

УДК 528.7

М.О. Пілічева

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків*

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОРТОРЕКТИФІКАЦІ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ

*В статті розглянуто етапи корекції космічних знімків від первісного («сирого») зображення до орторектифікованого (аналог ортофотоплану). Наведено опис проведення ректифікації зображення. Проаналізовано існуючі геометричні моделі орторектифікації. Надано пропозиції використання геометричних моделей орторектифікації для різних рівнів попередньої обробки космічних знімків. Розглянуто вплив помилки визначення висоти глобальної цифрової моделі рельєфу на точність визначення планового положення точки при орторектифікації. Запропоновано метод орторектифікації космічного знімка без прямого обліку рельєфу місцевості, заснований на інтерполяції вимірних лінійних відхилень космічного знімка від існуючих картографічних даних.*

**Ключові слова:** космічний знімок, орторектифікація, геометрична корекція, цифрова модель рельєфу, інтерполяція, відхилення.

### Вступ

**Вступ і постановка проблеми.** Питання реалізації державної політики в сфері ведення кадастру, раціонального використання, охорони та моніторингу земель тісно пов'язані з проблемою їх інвентаризації, реєстрації та обліку. У населених пунктах різного підпорядкування поставлені завдання можуть вирішуватися на великомасштабних картографічних матеріалах, але майже 70% топографічних карт всіх масштабів на територію України застаріли більш ніж на 20 років і не відповідають реальній ситуації [1]. Традиційна схема створення та оновлення карт (проведення геодезичних і камеральних робіт) вимагає значних матеріальних, трудових та фінансових витрат.

Швидким і порівняно дешевим способом оновлення картографічних даних великих територій є використання актуальних сканерних космічних знімків високої просторової здатності (максимум 1 м/піксель) в комбінації з існуючими топографічними і кадастровими даними (архівні картографічні дані, дані обмінних файлів тощо).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблематика використання сканерних космічних знімків великомасштабного картографування почала підніматися з початку 2000рр., що пов'язано, перш за все, з їх доступністю і невисокою вартістю. Найчастіше застосовують космічні знімки з супутників QuickBird, Ikonos і GeoEye-1, які мають декілька рівнів обробки – базовий рівень (Level 1 (Basic)), стандартний рівень (Level 2 (Standard, Standart Ortho Ready, Geo, Geo Ortho Kit)) і орторектифіковані зображення (Level 3 (Orthorectified, Reference, Pro, Precision, PrecisionPlus)). Основні характеристики кожного рівня і точність представлені в роботі [2].

Космічні знімки перших двох рівней (Level 1 і Level 2) являються більш дешевими, але потребують додаткової обробки. У роботах [3 – 5] наведені ос-

новні математичні моделі усунення геометричних спотворень космічних знімків. Проте виникає задача вибору оптимального методу обробки даних для рішення прикладних задач.

**Метою даної публікації** є вибір відповідного продукту і оптимального методу обробки даних дистанційного зондування Землі.

### Виклад основного матеріалу

Готовими до використання в картографічних цілях вважаються орторектифіковані (ортотрансформовані) зображення (аналог ортофотоплану), які проходять кілька етапів корекції для усунення багатьох випадкових, системних і систематичних спотворень [6] – радіометричну корекцію, ректифікацію, трансформування в географічну проекцію з топографічної прив'язкою, орторектифікацію (ортотрансформірованіе).

Первісне, так зване «сире», зображення являє собою зображення, яке отримано послідовним складанням всіх лінійок каналів. Отримане зображення, не має чітких контурів, має деякі відмінності пікселів по яскравості подібних об'єктів і може містити пробіли.

Такі спотворення викликані недосконалістю оптико-електронної супутникової скануючої системи: платформи (нерівномірність руху, нерівномірність висоти платформи), сенсора зображення (нерівномірність сенсорних механізмів: швидкості розгортки і сканування, кутів зору, панорамного ефекту поля зору), спотвореннями інших вимірювальних інструментів (гіроскоп, зоряний сенсор (часова зміна, синхронізація сигналів)) [7].

Для усунення спотворень «сирого» зображення проводиться радіометрична корекція і ректифікація. Радіометрична корекція включає в себе [6]:

– встановлення відносної радіометричної відповідності між каналами і усунення неточностей в

зображеннях, які виникли внаслідок різної чутливості пікселя;

- заповнення на зображенні нульових значень, викликаних нетривалим накопиченням даних;
- калібрування реакції сенсора на відомі радіометричні сигнали.

Ректифікація включає в себе побудову проміжного зображення, яке не має прогалин і накладень пікселів з різних лінійок. Для створення ректифікованого зображення вибирається площина, що проходить через середню точку відсканованої ділянки, або поверхня паралельна поверхні обраного еліпсоїда, що має постійну (частіше середню) висоту ділянки. На даній поверхні визначають межі ділянки місцевості, на яку проводилась зйомка і яка оконтурюється в прямокутник. Визначається мінімальна квадратна ділянка (середній розмір ділянки місцевості відповідає одному пікселю лінійки) і виконується поділ прямокутника прийнятими квадратними ділянками на стовпці і рядки. Для кожного квадрата визначаються геодезичні координати центру ( $B, L, Z$ ) і визначається щільність по щільності відповідного або сусідніх пікселів. Це стає можливим внаслідок того, що відомі для кожного пікселя лінійок точки сканування і кути зовнішнього орієнтування, тобто можна відновити зв'язку скануючих променів. Отримане ректифікованого зображення має чіткі контури, а також за своїми візуальним властивостям близько до фотографії.

Але отримане ректифіковане зображення відрізняється від карти або плану, в зв'язку з тим, що має спотворення викликані рельєфом місцевості. Вони усуваються виконанням орторектифікації (ортотрансформування), при цьому використовуються наступні геометричні моделі [3 – 5]:

**1. Строга геометрична модель камери** (заснована на рівняннях колінеарності). Можна досягти точності орторектифікації 1-2 м. Слід враховувати, що залежність між координатами на місцевості і на знімку порушується при геометричній корекції, тому для обробки в межах даного методу необхідні виключно знімки базового рівня попередньої обробки, які зазнали тільки радіометричної корекції.

**2. Апроксимація строгої моделі камери** (заснована на використанні коефіцієнтів раціонального полінома (RPC), які поставляються виконавцями зйомки). З використанням RPC можна досягти точності 2 – 3 м за умови використання опорних точок (1 – 4 опорні точки) в разі обчислення RPC постачальником або при зрівнянні блоку стереоскопічних космічних знімків, або при обчисленні поправок в обчислені координати при зрівнянні (зміщення, масштабування, поворот). Останній спосіб поліпшення результатів геометричної корекції частіше використовується при роботі з одним космічним знімком.

При використанні RPC без опорних точок точність отриманого зображення становить 3 – 10 м. Апроксимуючу геометричну модель найкраще застосовувати для корекції космічних знімків стандартного рівня обробки, які були перетворені без урахування цифрової моделі рельєфу (Standart Ortho Ready, Geo Ortho Kit).

**3. Параметричні універсальні моделі** (засновані на загальних і наближених допущених про спосіб виконання зйомки, при цьому значення параметрів обчислюються за допомогою опорних точок). Можна досягти точності орторектифікації 3 – 15 м. Для обчислення параметрів моделі необхідно мати достатню кількість опорних точок (від 4 до 20). Застосовують для корекції космічних знімків стандартного рівня обробки (Standart Ortho Ready, Geo Ortho Kit) в тих випадках, коли не має даних по апроксимуючій геометричній моделі.

Однією з важливих складових при виконанні орторектифікації знімків є якісна цифрова модель рельєфу (ЦМР). Створення такої ЦМР пов'язано зі значними витратами часу і коштів, тому можна використовувати існуючі глобальні моделі висот, при цьому необхідно враховувати їх точність. Орієнтовно за допомогою доступних на сьогодні глобальних ЦМР можна отримувати вихідні матеріали в масштабах від 1:25000 і дрібніше [8].

Розглянемо вплив помилки визначення висоти глобальної ЦМР на точність визначення планового положення точки при орторектифікації космічного знімка (табл. 1).

Із результатів табл. 1 можна зробити висновок про недостатню точності безкоштовних глобальних ЦМР для отримання великомасштабних ортофотопланів на основі космічних знімків, особливо це стосується космічних знімків, які мають великі відхилення кута сканування від надіра (більше 5°).

Для зменшення впливу похибки ЦМР автором запропоновано метод орторектифікації космічного знімка без прямого обліку рельєфу місцевості, який заснований на інтерполяції вимірних лінійних відхилень космічного знімка від існуючих даних (великомасштабні картографічні матеріали, даних кадастрових або геодезичних зйомок) на характерних точках методом колокації. Можливість застосування даного методу наведено в [9].

Процес геометричної корекції космічного знімка в запропонованому методі можна розділити на кілька етапів:

1. Попереднє трансформування космічного знімка в систему координат картографічного матеріалу.

2. Вимірювання лінійних відхилень космічного знімка і картографічного матеріалу на характерних точках.

Таблиця 1

Вплив помилки  
визначення висоти глобальної ЦМР  
на точність орторектифікації космічного знімка

Основні характеристики ЦМР		Помилка орторектифікації при відхиленні кута сканування від надира, м				
Розмір осередку	СКП визначення висоти, м	5°	10°	15°	20°	25°
		<b>GMTED2010 (у свободному доступі)</b>				
7,5" (250м)	26-30	2,6	5,3	8,0	10,9	14,0
15" (500м)	29-32	2,8	5,6	8,6	11,6	14,9
30" (1000м)	25-42	3,7	7,4	11,3	15,3	19,6
<b>ГТОРО30 (у свободному доступі)</b>						
30" (1000м)	30	2,6	5,3	8,0	10,9	14,0
<b>ASTER GDEM2 (у свободному доступі)</b>						
1" (30 м)	6-15	0,5 1,6	1,0 2,6	1,6 4,0	2,2 5,5	2,8 7,0
<b>SRTM C-band (у свободному доступі)</b>						
1" (30 м, США) 3" (90 м, світ)	5,6-9,0	0,5 0,8	1,0 1,6	1,6 2,4	2,2 3,3	2,8 4,2
<b>SRTM X-band(у свободному доступі)</b>						
1" (30 м)	8,0	0,7	1,4	2,1	2,9	3,7
<b>SPOT DEM (Reference 3D) (на комерційній основі)</b>						
1" (30 м або 20 м)	5-15	0,5 1,6	1,0 2,6	1,6 4,0	2,2 5,5	2,8 7,0
<b>NextMap World 30 (на комерційній основі)</b>						
1" (30 м)	від 5	от 0,5	от 1,0	от 1,6	от 2,2	от 2,8
<b>NextMap на комерційній основі)</b>						
0,15" (5 м)	0,5-2,5	0,0 0,2	0,1 0,4	0,1 0,7	0,2 0,9	0,2 1,2

3. Остаточне (детальне) трансформування знімка з використанням вимірних лінійних відхилень.

Попереднє трансформування космічного знімка в систему координат картографічного матеріалу виконується по не менш ніж чотирьом опорним точкам, які легко дешифруються на космічному знімку і на картографічному матеріалі і які бажано розташовані по периметру космічного знімка. Використовується афінне перетворення.

При остаточному трансформування космічного знімка з використанням вимірних лінійних відхилень на характерних точках можна застосовувати різні методи інтерполяції. Було апробовано інтерполяцію методом зворотних відстаней, поліноми 1, 2 і 3 ступеня і метод колокації. Підвищувати ступінь полінома при інтерполяції не має сенсу, так як при

підвищенні ступеня полінома помилка інтерполяції починає значно зростати і значення довільної функції можуть як завгодно сильно відрізнятись від інтерполяційних значень в точках, що лежать між вузлами інтерполяції.

При застосуванні інтерполяції методом зворотних відстаней і афінного перетворення на характерних точках залишаються відхилення від картографічного матеріалу (табл. 2). При використанні поліномів 2 і 3 ступеня відхилення на характерних точках можуть досягати 20 м, тому використовувати ці методи недоцільно.

Таблиця 2

Похибки інтерполяції лінійних відхилень в залежності від методу інтерполяції

Космічний знімок міста	Середня квадратична помилка інтерполяції лінійних відхилень, м	
	метод зворотних відстаней	метод афінного перетворення
A	2,888	2,379
D	1,857	1,789
B	6,763	5,728
C	1,793	1,513

Примітка. Тестування методу проводилося на прикладі космічних знімків з супутника QuickBird високої просторової здатності (0,6 м) чотирьох міст Донецької області. Рівень попередньої обробки космічних знімків міст A, B і C – ORStandard2A, а міста D – Standard2A. В якості картографічного матеріалу були використані карти масштабу 1:2000

В якості пріоритетного методу інтерполяції був обраний метод колокації [10], який базується на фільтрі Колмогорова-Вінера. Основний принцип запропонованого методу заснований на визначенні мінімуму середньоквадратичного відхилення профільтрованого сигналу від його дійсного або заданого значення.

Інтерполяція здійснюється методом ковзаючого вікна. Для кожного пікселя зображення апертура вікна  $R$  збільшується або зменшується в залежності від числа потрапляння в нього лінійних відхилень, оптимальне число останніх – від 2 до 70. Начальне значення апертури вікна (300 м) і кількість відхилень (від 2 до 70), що потрапили у вікно, були отримані ітераціями методом підбору. При інтерполяції використовується лінійна коваріаційна функція [10].

Середня квадратична похибка різностей обчислених і вимірних лінійних відхилень (тобто точність орторектифікації) в запропонованому методі складає 1,2 м (приблизно 2 пікселя).

## Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Додаткової корекції зазнають тільки космічні знімки базового і стандартного (Standart Ortho Ready) рівнів обробки у зв'язку з тим, що перший не зазнавав ніякої додаткової корекції, а другий – корекції за рельєф. Знімків рівня Standart є орторектифікованими з використанням грубої ЦМР, тому проведення повторної орторектифікації недоцільно.

2. Для обробки космічних знімків базового рівня попередньої обробки використовується строга геометрична модель камери. Для орторектифікації знімків стандартного рівня (Standart Ortho Ready) використовують апроксимуючу строгу модель камери або параметричні універсальні моделі.

3. Для зменшення впливу ЦМР на результат орторектифікації знімків стандартного рівня (Standart Ortho Ready) пропонується використовувати метод орторектифікації космічного знімка без прямого обліку рельєфу місцевості, заснований на інтерполяції вимірних лінійних відхилень космічного знімка від існуючих картографічних даних.

## Список літератури

1. Карпінський Ю. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні / Ю. Карпінський, А. Ляшенко. – К.: НДІГК, 2006. – 108 с.: іл. – (Сер. «Геодезія, картографія, кадастр»).
2. Болсуновский М.А. Уровни обработки данных ДЗЗ сверхвысокого разрешения / М.А. Болсуновский // Геоматика. – 2009. – № 2. – С. 20-23.

3. Болсуновский М.А. Геометрическая коррекция данных со спутника QuickBird / М.А. Болсуновский [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://sovzond.ru/dzz/publications/542/3072.html>.

4. Orto-rectification of high resolution satellite images / [Boccardo P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo F., Lingua A.] [Электрон. ресурс] – Режим доступа: [www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm1/papers/6.pdf](http://www.isprs.org/congresses/istanbul2004/comm1/papers/6.pdf).

5. Geometric modeling and photogrammetric processing of high resolution satellite imagery / [Xutong Niu, Jue Wang, Kaichang Di, Jin-Duk Lee, Ron Li] [Электрон. ресурс] – Режим доступа: [http://shoreline.eng.ohio-state.edu/publications/isprs2004\\_quickbird.pdf](http://shoreline.eng.ohio-state.edu/publications/isprs2004_quickbird.pdf).

6. Кохан С.С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручн. / С.С. Кохан, А.Б. Востоков; передм. Д.О. Мельничука. – К.: Вища шк., 2009. – 511 с.: іл.

7. Георгиев Н. Спутниковая электронная сканирующая система. Оценка помех и корректирование параметров при георектификации / Н. Георгиев, С. Фотев // Вопросы электромеханики. – 2008. – Том 105. – С. 110-122.

8. Глобальные цифровые модели высот [Электрон. ресурс] – Режим доступа: [http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Глобальные\\_цифровые\\_модели\\_высот](http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Глобальные_цифровые_модели_высот) – Титул з екрану.

9. Пиличева М.О. Исследование методов трансформирования космических изображений / М.О. Пиличева // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірничо-геологічна. Випуск 9(143) / Редкол.: Башков Є.О. (голова) та ін. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 132-139.

10. Пиличева М.О. Орторектифікація космічних знімків для цілей землеустроювання / М.О. Пиличева // Известия высших учебных заведений. Раздел геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 49-55.

Надійшла до редколегії 16.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.М. Гавриленко, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОРТОРЕКТИФИКАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

М.О. Пиличева

В статье рассмотрены этапы коррекции космических снимков от первоначального («сырого») изображения в орторектифицированное (аналог ортофотоплану). Приведено описание проведения ректификации изображения. Проанализированы существующие геометрические модели орторектификации. Даны предложения использования геометрических моделей орторектификации для различных уровней предварительной обработки космических снимков. Рассмотрено влияние ошибки определения высоты глобальной цифровой модели рельефа на точность определения планового положения точки при орторектификации. Предложен метод орторектификации космического снимка без прямого учета рельефа местности, основанный на интерполяции измеренных линейных отклонений космического снимка от существующих картографических данных.

**Ключевые слова:** космический снимок, орторектификация, геометрическая коррекция, цифровая модель рельефа, интерполяция, отклонение.

## STUDY OF THE METHODS OF SATELLITE IMAGES ORTHORECTIFICATION

M.O. Pilicheva

The article presents the stages of correction of satellite images from the initial ("raw") image to orthorectified image (analogue of the orthophotomap). Image rectification is described. The existing geometric orthorectification models are analyzed. Using of geometric models of orthorectification for different levels of pre-processing of satellite images is proposed. The influence of errors in determining the height of a global digital elevation model to the accuracy of the planned location of the point in orthorectification is described. A method of the orthorectification of satellite images without direct account of the relief is presented. The proposed method is based on the interpolation of the measured linear deviations of the satellite image from the existing graphical surveying data on the characteristic points.

**Keywords:** satellite image, orthorectification, geometric correction, digital elevation model, interpolation, deviation.