

## Использование топографических данных SRTM для расчета поправки за влияние рельефа местности на гравитационное поле

© А. П. Петровский<sup>1</sup>, Т. А. Федченко<sup>1</sup>, А. Ю. Трачук<sup>2</sup>, 2012

<sup>1</sup>Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

<sup>2</sup>Институт геотехнологий «ИНГЕОТЕХ ЛТД», Ивано-Франковск, Украина  
Поступила 26 апреля 2012 г.

*Представлено членом регколлегии В. И. Старостенко*

Досліджено можливість використання даних топографічного знімання SRTM для розрахунку поправки за вплив рельєфу місцевості на виміряне гравітаційне поле. Наведено загальний огляд топографічного радіолокаційного знімання SRTM, виконано статистичну оцінку точності та вертикальної роздільної здатності SRTM-знімання у зіставленні з наземним геодезичним зніманням. Проаналізовано можливість використання даних SRTM для розрахунку поправки за вплив рельєфу місцевості в гравітаційне поле для різних масштабів гравіметричних знімачів. Установлено, що для рівнинних умов місцевості, з перепадом висот не більше 60 м, дані SRTM можуть бути використані для обчислення поправки за рельєф від середньої і дальньої зон.

The subject of the article is investigation of usage of SRTM topographic data for relief correction evaluation for measured gravitational field. Brief review of SRTM, statistical assessment, comparison of accuracy and vertical resolution ability of SRTM and ground geodetic survey have been represented in article. Analysis of possibility to apply SRTM data for relief correction evaluation for different scales of gravitational survey have been given. It has been found that for the plains terrain, with a height difference of not more than 60 m SRTM data can be used to calculate the correction for the relief of middle and far zones.

**Введение.** При проведении геолого-разведочных работ на нефть и газ все большая роль отводится высокоточной гравиразведке, которая обеспечивает получение новой дополнительной информации о глубинном строении изучаемых объектов. Результатом выполнения гравиметрических измерений является построение кондиционной карты гравитационного поля, из которого исключено влияние всех источников, не представляющих геолого-поискового интереса. Одна из составляющих измеренного гравитационного поля — гравитационное влияние рельефа местности, которое компенсируется введением в гравитационное поле соответствующей поправки. Значительные трудности при расчете поправки за влияние рельефа местности возникают в связи с отсутствием надежных цифровых топографических данных как вблизи пункта гравиметрического наблюдения, так и на отдалении от него. В этом случае приходится выполнять геодезические измерения вокруг гравиметрических пунктов, оцифровывать

топографические карты крупного масштаба с созданием соответствующей цифровой модели местности или использовать иные методы аппроксимации поверхности рельефа. Все эти действия либо нетехнологичны и требуют значительных затрат времени, либо приводят к недостаточной точности вычислений, что является недостатком при интенсивном развитии современной высокоточной гравиразведки. При этом наиболее влияют на точность расчета поправки размеры ближней, средней и дальней зон, а также точность и качество цифровых топогеодезических данных в пределах указанных зон.

Так, согласно классическим представлениям, для учета влияния рельефа местности строится математическая модель, аппроксимирующая реальную земную поверхность вокруг точки наблюдения с помощью методов (способы Немцова—Пришивалко, Лукавченко, Березкина, Мудрецово́й), которые базируются на непосредственных топогеодезических наблюдениях [Гравиразведка, 1981].

**Краткий обзор съемки SRTM.** В качестве альтернативы для решения проблемы топогеодезического обеспечения вычисления поправки за рельеф местности может выступать топографическая база данных SRTM [<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>].

SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) — глобальная радиолокационная многократная топографическая съемка — была проведена для большей части территории земного шара, за исключением самых северных (более 60°) и южных (более 54°) широт, а также океанов (рис. 1). Съемка SRTM выполнялась на протяжении 11 дней в феврале 2000 г. двумя сенсорами SIR-C и X-SAR, смонтированными на космическом корабле многоразового использования «Shuttle». Основная база данных находилась в свободном доступе через глобальную сеть Интернет по адресу: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/> в виде растровых файлов, представленных как квадратные области размером 1×1° с пространственным разрешением 1 арксекунда (~30 м) или 3 арксекунды (~90 м). Квадрат данных

SRTM — простое 16-битовое растровое изображение без заголовка. Высота над уровнем моря — значение амплитуды (яркости) пикселя в этой точке. В случае отсутствия данных в соответствующем пикселе записывается число -32768, которое соответствует значению «no data» (отсутствие данных о высоте).

Проектная точность данных SRTM различная для разных континентов и территорий земной поверхности, что связано, прежде всего, с кратностью съемки и характером поведения рельефа местности (табл. 1).

За время, прошедшее после проведения измерений, топогеодезическая база SRTM уточнялась и корректировалась другими топогеодезическими исследованиями, в том числе наземными, что позволило существенно улучшить ее характеристики.

Следует отметить, что территория Украины находится в одном из наиболее освещенных SRTM-съемкой поясов планеты. Как видно из схемы освещенности (рис. 1), основная часть покрыта трехкратной съемкой, а ее централь-

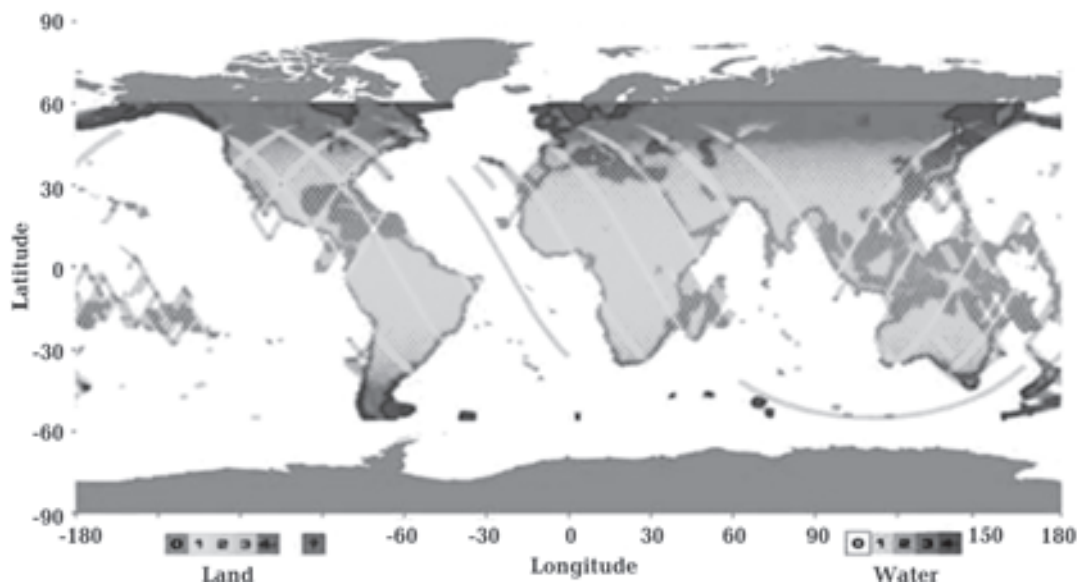


Рис. 1. Схема покрытия поверхности Земли съемкой SRTM (Land 0-1-2-3-4, Water 0-1-2-3-4 — цифра указывает на кратность наблюдения соответственно на суше (Land) и на воде (Water)) [<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>].

**Таблица 1. Проектная точность данных SRTM** [<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>]

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

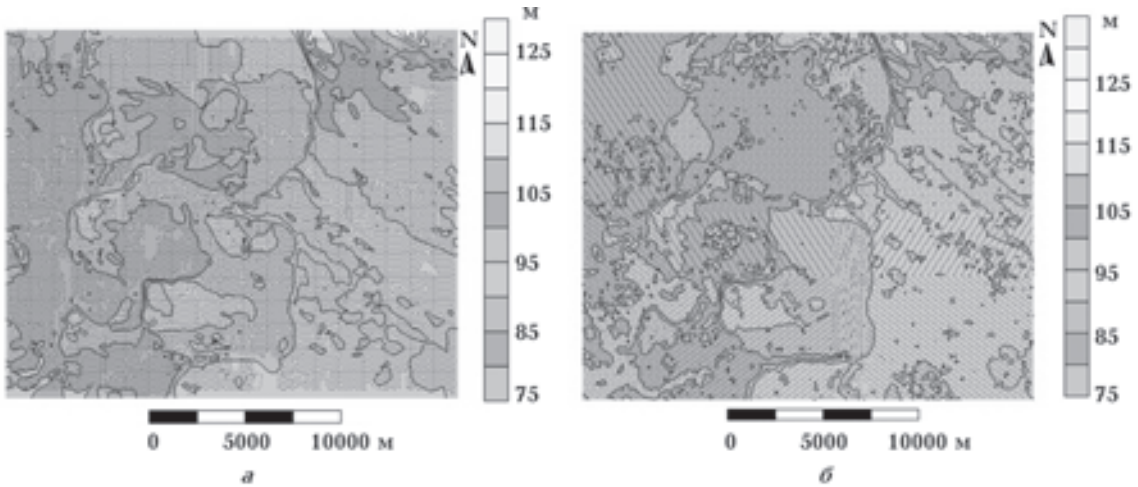


Рис. 2. Карта цифровой модели местности (ЦММ), построенная по данным НПГС с положением пунктов геодезической съемки (а), по данным SRTM (б), а также отклонение высот между НПГС и SRTM (в).

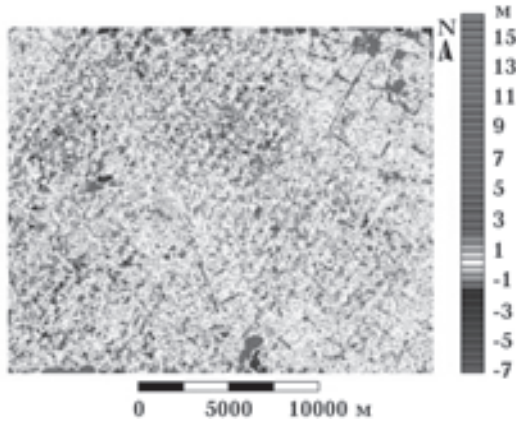
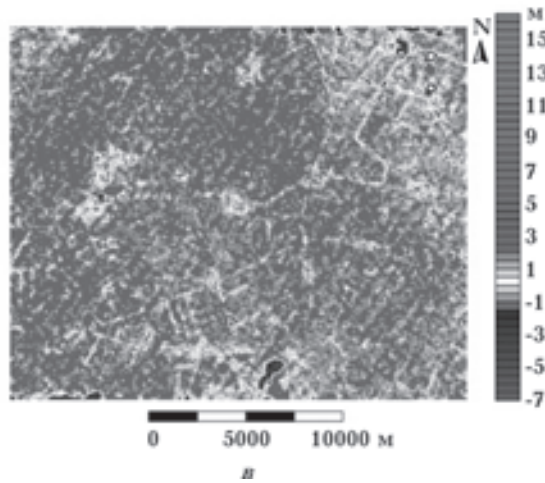


Рис. 3. Отклонение между НПГС и SRTM с учетом аддитивной составляющей 1,83 м.

ная и северная части — четырехкратной. Такая кратность наблюдений позволяет полагать, что ошибки топографической съемки SRTM в пределах территории Украины, и особенно в ее равнинных участках, могут быть значительно меньшими, чем в целом по Евразии, а точность определения высот рельефа — выше.

**Оценка точности SRTM для территории Украины.** С целью оценки точности топографической основы, полученной из базы данных SRTM, для территории Украины, было проведено их сопоставление с результатами наземной площадной геодезической съемки (НПГС), выполненной спутниковой системой позиционирования GPS Trimble-5700 по квазирегулярной сети 100×100 м. Общая площадь сопоставления 400 км<sup>2</sup>.

Цифровые модели местности и карты отклонений высот (1) (рис. 2, 3) построены с использованием программного комплекса Surfer по регулярной сети 100×100 м методом интерполяции «Kriging» с радиусом поиска 1000 м:

$$\Delta Z(x_i, y_j) = N(x_i, y_j) - S(x_i, y_j), \quad (1)$$

где  $N(x_i, y_j)$  — интерполированное значение высоты по данным НПГС в точках с координатами  $x_i, y_j$  по регулярной сети 100×100 м;  $S(x_i, y_j)$  — интерполированное значение высоты по данным SRTM в точках с координатами  $x_i, y_j$  по

**Таблица 2. Статистические характеристики отклонения между данными НПГС и SRTM**

Отклонение высот	Среднее значение, м	Медиана, м	Дисперсия, м <sup>2</sup>	Средне-квадратическое отклонение, м
$\Delta Z(x_i, y_j)$	1,74	1,83	0,971	0,9849
$\Delta Z_m(x_i, y_j)$	0,12	0,006	0,971	0,9849
$\Delta Z_s(x_n, y_m)$	1,78	1,84	0,635	0,7968

той же регулярной сетке точек;  $\Delta Z(x_i, y_j)$  — отклонение между высотами по данным НПГС и SRTM в точках с координатами  $x_i, y_j$ .

Статистический анализ величины отклонения  $\Delta Z(x_i, y_j)$  (табл. 2) показал, что среднее значение отклонения составило 1,74 м, дисперсия — 0,97, медиана — 1,83 м, среднеквадратическое отклонение — 0,9845 м. Величина полученного среднеквадратического отклонения соответствует точности SRTM модели, которая составляет  $\pm 0,5$  м, что свидетельствует о принципиальном соответствии между цифровыми моделями местности по данным НПГС и SRTM. Наличие смещения указывает на систематическую (аддитивную) погрешность, которая может быть устранена соответственной адаптацией данных SRTM к НПГС путем вычитания из высот модели SRTM величины оцененной медианы:

$$\Delta Z_m(x_i, y_j) = \Delta Z(x_i, y_j) - 1,83. \quad (2)$$

Кроме аддитивной погрешности отклонения  $\Delta Z_m(x_i, y_j)$  (рис. 3) содержат погрешности интерполяции, возникающие при перерасчете высот из точек наблюдения в точки регулярной сети. В связи с этим для окончательной оценки точности данных SRTM выполнен дополни-

тельный статистический анализ отклонения высот по данным НПГС и SRTM в точках, где пространственные координаты и высоты были точно измерены при проведении наземных измерений:

$$\Delta Z_s(x_n, y_m) = N(x_n, y_m) - S(x_n, y_m), \quad (3)$$

где  $\Delta N(x_n, y_m)$  — значение высоты в точках НПГС с координатами  $x_n, y_m$ ;  $S(x_n, y_m)$  — интерполированное значение высоты по данным SRTM в точках НПГС с координатами  $x_n, y_m$ ;  $\Delta Z_s(x_n, y_m)$  — отклонение между высотами по данным НПГС и SRTM в точках НПГС с координатами  $x_n, y_m$ ;  $n$  — номер профиля НПГС;  $m$  — номер пикета НПГС.

Характер поведения гистограммы распределения отклонений высот (рис. 4) показывает, что отклонение имеет квазинормальное случайное распределение со средним значением 1,78 м, дисперсией 0,635, среднеквадратическим отклонением 0,7968 м и медианой 1,84 м.

**Использование данных SRTM съемки для расчета поправки за влияние рельефа местности на измеренное гравитационное поле.** Чтобы оценить пригодность данных SRTM для использования при расчете поправок к гравитационному полю за влияние рельефа средней

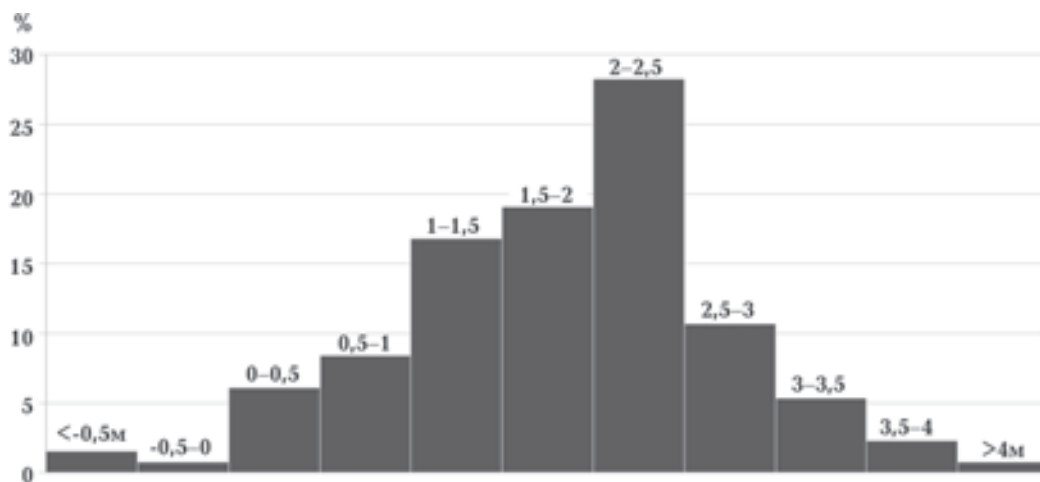


Рис. 4. Гистограмма отклонения между высотами по данным НПГС и SRTM в точках НПГС.

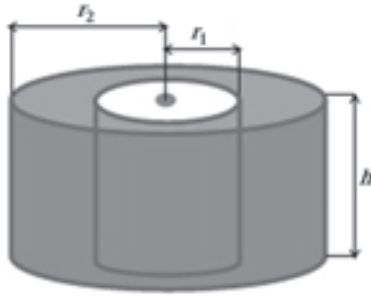


Рис. 5. Модель рельефа для расчета поправки в гравитационное поле за влияние рельефа местности.

и дальней зон на исследуемом участке, был выполнен оценочный расчет влияния погрешности определения высоты на величину поправки за влияние рельефа местности. Рельеф исследуемого участка является типичным для центральной, северной и восточной частей территории Украины. Расчеты выполнены при перепаде высот рельефа не более 60 м со среднеквадратической погрешностью определения высот 1 м, что хуже оцененной ранее среднеквадратической погрешности определения высот по данным SRTM съемки (табл. 2). При расчете поправки для гравитационного поля

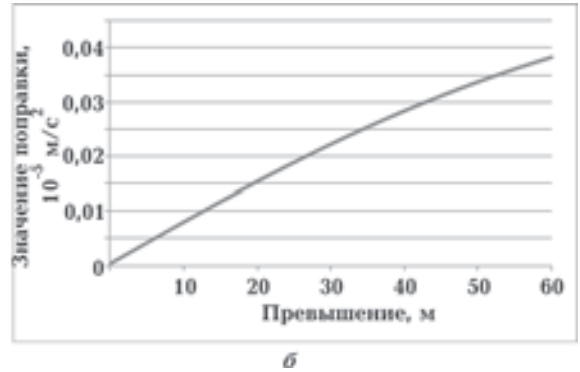
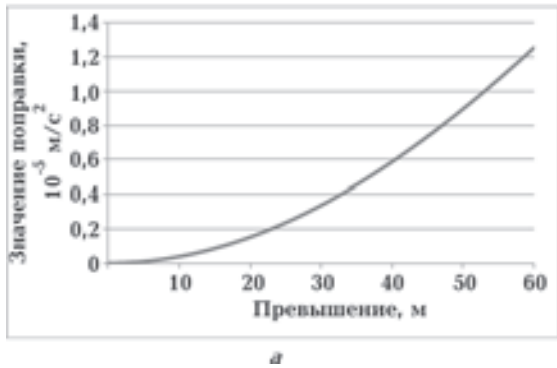


Рис. 6. Поправка (а) и погрешность в поправке (б) за влияние рельефа для средней зоны.

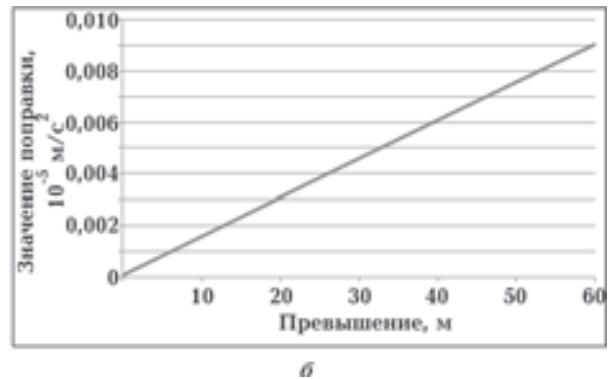
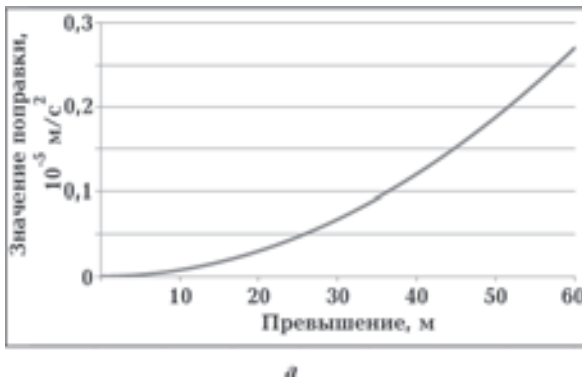


Рис. 7. Поправка (а) и погрешность в поправке (б) за влияние рельефа для дальней зоны № 1.

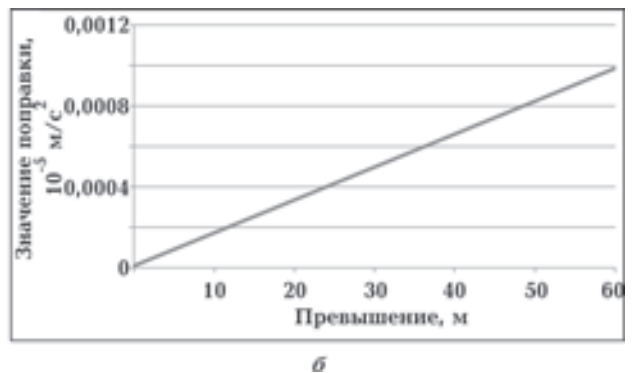
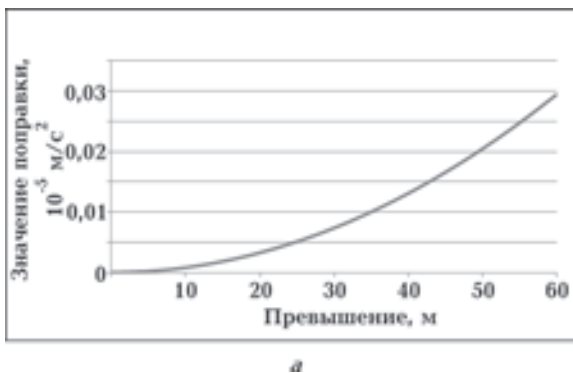


Рис. 8. Поправка (а) и погрешность в поправке (б) за влияние рельефа для дальней зоны № 2.

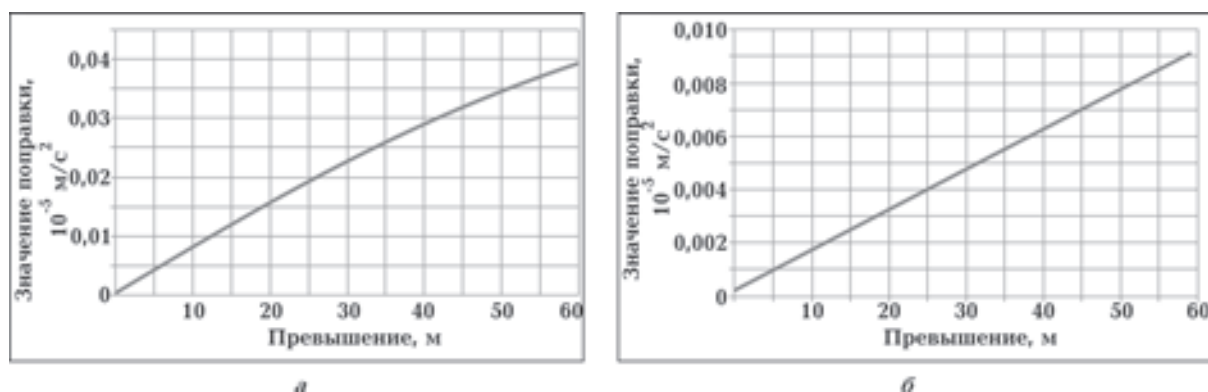


Рис. 9. Суммарная погрешность поправки за влияние рельефа при использовании данных SRTM для средней (а) и дальней (б) зон.

Таблица 3. Анализ возможности использования данных съемки SRTM для расчета поправки за влияние рельефа средней и дальней зон

Масштаб отчетных карт	Сечение изомала, $\times 10^{-5} \text{ м/с}^2$	СКП определения аномалии Буге, $\times 10^{-5} \text{ м/с}^2$	СКП определения высот, м	Общий перепад высот рельефа, м					
				<10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60
1:1 000 000 1:500 000	5,0	$\pm 1,5$	$\pm 5,0$	С, Д					
1:200 000 1:100 000	2,0 1,0	$\pm 0,8$ $\pm 0,4$	$\pm 2,5$ $\pm 1,2$	С, Д					
1:50 000	0,5	$\pm 0,2$	$\pm 0,7$	С, Д					
	0,25	$\pm 0,1$	$\pm 0,35$	С, Д					
1:25 000	0,25	$\pm 0,10$	$\pm 0,35$	С, Д					
	0,20	$\pm 0,08$	$\pm 0,25$	С, Д					
1:10 000	0,2	$\pm 0,08$	$\pm 0,20$	С, Д					
	0,1	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$	С, Д					
1:5 000	0,1	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$	С, Д					
	0,05	$\pm 0,02$	$\pm 0,05$	С, Д		Д			

Примечание. Возможность использования данных SRTM при расчете влияния рельефа: С — средней зоны, Д — дальней зоны.

за влияние рельефа местности использовалось соотношение [Гладкий, 1967]

$$\Delta g_p(r_1, r_2, h) = 2\pi f \sigma \left[ (r_1^2 + h^2)^{1/2} - r_1 - (r_2^2 + h^2)^{1/2} + r_2 \right], \quad (4)$$

где  $\Delta g_p(r_1, r_2, h)$  — поправка за влияние рельефа,  $\text{м/с}^2$ ;  $f$  — гравитационная постоянная ( $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ );  $\sigma$  — средняя плотность избыточных гравитационных масс ( $2300 \text{ кг/м}^3$ );  $h$  — превышение рельефа над точкой, для которой рассчитывается поправка за влияние рельефа, м;  $r_1, r_2$  — расстояния от точки, для которой рассчитывается поправка за влияние рельефа до внутренней и внешней границ

кольцевой зоны, охватывающей точку вычисления (рис. 5).

Расчет поправки за влияние рельефа на измеренное гравитационное поле выполнен при максимальном перепаде высот, не превышающем 60 м, и погрешности определения высоты 1 м. Местность вокруг точки наблюдения условно разделена:

- на ближнюю зону с внешним радиусом 100 м;
- среднюю зону с внутренним радиусом  $r_1=100$  м и внешним радиусом  $r_2=500$  м (рис. 6);
- дальнюю зону № 1 с внутренним радиусом  $r_1=500$  м и внешним радиусом  $r_2=5000$  м (рис. 7);

- дальнюю зону № 2 с внутренним радиусом  $r_1=5$  км и внешним радиусом  $r_2=200$  км (рис. 8).

Полученные величины погрешностей при вычислении поправки за влияние рельефа средней и дальней зон (рис. 9) и данных SRTM можно сравнить с среднеквадратической погрешностью определения аномалии Буге для различных масштабов гравитационной съемки (табл. 3) [Инструкции, 1975].

Таким образом, выполненный анализ позволяет утверждать, что для территории равнинной части Украины при среднем перепаде высот рельефа не больше 60 м высоты данные, из-

меренные с помощью топографической радиолокационной съемки SRTM, могут быть использованы в качестве топографической основы при расчете поправки в гравитационное поле за влияние рельефа местности. Использование данных SRTM для дальней зоны возможно при гравиразведочных работах любого масштаба, а для средней зоны — при съемках не крупнее М 1:10 000 (табл. 3). С учетом того, что данные SRTM уже представлены в цифровом виде, их применение для расчета поправки за влияние рельефа местности на гравитационное поле обеспечивает высокую достоверность и эффективность обработки гравиметрических данных.

### Список литературы

Гладкий К. В. Гравиразведка и магниторазведка. — Москва: Недра, 1967. — 319 с.

Гравиразведка. Справочник геофизика / Под ред. Е. А. Мудрецовой. — Москва: Недра, 1981. — 397 с.

Инструкция по гравиметрической разведке. — Москва: Недра, 1975. — 87 с.

<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm> (официальный сайт SRTM).