

Построения цифровой модели рельефа по данным радарной интерферометрической съемки

Ситуация на рынке изысканий такова, что заказчик предъявляет подчас довольно необычные требования, чем ставит исполнителя работ в жесткие технические и временные рамки. В июне 2011 года был объявлен тендер на производство инженерно-геодезических изысканий на объекте «Коттеджный поселок „Аэропорт“» площадью около 3 кв. км. Одним из основных требований заказчика было сверхсрочное (1–2 дня) создание цифровой модели рельефа площадки для разработки эскизного плана застройки с учетом особенностей ландшафта территории. При этом создаваемая цифровая модель рельефа должна была обеспечить возможность *определения основных морфологических характеристик элементов рельефа площадки (направлений и протяженности водораздельных линий, оврагов и балок, крутизны и экспозиций склонов, общую расчлененность рельефа) с точностью определения высот порядка 1–2 метра.*

Выполнить изыскания в столь короткий срок можно было лишь при использовании топографических карт мелкого масштаба или данных дистанционного зондирования Земли. Проанализировав эти возможности, мы приняли решение об использовании открытых данных радарной интерферометрической съемки, полученных с борта космического корабля многоразового использования (шаттла) и называемых в технической литературе SRTM (Shuttle radar topographic mission).

ДАННЫЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Полет шаттла с шестью членами экипажа проходил в период с 11 по 22 февраля 2000 года в рамках проекта SRTM с задачей получения цифровой модели поверхности планеты с разрешением около 30 м (1"). Выбранные параметры полета (высота орбиты 233 км, наклонение 57°, период обращения 89,2 мин) обеспечивали выполнение радиолокационной съемки 85% поверхности Земли (рис. 1), заключенной между 60° с.ш. и 54° ю.ш. [1, 2, 3].

Для съемки использовались два установленных на борту корабля радиолокационных сенсора SIR-C и

X-SAR, осуществляющих локацию поверхности планеты в диапазонах С (длина волны $\lambda = 3,75 \div 7,5$ см) и Х ($\lambda = 2,5 \div 3,75$ см) соответственно с дискретностью через 1 секунду. Всего за 11 дней и 5,5 часов шаттл совершил 182 витка, с которых получено около 12 терабайт радиолокационных данных. Их обработка специалистами NASA продолжается и в настоящее время, но некоторые данные доступны уже сейчас [3].

Различают предварительную версию данных SRTM (2003 г.) и окончательную (февраль 2005 г.), причем данные 2005 г. прошли дополнительную обработку, заключающуюся в выделении береговых линий, водных объектов, фильтрацию ошибочных

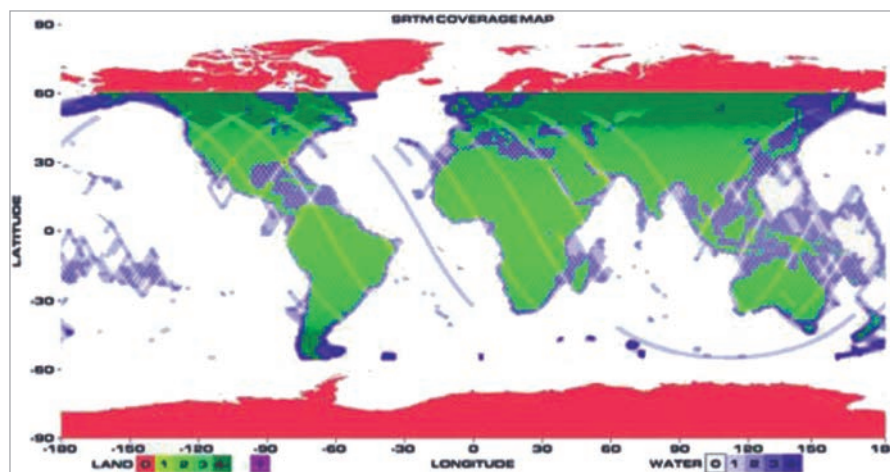


Рис. 1. Схема покрытия поверхности Земли съемкой SRTM. Плотность окраски суши (Land) и водных пространств (Water) определяет число покрытий съемкой (0–4)

1	ncols	6001
2	nrows	6001
3	xllcorner	49.999583817611
4	yllcorner	54.999583914469
5	cellsize	0.0008333333333333
6	NODATA_value	-9999
7		-9999 -9999 -9999 -9999 -9999 -9999
8		195 196 198 196 194 196 198 198 197
9		192 192 193 192 191 193 196 196 196
10		191 191 191 190 189 191 193 193 194

Рис. 2. Фрагмент файла с данными SRTM

1	Projection	GEOGRAPHIC
2	Datum	WGS84
3	Zunits	NO
4	Units	DD
5	Spheroid	WGS84
6	Xshift	0.0000000000
7	Yshift	0.0000000000
8	Parameters	

Рис. 3. Фрагмент файла с данными о проекции и эллипсоиде

Таблица 1 [3]

Ошибки координат узлов матрицы	Значение, м
Абсолютная (в плане)	8,8
То же (по высоте)	6,2
Относительная (по высоте)	8,7
То же для данных диапазона X	2,6

значений и пр. Они предоставляются пользователям бесплатно, в одном из следующих вариантов [3, 4]:

- **вариант 1** (для территории США) в виде регулярной сетки с дискретностью в одну угловую секунду (около 30 м) и размером $1^\circ \times 1^\circ$ (3601×3601 элементов);

- **вариант 2** (для территорий других стран, в том числе России) в виде регулярной сетки с дискретностью в три угловых секунды (около 90 м) и размером $1^\circ \times 1^\circ$ (1201×1201 элементов);

- **вариант 3** в виде файлов ARC GRID, а также ARC ASCII и в формате Geotiff, содержащих регулярную сетку с дискретностью в три угловых секунды (~90 м) и размером $5^\circ \times 5^\circ$ (6001×6001 элементов).

Данные варианта 3 получены обработкой оригинальных высотных данных, обеспечивающей гладкие топографические поверхности и интерполированные значения для областей, в которых отсутствовали исходные данные [3, 4].

Результаты зондирования в варианте 3 размещаются в двух файлах:

- с расширением .asc, в котором приведены размеры матрицы высот (число строк и столбцов), геодезические координаты (широта В и долгота L в градусах) юго-западного угла матрицы, шаг регулярной сетки в градусной мере, высоты узловых точек матрицы и др. (рис. 2);

- с расширением .prj с данными о проекции, эллипсоиде, единице измерения и др. (рис. 3).

Во всех вариантах нижние дополнительные ряды (1201, 3601, 6001) и правые дополнительные колонки

(1201, 3601, 6001) повторяются на соседней матрице [3]. Высоты узлов регулярной сетки отсчитываются относительно поверхности геоида EGM-96, округляются до одного метра и представляются целыми числами длиной два байта (16 бит).

Сведения о сайтах с доступными данными SRTM размещены по электронным адресам [1, 2, 3, 4].

При решении вопроса о возможности использования данных SRTM, первостепенное значение имеет их точность, заявленные значения которой составляют 20 метров в плане и 16 метров по высоте [1, 2, 3]. Однако фактическая точность оказалось несколько выше расчетной (особенно для диапазона X с более короткой длиной волны), а численные значения погрешностей для различных регионов планеты различаются в два и более раза [3]. Значения точностных параметров цифровой модели рельефа для континента Европы и Азии представлены в табл. 1.

Вместе с тем в специальных исследованиях отмечается, что в ряде случаев (в частности — в равнинных и слабовосхолмленных районах) данные имеют более высокую точность [1], а во всхолмленных и горных районах — более низкую точность, и содержат систематические ошибки, вызванные осреднением высот в области пятна радиолокатора, причем, высоты вершин всегда занижены, а дна узких ущелий — завышены [2]. Все это обуславливает необходимость выполнения специальных испытаний в каждом конкретном случае на контрольном (эталонном) участке.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И КОНТРОЛЯ ДАННЫХ SRTM

Выполнению стандартных процедур построения цифровой модели рельефа средствами программного комплекса CREDO предшествовала предварительная обработка данных SRTM, включающая импорт материалов дистанционного зондирования, преобразование координат узлов регулярной сетки в систему координат объекта с учетом высоты квазигеоида над геоидом и оценка соответствия данных SRTM требованиям заказчика с точки зрения точности высот. На эти операции и обратит внимание, поскольку специфика моделирования рельефа в среде CREDO общеизвестна.

Импорт данных SRTM и формирование каталога координат и высот узлов регулярной сетки в системе WGS-84 выполнены с помощью программы Global Mapper (рис. 4).

Полученный каталог с помощью программы CREDO ТРАНСКОР (рис. 5) преобразован из системы координат WGS-84 в систему координат объекта региона (СК-63).

Формирование данных SRTM в системе нормальных высот, оценка их точности и проверка ее соответствия требованиям заказчика были выполнены сопоставлением с данными цифровой модели рельефа (ЦМР), полученными в процессе тахеометрической съемки. В качестве эталона выбрана площадка площадью 2,5 кв. км с расчленимым рельефом. В процессе полевых изысканий на этой площадке для создания планово-высотного обоснования были использованы

спутниковые измерения (метод GPS Static), а для съемки рельефа с сечением через 0,5 метра – тахеометрический метод.

С этой целью с помощью программы CREDO ЛИНЕЙНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ получены нормальные высоты узлов регулярной сети SRTM линейной интерполяцией между узлами ЦМР эталонного участка и по их разностям построена соответствующая модель и ее отображение изолиниями через 1,0 метр (рис. 6).

Эта модель послужила основой для фильтрации ошибочных данных SRTM: по характерным «пикам» из 800 узлов забраковано около 5%, а оставшиеся разности подвергнуты статистическому анализу в программе Excel 2007. Полученное среднее расхождение высот (+2,22 м) объясняется наличием

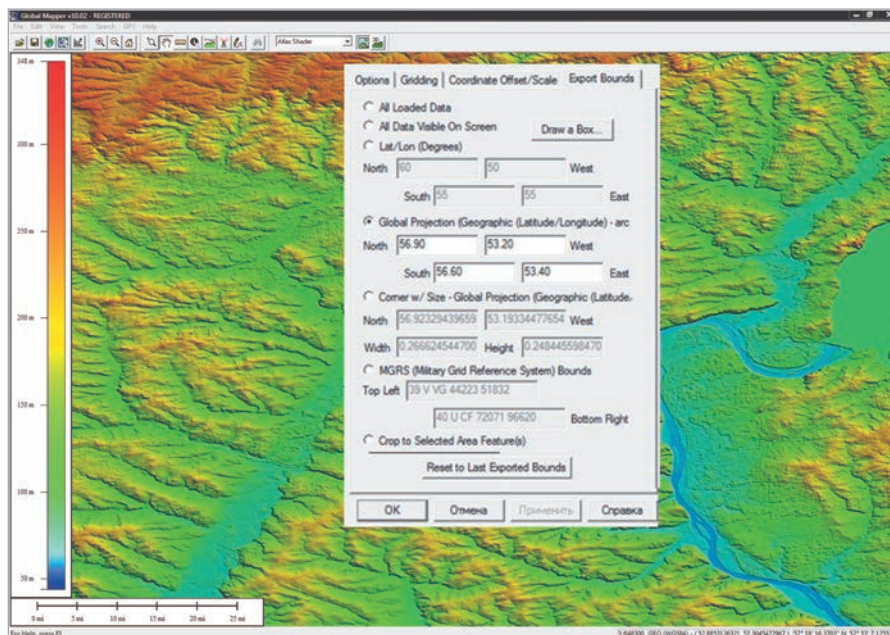


Рис. 4. Преобразование данных SRTM в каталог координат и высот точек в системе WGS-84

Имя	В	Л	h (элл)	H (орт)	ζ_1	ζ_2	$\Delta\zeta$
1	56.90000000*	53.20000000*	144.929	147.000	-2.071	-2.071	0.000
2	56.89916667*	53.20000000*	144.927	147.000	-2.073	-2.073	0.000
3	56.89833333*	53.20000000*	144.925	147.000	-2.075	-2.075	0.000
4	56.89750000*	53.20000000*	142.923	145.000	-2.077	-2.077	0.000
5	56.89666667*	53.20000000*	146.921	149.000	-2.079	-2.079	0.000
6	56.89583333*	53.20000000*	145.919	148.000	-2.081	-2.081	0.000
7	56.89500000*	53.20000000*	142.917	145.000	-2.083	-2.083	0.000
8	56.89416667*	53.20000000*	146.915	149.000	-2.085	-2.085	0.000

Рис. 5. Фрагмент окна преобразования координат в программе ТРАНСКОР

систематических погрешностей данных SRTM и разностью высот квазигеоида и геоида, поэтому эта величина и была использована для исправления высот SRTM. После этого построили цифровую модель рельефа на объект «Коттеджный поселок „Аэропорт”» (рис. 7), которую и передали заказчику как соответствующую его требованиям.

После завершения всех работ и сдачи материалов заказчику нами выполнен анализ возможности применения рассмотренной выше

методики построения ЦМР с использованием данных SRTM. С этой целью была произведена повторная статистическая обработка скорректированных разностей высот (табл. 2, рис. 9) и наложение окончательной ЦМР (рис. 7) на полевые данные.

Изучение совмещенных ЦМР (рис. 8) и результатов статистического анализа (рис. 9, табл. 2) показывает, что распределение погрешностей достаточно близко к нормальному (75% разностей укладываются в диа-

Таблица 2

Статистическая оценка	Значение, м
Среднее отклонение	0,86
Среднеквадратичное отклонение	1,26
Максимальные отклонения	+2,91 -9,26
Минимальное отклонение	0,002



Рис. 6. Изолинии равных разностей высот, полученных по данным SRTM и по полевым данным (изолинии проведены через 1 м)

пазон $-1 \dots +1$ м, а 95% — в диапазон $-2 \dots +2$ м), а SRTM описывают рельеф местности довольно точно.

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Данные SRTM при надлежащей обработке и анализе укладываются в допуск ± 1 м.
2. Использование имеющихся в открытом доступе данных радарной интерферометрической съемки сопровождается существенным экономическим эффектом (на выполнение работ мы затратили 12 рабочих часов), и построенные на их основе SRTM можно использовать в изысканиях на стадиях технико-экономического обоснования, для выбора трасс прохождения линейных сооружений и др.

Литература

1. Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы SRTM. <http://www.racurs.ru>.
2. Муравьев Л. Высотные данные SRTM против топографической съемки. <http://web.ru/db/msg.html?mid=1177761>.
3. Описание и получение данных SRTM. <http://gis-lab.info/qa/strm.html>.
4. SRTM. <http://wiki.risk.ru/index.php/SRTM>.



Рис. 7. Отображение ЦМР, построенной по данным SRTM, горизонталями с сечением через 1 м

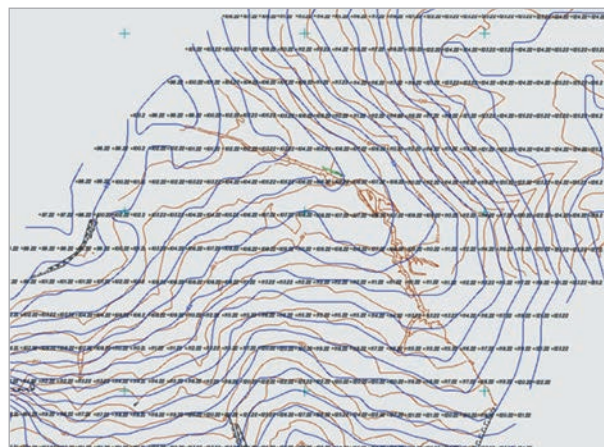


Рис. 8. Фрагмент совмещенных цифровых моделей, полученных по данным SRTM (синий цвет) и полевым изысканиям (коричневый цвет)

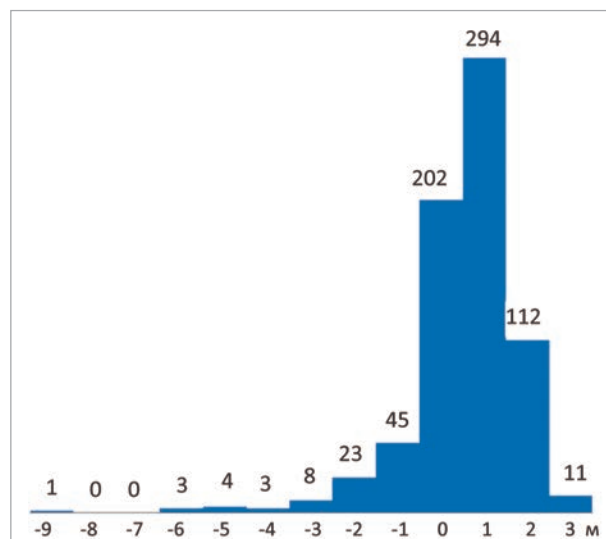


Рис. 9. Гистограмма распределения разностей высот точек, полученных по полевым данным и данным SRTM