

И. В. Оньков (ЗАО «Мобиле», Пермь)

В 1970 г. окончил МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». В настоящее время – научный консультант ЗАО «Мобиле» (Пермь). Кандидат технических наук, доцент.

Исследование геометрической точности ортоснимков WorldView-2, созданных с использованием цифровой модели рельефа Земли SRTM

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Цель работы – исследование геометрической точности ортоснимков, созданных по космическим снимкам сверхвысокого разрешения WorldView-2 с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) Земли SRTM.

Возможность использования общедоступной модели рельефа Земли SRTM для целей ортотрансформирования одиночных космических снимков высокого разрешения с небольшими углами отклонения от надира имеет прикладной интерес, так как полностью исключает трудозатраты на создание внешней ЦМР по картографическим материалам.

В частности, на примере территории г. Перми выполненные ранее нами исследования показали, что точность модели SRTM достаточна для создания ортофотопланов крупного масштаба (1:2000 – 1:5000) по космическим снимкам высокого разрешения с углами отклонения от надира менее 14° [1].

В данной работе исследования выполнены по двум смежным ортоснимкам WorldView-2 территории г. Перми и пригородной зоны (рис. 1).

Исходные снимки (уровень обработки Ortho Ready Standard) и программный комплекс ENVI для их обработки были предоставлены компанией «Совзонд».

Основные характеристики снимков и условий съемки приведены в табл. 1.

ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ

Ортотрансформирование снимков (PAN-канал) выполнялось в проекции UTM на эллипсоиде WGS-84 с использованием RPC-коэффициентов и глобальной цифровой модели рельефа Земли SRTM без привлечения наземных опорных точек. Средняя высота геоида EGM96 над эллипсоидом WGS-84 (geoid offset) для снимаемой территории была принята равной $-2,6$ м. Ортотрансформирование снимков проводилось в программном комплексе ENVI.

При ортотрансформировании использовался фрагмент цифровой модели рельефа Земли размером $2 \times 2^\circ$, покрывающей территорию съемки, сформированный из четырех одноградусных ячеек SRTM.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Координаты наземных опорных точек (опознаков) определялись с использованием двухчастотных GPS-приемников с опорой на пункты триангуляции 2-го и 3-го классов городской геодезической сети. В качестве опознаков использовались хорошо отобразившиеся на снимках четкие контура местности, ошибка опознавания которых не превышала 1–2 пикселей растра (рис. 2).

Наблюдения и обработка GPS-измерений выполнялись в соответствии с инструкцией [2]. Средние квадра-

Таблица 1

Основные характеристики снимков и условий съемки

Параметр	Значение параметра	
Номер снимка (productOrderId)	052520644010	052542561010
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Дата и время съемки	22.07.2010, 07:42	17.05.2011, 08:02
Азимут Солнца (meanSunAz)	165,0°	176,7°
Высота Солнца над горизонтом (meanSunEl)	51,8°	51,4°
Азимут направления на спутник (meanSatAz)	57,8°	231,8°
Средний угол возвышения спутника (meanSatEl)	77,7°	77,5°
Процент облачности (cloudCover)	0,5%	0,0%
Размер PAN-изображения (numRows x numCols)	58496 x 34543 pxl	64772 x 34564 pxl

тические ошибки плановых координат опознаков по результатам уравнивания съемочной сети не превысили 0,05 м. Всего было принято в обработку по 50 опознаков на каждый снимок, общая схема расположения которых показана на рис. 3. Преобразование измеренных координат опознаков из системы СК-42 в систему прямоугольных координат проекции UTM на эллипсоиде WGS-84 выполнялось по общим формулам проекции Гаусса – Крюгера с коэффициентом масштаба на осевом меридиане 0,9996 и формулам преобразования геодезических координат с эллипсоида Красовского на эллипсоид WGS-84, приведенным в ГОСТ Р 51794-2008 [3]. Преобразование координат точек из городской системы координат в систему СК-42 выполнялось по алгоритму, предложенному в работе [4].

ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ

Геометрическая точность ортоснимков оценивалась по отклонениям координат контрольных точек на ортоснимках, непосредственно измеренных x, y или скорректированных X, Y от их значений, вычисленных по результатам наземных GPS-измерений X_g, Y_g , которые считались безошибочными.

Для корректировки смещения, разворота и масштаба ортоснимка была принята линейная модель аффинного преобразования плоскости, реализованная в программном комплексе ENVI, включающая шесть параметров $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$:



Рис. 1.
Исходные снимки WorldView-2 на территорию г. Перми



Рис. 2.
Примеры выбора наземных опорных точек (опознаков)



Рис. 3.
Схема расположения опознаков

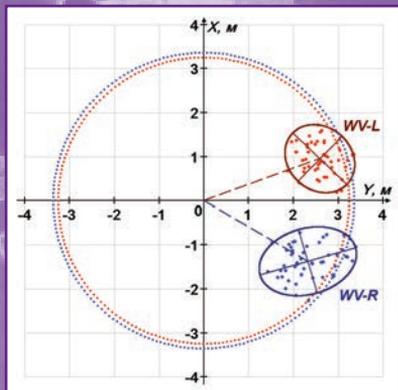


Рис. 4.
Диаграммы рассеяния ошибок контрольных точек ортоснимков без наземной привязки

$$X = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$Y = b_1 + b_2x + b_3y$$

Определение параметров аффинного преобразования a_i, b_i и оценка точности решения выполнялись по опорным точкам с известными геодезическими координатами по методу наименьших квадратов (МНК).

Рассмотрено три варианта оценки точности ортоснимков в зависимости от числа используемых для геопривязки наземных опорных точек (опознаков):

1. Без геопривязки. Оценка точности выполнялась непосредственно по разностям измеренных на ортоснимке и геодезических координат точек.
2. Геопривязка ортоснимка по одной опорной точке (смещение на величину разностей измеренных на ортоснимке и геодезических координат опорной точки).
3. Геопривязка ортоснимка по 4 и более опорным точкам.

Во втором и третьем вариантах оценка точности выполнялась по разностям скорректированных и геодезических координат контрольных точек и по остаточным отклонениям координат на всех опорных точках.

Измерение координат опорных и контрольных точек на ортоснимках проводилось в программном комплексе ENVI. Дальнейшая обработка результатов измерений выполнялась по известным алгоритмам линейной алгебры и математической статистики.

В качестве основных показателей точности ортоснимков были приняты следующие выборочные оценки, принятые в отечественной и зарубежной практике:

- модуль систематической ошибки (систематического сдвига) d ;
- среднеквадратическая ошибка RMSE;
- средняя радиальная ошибка MRE;
- круговая ошибка CE90;
- максимальное радиальное отклонение в выборке R_{max} .

Для повышения статистической надежности оценок расчеты выполнялись в нескольких вариантах, причем каждая опорная точка использовалась только в одном из вариантов расчетов.

Дополнительный контроль точности ортоснимков выполнялся по расхождениям координат точек, снятым с цифрового плана города масштаба 1:1000.

Таблица 2

Показатели точности исходных ортоснимков

Параметр	Значение параметра	
	WV-L	WV-R
Условное имя снимка		
Число опорных (контрольных) точек	50	50
Сдвиг по X, м	0,95	-1,37
Сдвиг по Y, м	2,59	2,32
Модуль систематического сдвига d, м	2,76	2,69
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	2,80	2,76
Средняя радиальная ошибка MRE, м	2,78	2,73
Круговая ошибка CE90, м	3,25	3,36
Максимальное радиальное отклонение Rmax, м	3,31	3,58

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ОРТОСНИМКОВ (БЕЗ ГЕОПРИВЯЗКИ)

Оценка точности выполнена по отклонениям координат всех измеренных на исходных ортоснимках наземных опорных точек (табл. 2). Графическая интерпретация полученных результатов: диаграммы рассеяния, 90%-эллипсы ошибок и окружности радиуса CE90 – приведена на рис. 4.

На основании анализа данных табл. 2 следует отметить два основных момента:

- значения круговых ошибок CE90 примерно в два раза меньше допустимой ошибки для снимков без наземной геопривязки ($CE90_{\text{доп}} = 5.0$ м) [7];
- значения средних радиальных ошибок MRE также примерно в два раза меньше допустимого значения, установленного инструкцией [6] для фотопланов масштаба 1:10 000.

Полученные результаты подтверждают заявленную производителем точность снимков Worldview-2 без использования наземных опорных точек и позволяют сделать вывод о возможности создания по ним ортофотопланов масштаба 1:10 000 на основе цифровой модели рельефа Земли SRTM.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ, СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ПО ОДНОЙ ОПОРНОЙ ТОЧКЕ

Использование одной опорной точки позволяет оценить и устранить параллельный сдвиг (смещение) ортоснимка

по осям координат. При этом внутренняя геометрия ортоснимка, т.е. взаимное положение точек на ортоснимке, а также его ориентировка и масштаб остаются неизменными. Корректировка ортоснимка в этом случае сводится просто к изменению прямоугольных координат углов верхнего левого угла ортоснимка.

В табл. 3 приведены средние значения показателей точности ортоснимков (в скобках – минимальные и максимальные) для 24 вариантов выбора одной опорной точки.

Как видно из приведенных в табл. 3 данных, максимальное значение средней радиальной ошибки MRE во всех вариантах выбора опорной точки не превышает допустимой величины 2,5 м, установленной инструкцией [6] для фотопланов масштаба 1:5000, а максимальное значение круговой ошибки CE90 не превышает допустимой величины 2,0 м для снимков, скорректированных по опорным точкам [7].

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ, СКОРРЕКТИРОВАННЫХ ПО 4 И БОЛЕЕ ОПОРНЫМ ТОЧКАМ

Оценка точности выполнялась по контрольным точкам, координаты которых корректировались с использованием линейного преобразования (1). Число опорных точек на каждом снимке варьировалось от 4 до 24, число контрольных точек для всех вариантов расчетов принято равным 26.

Полученные средние (минимальные и максимальные в скобках) значения показателей точности ортоснимков в зависимости от числа опорных точек приведены в та-

блицах 4–8. На рис. 5 приведена графическая интерпретация показателей точности ортоснимков, скорректированных по 24 опорным точкам. Зависимость средней радиальной ошибки MRE от числа опорных точек показана на рис. 6.

Анализ ошибок, приведенных в таблицах 4–8 и графиках на рис. 6, показывает, что точность ортоснимков, скорректированных по 4 и более опорным точкам, практически не зависит от их числа, а ее уровень определяется в основном случайными ошибками измерения координат точек на ортоснимках и остаточными ошибками цифровой модели рельефа SRTM.

Максимальное значение средней радиальной ошибки MRE во всех вариантах выбора опорных точек не превышает предельно допустимой величины 1,0 м, установленной инструкцией [6] для фотопланов масштаба 1:2000.

КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ ПО ЦИФРОВОМУ ТОПОГРАФИЧЕСКОМУ ПЛАНУ

Для дополнительного контроля точности ортоснимков использовался цифровой план города масштаба 1:1000, созданный по материалам аэрофотосъемки масштаба 1:5000. Точность плана по результатам полевого контроля соответствует требованиям инструкции [5] и характеризуется средней радиальной ошибкой положения твердых контуров на плане не более 0,5 м. В качестве контрольных точек выбирались в основном углы крыш малоэтажных строений и элементы городской планировки, хорошо опознающиеся на ортоснимках. На каждый ортоснимок было выбрано по 70 контрольных точек в разных частях города. Коррекция ортоснимков выполнялась по 24 опорным точкам. Показатели точности, вычисленные по разностям координат на ортоснимках и плана, приведены в табл. 9.

Таблица 3

Показатели точности ортоснимков, скорректированных по одной опорной точке

Параметр	Значение параметра	
	WV-L	WV-R
Условное имя снимка		
Число контрольных точек	26	26
Модуль систематического сдвига d , м	0,72 (0,51; 0,97)	0,62 (0,11; 0,98)
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,57 (0,48; 0,66)	0,86 (0,58; 1,13)
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,66 (0,45; 0,91)	0,78 (0,53; 1,04)
Круговая ошибка CE90, м	1,07 (0,80; 1,36)	1,25 (0,90; 1,57)
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	1,22 (0,84; 1,53)	1,50 (1,04; 2,05)

Таблица 4

Показатели точности ортоснимков по 4 опорным точкам (6 вариантов)

Параметр	Значение параметра	
	WV-L	WV-R
Условное имя снимка		
Модуль систематического сдвига d , м	0,30 (0,17; 0,45)	0,15 (0,05; 0,35)
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,57 (0,48; 0,66)	0,59 (0,47; 0,72)
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,52 (0,43; 0,61)	0,52 (0,44; 0,59)
Круговая ошибка CE90, м	0,88 (0,76; 0,98)	0,91 (0,74; 1,09)
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	1,09 (0,82; 1,30)	1,16 (0,75; 1,51)

Таблица 5

Показатели точности ортоснимков по 6 опорным точкам (4 варианта)

Параметр	Значение параметра	
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Модуль систематического сдвига d , м	0,28 (0,16; 0,33)	0,11 (0,02; 0,16)
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,56 (0,47; 0,61)	0,54 (0,51; 0,60)
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,51 (0,43; 0,55)	0,49 (0,46; 0,55)
Круговая ошибка CE_{90} , м	0,87 (0,75; 0,94)	0,84 (0,79; 0,93)
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	1,05 (0,81; 1,26)	0,96 (0,79; 1,17)

Таблица 6

Показатели точности ортоснимков по 8 опорным точкам (3 варианта)

Параметр	Значение параметра	
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Модуль систематического сдвига d , м	0,28 (0,16; 0,33)	0,11 (0,02; 0,16)
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,56 (0,47; 0,61)	0,54 (0,51; 0,60)
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,51 (0,43; 0,55)	0,49 (0,46; 0,55)
Круговая ошибка CE_{90} , м	0,87 (0,75; 0,94)	0,84 (0,79; 0,93)
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	1,05 (0,81; 1,26)	0,96 (0,79; 1,17)

Таблица 7

Показатели точности ортоснимков по 12 опорным точкам (2 варианта)

Параметр	Значение параметра	
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Модуль систематического сдвига d , м	0,23 (0,20; 0,26)	0,10 (0,06; 0,14)
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,50 (0,49; 0,51)	0,50 (0,49; 0,51)
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,46 (0,44; 0,47)	0,46 (0,45; 0,47)
Круговая ошибка CE_{90} , м	0,78 (0,76; 0,80)	0,78 (0,77; 0,80)
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	0,90 (0,87; 0,92)	0,80 (0,73; 0,88)

Таблица 8

Показатели точности ортоснимков по 24 опорным точкам (1 вариант)

Параметр	Значение параметра	
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Модуль систематического сдвига d , м	0,24	0,07
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,51	0,49
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,46	0,45
Круговая ошибка CE_{90} , м	0,79	0,77
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	0,90	0,77

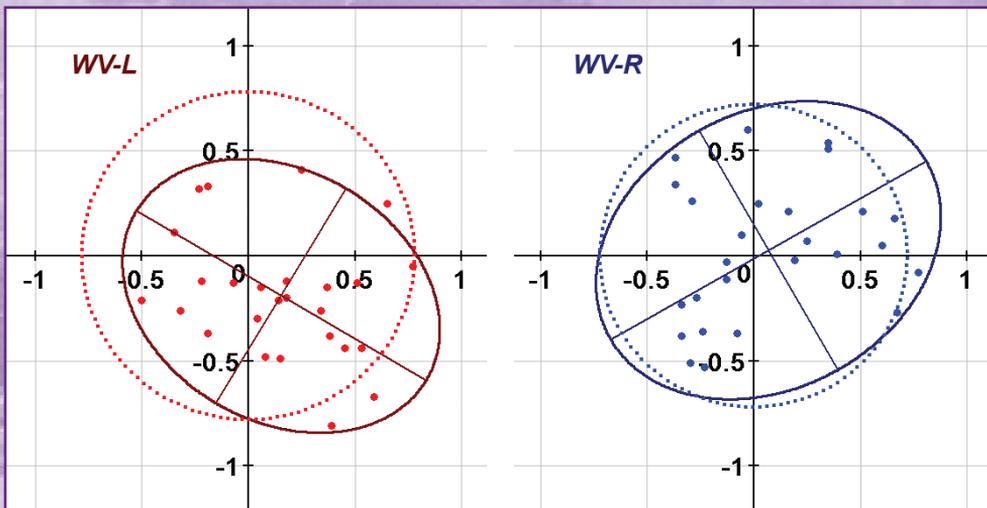


Рис. 5.

Диаграммы рассеяния ошибок контрольных точек ортоснимков, скорректированных по 24 опорным точкам

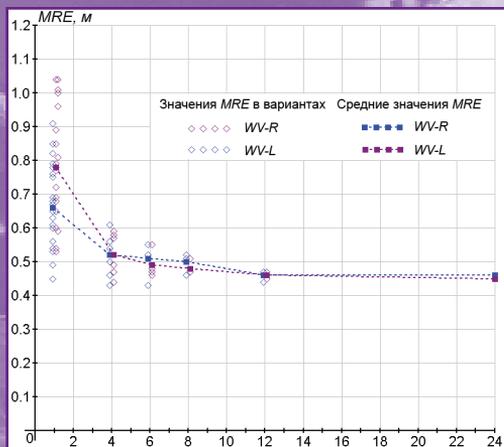


Рис. 6.

Зависимость средней радиальной ошибки MRE от числа опорных точек

Таблица 9

Показатели точности ортоснимков относительно топографического плана

Параметр	Значение параметра	
Условное имя снимка	WV-L	WV-R
Модуль систематического сдвига d , м	0,14	0,09
Средняя квадратическая ошибка RMSE, м	0,65	0,53
Средняя радиальная ошибка MRE, м	0,61	0,46
Круговая ошибка CE90, м	1,00	0,83
Максимальное радиальное отклонение R_{max} , м	0,98	1,12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований геометрической точности двух снимков WorldView-2 территории г. Перми, с углами отклонения от надира менее 14° и ортотрансформированных с использованием цифровой модели рельефа Земли SRTM, можно сделать следующие основные выводы:

- точность ортоснимков без привязки по наземным опорным точкам удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ортофотопланам масштаба 1:10 000;
- точность геопривязанных ортоснимков по одной наземной опорной точке удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ортофотопланам масштаба 1:5000;
- точность ортоснимков, геопривязанных по 4 и более наземным опорным точкам, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ортофотопланам масштаба 1:2000.

Сформулированные выше выводы основаны на полученных оценках средней радиальной ошибки (MRE), которая согласно инструкции [6] не должна превышать 0,5 мм в масштабе соответствующего плана. Результаты контрольного сравнения координат точек на ортоснимках с координатами одноименных точек на цифровом топографическом плане города масштаба 1:1000 достаточно хорошо согласуются с оценками точности, полученными по наземным опорным точкам.

Таким образом, результаты выполненных экспериментальных исследований показали возможность использования общедоступной цифровой модели рельефа Земли SRTM для ортотрансформирования одиночных космических снимков высокого разрешения WorldView-2 в программном комплексе ENVI с целью создания ортофотопланов крупных масштабов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. – 2011. – №3. – С.40–47.*
2. *Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 55 с.*
3. *ГОСТ Р 51794–2008 – Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.*
4. *Оньков И.В. Определение параметров преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса по одноименным точкам // Геопроби. – 2009. – №6. – С.56–59.*
5. *Инструкция по топографической съёмке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500, – М., Недра, 1985. – 152 с.*
6. *Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.*
7. http://www.digitalglobe.com/file.php/811/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf