

**И.В. Оньков** (ООО «Тримм», Пермь)

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

## Исследование геометрической точности ортотрансформированных снимков RapidEye

Геометрическая точность ортоснимков, созданных по материалам космической съемки со спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) RapidEye (Германия), является определяющим фактором при оценке возможности их использования для решения задач топографического и тематического картографирования, мониторинга природных ресурсов и решения разнообразных прикладных задач.

Съемочная система спутников обладает уникальной возможностью вести съемку в пяти спектральных каналах с пространственным разрешением 6,5 м, что делает использование данных, полученных со спутников RapidEye, особенно перспективными для картографирования растительного и почвенного покровов в сельском и лесном хозяйстве.

В данной работе рассмотрены вопросы оценки геометрической точности ортотрансформированных снимков RapidEye по материалам съемки территории Пермского края, предоставленных для тестирования компанией «Совзонд» (табл. 1).

Снимки полностью покрывают территорию города Перми и города-спутника Краснокамска (рис. 1), на которую имеются топографо-геодезические и картографические данные различных масштабов и материалы космической съемки сверхвысокого разрешения с космических аппаратов (КА) IKONOS и QuickBird.

В качестве координатной основы для оценки точности ортоснимков RapidEye использовалась ортомозаика города, созданная по материалам съемки со спутника IKONOS с размером пикселя 1 м в системе СК-42.

Таблица 1

Основные характеристики снимков и условий съемки

Номер снимка (product ID)	Уровень обработки	Дата и время съемки	Угол отклонения от надира, °	Высота Солнца над горизонтом, °
1331830	1В	13.07.2009 08:19:43	6,5	54,0
1331952	1В	14.07.2009 08:21:02	3,0	53,7

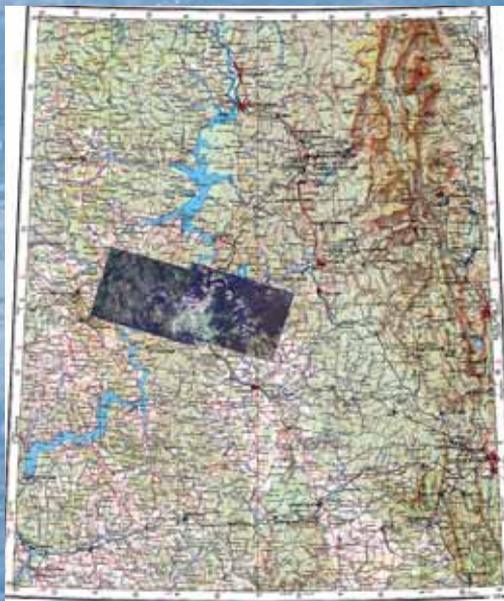


Рис. 1.  
Географическое положение снимков

### ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СНИМКОВ

Орточтотрансформирование снимков для каждого спектрального диапазона выполнялось отдельно в программном комплексе (ПК) ENVI 4.6.1 с использованием коэффициентов рациональных полиномов RPC (без наземных опорных точек) и глобальной цифровой модели рельефа Земли SRTM в проекции Гаусса-Крюгера СК-42 (10 зона). Размер пикселя ортоизображения на местности задавался равным 6,5 м, высота геоида над эллипсоидом принималась равной нулю.

Из ортоснимков первого (Blue), второго (Green) и третьего (Red) спектральных каналов формировались цветные 8-битные RGB-изображения, по которым выполнялись измерения координат опорных точек.

В качестве опорных точек выбирались, как правило, пересечения (примыкания) осевых линий дорожной сети и геометрические центры объектов местности симметричной формы (рис. 2).

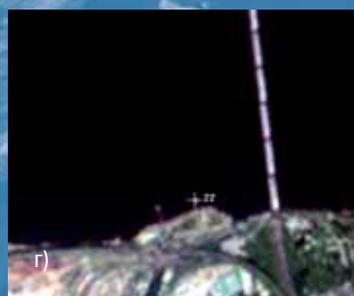
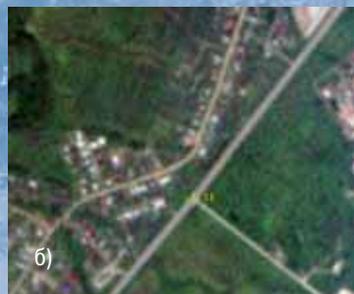


Рис. 2.  
Примеры выбора опорных точек

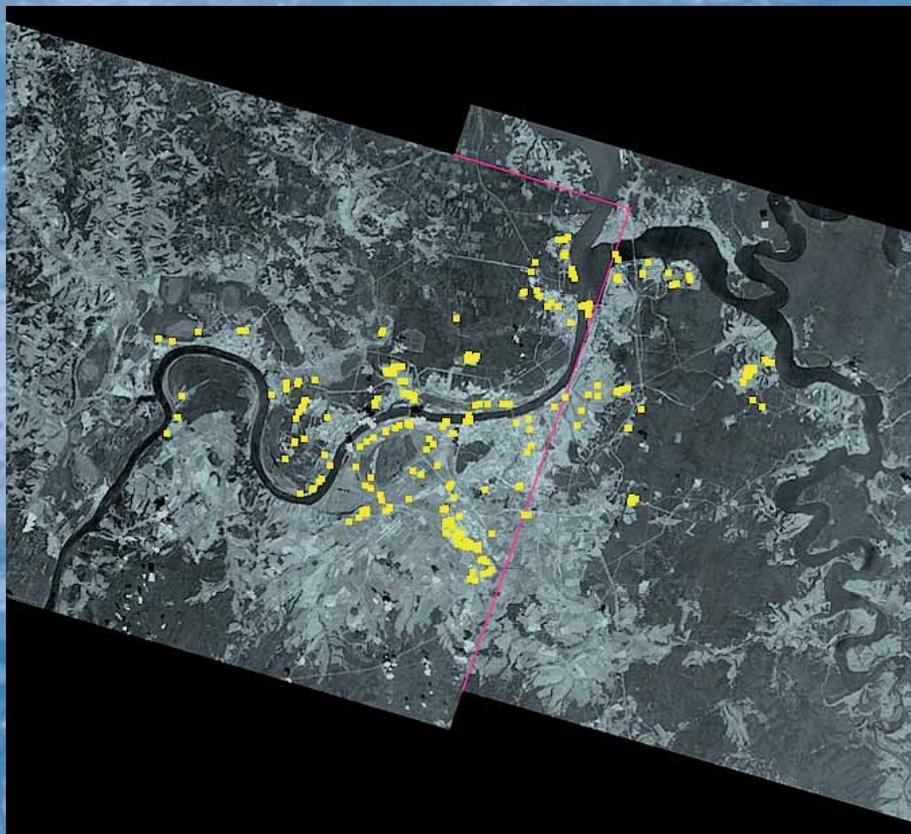


Рис. 3.  
Расположение опорных точек на ортоснимках

В общей сложности на ортоснимках были измерены и приняты в обработку координаты 324 точек, простран-

ственное распределение которых по площади снимков показано на рис. 3.

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ, СОЗДАНЫХ БЕЗ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Геопривязка ортоснимков в этом случае выполнялась по геодезическим координатам четырех угловых точек растра, полученных в результате ортотрансформирования снимков в ПК ENVI 4.6.1.

Точность ортоснимков оценивалась по расхождению координат контрольных точек, измеренных на ортоснимках  $X_i, Y_i$  и на ортомозаике города  $X_i^0, Y_i^0$ :

$$\Delta X_i = X_i - X_i^0, \Delta Y_i = Y_i - Y_i^0, i = 1, n.$$

В табл. 2 приведены средние значения разностей координат

$$\bar{\Delta}_X = \sum_{i=1}^n \Delta X_i, \bar{\Delta}_Y = \sum_{i=1}^n \Delta Y_i,$$

которые можно рассматривать как систематические ошибки геопривязки ортоснимков относительно СК-42.

Таблица 2

### Систематические ошибки геопривязки ортоснимков без использования опорных точек

Номер ортоснимка (product ID)	Число контрольных точек $n$	$\bar{\Delta}_X$ , м	$\bar{\Delta}_Y$ , м
1331830	186	-25,3	17,8
1331952	138	-21,9	13,3
Разности систематических ошибок		-3,4	4,5



Рис. 4.  
Примеры стыковки изображений на ортомозаике

Необходимо отметить, что приведенные в табл. 2 значения включают в себя не только ошибки значений коэффициентов RPC снимков, но и ошибки, связанные с преобразованием координат из системы WGS-84 в систему СК-42, которые могут достигать нескольких метров, ввиду недостаточной точной информации о параметрах связи этих систем (относительного смещения центров и углов взаимного ориентирования осей эллипсоидов).

Для двух смежных снимков происходит определенная взаимная компенсация некоторых источников ошибок, что видно по приведенным в последней строке таблицы разностям систематических ошибок, которые в данном случае не превышают 6,5 м, т. е. размеров одного пикселя растра. Это позволяет составить достаточно точную ортомозаику по этим ортоснимкам путем только параллельного сдвига, используя процедуру Mosaicking – Georeferenced в ПК ENVI.

Качество стыковки двух растров на ортомозаике, созданной таким способом, можно визуально оценить на примерах, приведенных на рис. 4. По всей линии стыковки ортоснимков видимые расхождения контуров не превысили 2 пикселя растра (13 м).

Более объективная численная оценка относительных смещений изображений на ортомозаике была выполнена по измерениям 64 опорных точек (по 32 точки на каждой части ортомозаики). Средние значения относительного смещения изображений по осям координат составили:  $\Delta X = 4,41$  м (0,68 пикселей),  $\Delta Y = 2,16$  м (0,33 пикселей), что свидетельствуют о высокой точности коэффициентов рациональных полиномов (RPC), включенных в файлы исходных снимков RapidEye уровня обработки 1В.

### ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВЯЗИ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ОРТОСНИМКОВ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

В качестве математической модели, которая связывает растровую систему координат снимка  $(x, y)$  с системой геодезических координат  $(X, Y)$  проекции Гаусса-Крюгера, в данной работе принята модель конформного преобразования Гельмерта:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_3 & -a_4 \\ a_4 & a_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix},$$

которую можно записать также в эквивалентной форме, имеющей наглядную геометрическую интерпретацию:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + m \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

где  $X_0, Y_0$  – координаты начала системы координат снимка в геодезической системе координат;

$m$  – масштабный коэффициент, равный, в данном случае, размеру пикселя растра в метрах;

$\phi$  – угол поворота осей системы координат снимка относительно геодезической системы, отсчитываемый по часовой стрелке.

Оценки параметров преобразования Гельмерта вычислялись по результатам измерений координат опорных точек на ортоснимках из решения уравнения поправок по методу наименьших квадратов (табл. 3).

Полученные значения углов поворота и масштабных коэффициентов  $m$  практически не отличаются от их номинальных значений, что еще раз подтверждает высокую точность коэффициентов RPC, включенных в исходные снимки RapidEye уровня обработки 1В.

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОРТОСНИМКОВ ПО ОСТАТОЧНЫМ ОТКЛОНЕНИЯМ

По остаточным отклонениям (разностям измеренных и урвненных координат опорных точек) вычислялись следующие показатели точности измерений:

- стандартные ошибки  $\sigma X, \sigma Y, \sigma$  ;
- средние радиальные ошибки (Mean Radial Error) MRE;
- максимальные радиальные ошибки;
- круговые ошибки (Circular Error) CE90, CE95;
- параметры эллипсов ошибок 95% доверительной вероятности.

Полученные значения ошибок и параметры эллипсов ошибок приведены в табл. 4 и 5.

Графические интерпретации остаточных отклонений в виде диаграмм рассеяния и эллипсов ошибок 95% доверительной вероятности приведены на рис. 5.

Таблица 3

#### Оценки геометрических параметров преобразования координат

Номер ортоснимка (product ID)	Число опорных точек, $n$	Угол поворота $\phi$ , рад (")	Коэффициент масштаба $m$ , м/пиксель	$X_0$ , м	$Y_0$ , м
1331830	186	0,000056 (11,6)	6,49954	6388850,6	432663,6
1331952	138	0,000075 (15,5)	6,50008	6402489,1	373066,2

Таблица 4

## Показатели точности измерений ортоснимков по опорным точкам

Номер ортоснимка (product ID)	Число опорных точек $n$	Стандартные ошибки, м			$MRE$ , м	Максимальная радиальная ошибка, м	CE90, м	CE95, м
		$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma$				
1331830	186	1,79	1,77	1,78	2,25	5,50	3,84	4,38
1331952	138	1,91	1,85	1,88	2,41	5,00	4,05	4,62

Таблица 5

## Параметры эллипсов ошибок 95% доверительной вероятности

Номер ортоснимка (product ID)	Большая полуось $a$ , м	Малая полуось $b$ , м	Отношение полуосей $b/a$	Ориентирующий угол $\theta_i$ , °
1331830	4,73	3,97	0,84	43,6
1331952	4,75	4,49	0,95	334,4

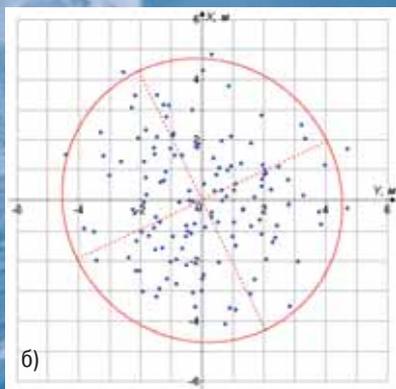
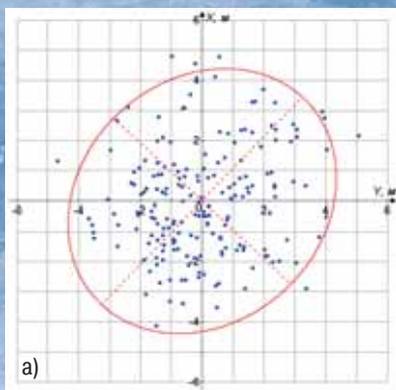


Рис. 5.

Диаграммы рассеяния остаточных отклонений:  
а) ортоснимок 1331830; б) ортоснимок 1331952

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ,  
СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ПО ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Оценка точности выполнялась в двух вариантах.

В первом варианте число опорных точек равнялось единице. Вычислялись только два параметра сдвига:  $X_0$ ,  $Y_0$ . Коэффициент масштаба  $m$  принимался равным номинальному значению 6,5 м, угол разворота  $\varphi$  – равным нулю.

Во втором варианте число опорных точек принималось равным пяти, по которым оценивались параметры преобразования Гельмерта:  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $m$  и  $\varphi$ .

Скорректированные координаты измеренных на ортоснимках контрольных точек вычислялись в соответствии с выражением (1).

По расхождениям между скорректированными и геодезическими координатами контрольных точек на ортоснимке

$$\delta X_i = X^c_i - X_i^0, \quad \delta Y_i = Y^c_i - Y_i^0, \quad i = 1, n$$

оценивались следующие показатели точности:

- средние квадратические ошибки

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta X_i^2}, \quad RMSE_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta Y_i^2},$$

$$RMSE_{XY} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2};$$

- средние радиальные ошибки

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta R_i, \quad \delta R_i = \sqrt{\delta X_i^2 + \delta Y_i^2};$$

- максимальные радиальные ошибки  $\delta R_{max}$ .

Таблица 6

**Показатели точности ортоснимков, скорректированных по одной опорной точке**

Показатель точности	Значение показателей точности, м					
	Ортоснимок № 1331830			Ортоснимок № 1331952		
	Минимальное	Максимальное	Среднее	Минимальное	Максимальное	Среднее
$RMSE_x$	2,22	4,57	2,94	2,03	4,80	2,83
$RMSE_y$	1,72	4,05	2,38	1,97	4,16	2,41
$RMSE_{xy}$	2,86	5,16	3,82	2,86	5,25	3,78
$MRE$	2,53	4,73	3,47	2,55	4,87	3,46
$\delta R_{max}$	6,14	10,85	8,13	6,07	10,13	7,80

Таблица 7

**Показатели точности ортоснимков, скорректированных по пяти опорным точкам**

Показатель точности	Значение показателей точности, м					
	Ортоснимок № 1331830			Ортоснимок № 1331952		
	Минимальное	Максимальное	Среднее	Минимальное	Максимальное	Среднее
$RMSE_x$	1,76	2,32	2,02	2,13	2,71	2,33
$RMSE_y$	1,76	2,45	1,99	1,91	2,40	2,11
$RMSE_{xy}$	2,76	3,01	2,85	2,94	3,41	3,15
$MRE$	2,50	2,67	2,58	2,64	3,08	2,83
$\delta R_{max}$	5,29	6,21	5,86	5,69	7,43	6,26

**ОДНА ОПОРНАЯ ТОЧКА**

Для повышения надежности статистических выводов было сформировано 30 выборок с различным расположением опорной точки на снимке. Оставшиеся точки рассматривались в качестве контрольных. Учитывая большой объем полученных данных, в табл. 6 приведены только минимальные, максимальные и средние значения показателей точности ортоснимков по тридцати выборкам.

**ПЯТЬ ОПОРНЫХ ТОЧЕК**

В этом варианте было сформировано шесть выборок с различным расположением опорных точек, как правило, наиболее удаленных друг от друга. Оставшиеся точки на снимке рассматривались как контрольные. Результаты статистической обработки приведены в табл. 7.

По результатам экспериментальных исследования точности ортотрансформированных снимков RapidEye уровня обработки 1В с использованием коэффициентов RPC и цифровой модели рельефа Земли SRTM в ПК ENVI 4.6.1 установлено следующее:

- точность ортотрансформированных снимков без привле-

чения опорных точек характеризуется ошибками порядка 20-30 м в системе геодезических координат СК-42;

- точность ортоснимков по остаточным отклонениям на опорных точках после оценки параметров преобразования Гельмерта характеризуется средними радиальными ошибками 2,3-2,5 м и максимальными отклонениями 5,0-5,5 м;
- точность ортоснимков, скорректированных по одной опорной точке, характеризуется средними радиальными ошибками 2,5-4,9 м и максимальными отклонениями 6,1-10,8 м;
- точность ортоснимков, скорректированных по пяти опорным точкам, характеризуется средними радиальными ошибками 2,5-3,1 м и максимальными отклонениями 5,3-7,4 м.

Таким образом, геометрическая точность ортотрансформированных снимков RapidEye, скорректированных по небольшому числу опорных точек (1-5) с использованием преобразования Гельмерта, удовлетворяет требованиям Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов (М.: ЦНИИГАиК, 2002), предъявляемым к ортофотопланам масштаба 1:25 000.