



УДК 528.852:528.113

А. А. Постельняк

ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИСОТ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ SRTM ТА ASTER GDEM

Осуществлено локальную оценку точности общедоступных глобальных цифровых моделей рельефа SRTM и ASTER GDEM на территорию г. Киева. Проанализирована возможность их использования для целей ортотрансформирования космических снимков.

The local accuracy assessment of two opened global digital elevation models SRTM and ASTER GDEM for the territory of city Kyiv is performed. A possibility of use of these models for the purposes of satellite image orthorectification is analyzed.

Постановка проблеми. Цифрова модель рельєфу (ЦМР) є одним із важливих компонентів під час ортотрансформування космічних знімків. Її точність багато в чому визначає точність кінцевого продукту – ортофотоплану. Сьогодні найпоширенішим способом отримання ЦМР є векторизація елементів рельєфу за сканованими паперовими картографічними матеріалами. Проте такий метод досить трудомісткий, довготривалий і дорогий. До того ж, велика частина наявних нині картографічних матеріалів уже досить застаріла, тому інформація про рельєф на них може не відповідати дійсності, що спричинює похибки при ортотрансформуванні. Через це значний інтерес наразі становлять загальнодоступні цифрові моделі рельєфу, які створені на більшу частину території нашої планети. На сьогодні маємо дві такі моделі: SRTM та ASTER GDEM. Основними перевагами цих моделей є відкритість та актуальність, тому їх використання має значний прикладний інтерес, оскільки дозволяє уникнути трудомісткого і тривалого процесу створення ЦМР за картографічними матеріалами.

Аналіз попередніх публікацій. Питання дослідження точності цифрових моделей рельєфу SRTM та ASTER GDEM непогано висвітлені в зарубіжних публікаціях. З моменту появи цих моделей у відкритому доступі проведено багато глобальних і локальних оцінювань точності цих продуктів. У праці [5] оцінено точність висот моделі SRTM для територій окремих материків. У статтях [2, 3] виконано локальне оцінювання точності цієї самої моделі для території Росії. У публікаціях [6,10] здійснено комплексне порівняння обох моделей для територій Ірану й Туреччини. Результати показують, що, як глобальна, так і локальна точність цих двох цифрових моделей рельєфу відповідають заявленим або навіть перевищують їх.

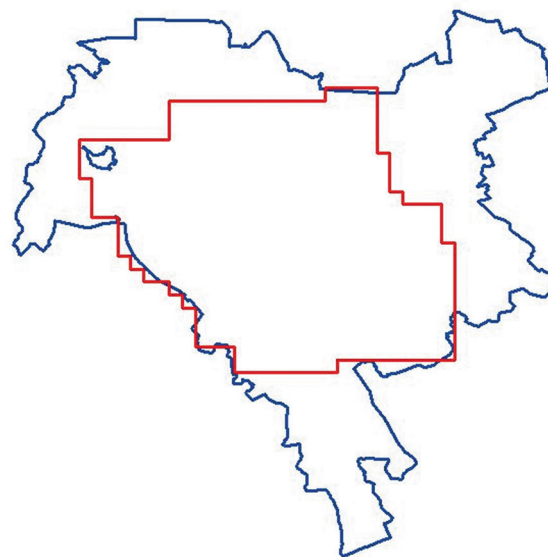
Автору не вдалося знайти вітчизняних публікацій на тему точності моделей SRTM чи ASTER GDEM стосовно території України. Через це вважаємо, що оцінювання якості таких моделей є актуальним для країни завданням.

Постановка завдання. Мета дослідження – комплексне порівняння точності обох моделей рельєфу на територію м. Києва та оцінювання можливості використання їх для створення ортофотокарт і ортофотопланів на основі космічних знімків високої

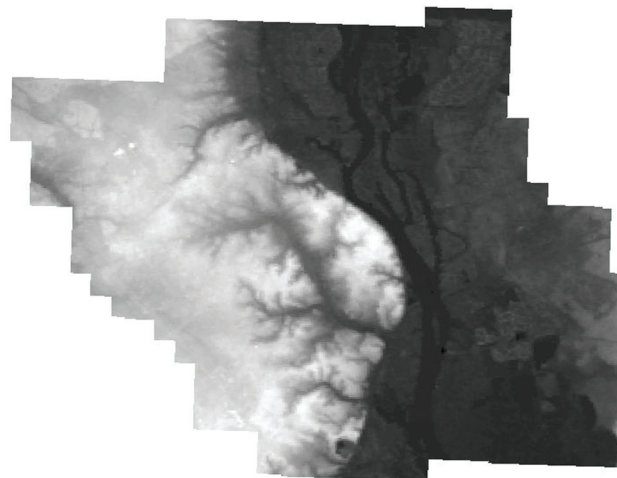
та надвисокої роздільної здатності.

Основний зміст роботи. Загальна площа досліджуваного масиву (мал. 1) становить 450 км². У процесі роботи було використано дві загальнодоступні цифрові моделі рельєфу – SRTM та ASTER GDEM (мал. 2 і 3).

Цифрову модель рельєфу SRTM (Shuttle radar topographic mission) створено на основі даних про інтерферометричне знімання земної поверхні



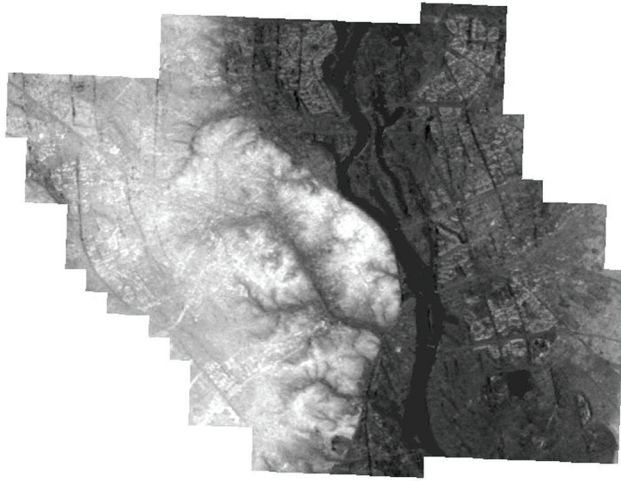
Мал. 1. Межі Києва (синій колір) та досліджуваної території (червоний колір)



Мал. 2. Цифрова модель рельєфу SRTM

© А. А. Постельняк, 2013



Мал. 3. Цифрова модель рельєфу ASTER GDEM¹

радіолокаційним комплексом на базі SIR-C/X-SAR у двох діапазонах довжин хвиль – X (3,1 см) та C (5,6 см). Тобто цей вид моделі характеризує висоту відбивної, а не топографічної поверхні. Знімання виконувалося на широтах до 60° .

На сьогодні відомо кілька версій цієї цифрової моделі рельєфу. В даному дослідженні використано останню (четверту) версію, яка має значні переваги над попередніми [7]. Вона доступна безкоштовно для завантаження на сайті <http://srtm.csi.cgiar.org/> у вигляді 16-бітних растрових файлів у форматі GeoTIFF, кожен з яких відповідає трапеції розміром 5×5 градусів на еліпсоїді WGS-84. Растровий файл є матрицею розміром 6001×6001 пікселів, тобто кожен піксель відповідає трапеції розміром 3×3 кутові секунди (на широті Києва це охоплює ділянку розміром приблизно 90×90 м). Один додатковий ряд (нижній) та одна колонка (права) є дубльованими й повторюються на сусідній матриці. Висота над рівнем геоїда EGM96 відповідає значенню яскравості пікселя. Заявлена абсолютна точність глобальної моделі по висоті становить 16 м [5].

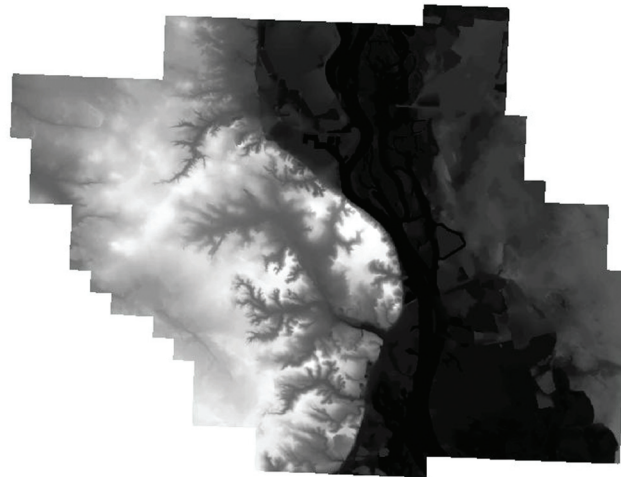
Для створення цифрової моделі рельєфу ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) використовувалися дані стереоскопічного знімання з супутника ASTER. Система, яка застосовувалася для отримання цифрової моделі рельєфу, знімає у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах довжин хвиль і складається з двох телескопів: перший знімає в надир у трьох смугах (червона, зелена, синя), а другий – назад (кут відхилення від надиру $27,7^\circ$) в одній смузі.

Наразі є дві версії цієї цифрової моделі рельєфу. В даному дослідженні використано другу, яка доступна з жовтня 2011 року. Модель доступна для завантаження безкоштовно після попередньої реєстрації на сайті <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> у вигляді 16-бітних растрових файлів у форматі GeoTIFF, кожен з яких відповідає трапеції розмі-

¹ ASTER GDEM is a product of METI and NASA.

ром 1×1 градус на еліпсоїді WGS-84. Растровий файл є матрицею розміром 3601×3601 пікселів, тобто кожен піксель відповідає трапеції розміром 1×1 кутових секунд (на широті Києва це відповідає ділянці розміром приблизно 30×30 м). Один додатковий ряд (нижній) та одна колонка (права) є дубльованими і повторюються на сусідній матриці. Висота над рівнем геоїда EGM96 відповідає значенню яскравості пікселя. Заявлена абсолютна точність глобальної моделі по висоті становить 17 м [9].

Як еталон було використано цифрову орографічно-триангуляційну модель рельєфу (мал. 4). Її створено відповідно до стандарту "База топографічних даних. Правила цифрового опису рельєфу" на територію м. Києва. Спочатку провекторизували рельєф на сканованих топографічних планах масштабу $1:2\,000$ з висотою перерізу рельєфу 2 м, а далі виконали побудову моделі за модифікованим алгоритмом Делоне в програмному забезпеченні ArcGIS 10. Після цього модель було конвертовано в растровий формат, відповідний формату моделей SRTM та ASTER GDEM, з розміром пікселя на місцевості 2 м. Це відповідає висоті перерізу рельєфу на топографічному плані.



Мал. 4. Еталонна орографічно-триангуляційна цифрова модель рельєфу

Переріз рельєфу вихідного картографічного матеріалу обрано, виходячи з таких міркувань: еталонна висота має бути мінімум в три рази точнішою, ніж та, яка оцінюється. Якщо точність моделі SRTM становить 16 м, а моделі ASTER GDEM – 17 м, тоді орографічно-триангуляційну модель можна вважати еталонною, різниці висот – істинними похибками моделей SRTM та ASTER GDEM.

Експериментальні дослідження виконано в програмному забезпеченні ArcGIS 10 з додатковим використанням Matlab 2011a та Excel. Спочатку було попередньо підготовлено дані. Для використання моделей у програмному середовищі ArcGIS 10 пікселі растру було перетворено з типу 16-bit unsigned у тип 16-bit signed. Крім того, здійснено перехід від місцевої системи координат м. Києва, на основі якої була побудована еталонна орографічно-триангуляційна



модель рельєфу, в систему координат WGS-84, в якій були створені досліджувані цифрові моделі рельєфу SRTM та ASTER GDEM. Це виконано в два етапи:

1) перетворення з місцевої системи координат м. Києва в систему координат СК-42 (проекція Гауса – Крюгера, 6-та зона) на основі відомого ключа переходу;

2) перетворення за формулами Молоденського з геодезичної системи координат СК-42 в WGS-84.

Для оцінювання якості моделей використано 3010 контрольних точок, хаотично розташованих на досліджуваній території. До оброблення залучалися всі точки незалежно від типу відбивної поверхні та характеру рельєфу. За допомогою інструменту просторового аналізу ArcGIS 10 "Вилучити величини в точки" ("Extract values to points") було отримано висоти контрольних точок з еталонної моделі, моделей SRTM та ASTER GDEM. Іншими словами, висоти контрольних точок були отримані білінійним інтерполюванням висот відповідної цифрової моделі рельєфу.

За показники точності ЦМР приймалися такі величини:

1) середня абсолютна похибка:

$$\Delta H_{\text{сеп}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta H_i|,$$

тут $\Delta H_i = H_{\text{SRTM}} - H_{\text{еталн}}$; $H_i = H_{\text{ASTER GDEM}} - H_{\text{еталн}}$;

2) середньоквадратична похибка:

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

3) мінімальна (min) та максимальна (max) різниця висот;

4) показники точності висот точок місцевості LE90 та LE95:

$$LE90 = 1,645 \cdot \sigma_{\Delta H}; \quad LE95 = 1,96 \cdot \sigma_{\Delta H},$$

де LE (Linear Error) – величина, яка із заданою імовірністю (відповідне значення 90 % або 95 % вказується в показнику) не перевищує відхилення оцінюваної висоти точки від її істинного значення [8];

5) коефіцієнт асиметрії:

$$\gamma = \frac{1}{n \cdot \sigma_{\Delta H}^3} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^3;$$

6) коефіцієнт ексцесу:

$$g = \frac{1}{n \cdot \sigma_{\Delta H}^4} \sum_{i=1}^n \Delta H_i^4 - 3.$$

Результати оцінювання точності моделей наведено в таблицях 1 та 2.

З таблиць видно, що цифрова модель рельєфу SRTM за більшістю параметрів є точнішою, ніж ASTER GDEM. Крім того, за цими параметрами можна зробити висновок, що четверта версія моделі SRTM має мінімум у два рази вищу точність, ніж заявлені 16 м. Щодо другої версії моделі ASTER GDEM, то її точність також вище заявленої.

Для уточнення оцінювання моделей було про-

Таблиця 1. Показники точності моделі SRTM

Параметр	Значення
Середня абсолютна похибка	3,57 м
Середньоквадратична похибка	5,32 м
Мінімальна різниця висот	0,04 м
Максимальна різниця висот	45,46 м
LE90	8,76 м
LE95	10,43 м
Коефіцієнт асиметрії	0,55
Коефіцієнт ексцесу	9,33

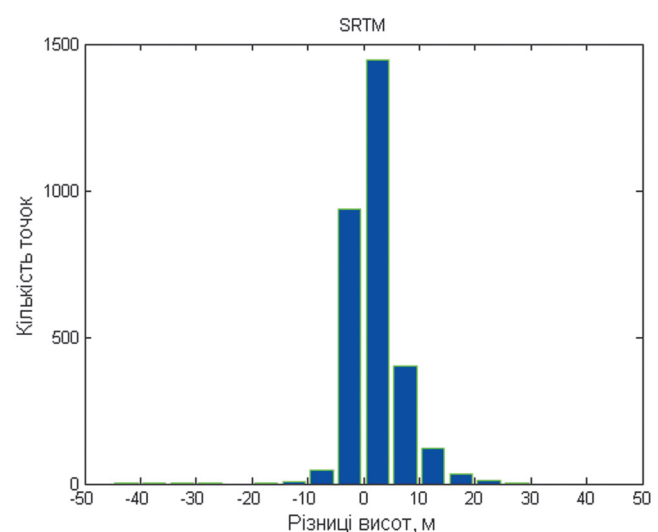
Таблиця 2. Показники точності моделі ASTER GDEM

Параметр	Значення
Середня абсолютна похибка	7,53 м
Середньоквадратична похибка	9,98 м
Мінімальна різниця висот	0,13 м
Максимальна різниця висот	50,00 м
LE90	16,41 м
LE95	19,55 м
Коефіцієнт асиметрії	1,88
Коефіцієнт ексцесу	1,58

аналізовано різниці висот (мал. 5 і 6) та побудовано графіки кореляції висот (мал. 7 і 8). На малюнках 5 і 6 зображено розподіл різниць висот оцінюваних моделей та еталонної. Як видно, для обох моделей цей розподіл є нормальним. Для моделі SRTM 79 % усіх різниць знаходиться в діапазоні від -5 м до 5 м, тоді як для моделі ASTER GDEM у цей діапазон потрапляє лише 45 % усіх різниць. Це підтверджує вищу якість моделі SRTM.

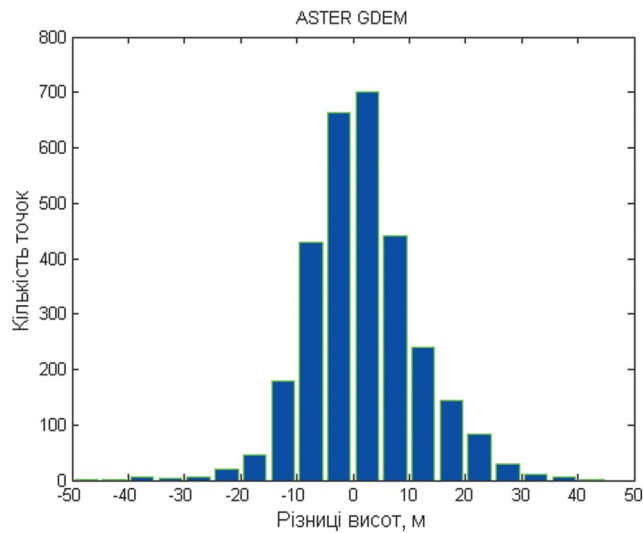
Слід також зазначити, що 67 % точок моделі SRTM та 55 % точок моделі ASTER GDEM перебувають вище точок еталонної моделі. Іншими словами, значення висот відповідного відсотка точок обох досліджуваних моделей є більшими, ніж реальні.

На малюнках 7 і 8 відображено картину розсіювання висот еталонної моделі та оцінюваних моделей. Червоним нанесено апроксимівну за методом найменших квадратів пряму. З малюнків видно, що кореляції висот різні для обох моделей: висоти

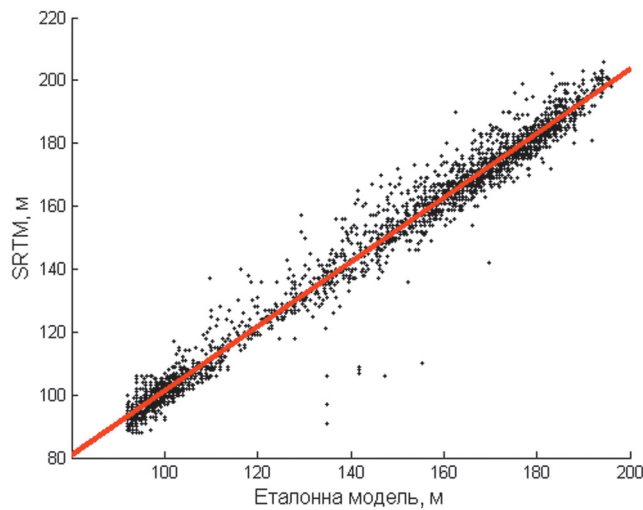


Мал. 5. Розподіл різниць висот контрольних точок еталонної моделі та моделі SRTM

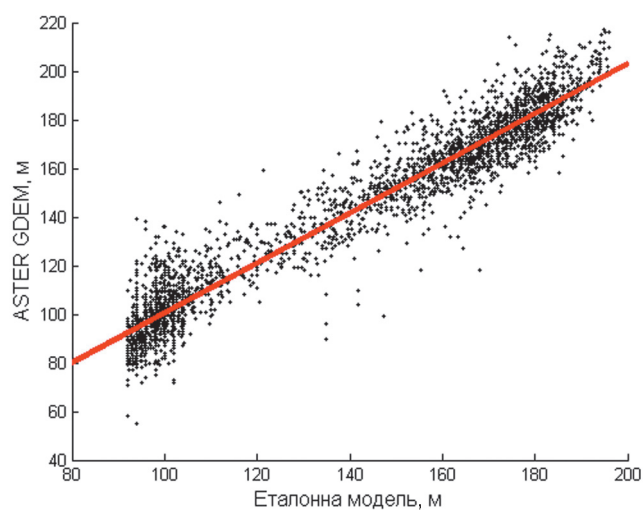




Мал. 6. Розподіл різниць висот контрольних точок еталонної моделі та моделі ASTER GDEM



Мал. 7. Графік кореляції висот еталонної моделі та моделі SRTM



Мал. 8. Графік кореляції висот еталонної моделі та моделі ASTER GDEM

ЦМР SRTM мають меншу розсіюваність та більшу корельованість з висотами еталонної моделі. Це зайве підтвердження вищої якості моделі SRTM у порівнянні з моделлю ASTER GDEM.

Для оцінювання можливості використання загальнодоступних ЦМР для цілей ортотрансформування космічних знімків було використано такий вираз [2]:

$$\Delta L = \Delta H \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

тут ΔL – допустиме лінійне зміщення точки на ортофотоплані; ΔH – абсолютна похибка висоти цифрової моделі рельєфу, яка використовується для ортотрансформування; α – кут відхилення осі камери від надиру при зніманні.

Згідно з нормативом (див. [1] і [4]), середня похибка у положенні на карті й плані предметів та контурів місцевості з чіткими контурами відносно ближніх точок знімальної основи не повинна перевищувати 0,5 мм у масштабі карти або плану. Наприклад, для масштабу 1:25 000 це 12,5 м. Значення ΔH взято з таблиць 1 та 2 (середня абсолютна похибка). Тоді максимально допустимий кут відхилення від надиру, виходячи з формули, буде 74° . Якщо взяти до уваги, що максимальне відхилення від надиру в сучасних супутниках не перевищує 60° (а на практиці для створення ортофотопланів та ортофотокарт рідко використовуються знімки зі значенням відхилення понад 20°), то значення виразу в правій частині вищенаведеної формули буде меншим допустимих 12,5 м. Отже, обидві загальнодоступні ЦМР можна використовувати для створення ортофотокарти масштабу 1:25 000.

Аналогічно було виконано розрахунки для інших масштабів. Їх результати зведено в таблиці 3 й 4. Роздільну здатність вихідного космічного знімка взято з розрахунку не менше 0,1 мм у масштабі створюваної карти або плану з урахуванням найвищої, доступної на сьогоднішній день – 50 см.

Наведені в таблицях 3 і 4 дані показують, що загальнодоступну цифрову модель рельєфу SRTM можна використовувати для створення ортофотокарт масштабу 1:25 000 та 1:10 000 на основі космічних знімків високої і надвисокої роздільної здатності. Модель ASTER GDEM годиться для створення ортофотокарт

Таблиця 3. Оцінювання можливостей використання моделі SRTM для створення карт і планів різних масштабів

Показник	Масштаб			
	1:25 000	1:10 000	1:5000	1:2000
Допустиме лінійне зміщення точки ΔL , м	12,5	5	2,5	1
Абсолютна похибка висоти ЦМР ΔH , м	3,57	3,57	3,57	3,57
Максимальний кут нахилу α	74°	54°	35°	15°
Роздільна здатність космічного знімка, м	$\leq 2,5$	≤ 1	0,5	0,5
Використання моделі для ортотрансформування	Так	Так	Можливо	Можливо





Таблиця 4. Оцінювання можливостей використання моделі ASTER GDEM для створення карт і планів різних масштабів

Показник	Масштаб			
	1:25 000	1:10 000	1:5000	1:2000
Допустиме лінійне зміщення точки ΔL , м	12,5	5	2,5	1
Абсолютна похибка висоти ЦМР ΔH , м	7,53	7,53	7,53	7,53
Максимальний кут нахилу α	59°	34°	18°	7°
Роздільна здатність космічного знімка, м	≤ 2,5	≤ 1	0,5	0,5
Використання моделі для ортотрансформування	Так	Можливо	Можливо	Можливо

масштабу 1:25 000. Використання даних ЦМР також можливе при створенні ортофотопланів масштабів 1:5000 та 1:2000, проте зараз однозначної відповіді дати не можна: потрібно проводити додаткові дослідження.

Висновок. У статті досліджено питання можливостей двох глобальних цифрових моделей рельєфу SRTM та ASTER GDEM на основі їх порівняння з еталонною орографічно-триангуляційною моделлю на територію м. Києва. Результати засвідчили, що перша модель, незважаючи на її нижчу роздільну здатність, із більшості показників має вищу локальну точність. Також виявлено, що локальна точність SRTM мінімум у два рази вища заявлених 16 м, а локальна точність ASTER GDEM також перевищує заявлені 17 м. Додатково була проаналізована можливість використання цих загальнодоступних ЦМР при створенні ортофотокарт і ортофотопланів за космічними знімками високої та надвисокої роздільної здатності. Встановлено, що цифрова модель рельєфу SRTM придатна для створення ортофотокарт масштабу 1:10 000 і дрібніших, а ASTER GDEM – для масштабу 1:25 000 і дрібніших. Також встановлена можливість використання означених ЦМР для створення ортофотопланів масштабів 1:5000 та 1:2000. Це питання буде досліджене в подальшому.

Література

1. *Інструкція* з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. – К.: Укргеодезкартографія, 1998. – 86 с.
2. *Карионов, Ю.И.* Оценка точности матрицы высот SRTM / Ю. И. Карионов // *Геопрофи.* – 2010. – № 1. – С. 48-51.
3. *Оньков, И.В.* Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения / И. В. Оньков // *Геоматика.* – 2011. – № 3. – С. 40-46.
4. *Основні положення* створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000. – К.: Укргеодезкартографія, 1999. – 18 с.
5. *Farr, T.G.* The Shuttle Radar Topography Mission / T.G. Farr, P.A. Rosen, E. Caro [et al.] // *Reviews of geophysics.* – 2007. – 45, RG2004. – P. 1-33.
6. *Forkuor, G.* Comparison of SRTM and ASTER Derived Digital Elevation Models over Two Regions in Ghana – Implications for Hydrological and Environmental Modeling / G. Forkuor, B. Maathuis // *Studies on Environmental and Applied Geomorphology.* – 2012. – P. 219-240.
7. *Suwandana, E.* Evaluation of ASTER GDEM2 in Comparison with GDEM1, SRTM DEM and Topographic-Map-Derived DEM Using Inundation Area Analysis and RTK-dGPS Data / E. Suwandana, K. Kawamura, Y. Sakuno [et al.] // *Remote sensing.* – 2012. – № 4. – P. 2419-2431.

Інтернет-джерела

8. *Титаров, П.С.* Характеристики точности CE и LE. – <http://www.racurs.ru/?page=169>
9. *ASTER Global digital elevation model: release of Version 2.* – <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>
10. *Sefercik, U., Jacobsen, K., Oruc, M., Marangoz, A.* Comparison of SPOT, SRTM and ASTER DEMs / U. Sefercik, K. Jacobsen, M. Oruc, A. Marangoz. – http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/1-w51/paper/Sefercik_jac_oruc_marangoz.pdf

Надійшла 15.07.13

* * *

УДК 528.7

О. Л. Дорожинський

КАФЕДРА ФОТОГРАМЕТРІЇ ТА ГЕОІНФОРМАТИКИ: ІСТОРІЯ, СЬОГОДЕННЯ (до 50-річчя заснування)

В статье представлена многовекторная деятельность кафедры фотограмметрии и геоинформатики Национального университета "Львовская политехника" в период с 1963 года до нынешнего времени: учебная и научно-методическая работа, научные исследования, международное сотрудничество, подготовка кадров высшей квалификации.

The articles describes the multifaceted activity of the Photogrammetry and Geoinformatics Department of National University Lviv Polytechnic since 1963. Educational and methodical work, scientific research, international cooperation and staff training are considered.

12 червня 1963 р. наказом Міністерства вищої і середньої спеціальної освіти УРСР у Львівському по-

літехнічному інституті створено кафедру аерофотогеодезії. У ці дні ми підсумовуємо пройдений кафедрою піввіковий шлях, аналізуємо здобутки і невдачі, задумуємось над подальшими перспективними діями.

© О. Л. Дорожинський, 2013

