстояние, мм (пикселов)	62,5 (12 500)
Углы поля зрения поперек маршрута	65,2°; 72,5°; 77,3° в зависимости от направления линеек вперед, назад или в надир
Радиометрическое разрешение, бит/пиксел	14
Спектральные диапазоны	R, G, B, NIR
R – линейка, снимающая местность в красной зоне спектра; G – в зеленой; B – в синей (голубой); NIR – в инфракрасной зонах спектра.	

Таблица 2. – Точность определения элементов ориентирования

Модели инерциального блока	Азимут (курс) ( $\kappa$ )	Крен ( $\omega$ )	Тангаж ( $\alpha$ )
FSAS	2'27,6"	54"	54"
HG1700 (H58/H62)	1' 51,6"	46,8"	46,8"
LN200	1' 30"	36"	36"
В скобках указаны обозначения углов, применяемые в фотограмметрии: $\alpha$ – продольный угол наклона; $\omega$ – поперечный угол наклона; $\kappa$ – угол поворота в плоскости снимка.			

Наиболее точным из представленных в таблице 2 является вариант – инерциальный блок LN200. Вычислим, какую погрешность в определении положения пиксела получим, используя данную модель инерциального блока (рисунок 2).

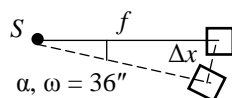


Рисунок 2. – Погрешность в положении пиксела

На основании рисунка 2:  $\Delta x$  – искомая погрешность:  $\Delta x = f \operatorname{tg}(36'') = 10,9$  мкм. Учитывая, что размер пиксела  $l = 5$  мкм (см. таблицу 1), погрешность довольно большая, что снизит точность определения координат точек местности. В связи с этим при дальнейших расчетах примем погрешность измерения по снимкам  $\sigma = l = 5$  мкм. При обработке аналоговых снимков в цифровых технологиях принимают  $\sigma = l/2$ , где  $l$  – размер пиксела при сканировании [6; 7].

Вследствие того, что ADS100 является сканерной съемочной системой, геометрия получаемых изображений несколько отличается от центральной проекции; каждая строка снимка имеет собственные элементы внешнего ориентирования (ЭВО) [8]. Вследствие такого изменения ЭВО геометрически не преобразованные снимки, которые в терминологии компании Leica Geosystems называются изображениями уровня Level 0, содержат существенные геометрические искажения. Поэтому перед выполнением фотограмметрических процессов изображения Level 0 преобразуются в так называемые изображения уровня Level 1, лишенные упомянутых недостатков. Для выполнения этого преобразования используется программное обеспечение GPrо, которое входит в комплект поставки съемочного комплекса ADS100 [8].

Для анализа точности определения координат по снимкам, полученным аэрокамерой ADS 100, выберем масштаб фотографирования  $1:m = 1:20000$ . Анализ расчетов показал, что углы засечки не зависят от масштаба фотографирования, а точностные характеристики изменяются пропорционально масштабу съемки, точность окончательных результатов для других масштабов фотографирования легко определить.

Рассчитаем разрешение на местности  $L$  и высоту фотографирования  $H$  для выбранного масштаба съемки по формулам [9]:

$$L = l \cdot m, \quad (1)$$

где  $l$  – геометрическое разрешение (размер пиксела), мкм;  $m$  – значение знаменателя масштаба;

$$H = f \cdot m. \quad (2)$$

Здесь  $f$  – фокусное расстояние аэрокамеры;  $H$  – высота съемки.

Результаты вычислений приведем в таблице 3.

Таблица 3. – Расчет разрешения на местности и высоты съемки

Масштаб	Геометрическое разрешение, мкм	Разрешение на местности, см	Высота съемки $H$ , м
1:20 000	5	10,0	1250,0

Следующий рассчитываемый нами параметр съемки – условный базис для наблюдения стереоэффекта. Рассмотрим способы нахождения условного базиса при съемке тремя линейками ПЗС, снимающими местность под разными углами.

*Первый способ:* используются линейки ПЗС, снимающие местность вперед под углом  $\alpha_1 = 25,6^\circ$  и назад под углом  $\alpha_2 = 17,7^\circ$  [2] (рисунок 3).

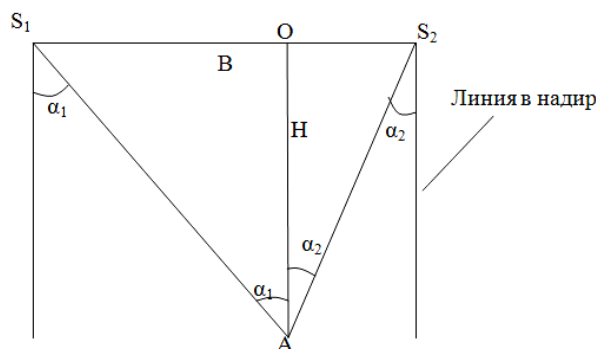


Рисунок 3. – Съемка местности под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$

Согласно рисунку 3,  $S_1S_2 = B$  – базис,  $OA = H$  – высота съемки.

Значение базиса найдем как сумму отрезков  $S_1O$  и  $S_2O$  из прямоугольных треугольников  $S_1OA$  и  $S_2OA$ :

$$B = S_1O + S_2O = H(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2). \quad (3)$$

Результаты выполненного вычисления сведем в таблицу 4.

Таблица 4. – Расчет условного базиса для первого способа съемки

Масштаб	$H$ , м	$S_1O$ , м	$S_2O$ , м	$B$ , м
1:20 000	1250	600	400	1000

*Второй и третий способы:* одна из линеек снимает в надир; вторая – при отклонении проектирующего луча на угол  $\alpha_1 = 25,6^\circ$  и  $\alpha_2 = 17,7^\circ$  (рисунок 4).

Согласно рисунку 4, выразим базис  $B_i$ :

$$B_i = H \cdot \operatorname{tg}\alpha_i. \quad (4)$$

Рассчитанные по формулам (3) и (4) значения базисов для вариантов засечек, возникающих при съемке аэрокамерой ADS 100, представим в таблице 5.

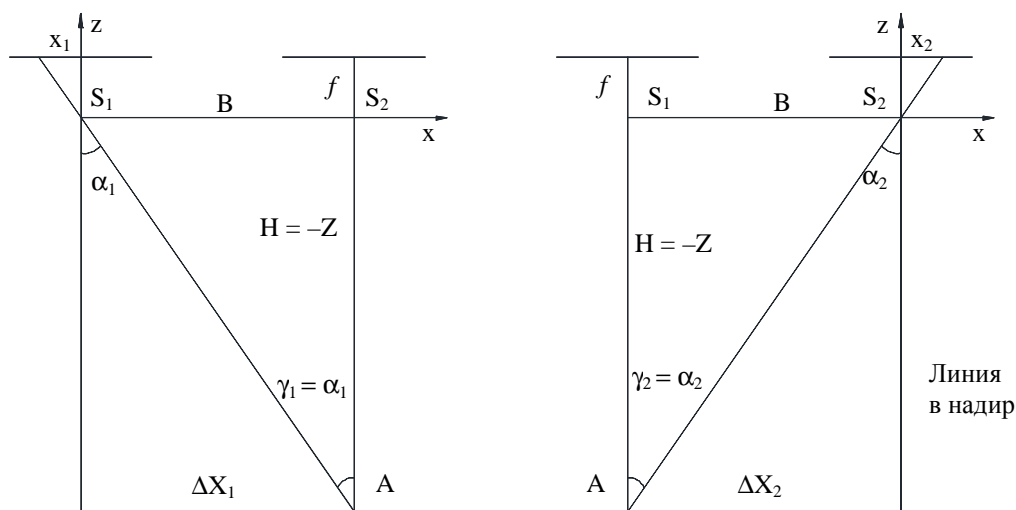


Рисунок 4. – Съемка местности линейками ПЗС в надир и под углом  $\alpha_i$

Таблица 5. – Значения условного базиса для наблюдения стереоэффекта

Масштаб	H, м	1-й способ		2-й способ		3-й способ	
		Направление проектирующих лучей					
		$\alpha_1 = 25,6^\circ$ $\alpha_2 = 17,7^\circ$		$\alpha_1 = 25,6^\circ$ надир		$\alpha_2 = 17,7^\circ$ надир	
		Значения базисов: B – на местности; b – на снимке					
		B, м	b, мм	B, м	b, мм	B, м	b, мм
1:20 000	1250	1000	50	600	30	400	20

В литературе [1; 10] встречается утверждение, что чем больше отношение  $B/H$ , тем выше точность определения отметок точек местности. Рассчитанные значения  $B/H$  приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Значения отношений  $B/H$

Способ наблюдения стереоэффекта	1-й	2-й	3-й
Базис/высота $B/H$	0,8	0,48	0,32

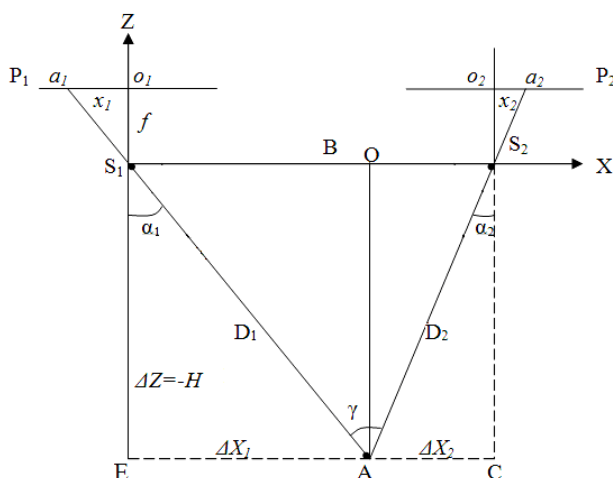
На основании [1; 10] и согласно данным, представленным в таблице 6, самым точным должен быть первый способ. Проверим это на основе эллипсов погрешностей. В фотограмметрии положение точек на местности определяется путем решения прямых угловых засечек. Для условий аэрофото-съемки с использованием аэрокамеры ADS 100 возможны три варианта засечки.

Как отмечено в работах [11; 12], средние квадратические ошибки определения абсцисс  $m_x$  и ординат  $m_y$  равны между собой, поэтому мы будем рассматривать координаты  $X$  и  $Z$  и их ошибки. В случае съемки тремя ПЗС-линейками, по всей площади снимка будет обеспечено тройное перекрытие, что создаст дополнительный контроль при определении координат точек [3].

Как видно из рисунка 3 и 4, ни одна из засечек не представляет собой равнобедренный треугольник, поэтому можно отметить, что эллипсы погрешностей будут занимать различное положение в данной системе координат – у каждого эллипса будет присутствовать угол разворота. В этом случае средними квадратическими ошибками будут основания касательных, проведенных параллельно осям координат  $X$  и  $Z$ , или СКО рассчитываются по формулам в работе [18].

На основе рассчитанных элементов эллипсов погрешностей определим, какой из представленных на рисунках 3 и 4 случаев засечки позволит получить наименьшие СКО  $m_x$  и  $m_z$  определения координат точек местности.

*Первый способ:* засечка образована проектирующими лучами, идущими под углами  $\alpha_1 = 25,6^\circ$  и  $\alpha_2 = 17,7^\circ$ , как показано на рисунке 5. В образовании стереопары участвуют линейки ПЗС, снимающие местность в направлениях вперед ( $\alpha_1 = 25,6^\circ$ ) и назад ( $\alpha_2 = 17,7^\circ$ ).



**Рисунок 5. – Прямая фотограмметрическая засечка из направлений вперед-назад**

Согласно рисунку 5, точность определения координат  $X$  и  $Z$  будет зависеть от точности определения углов  $\alpha_i$ . В нашем случае углы  $\alpha_i$  нам известны.

В работе [13] получены формулы связи между измеренными координатами точки, значением фокусного расстояния и углами  $\alpha$  и  $\gamma$  на основе засечки в виде равнобедренного треугольника:

$$\alpha = \arctg \frac{x}{f}, \quad (5)$$

а угол  $\gamma$  получим на основании рисунка 5:

$$\gamma = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (6)$$

где  $x$  – измеренная абсцисса точки местности на снимке;  $f$  – фокусное расстояние аэрофотокамеры.

Преобразуем формулу (5) применительно к засечке, показанной на рисунке 5. Значение  $x_1$  получим из подобия треугольников  $S_1O_1a_1$  и  $S_1DA$ , а  $x_2$  – из треугольников  $S_2O_2a_2$  и  $S_2CA$ :

$$x_1 = \frac{\Delta X_1}{H} = \frac{S_1Of}{H} = \frac{S_1O}{m}, \quad (7)$$

$$x_2 = \frac{\Delta X_2}{H} = \frac{S_2Of}{H} = \frac{S_2O}{m}. \quad (8)$$

Выше мы рассчитали значения отрезков  $S_1O$  и  $S_2O$  (таблица 4). Значение  $x_1$  для всех масштабов получили 30 мм, а для  $x_2$  получили –20 мм.

Углы засечек:  $\alpha_1 = 25,6^\circ$ ,  $\alpha_2 = 17,7^\circ$ .

Углы для засечек, показанных на рисунках 3 и 5, сведем в таблицу 7.

Таблица 7. – Значения углов для засечек и координат точек снимка для разных способов съемки

Параметры	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\gamma$	$x_1$ , мм	$x_2$ , мм
1-й способ	$25^\circ 36'$	$17^\circ 42'$	$43^\circ 18'$	30	–20
2-й способ	$25^\circ 36'$	$0^\circ$	$25^\circ 36'$	30	0
3-й способ	$0^\circ$	$17^\circ 42'$	$17^\circ 42'$	0	–20

Для дальнейших вычислений необходимо определить СКО углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Для решения этой задачи формулу (5) дифференцируют по переменным  $x$  и  $f$  и возводят в квадрат [13].

Таким образом, имеем

$$m_{\alpha}^2 = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right)^2 \rho^2 \sigma^2 + \left( \frac{\partial \alpha}{\partial f} \right)^2 \rho^2 m_f^2, \quad (9)$$

где  $m_{\alpha}$  – СКО угла  $\alpha$ ;  $\sigma$  – СКО измерения координат на снимке;  $m_f$  – СКО определения фокусного расстояния. Как отмечено выше, СКО определения координат на снимке примем  $\sigma = 5$  мкм – размер пиксела. Средние квадратические ошибки определения фокусного расстояния определим из соотношения [13]:

$$\frac{m_f}{f} = \frac{1}{10000}, \quad (10)$$

откуда  $m_f = 0,006$  мм.

Найдя частные производные уравнения (5), подставив их в формулу (9) и выполнив преобразования, авторы работы [13] получили следующую формулу:

$$m_{\alpha} = \frac{\rho}{f^2 + x^2} \sqrt{f^2 \sigma^2 + x^2 m_f^2}. \quad (11)$$

Рассчитанные значения СКО для рассматриваемых вариантов съемки приведены в таблице 8

Таблица 8. – Значения средних квадратических ошибок и весов

Способ	1-й способ	2-й способ	3-й способ
$m_{\alpha 1}$	15,47693	15,47693	16,5012
$m_{\alpha 2}$	16,03409	16,5012	16,03409
$P_1$	1,073295	1,136741	1
$P_2$	1	1	1,059113

Так как СКО определения углов  $m_{\alpha}$  отличаются между собой, то измерения не равноточные и необходимо ввести веса  $P$ . В качестве ошибки единицы веса  $\mu$  мы приняли наибольшую ошибку из вычисленных СКО  $m_{\alpha 1}$  и  $m_{\alpha 2}$ . Значение веса вычислили по формуле [14]:

$$P_i = \frac{\mu^2}{m_{\alpha_i}^2}. \quad (12)$$

Для определения координат точек местности в фотограмметрии можно применить параметрический способ уравнивания. Значения координат будут получены по формулам [15]:

$$X = X_0 + \Delta X, \quad Z = Z_0 + \Delta Z, \quad (13)$$

где  $\Delta X$  и  $\Delta Z$  – поправки к приближенным значениям координат точки  $A$  (рисунки 3, 4, 5);  $X_0, Z_0$  – приближенные значения координат, которые, согласно рисунку 5, будут равны:

$$X_0 = \Delta X_1; \quad Z_0 = -H. \quad (14)$$

Величины поправок в координаты  $\Delta X$  и  $\Delta Z$  находят по способу наименьших квадратов с использованием дифференциальной формулы угла  $\alpha$  [15], которая применительно к системе координат, показанной на рисунке 5, имеет вид:

$$d\alpha = \frac{(a)}{L} dX + \frac{(b)}{L} dZ, \quad (15)$$

где  $(a) = \rho \sin \alpha$ ,  $(b) = \rho \cos \alpha$ .

Запишем формулу (15) согласно обозначениям, принятым на рисунке 5.

$$d\alpha_1 = \frac{\rho \sin \alpha_1}{L_1} dX + \frac{\rho \cos \alpha_1}{L_1} dZ, \quad (16)$$

$$d\alpha_2 = \frac{\rho \sin \alpha_2}{L_2} dX + \frac{\rho \cos \alpha_2}{L_2} dZ. \quad (17)$$

Значения углов  $\alpha_i$  известны. Отрезки  $L_1$  и  $L_2$  получены из треугольников  $S_1DA$  и  $S_2CA$  (рисунок 5):

$$L_1 = \sqrt{\Delta X_1^2 + \Delta Z^2}; \quad L_2 = \sqrt{\Delta X_2^2 + \Delta Z^2}. \quad (18)$$

В свою очередь, на основании рисунков 4 и 5  $\sin \alpha_i = \frac{\Delta X_i}{L_i}$ ;  $\cos \alpha = -\frac{\Delta Z}{L_i}$ . Знак плюс или минус у значения  $\sin \alpha$  будет зависеть от знака  $\Delta X_i$ , а знак у  $\cos \alpha$  всегда будет иметь знак «минус».

На основании работы [13] введем обозначения:

$$\frac{\rho \sin \alpha_1}{L_1} = a_1; \quad \frac{\rho \cos \alpha_1}{L_1} = b_1, \quad (19)$$

$$\frac{\rho \sin \alpha_2}{L_2} = a_2; \quad \frac{\rho \cos \alpha_2}{L_2} = b_2. \quad (20)$$

После этого формулы (16) и (17) примут вид:

$$d\alpha_1 = a_1 dX + b_1 dZ, \quad (21)$$

$$d\alpha_2 = a_2 dX + b_2 dZ. \quad (22)$$

В матричной форме уравнения (21)...(22) запишутся в следующем виде [13]:

$$\begin{vmatrix} d\alpha_1 \\ d\alpha_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} dX \\ dZ \end{vmatrix} = A \cdot \begin{vmatrix} dX \\ dZ \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Матрица коэффициентов нормальных уравнений  $B$  получится в результате перемножения матриц  $A^T$  на  $A$  [16; 17]:

$$B = A^T \cdot A = \begin{vmatrix} (p_1 a_1 a_1 + p_2 a_2 a_2) & (p_1 a_1 b_1 + p_2 a_2 b_2) \\ (p_1 a_1 b_1 + p_2 a_2 b_2) & (p_1 b_1 b_1 + p_2 b_2 b_2) \end{vmatrix}, \quad (24)$$

где  $p_i$  – вес  $i$ -го измерения, рассчитываемый по формуле (12).

Для удобства записи последующих формул введем обозначения:

$$\begin{aligned} p_1 a_1 a_1 + p_2 a_2 a_2 &= c, \\ p_1 a_1 b_1 + p_2 a_2 b_2 &= e, \\ p_1 b_1 b_1 + p_2 b_2 b_2 &= d. \end{aligned} \quad (25)$$

На основе обратной матрицы коэффициентов нормальных уравнений  $Q = B^{-1} = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{vmatrix}$  можно определить СКО координат точек по формулам [18]:

$$\begin{aligned} m_z &= \mu \sqrt{Q_{11}}, \\ m_{x,y} &= \mu \sqrt{Q_{22}}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $Q_{11}$  и  $Q_{22}$  – диагональные элементы обратной матрицы;  $\mu$  – СКО единицы веса, приведенные в таблице 8.

Рассчитанные значения коэффициентов уравнений поправок по формулам (19)...(20) и коэффициентов нормальных уравнений по формулам (25), значения  $\mu$  и средние квадратические ошибки  $m_z$  и  $m_{x,y}$  для вариантов засечек, представленных на рисунках 4 и 5, приведены в таблице 9.

Направление искажений показывает эллипс погрешностей.

По вычисленным значениям  $c$ ,  $e$ ,  $d$  можно определить угол разворота осей эллипса погрешностей  $\theta$  относительно принятой системы координат [16]:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2e}{c-d}. \quad (26)$$

Таблица 9. – Расчет коэффициентов уравнений поправок и нормальных уравнений для первого, второго и третьего вариантов засечек

Определяемые параметры	Масштаб съемки 1:20000		
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
$x_1$ , мм	30	30	0
$x_2$ , мм	-20	0	-20
$\Delta X_1$ , м	600	600	0
$\Delta X_2$ , м	-400	0	-400
$\Delta Z$ , м	-1250	-1250	-1250
$L_1$ , м	1386,54246	1386,54246	1250
$L_2$ , м	1312,44047	1250	1312,44047
$a_1$	64,373992	64,373992	0,000000
$b_1$	-134,112484	-134,112484	-165,012000
$a_2$	-47,898984	0,000000	-47,898984
$b_2$	-149,684325	-165,012000	-149,684325
$c$	6742,058683	4710,667033	2429,936373
$e$	-2096,410425	-9813,889701	7593,551166
$d$	41709,850357	47674,56379	50958,80754
$\mu''$	16,03409	16,5012	16,5012
$m_{x,y}$ , см	7,91	10,00	10,00
$m_z$ , см	19,68	31,81	45,79

Наличие коэффициентов нормальных уравнений позволяют определить значения большой  $R_{max}$  и малой  $R_{min}$  полуосей эллипса погрешностей по формулам [17]:

$$R_{max}^2 = \frac{2\mu^2}{c + d - \sqrt{(c-d)^2 + 4e^2}}, \quad (27)$$

$$R_{min}^2 = \frac{2\mu^2}{c + d + \sqrt{(c-d)^2 + 4e^2}}. \quad (28)$$

В случае если угол разворота осей эллипса погрешностей  $\theta$  равен нулю, величина малой полуоси эллипса будет соответствовать значению СКО  $m_{x,y}$ , а величина большой полуоси – СКО  $m_z$  [19].

Рассчитаем угол разворота и значения большой и малой полуосей эллипса погрешностей по формулам (27)–(28) для засечек, представленных на рисунках 4 и 5. Результаты вычислений занесем в таблицу 10. Эллипсы погрешностей для рассматриваемых вариантов приведены на рисунке 6.

Таблица 10. – Расчет элементов эллипса погрешностей для трех вариантов засечек

Определяемые параметры	Значения масштаба 1:20000		
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант
$\theta$	3° 25' 13,6"	12° 16' 57,79"	-8° 41' 35,37"
$R_{max}$ , см	19,72	32,52	46,30
$R_{min}$ , см	7,84	7,40	7,02

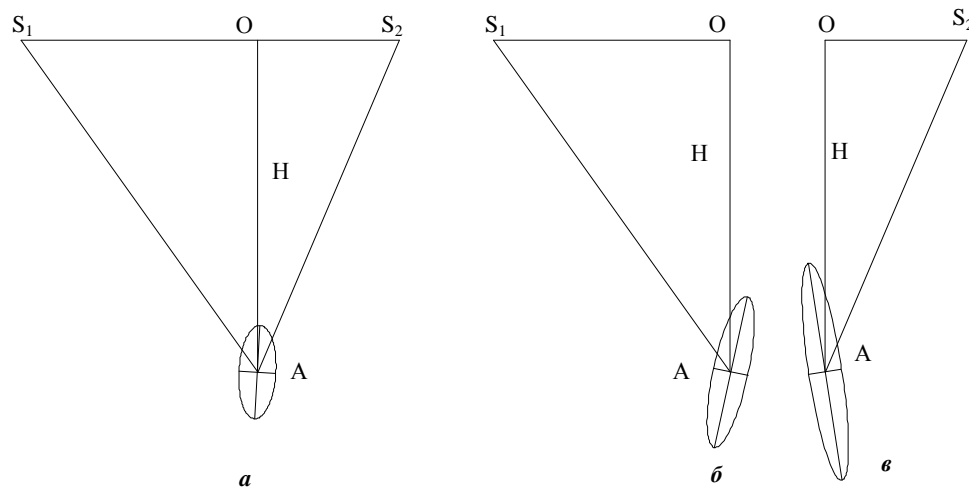


Рисунок 6. – Эллипсы погрешностей для рассматриваемых вариантов



На основании данных таблицы 10 и рисунка 6 углы засечек  $\gamma$  во всех вариантах меньше  $90^\circ$ , а следовательно, отметки будут определены грубее, чем плановые координаты, что подтверждают и данные таблицы 9. Наиболее точным из представленных получился первый вариант засечки, так как ее вид более близок к равнобедренному треугольнику и угол засечки  $\gamma$  больше, чем для других вариантов. Кроме этого, ранее мы рассчитали отношение  $B/H$ , которое, как утверждает автор [1], является критерием точности определения отметок. Рассчитанное значение  $B/H$  оказалось больше у первого варианта засечки и, как видно из таблицы 9, ей соответствует наименьшее значение ошибки по высоте:  $m_z = 19,68$  см.

Согласно работе [8], по снимкам, полученным камерой ADS100, можно получить следующую точность определения координат:

$$m_{x,y} = L, \quad (29)$$

$$m_z = 1,5L, \quad (30)$$

где  $L$  – размер пиксела (разрешение) на местности.

Величину разрешения на местности  $L$  мы рассчитали ранее в таблице 3. Оттуда видно, что  $L = 10$  см. Тогда согласно формулам (29)...(30) получим:  $m_{x,y} = 10$  см;  $m_z = 15$  см. Сравнив их со значениями в таблице 9, видим, что плановые координаты получили несколько точнее. Однако для производства, возможно, следует принять  $m_{x,y} = L$ . Для первого варианта съемки высоты получили грубее  $m_z = 19,68$  см. Для второй засечки – почти в два раза хуже ( $m_z = 31,81$ ), для третьей – ( $m_z = 45,79$ ) т.е. еще грубее.

Учитывая, что для производства желательно увеличить допуск, формула (30) должна иметь вид:

$$m_z = 2,0 L. \quad (31)$$

Это для случая, если в обработку принят первый вариант съемки.

На ЦФС (например, PHOTOMOD) обработку снимков производят совместно, для дополнительного контроля и отбраковки грубых измерений. Рассмотрим, позволит ли это повысить точность определения высот, если в стереоскопических наблюдениях участвуют:

- стереопары, образованные двумя способами засечек (например, первой и третьей, второй и третьей);
- стереопары, образованные всеми тремя способами засечки.

Средние квадратические ошибки наиболее надежного измерения (среднее весовое) рассчитываются [20] по формуле:

$$m_z = \frac{\mu}{[P]}, \quad (32)$$

где  $\mu$  – ошибка единицы веса, равная наибольшей из СКО  $m_z$ ;  $P$  – вес  $i$ -го измерения, рассчитываемый по формуле (12).

Согласно таблице 9, ошибка единицы веса будет равна  $\mu = 45,79$  см.

Вычисление среднего весового  $m_z$  сведем в таблицу 11.

Таблица 11. – Вычисление среднего весового  $m_z$

Способ засечки	$m_z$ , см	$P_i$	$m_z$ , см		$m_z$ , см
			варианты 1, 3	варианты 2, 3	варианты 1, 2, 3
1	19,68	5,416	18,08	26,13	15,72
2	31,81	2,072			
3	45,79	1			

Как видим по данным таблицы 11, при любой комбинации засечек точность по высоте повысилась. При совместной обработке всех трех вариантов засечек точность по высоте улучшилась на 4 см по сравнению с  $m_z = 19,68$  см, что составляет 20% от самой величины  $m_z$  и говорит о целесообразности совместной обработки снимков, полученных при съемке всеми тремя линейками ПЗС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Севастьянова, М.Н. Цифровые аэрофотосъемочные системы : метод. пособие по курсу «Техника и технология аэрокосмической съемки» / М.Н. Севастьянова, С.А. Серебряков – М. : Изд-во МИИГАиК, 2015. – 58 с.
2. Зинченко, О.Н. Цифровые камеры для топографической аэрофотосъемки. Обзор моделей [Электронный ресурс] / О.Н. Зинченко. – М. : Ракурс. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=784>.
3. Сечин, А.Ю. Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер [Электронный ресурс] / А.Ю. Сечин. – М. : Ракурс. – Режим доступа <http://www.credodialogue.com>.
4. Янкуш, А.Ю. Оборудование NovAtel SPAN СРТ / А.Ю. Янкуш / Геопрофи. – 2008. – № 3. – С. 40–41.

5. Янкуш А.Ю. Высокоточное комплексное позиционирование ГНСС+ИНС / А.Ю. Янкуш // От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии : VIII междунар. науч.-техн. конф., Пореч (Хорватия), 15–18 сентября 2008 г. – Пореч : ООО «ГРСС плюс», 2008.
6. Евстратова, Л.Г. Технология создания цифровых карт в свободной системе координат / Л.Г. Евстратова // Геодезия и картография. – 2004. – № 9. – С. 42–44.
7. Книжников, Ю.Ф. Зависимость точности стереоскопических измерений от размера пиксела цифровых снимков / Ю.Ф. Книжников // Геодезия и картография. – 2003. – № 4. – С. 32–41.
8. Титаров, П.С. Фотограмметрическая обработка снимков ADS 40 в программе Photomod [Электронный ресурс] / П.С. Титаров. – Режим доступа <http://www.racurs.ru>.
9. Михеева, А.А. Прикладная фотограмметрия : учеб.метод. компл. для студентов специальности 1-56 02 01 «Геодезия» / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2006. – 320 с.
10. Обзор космических съемочных систем высокого разрешения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vinek.narod.ru/satellites.htm>.
11. Минько, В.Ю. Технологическое проектирование аэрофотосъемки / В.Ю. Минько. – М. : Недра, 1991. – 154 с.
12. Ackremann, F. Application of GPS for Aerial Triangulation / F. Ackremann, H. Schade // Photogrammetric Engineering Remote Sensing. – 1993. – Vol. 59, № 11. – P. 1625–1632.
13. Михеева, А.А. Оценка формул расчета разрешения при сканировании аэрофотоснимков и формул предрасчета точности определения координат точек местности по эллипсам погрешностей / А.А. Михеева, В.И. Медведев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк, 2011. – № 8. – С. 159–169.
14. Голубев, В.В. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. пособие / В.В. Голубев. – М., 2005. – 62 с.
15. Селиханович, В.Г. Геодезия / В.Г. Селиханович. – М. : Недра. – 388 с.
16. Мицкевич, В.И. Применение нелинейного программирования при обработке геодезических сетей : дис. ... канд. техн. наук / В.И. Мицкевич. – Новосибирск, 1981. – 232 с.
17. Кель, Н.Г. Высшая геодезия и геодезические работы / Н.Г. Кель, В.А. Баринов. – Москва ; Ленинград ; Новосибирск, 1933. – 508 с.
18. Гудков, В.М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений : учеб. для вузов / В.М. Гудков, А.В. Хлебников. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
19. Чеботарев, А.С. Способ наименьших квадратов с основами теории вероятности / А.С. Чеботарев. – М. : Геодезиздат, 1958. – 606 с.
20. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. пособие. – М. : МИИГАиК, 2016. – Ч. I : Теория ошибок измерений. – 56 с.

Поступила 23.11.2017

## THE ANALYSIS OF ACCURACY OF COORDINATES DEFINITION USING IMAGES MADE BY CAMERA ADS-100

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, E. LAKOTKA

*In the recent time the aerial survey in Belarus is made with the air camera ADS-100. There are three CCD rulers located on the focusing plane of the air camera lens in such a way that one of them provides the footage in the front, the second – in the plate nadir direction, the third – in the back. Therefore, each point is shot with three sensors providing triple coverage, which creates additional control over the point coordinates determination. The paper examines the accuracy of the results using ellipse of errors for three options: aerial survey with the CCD rulers in the front and back; in the front and in the plate nadir direction, and in the plate nadir direction and back. The first method proved to be the most accurate. The combination of the three methods increases the accuracy by 20% compare to the first method.*

**Keywords:** *aerocamera, survey, coordinates location, accuracy assessment, the ellipses of errors.*