

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.

Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Хорошо известно, что точность ортофотоплана во многом определяется точностью используемой при ортотрансформировании цифровой модели рельефа (ЦМР). Создание ЦМР соответствующей точности для ортотрансформирования одиночных космических снимков высокого разрешения (IKONOS, QuickBird, WorldView-1,2) традиционным методом оцифровки топографических карт требует значительных затрат времени и средств. В связи с этим возможность использования общедоступной модели рельефа Земли SRTM для целей ортотрансформирования одиночных космических снимков высокого разрешения с небольшими углами надирного отклонения весьма привлекательна, так как полностью исключает трудозатраты на создание внешней ЦМР по картографическим материалам.

В данной работе на примере конкретной территории (г. Пермь), покрываемой двумя одиночными снимками WorldView-2 с небольшими углами надирного отклонения (менее 14°), предоставленными компанией «Совзонд», выполнено исследование точности высот модели SRTM с целью оценки возможностей создания по этим снимкам ортофотопланов крупного масштаба (1:2000 – 1:5000). В работе также исследовано влияние характера рельефа и типа отражающей поверхности на точность высот модели SRTM.

Как известно, модель SRTM создана по данным радарной интерферометрической съемки земной поверхности радиолокационным комплексом на базе SIR-C/X-SAR, установленным на борту КА Shuttle Endeavour в двух диапазонах длин волн С (5,6 см) и Х (3,1 см), и измеряет высоту отражающей, а не топографической поверхности: в залесенных районах – высоту деревьев, на заснеженной территории – высоту снежного покрова, а на застроенных территориях – высоту некой осредненной поверхности, которая формируется в процессе обработки радиолокационных сигналов и достаточно неопределенна, так как зависит от большого числа трудноучитываемых факторов, таких, как густота застройки, этажность зданий и т.п. Поэтому, строго говоря, данные SRTM можно рассматривать как цифровую модель рельефа Земли (ЦМР) и выполнять ее корректную оценку точности только на открытых незастроенных территориях, не покрытых кустарниковой и древесной растительностью, и при условии, что толщина снежного покрова на этих участках в период съемки достаточно мала, чтобы ею можно было пренебречь.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе тестировалась цифровая модель местности SRTM, открытая для свободного доступа в Интернете на сайте <http://dds.cr.usgs.gov/srtm> в виде

16-битных растровых файлов, значения пикселей в которых численно равно высоте модели местности над поверхностью геоида EGM96 в метрах.

Каждый файл географически соответствует одной эллипсоидальной трапеции размером 1x1 градуса по широте и долготе на эллипсоиде WGS-84 и структурно представляет собой матрицу размером 1201x1201 с шагом сетки 3x3 секунды дуги. В системе прямоугольных координат города Перми это соответствует сетке с размером ячейки приблизительно 93x49 м по оси X и по оси Y.

Так как снимки WorldView-2, предназначенные для ортотрансформирования, располагались на стыке четырех одноградусных трапеций, то предварительно была сформирована расширенная матрица высот SRTM, состоящая из 2401x2401 элементов. Объединение данных в единый файл выполнялось в программе ENVI 4.4. При этом учитывалось, что одна дополнительная строка и одна дополнительная колонка матрицы являются дублирующими и повторяются на соседних матрицах.

В качестве исходного картографического материала использовались растровые копии топографических планов города масштаба 1:5000 с высотой сечения рельефа 1,0 м, цифровые топографические планы города масштаба 1:500 с высотой сечения горизонталей 0,5 м, а также данные о координатах и высотах пунктов опорной межевой сети (ОМС) города.

Выбор масштаба картографического материала основывался на принципе «ничтожных погрешностей», в соответствии с которым точность эталонных отметок земной поверхности должна быть по крайней мере в три раза выше оцениваемой точности высот SRTM. В этом случае ошибками эталонных отметок, снятых с топографических планов, можно пренебречь и рассматривать разности высот как истинные ошибки модели SRTM.

Этому требованию вполне удовлетворяют топографические планы масштаба 1:500 – 1:5000 с высотой сечения рельефа 0,5–1,0 м, а также высоты пунктов ОМС, полученные с использованием GPS-приемников.

В общей сложности на территории площадью примерно 70 кв. км городской и пригородной зоны Перми были измерены по картографическому материалу прямоугольные координаты более 2000 точек с подписанными отметками высот рельефа и выписаны из каталогов координаты и высоты более 150 пунктов ОМС.

Общее расположение измеренных точек и контуры снимков WorldView-2 показаны на растровом изображении модели SRTM (рис. 1).

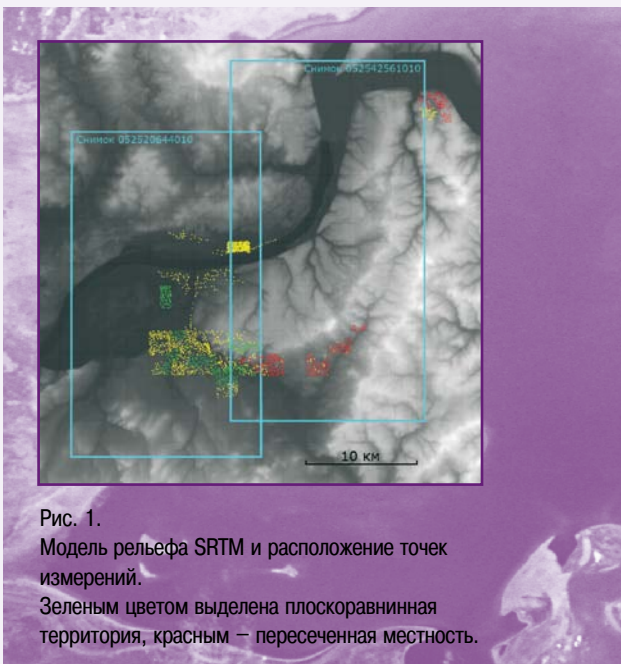


Рис. 1. Модель рельефа SRTM и расположение точек измерений. Зеленым цветом выделена плоскоровинная территория, красным – пересеченная местность.

ВЫЧИСЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ВЫСОТ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И МОДЕЛИ SRTM

Разности высот топографической поверхности и модели SRTM можно вычислять, используя два основных подхода:

- интерполированием высот поверхности SRTM в заданных точках топографической поверхности с известными отметками;
- интерполированием высот топографической поверхности по горизонталям в узлах сетки матрицы высот SRTM.

Второй подход, основанный на графическом линейном интерполировании (на рис. 2 приведен пример графического наложения узлов матрицы высот на фрагмент топографического плана масштаба 1:5000), в ручном варианте достаточно трудоемок, а его эффективная машинная реализация требует предварительно-

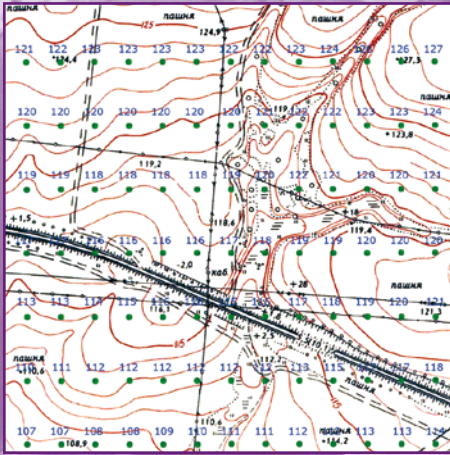


Рис. 2.
Пример графического наложения узлов матрицы высот SRTM на топографический план масштаба 1:5000

го создания цифровой модели рельефа Земли по картографическим материалам, что также ведет к значительным трудовозатратам.

С учетом этого обстоятельства, в данной работе для вычисления разности высот топографической поверхности и модели SRTM был принят первый подход. Отметки высот поверхности SRTM в заданных точках с подписанными отметками земной поверхности рассчитывались путем интерполирования матрицы высот модели по координатам B_{WGS-84}, L_{WGS-84} точки на эллипсоиде WGS-84 двумерными кубическими полиномами с использованием стандартных программ библиотеки численного анализа НИВЦ МГУ [1].

Переход от городской системы $X_{Гор}, Y_{Гор}$ в которой выполнялись измерения координат точек на цифровых топографических планах, к системе геодезических координат на эллипсоиде WGS-84 B_{WGS-84}, L_{WGS-84} выполнялся в два этапа через систему координат СК-42: $(X_{Гор}, Y_{Гор}) \rightarrow (X_{СК-42}, Y_{СК-42}) \rightarrow (B_{WGS-84}, L_{WGS-84})$.

Преобразование прямоугольных координат точек из городской системы в систему координат Гаусса-Крюгера (СК-42) выполнялось с использованием параметров перехода, определенных по одноименным пунктам триангуляции 1-го класса [2].

Преобразования прямоугольных координат точек из системы координат СК-42 в систему геодезических координат на эллипсоиде WGS-84 выполнялись в соответствии с действующим стандартом ГОСТ Р 51794-2008 через систему координат ПЗ-90.02 [3].

ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ВЫСОТ МОДЕЛИ SRTM

При статистической обработке данных принималась аддитивная модель ошибок, согласно которой разности высот SRTM H_{SRTM} и топографического рельефа земли $H_{Топо}$

$$\Delta H = H_{SRTM} - H_{Топо}$$

рассматривались в виде суммы систематической Δ_H и случайной δ_H ошибок:

$$\Delta H = \Delta_H + \delta_H.$$

В качестве основных показателей точности модели были приняты следующие параметры:

- среднее значение разности высот, оценка систематической ошибки (n – число измерений)

$$\bar{\Delta}_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i;$$

- средняя квадратическая ошибка (Root Mean Square Error)

$$RMSE_{\Delta H} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^2};$$

- средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error)

$$MAE_{\Delta H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|;$$

- вероятные линейные ошибки (Linear Error) $LE_{90_{\Delta H}}$ и $LE_{95_{\Delta H}}$, оцениваемые как 90 и 95% или вариационные ряды абсолютных значений разностей ΔH_i ;
- минимальное ΔH_{\min} и максимальное ΔH_{\max} значения разностей высот.

После исключения систематической ошибки из результатов измерений $\Delta h_i = \Delta H_i - \bar{\Delta}_H$ оценивались параметры случайной составляющей δ_H :

- стандартная средняя среднеквадратическая ошибка

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2};$$

Таблица 1

Показатели точности высот модели SRTM по всей совокупности данных

Параметр выборки	Значение параметра
Число точек n	2164
Систематическая ошибка $\bar{\Delta}_H$, м	-0,40
Средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\Delta H}$, м	1,35
Средняя абсолютная ошибка $MAE_{\Delta H}$, м	1,07
Вероятная линейная ошибка $LE90_{\Delta H}$, м	2,20
Вероятная линейная ошибка $LE95_{\Delta H}$, м	2,70
Минимальное значение разности ΔH_{\min} , м	-4,95
Максимальное значение разности ΔH_{\max} , м	4,16
Стандартная средняя квадр. ошибка $\sigma_{\Delta h}$, м	1,29
Средняя абсолютная ошибка $\theta_{\Delta h}$, м	0,99
Коэффициент асимметрии $As_{\Delta h}$	0,24
Коэффициент эксцесса $Ex_{\Delta h}$	0,75

- центрированная средняя абсолютная ошибка

$$\theta_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |\Delta h_i|};$$

- коэффициенты асимметрии

$$As_{\Delta h} = \frac{1}{n\sigma_{\Delta h}^3} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^3;$$

- коэффициент эксцесса

$$Ex_{\Delta h} = \frac{1}{n\sigma_{\Delta h}^4} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^4 - 3.$$

Визуальная оценка близости эмпирического распределения случайных ошибок нормальному закону распределения оценивалась по гистограмме частот и наложенной на нее кривой нормального распределения (кривой Гаусса).

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ SRTM И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

В обработку принимались все точки с подписанными отметками вне зависимости от характера рельефа и отражающей поверхности (в том числе расположенные и в сельских населенных пунктах с одноэтажной застройкой), за исключением территорий, занятых сплошными лесными массивами и

садами, а также участками с многоэтажной городской застройкой.

Характер рельефа местности на исследуемой территории достаточно резко менялся от плоскоравнинного (поля мелиоративного земледелия, территория недействующего аэродрома, поймы рек) с преобла-

Таблица 2

Интервальное распределение ошибок Δh

Интервал, м		Частота, p	
		n	%
-5,000	-4,001	5	0,2
-4,000	-3,001	21	1,0
-3,000	-2,001	78	3,6
-2,000	-1,001	317	14,6
-1,000	-0,001	710	32,8
0,000	0,999	588	27,2
1,000	1,999	294	13,6
2,000	2,999	106	4,9
3,000	4,000	37	1,7
4,000	5,000	8	0,4
Сумма		2164	100,0

дающими углами наклона существенно меньше 1 градуса до пересеченного (склоны коренного берега реки) с углами наклона земной поверхности более 6 градусов. Общий перепад высот составил 108 м от минимальной отметки 91 м до максимальной 199 м. Населенные пункты сельского типа находились преи-

мущественно на равнинной местности и занимали примерно 10% территории.

Показатели точности высотной составляющей модели SRTM по результатам обработки всей совокупности данных, без разделения по типу рельефа и характеру отражающей поверхности, приведены в табл. 1.

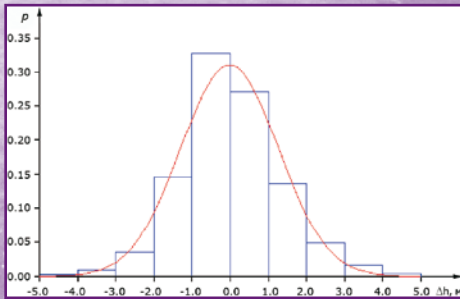


Рис. 3.
Гистограмма распределения случайных ошибок высот SRTM

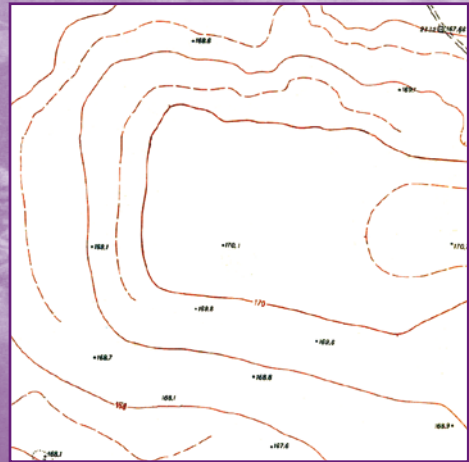


Рис. 4.
Фрагмент карты плоскоравнинной местности

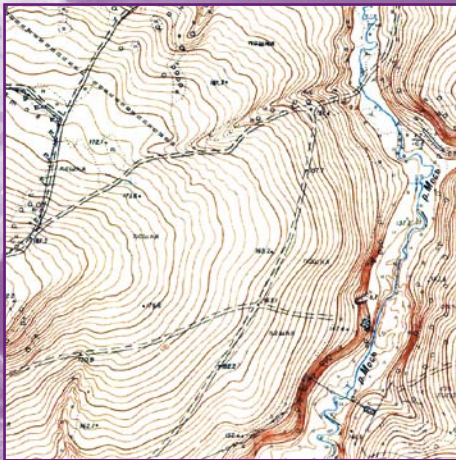


Рис. 5.
Фрагмент карты пересеченной местности

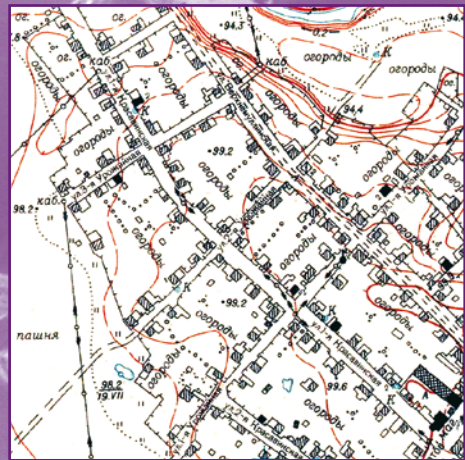


Рис. 6.
Фрагмент карты застроенной территории

Таблица 3

Показатели точности высот модели SRTM в зависимости от характера рельефа

Параметр выборки Характер рельефа	Значение параметра	
	Плоскоравнинный	Пересеченный
Число точек n	482	412
Систематическая ошибка $\bar{\Delta}_H$, м	-0,71	-1,08
Средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\Delta H}$, м	1,01	1,59
Средняя абсолютная ошибка $MAE_{\Delta H}$, м	0,85	1,27
Вероятная линейная ошибка $LE90_{\Delta H}$, м	1,60	2,68
Вероятная линейная ошибка $LE95_{\Delta H}$, м	1,80	3,16
Минимальное значение разности ΔH_{\min} , м	-2,80	-4,47
Максимальное значение разности ΔH_{\max} , м	1,42	1,94
Стандартная средняя квадр. ошибка $\sigma_{\Delta h}$, м	0,72	1,17
Средняя абсолютная ошибка $\theta_{\Delta h}$, м	0,57	0,92

Интервальное распределение случайных ошибок Δh (табл. 2) и соответствующая ему гистограмма эмпирических частот с наложенной на нее кривой Гаусса, позволяющая визуально оценить степень близости эмпирического распределения нормальному закону, приведены на рис. 3.

Нулевую гипотезу о согласии эмпирического распределения случайных ошибок Δh нормальному закону по критерию асимметрии и эксцесса в данном случае следует отклонить, так как выборочные значения $As_{\Delta h}$, $Ex_{\Delta h}$, приведенные в таблице 2, превышают их критические значения на уровне значимости 1%, равные соответственно $g_1 = 0,12$ и $b_2 = 0,28$ [4].

Полученный результат является следствием статистической неоднородности данных в анализируемой выборке, образованной измерениями с различными средними значениями и дисперсиями. Этот вывод подтверждают выполненные исследования влияния наклона и характера отражающей поверхности на показатели точности высот модели SRTM.

Влияние наклона отражающей поверхности на точность высот модели SRTM

Для исследования влияния наклона отражающей поверхности на точность высот SRTM из всего массива

измеренных данных были выделены измерения, выполненные на участках открытой местности (на рис. 1 выделены зеленым и красным цветом) с двумя наиболее характерными типами рельефа:

- плоскоравнинная местность с преобладающими углами наклона земной поверхности существенно меньше 1 градуса (рис. 4);
- пересеченная (холмистая) местность с преобладающими углами наклона земной поверхности более 6 градусов (рис. 5).

Показатели точности высотной составляющей модели SRTM по результатам статистической обработки данных для двух типов рельефа приведены в табл. 3.

Влияние характера отражающей поверхности на точность высот модели SRTM

Из всего массива информации были выделены измерения, выполненные на территории с малоэтажной застройкой сельского типа (рис. 6).

Показатели точности высотной составляющей модели SRTM по результатам статистической обработки данных приведены в табл. 4.

Анализ систематических и случайных ошибок, приведенный в табл. 2, 3, показывает, что показатели точности высот SRTM существенно зависят от типа рельефа и характера отражающей поверхности.

Таблица 4

Показатели точности высот модели SRTM для застроенной территории

Параметр выборки	Значение параметра
Число точек n	275
Систематическая ошибка $\bar{\Delta}_H$, м	0,18
Средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\Delta H}$, м	1,16
Средняя абсолютная ошибка $MAE_{\Delta H}$, м	0,91
Вероятная линейная ошибка $LE90_{\Delta H}$, м	2,06
Вероятная линейная ошибка $LE95_{\Delta H}$, м	2,37
Минимальное значение разности ΔH_{\min} , м	-3,25
Максимальное значение разности ΔH_{\max} , м	3,54
Стандартная средняя квадр. ошибка $\sigma_{\Delta H}$, м	1,15
Средняя абсолютная ошибка $\theta_{\Delta H}$, м	0,91

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований точности высоты модели SRTM для конкретной территории г. Перми, покрываемой двумя снимками WorldView-2 с углами надирного отклонения менее 14 градусов, позволяют сделать вывод о возможности использования этой модели для создания ортофотоснимков масштаба 1:2000 на участки открытой местности и малоэтажной застройки территории сельских населенных пунктов.

Этот вывод следует из соотношения между ошибкой высоты цифровой модели рельефа ΔH , используемой для ортотрансформирования, углом надирного отклонения α и смещением планового положения точки ΔL [5]:

$$\Delta L = \Delta H \operatorname{tg} \alpha.$$

Согласно инструкции [6], средняя ошибка положения твердого контура на ортофотоплане не должна превышать 0,5 мм в масштабе плана, что соответствует 1,0 м на местности для масштаба 1:2000. Приняв величину средней ошибки, равную 1,27 м (таблица 2, пересеченная местность) и учитывая значение $\operatorname{tg} 14^\circ = 0,25$, получим среднюю величину смещения $\Delta L = 0,32$ м, что существенно меньше допустимой средней ошибки положения контура для масштаба ортофотоплана 1:2000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ. Библиотека численного анализа НИВЦ МГУ [электронный ресурс] – режим доступа: http://www.srcc.msu.su/num_anal/lib_na/libnal.htm.
2. Оньков И.В. Определение параметров преобразования плоских прямоугольных координат в проекции Гаусса по одноименным точкам // Геопрофи. – 2009. – №6. С.56-59.
3. ГОСТ Р 51794–2008 – Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2009. – 19 с.
4. Болшев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математического литературы, 1983. – 416 с.
5. Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи. – 2010. – №10. С.48-51.
6. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.