

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МАТРИЦЫ ВЫСОТ SRTM ПО МАТЕРИАЛАМ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ СЪЕМОК

А.А. Трофимов («Северо-западный инжиниринговый центр», Санкт-Петербург)

В 2007 г. окончил Военный топографический институт (Санкт-Петербург) по специальности «астрономогеодезия». С 2008 г. работал в ЗАО «ЭнергоПроект». С 2014 г. работает в ООО «Северо-западный инжиниринговый центр», в настоящее время — директор департамента инженерных изысканий. Аспирант кафедры геоинформационных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

А.В. Филиппова (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Студентка VI курса кафедры геоинформационных систем факультета инфокоммуникационных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Целью данного исследования являлась оценка точности ортометрических высот радарной топографической съемки SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) по более точным данным инженерно-геодезических изысканий трасс проектируемых воздушных линий электропередачи, выполненных сотрудниками топографической группы отдела инженерных изысканий

ЗАО «ЭнергоПроект» в 2011 г. на территории юго-западной части Ленинградской области, в Кингисеппском, Волосовском и Сосновоборском районах (рис. 1).

▼ О проекте SRTM

В августе 1996 г. в Национальном управлении по авионавигации и исследованию космического пространства США (National Aeronautics and Space Administration — NASA) началась разработка проекта SRTM по радарной топографической съемке поверхности суши земного шара, за исключением территорий в северных и южных широтах, а также океанов. Съемку планировалось осуществлять с борта многоразового транспортного космического корабля по программе Space Shuttle за счет практической реализации эффекта интерференции на больших расстояниях с использованием глобальной навигационной спутниковой системы GPS в качестве координатной основы.

За финансирование проекта SRTM отвечало Национальное агентство геопространственной разведки США (National Geospatial-Intelligence Agency

— NGA), в то время как перед NASA стояли задачи по предоставлению радаров радиолокационного изображения С-диапазона (SIR-C), обеспечению запуска космического корабля, обслуживанию наземных систем и полетных операций, а также обработки данных. Немецкий аэрокосмический центр (DLR) и Итальянское космическое агентство (ASI) должны были предоставить радары с синтезированной апертурой X-диапазона (X-SAR), обеспечить обслуживание наземных систем и полетных операций, выполнить обработку данных [1–3].

Практическая реализация проекта состоялась благодаря запуску 11 февраля 2000 г. с космодрома космического центра им. Джона Ф. Кеннеди (John F. Kennedy Space Center), расположенного на острове Мерритт в округе Бревард штата Флорида США (рис. 2), многоразового транспортного космического корабля Endeavour со специальной измерительной аппаратурой (рис. 3).

В измерительной аппаратуре можно выделить три основных сегмента: основную платформу,



Рис. 1

Карта района работ с положением линейных объектов



Рис. 2
Общий вид космического центра им. Джона Ф. Кеннеди

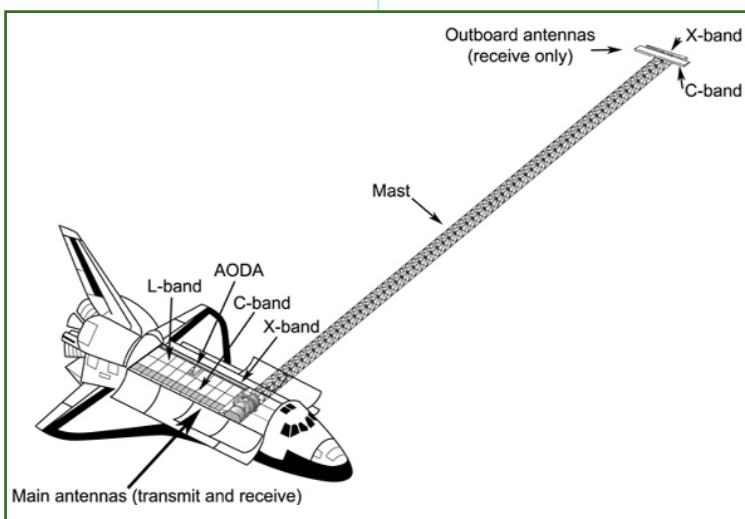


Рис. 3
Общая схема измерительной аппаратуры космического корабля Endeavour [3]

подвесную платформу и 60-ти метровую мачту, жестко соединяющую их между собой. Следует отметить, что мачта в транспортном состоянии имела длину 3 м и была развернута в рабочее положение вместе с подвесной платформой уже на орбите.

На основной платформе, размещенной непосредственно в грузовом отсеке корабля, были установлены два радара и бортовое оборудование на основе GPS и электронных систем измерения расстояния до подвесной платформы для вычисления в режиме постобработки пространственного положения основ-

ной и подвесной платформ. Один радар (SIR-C) имел возможность излучать и принимать электромагнитные волны С-диапазона длиной 5,6 см, а второй (X-SAR) — излучать и принимать электромагнитные волны X-диапазона длиной 3 см.

На подвесной платформе были размещены два радара (один С-диапазона, а другой X-диапазона), две системы на основе GPS, цели на светодиодах, а также угловой отражатель. Оба радара служили только для приема радиолокационных сигналов, направленных радарными, размещенными на основной

платформе, и отраженных от поверхности Земли.

За время полета космического корабля Endeavour, продолжавшегося 11 дней 5 часов и 38 минут, со 159 орбит, двумя радиолокационными системами SIR-C и X-SAR методом радарной интерферометрии было собрано более 12 Тбайт пространственной информации о рельефе поверхности Земли (рис. 4). Радар С-диапазона с шириной полосы луча на поверхности Земли в 225 км просканировал около 80% поверхности суши Земли, а радар X-диапазона с шириной полосы луча на поверхности земли в 50 км провел сканирование с более высоким разрешением, чем радар С-диапазон, но не имел глобального охвата.

В проекте SRTM предусматривались следующие параметры точности модели рельефа при доверительном интервале 90% [2]:

- абсолютная погрешность по высоте менее 16 м, а относительная погрешность — менее 10 м;

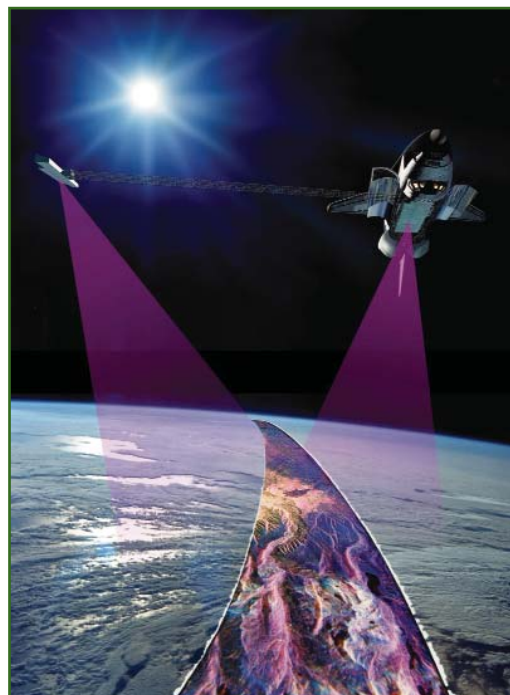


Рис. 4
Схема съемки рельефа поверхности Земли методом радарной интерферометрии

Фактические параметры точности модели SRTM [2]

Таблица 1

	Африка	Австралия	Евразия	Острова	Северная Америка	Южная Америка
Абсолютная погрешность в плане	11,9	7,2	8,8	9,0	12,6	9,0
Абсолютная погрешность по высоте	5,6	6,0	6,2	8,0	9,0	6,2
Относительная погрешность по высоте	9,8	4,7	8,7	6,2	7,0	5,5

Примечание. Все значения погрешностей приведены в м при доверительном интервале 90%.

— абсолютная погрешность в плане менее 20 м, а круговая относительная погрешность — менее 15 м.

Для оценки фактической точности модели рельефа SRTM использовались данные наземных геодезических измерений, выполненных геодезистами частных и государственных организаций, а также сотрудниками Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory — JPL) NASA [1]. Было измерено более 70 тыс. км профилей спутниковыми методами. Кроме того, специалисты JPL установили на земной поверхности угловые отражатели с точно измеренными координатами. Они хорошо определялись на радиолокационном изображении и служили в качестве контрольных точек при съемке.

Согласно данным, приведенным в работе [2], фактические значения оказались точнее (табл. 1).

Экспериментальные исследования точности высот SRTM на территории юго-западной части Ленинградской области

Существует несколько версий матриц высот SRTM. В данных исследованиях использовались файлы с расширением Geotiff, распространяемые через Интернет квадратами размером $1 \times 1^\circ$, при максимально доступном разрешении рельефа 90 м [1]. Такой квадрат имеет матрицу высот размером 1201×1201 элементов (пикселей). Один дополнительный ряд (нижний) и одна колонка (правая) являются дублирующими и повторяются на соседних матрицах. Данные доступны для широт, лежащих в диапазоне от 54° южной широты до 60° северной широты. Значения широт и долгот даны на референц-эллипсоиде WGS-84, ортометрические высоты представлены на основе модели геоида EGM-96 (рис. 5).

Для оценки точности данных SRTM в районе инженерно-геодезических изысканий (см. рис. 1) был взят квадрат с номенклатурой N59E28 и N59E29 (наименование квадрата с данными соответствует географическим координатам его левого нижнего угла) [4]. Матрица высот этого квадрата в формате Geotiff была переведена в текстовый формат и пересчитана в проекцию, в которой выполнялась топографическая съемка трасс. Полученные абсциссы и ординаты плоской системы координат и ортометрические высоты SRTM экспортировались в виде точек в программный комплекс AutoCAD Civil и создавалась цифровая модель рельефа. Она использовалась для построения профилей с ортометрическими высотами в EGM-96, пространственно соответствующих положению проектируемых воздушных линий электропередачи.

Полученные таким образом профили трасс с ортометрическими высотами в EGM-96 сравнивались и анализировались с одноименными профилями в Балтийской системе высот 1977 г., построенными по данным топографической съемки масштаба 1:2000 и сечением рельефа через 0,5 м, выполненной при инженерных изысканиях для проектирования воздушной линии электропередачи мощностью 330 кВ. Общая протяженность профилей по трассе составила порядка 80 км.

После совмещения двух профилей в плане, через каждые

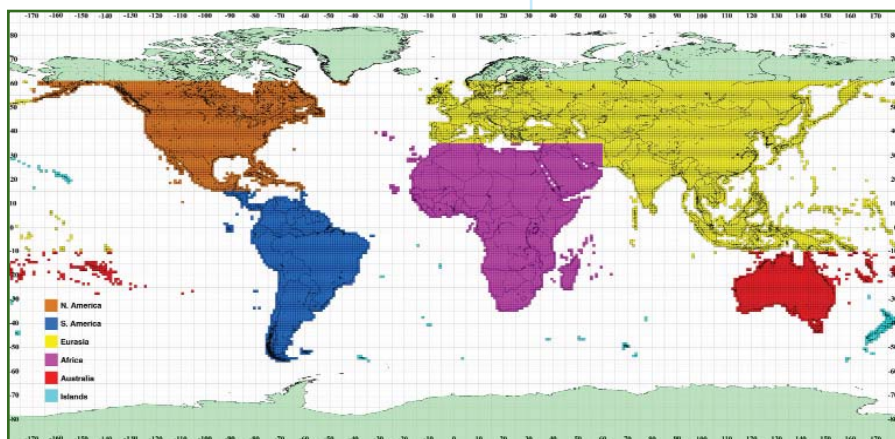


Рис. 5

Покрывение радиолокационной съемкой поверхности Земли [3]

40 м, графически были вычислены разницы в высотах одних и тех же точек профиля трассы. Таким образом, по всей трассе было получено 2049 отклонений, равномерно расположенных вдоль трассы.

Первый, геометрический, анализ показал, что высоты точек профиля в Балтийской системе не превосходят ортометрические высоты в EGM-96 на всем протяжении трассы. На рис. 6 приведен фрагмент совмещения профилей в плане (линией красного цвета показан профиль трассы по данным топографической съемки, а линией зеленого цвета — профиль той же трассы по данным SRTM).

Статистический анализ отклонений высот по всему профилю дал следующие результаты:

- минимальное отклонение составило 1,1 м;
- максимальное отклонение — 24,1 м;
- среднее отклонение (СО) — 12,8 м;
- среднее квадратическое отклонение (СКО) — 4,0 м.

После получения основных статистических сведений вся выборка отклонений высот была разбита на группы с частотой в 1 м. Было сформировано 13 групп, в каждой из которых подсчитали количество элементов выборки. Был построен график распределения отклонений высот, который имел форму нормального распределения со смещением вправо. Это позволило сделать предположение, что отклонения высот распределены по закону, близкому к Гауссовому распределению. Проверка этого предположения в данной статье не рассматривается.

Далее была выдвинута гипотеза о том, что среднее отклонение и среднее квадратическое отклонение высот на любом участке трассы должны лежать в некотором фиксированном диапазоне. Для проверки этой гипотезы трассу разбили на 4

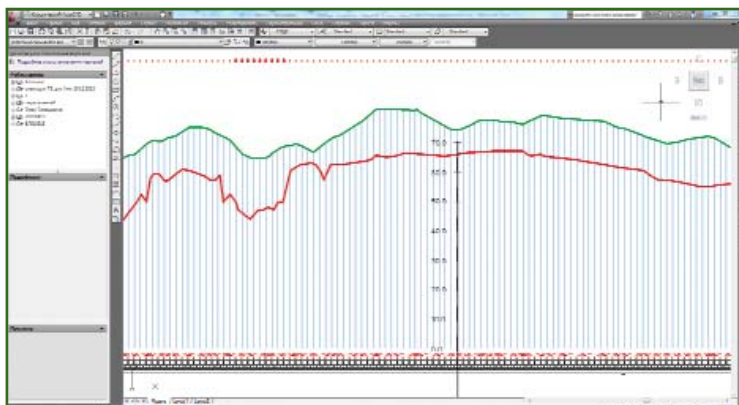


Рис. 6
Фрагмент участка с совмещенными в плане профилями (вертикальные линии проведены через 20 м)

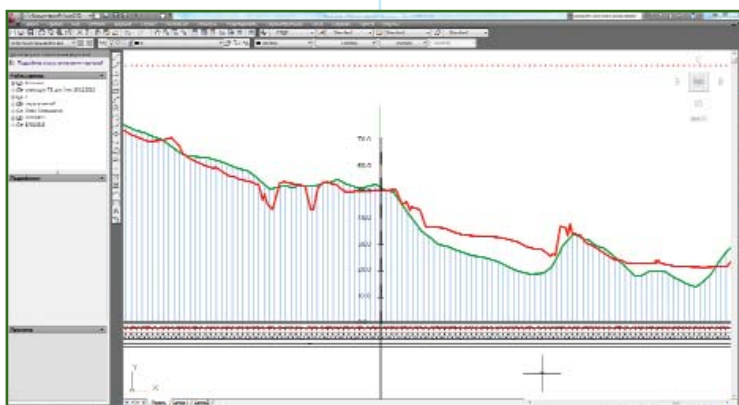


Рис. 7
Фрагмент участка с совмещенными в плане профилями после исключения систематической погрешности (вертикальные линии проведены через 20 м)

участка по 20 км, на каждом из которых вычислили значения СО и СКО (табл. 2).

На основании данных, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод о том, что СО и СКО на всех участках трассы протяженностью в 20 км отличаются от данных по всей трассе не более чем на 10% от своей абсолютной величины. Таким образом, с некоторым приближением можно считать, что среднее отклоне-

ние, равное 12,8 м, и среднее квадратическое отклонение, равное 4,0 м, могут быть приняты для всей трассы.

В этом случае среднее отклонение является систематическим отклонением между профилем в Балтийской системе высот 1977 г. и профилем с ортометрическими высотами в EGM-96. Для исключения систематической погрешности в разнице высот абсолютные значения орто-

Результаты вычисления СО и СКО высот

Таблица 2

	Участок трассы, км				Вся трасса
	0–20	20–40	40–60	60–82	
СО	11,8	12,4	13,8	13,0	12,8
СКО	4,4	3,6	4,1	3,7	4,0
Количество отклонений высот	500	500	500	549	2049

метрических высот были уменьшены на 12,8 м (рис. 7). После процедуры исключения вновь вычисленное СО стало равным 1,0 м, а СКО не изменилось.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

В соответствии с данными, приведенными в работе [2] (см. табл. 1), абсолютная погрешность высот модели рельефа SRTM в доверительном интервале 90% для Евразии составляет 6,2 м. По результатам выполненного исследования абсолютная погрешность высот SRTM для доверительного интервала 68% составила 4,0 м, а для доверительного интервала 95% — 8,0 м. Таким образом, заявленные NASA величины для Евразии, в целом, подтверждаются на исследуемом участке. Поскольку этот участок был выбран случайно, то имеет место предположение о достоверности заявленных характеристик и на других участках работ. Однако это предположение должно быть подтверждено экспериментально.

Таким образом, на основе проведенного эксперимента можно заключить, что ввиду

нормального распределения погрешностей отображения форм рельефа в модели SRTM высоты данной модели могут быть использованы для грубой оценки рельефа при выборе трасс воздушных линий электропередачи на территориях, необеспеченных картографическими материалами, либо в качестве оперативной оценки крупных форм рельефа в районе работ до начала проведения инженерно-геодезических изысканий. Однако в ходе оценки условий рельефа надо понимать, что только 68% информации о высотах будет иметь погрешность порядка 4 м, остальные данные будут грубее.

Кроме того, следует учитывать, что ортометрические высоты в EGM-96 будут иметь систематическое отклонение от высот в Балтийской системе высот 1977 г. Для его устранения необходимо выполнить контрольные определения высот не менее чем на 25% от всей протяженности профиля трассы.

Тем не менее, несмотря на обозначенное несовершенство данной модели по точности высот, она имеет и достоинства,

это глобальность покрытия и высокая оперативность для оценки районов при выборе трасс проектируемых воздушных линий электропередачи.

▼ Список литературы

1. Jet Propulsion Laboratory NASA. — www.jpl.nasa.gov.
2. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of The SRTM Topographic Product // Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 2005, 143 p.
3. Farr T.G., Rosen P.A., et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. — Vol. 45, 2007.
4. CGIAR-CSI. — <http://srtm.csi.cgiar.org>.

RESUME

The author evaluated the orthometric elevation accuracy of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data based on topographical survey. Recommendations on the SRTM data use for a rough assessment of the relief nature during the selection and engineering survey of the overhead power lines routes and other linear objects for the southwestern part of the Leningrad Region, are given.