

**А.В. Гормаш** (ООО «Тримм», Пермь)

В 2000 г. окончил Пермский ГТУ по специальности «инженер-геодезист». В настоящее время – директор ООО «Тримм».

**Т.В. Дорофеева** (ООО «Тримм», Пермь)

В 2006 г. окончила Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК) по специальности «прикладная геодезия». В настоящее время – ведущий специалист ООО «Тримм».

**И.В. Оньков** (ООО «Тримм», Пермь)

В 1970 г. окончил МИИГАиК по специальности «астроном-геодезист». В настоящее время – научный консультант ООО «Тримм».

## Влияние геометрических параметров съемки на точность ортофотопланов, создаваемых по снимкам с КА IKONOS

Точность цифровых ортофотопланов, созданных по космическим снимкам, играет определяющую роль при оценке возможности их использования для решения задач топографического и кадастрового картографирования, составления и обновления карт и планов. Исследованию различных аспектов данной проблемы, особенно после ввода в эксплуатацию космических съемочных систем высокого разрешения (IKONOS, QuickBird и пр.), обеспечивающих возможность картографирования в крупных масштабах (1:2000-1:5000), уделяется достаточно большое внимание [1-5].

Одним из основных факторов, влияющих на точность создания ортофотопланов по космическим снимкам, является геометрия съемки и, в первую очередь, угол наклона оптической оси камеры к снимаемой поверхности. Экспериментальная оценка влияния этого фактора на примере двух снимков IKONOS с большим ( $43,1^\circ$ ) и малым ( $10,6^\circ$ ) углом наклона камеры по 40 контрольным точкам, выполненная в работе [6], подтверждает этот факт и необходимость дальнейшего исследования этой проблемы с привлечением большего объема экспериментальных данных для получения более надежных статистических оценок.

В данной работе на основе созданных ортофотопланов территории города Перми по космическим снимкам IKONOS (Geo Ortho Kit) выполнены эксперимен-

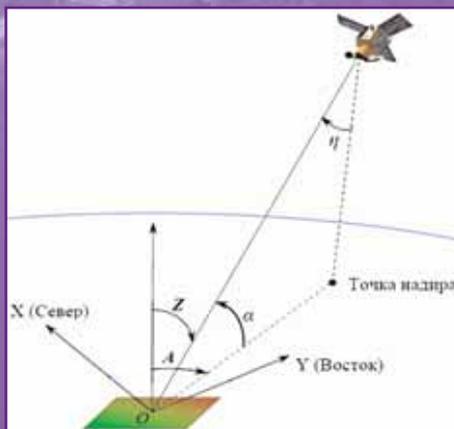


Рис. 1.  
Геометрия космической съемки

тальные исследования точности ортофотоплана в зависимости от геометрических параметров съемки – угла отклонения от зенита  $Z$  и азимута направления на спутник  $A$  (рис. 1). Для исследования было использовано 12 снимков, полученных с 7 маршрутов в широком диапазоне углов зенитного отклонения от  $1,6^\circ$  до  $29,2^\circ$ .

Как известно, процесс ортотрансформирования включает в себя процедуру вычисления поправок за рельеф местности на основе данных о геометрии съемки (в виде элементов внешнего ориентирования камеры) и данных о высоте снимаемых точек местности над некоторой, условно принятой поверхностью относимости. Эти данные хранятся в виде цифровой модели рельефа (ЦМР). В любом случае высоты точек ЦМР содержат неизбежные ошибки, так как они получены в результате измерений и некоторых математических преобразований, вносящих ошибки, например, операции интерполирования. В свою очередь, ошибка вертикальной составляющей цифровой модели рельефа  $\Delta h$  в некоторой точке  $P$  приводит к ошибке положения этой точки на ортофотоплане на величину  $\Delta r$ , пропорциональную котангенсу угла возвышения спутника  $\alpha$  или тангенсу угла отклонения от зенита  $Z$ , т. е.:

$$\Delta r = \Delta h \cdot \operatorname{ctg} \alpha = \Delta h \cdot \operatorname{tg} Z,$$

причем направление смещения совпадает с азимутом направления на спутник  $A$  и знаком ошибки  $\Delta h$ .

Особенностью оптико-электронных систем космической съемки является малый угол поля зрения камеры

(IKONOS –  $0,93^\circ$ ), вследствие чего при оценке точности можно считать значения углов  $\alpha$  и  $A$  для всех точек одного снимка одинаковыми. В этом случае направления ошибок точек ортофотоплана, вызванные ошибками ЦМР, будут коллинеарны направлению на спутник, т. е. азимуты этих направлений будут совпадать.

Геометрия съемки также сказывается на разрешающей способности ортоизображения. С увеличением угла зенитного отклонения увеличивается расстояние  $S$  до спутника, что приводит к увеличению размера площади, покрываемой одним пикселем на поверхности Земли, – поперек направления на спутник пропорционально отношению  $S/H$ , вдоль направления – пропорционально отношению  $S/(H \cdot \sin \alpha)$ .

Для ортотрансформирования снимков г. Перми использовалась ЦМР, созданная путем оцифровки топографических карт масштаба 1:25 000 с высотой сечения рельефа 5 м. Средние квадратические ошибки высот ЦМР, по независимым оценкам, составили 1,0–2,5 м.

Фотограмметрическая обработка снимков и создание ортофотопланов выполнялось в программе «Талка 3.5» с использованием коэффициентов рациональных полиномов (RPC) и данных GPS-измерений координат и высот опознаков. Были определены координаты 176 опознаков, из которых 163 использовались как опорные при уравнивании блочной фототриангуляции, а 13 – в качестве контрольных.

Оценка точности ортофотопланов осуществлялась по отклонениям прямоугольных координат контрольных точек, измеренных на ортофотоизображении, от координат этих же точек, снятых с оцифрованных планшетов наземной топографической съемки масштаба 1:500 и цифровых планов масштаба 1:1000, созданных по материалам аэрофотосъемки, а также материалов геодезических измерений при координировании углов зданий. В качестве контрольных точек брались углы многоэтажных зданий, достаточно уверенно опознаваемые на фотоизображении (рис. 2). В общей сложности было измерено более полутора тысяч точек, покрывающих большую часть города с многоэтажной застройкой, на которую имелись материалы топографических съемок и геодезических измерений (рис. 3).



Рис. 2.  
Пример выбора контрольных точек на ортофотоплане и цифровом топоплане масштаба 1:500

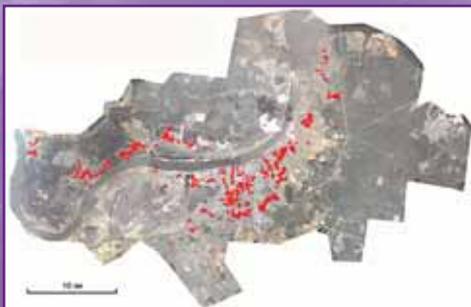


Рис. 3.  
Распределение контрольных точек по территории г. Перми

Измерения группировались по признаку пространственной близости так, чтобы в каждой группе (выборке) было не менее 50 точек. Окончательно в обработку были приняты измерения на 1373 контрольных точках, сводные данные о которых приведены в табл. 1.

Статистическая обработка данных выполнялась в соответствии с предположением, что измеренные разности координат контрольных точек  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  являются суммами трех независимых ошибок: случайных погрешностей измерения  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , систематических ошибок  $\xi_x$ ,  $\xi_y$ , зависящих от координат контрольной точки, и

погрешностей  $\delta X$ ,  $\delta Y$ , вызванных погрешностями высот ЦМР, т. е.:

$$\Delta X = \varepsilon_x + \xi_x + \delta_x;$$

$$\Delta Y = \varepsilon_y + \xi_y + \delta_y.$$

Случайные погрешности разностей координат возникают вследствие ошибок опознавания контрольных точек на фотоизображении, ошибок дискретизации раstra, случайных погрешностей контуров на топографическом плане и т. д.

Причиной возникновения систематических ошибок, зависящих от координат контрольных точки, является, в основном, неоднородность топографических планов города, которые создавались на протяжении десятилетий различными организациями, использующими геодезические основы, часто не связанные между собой.

Для исключения систематических ошибок из измеренных разностей координат использовалась аффинная модель, коэффициенты которой оценивались из решения систем уравнений в каждой группе измерений по методу наименьших квадратов.

Остаточные отклонения координат  $V_x$  и  $V_y$  после выполнения процедуры аффинного преобразования рассматривались как случайные погрешности, зависящие только от случайных погрешностей измерений и цифровой модели рельефа.

В табл. 2 приведены основные статистические характеристики погрешностей измерений, полученные в результате описанной выше обработки.

Таблица 1

### Число измерений по группам и маршрутам

Номер маршрута	Угол зенитного отклонения, °	Азимут направления на ИСЗ, °	Число групп на маршруте	Число измерений в маршруте
3336	1,6	16,5	3	215
7401	6,5	36,3	2	122
3337	10,8	13,2	4	268
7400	14,5	22,4	4	268
7399	22,6	18,5	3	168
3063	28,4	297,7	2	145
7398	29,2	289,6	2	187
Всего			20	1373

## Основные статистические характеристики погрешностей измерений

№ группы	Z, °	A, °	n	a <sub>95</sub> , м	b <sub>95</sub> , м	θ, °	CE95, м
1	1,6	16,5	68	1,45	1,41	6,7	1,73
2			57	1,88	1,80	34,7	1,84
3			90	1,94	1,44	327,5	1,43
4	6,5	36,3	72	2,11	1,72	271,8	1,68
5			50	1,79	1,57	273,5	1,93
6	10,8	13,2	72	1,90	1,54	30,4	2,17
7			57	2,20	1,47	18,1	1,90
8			73	2,19	1,47	18,9	1,91
9			66	2,55	1,50	19,6	1,74
10	14,5	22,4	83	2,43	1,57	41,6	2,48
11			61	2,26	1,71	31,6	2,28
12			67	2,55	1,91	33,0	2,02
13			57	2,77	2,09	36,1	2,10
14	22,6	18,5	57	2,87	1,47	20,6	2,72
15			53	2,59	1,79	38,7	2,27
16			58	3,19	1,94	19,8	2,40
17	28,4	297,7	69	2,53	1,55	299,7	2,17
18			76	2,53	1,58	297,2	2,16
19	29,2	289,6	72	3,29	1,71	285,6	2,72
20			115	3,20	1,90	284,4	2,75

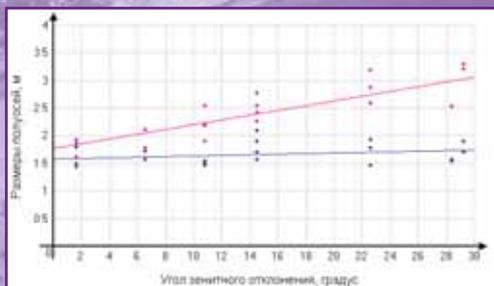


Рис. 4.  
Зависимость большой и малой полуосей 95% эллипса ошибок от угла отклонения спутника от зенита

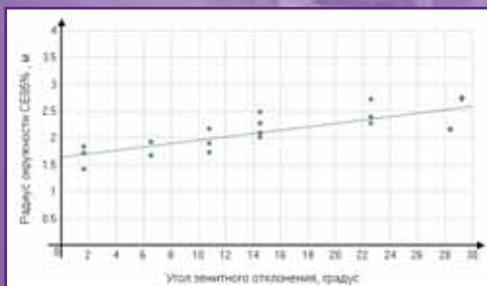


Рис. 5.  
Зависимость круговой ошибки CE95 от угла отклонения спутника от зенита

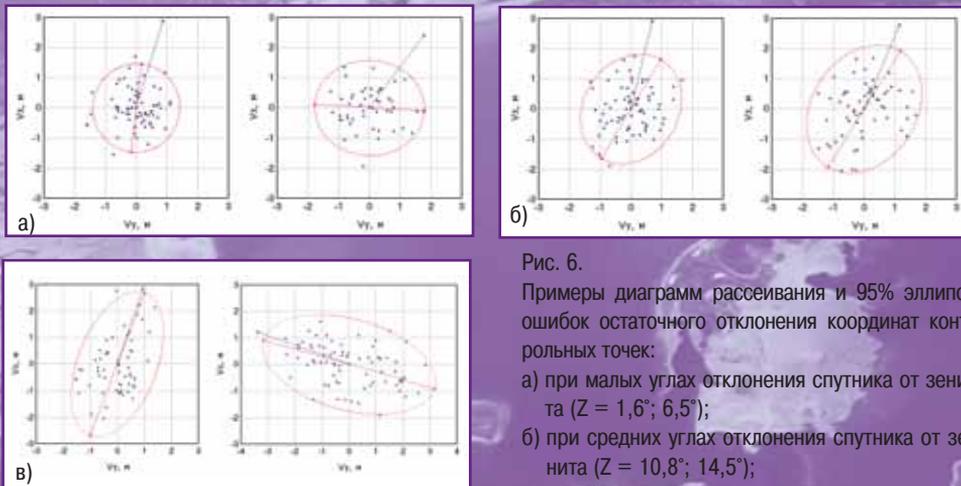


Рис. 6.

Примеры диаграмм рассеивания и 95% эллипса ошибок остаточного отклонения координат контрольных точек:

- а) при малых углах отклонения спутника от зенита ( $Z = 1,6^\circ; 6,5^\circ$ );
- б) при средних углах отклонения спутника от зенита ( $Z = 10,8^\circ; 14,5^\circ$ );
- в) при больших углах отклонения спутника от зенита ( $Z = 22,6^\circ; 29,2^\circ$ )

Полученные оценки статистических характеристик погрешностей с достаточной для практики точностью в диапазоне отклонений спутника от зенита от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  могут быть аппроксимированы следующими линейными выражениями (рис. 4 и 5):

$$a_{95}(Z) \approx (1,81 + 0,041 \cdot Z) \text{ м};$$

$$b_{95}(Z) \approx \text{const} \approx 1,6 \text{ м};$$

$$CE_{95} \approx (1,65 + 0,031 \cdot Z) \text{ м}.$$

На рис. 6 приведены эллипсы ошибок при малых, средних и больших углах отклонения спутника от зенита, на которых отчетливо прослеживается зависимость направления большой полуоси эллипса ошибок от направления на спутник при больших углах отклонения спутника от зенита (направление на спутник показано синей линией).

Полученные в работе численные оценки и зависимости могут быть использованы как для установления требований к максимальному углу отклонения космической съемки от надира (на этапе заказа), так и для обоснования допусков к точности высот ЦМР при создании ортофотопланов по космическим снимкам IKONOS.

Полученные в работе численные оценки и зависимости могут быть использованы как для установления требований к максимальному углу отклонения космической съемки от надира (на этапе заказа), так и для обоснования допусков к точности высот ЦМР при создании ортофотопланов по космическим снимкам IKONOS.

### Список литературы

1. Адров В.Н., Карионов Ю.А., Титаров П.С., Громов М.О., Харитонов В.Г. О точности создания ортофотопланов по снимкам QuickBird // Геопрофи. – 2005. – № 6. – С. 21-24.
2. Grodecki J., Gene D. IKONOS Geometric Accuracy. Proceedings of Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, 2001.
3. Jacobsen K., Passini R. Accuracy of digital orthophotos from high resolution Space imagery. Proceedings of the Workshop High Resolution Mapping from Space 2003, Hannover 2003.

4. Amato R., Dardanelli G., Emmolo D., Franco V., Midulla P., Orlando P., Villa B. Digital orthophotos at a scale of 1:5000 from high resolution satellite images. <http://www.image-info.com/isprs2004/comm4/papers/431.pdf>.
5. Ganas A., Lagios E., Tzannetos N. An investigation into the spatial accuracy of the IKONOS 2 orthoimagery within an urban environment. National Observatory of Athens, Institute of Geodynamics. <http://www.pcigeomatics.com/tech-papers/ganas2002ijrs.pdf>.
6. Wolniewicz W. Geometrical capacity of the VHRS images collected with significant off nadir angle. <http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/138-wolniewicz.pdf>.