УДК 528.856

Якубов Г.З., Щукина О.Г., Тошонов Б.Ш.

Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО СНИМКА KOMPSAT 3 МЕТОДОМ РАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Аннотация. *Космические снимки с высоким пространственным разрешением являются важным источником информации, особенно при крупномасштабном картографировании сельского хозяйства. Космические снимки под влиянием разных факторов подвергаются искажению, многие из которых исправляются в процессе предварительной обработки. Обычно на этапе предварительной обработки космические снимки подвергаются радиометрической, сенсорной, геометрической коррекции и приводятся в стандартную картографическую проекцию. Но снимки, прошедшие только предварительную обработку, не всегда могут удовлетворять требованиям составления крупномасштабных карт и планов. Для этого необходимо выполнить точное трансформирование космических снимков с использованием дополнительных данных, коэффициентов полиномов рациональных функций (RPC) и координат опорных точек. Данная статья посвящена вопросам точного трансформирования космического снимка с высоким пространственным разрешением Kompsat 3 методом полиномов рациональных функций и оценки его точности.*

Ключевые слова: *космические снимки, трансформирование, коэффициенты полиномов рациональных функций, опорные точки.*

Yakubov G.Z., Shchukina O.G., Toshonov B.Sh.

National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

ACCURACY ANALYSIS OF THE RECTIFICATION OF THE KOMPSAT 3 SATELLITE IMAGE BY THE METHOD OF RATIONAL FUNCTIONS

Abstract. *Satellite images with high spatial resolution are important source of information, especially in large-scale agricultural mapping. Satellite images are subject to distortion under the influence of various factors, many of which are corrected during pre-processing. Usually, at the stage of pre-processing, images are subjected to radiometric, sensory, geometric correction and are brought into a standard map projection. However, images that have undergone only preliminary processing cannot always meet the requirements for compiling large-scale maps and plans. To do this, it is necessary to rectification satellite images using additional data, rational polynomial coefficients (RPC) and coordinates of ground control points. This article is devoted to the issues of rectification of satellite image with high spatial resolution Kompsat 3 by the method of polynomials of rational functions and estimation its accuracy.*

Key words: *satellite images, rectification, rational polynomial coefficients, ground control points*

Введение и постановка проблемы. Космические снимки, получаемые с помощью современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), отличающиеся разными разрешающими способностями, являются очень важным источником информации для топографического и тематического картографирования [6, 8]. Для составления крупномасштабных планов и карт сельскохозяйственных земель необходимы снимки с высоким пространственным разрешением [11]. Космические снимки под влиянием разных факторов подвергаются искажению, многие из которых исправляются в процессе предварительной обработки. Обычно, в процессе предварительной обработки, снимкам даются радиометрическая, сенсорная,

геометрическая коррекция и приводятся в стандартную картографическую проекцию. Но снимки, прошедшие только предварительную обработку, не всегда могут удовлетворять требованиям составления крупномасштабных карт и планов. Для этого необходимо выполнить геометрическую коррекцию, т.е. трансформирование космических снимков с использованием дополнительных данных, коэффициентов рациональных полиномов (RPC) и координат опорных точек. В результате трансформирования с применением разных способов и математических моделей определяется взаимосвязь между координатами цифрового изображения и координатами точек на местности, и изображения приводятся в необходимую картографическую проекцию [2; 4].

Геометрия цифровых космических снимков с высоким пространственным разрешением, полученных с оптико-электронных сканеров дистанционного зондирования Земли, отличается от изображений (кадровых изображений), созданных на основе центральной проекции. Поэтому, при трансформировании таких цифровых изображений используются методы, основанные на известных математических моделях, обеспечивающих взаимосвязь между пиксельными координатами точек изображения и пространственными координатами точек на местности [5]. Разделяют строгие, аппроксимационные и универсальные методы трансформирования космических снимков [3; 4; 7].

Строгий метод является наиболее точным методом трансформирования космических снимков, обеспечивающий математическую взаимосвязь между координатами точек на космическом снимке и на местности, на основе физических параметров конкретного сенсора. Суть данного метода заключается в восстановлении пространственного положения совокупности лучей, участвующих в формировании изображения, путем моделирования процесса съемки. Однако физические параметры сенсора не всегда предоставляются пользователю операторами систем дистанционного зондирования Земли, или предоставляются в виде целых кадров, охватывающих большие площади, которые могут быть экономически не целесообразными [4; 7].

Параметрический или метод рациональных функций, как и строгий метод, позволяет точно трансформировать космические снимки. Суть данного метода заключается в обеспечении взаимосвязи между координатами точек снимка и местности на основе аппроксимационных параметров сенсора. В этом случае математическая связь между пикселными координатами изображений и пространственными координатами точек на местности выражается с помощью следующих уравнений

$$x = \frac{P_1(X,Y,Z)}{P_2(X,Y,Z)}, \qquad y = \frac{P_3(X,Y,Z)}{P_4(X,Y,Z)}. \tag{1}$$

где x, y – нормированные координаты точек космического снимка (строка и столбец); X, Y, Z – пространственные нормированные координаты точек местности [3; 4; 8; 10].

Для трансформирования космических снимков методом рациональных функций используются RPC-коэффициенты, которые обычно предоставляются операторами систем дистанционного зондирования Земли вместе с космическими снимками.

При отсутствии информации о физических параметрах съемочной системы и других данных (RPC коэффициенты) используются универсальные методы, основанные на самых общих предположениях о геометрии съемки. При универсальных методах взаимосвязь между координатами точек снимка и точек местности строится на основе координат наземных опорных точек [3].

Изученность проблемы. Анализ результатов исследований, выполненных по фотограмметрической обработке космических снимков с высоким пространственным разрешением показывает, что трансформирование изображений с использованием модели рациональных функций может обеспечить получение точных и надежных выходных данных [1; 7; 9; 13; 15]. В исследовании по фотограмметрической обработке космических снимков высокого пространственного разрешения GeoEye-1, WorldView-1 трансформирование проводилось с использованием различных математических моделей. Анализ результатов показывает, что при использовании метода полиномов рациональных функций средние квадратические ошибки планового положения контрольных точек может составить 0,16-0,49 м [9]. В другом исследовании, проведенном со снимками QuickBird, трансформирование космического снимка выполнено методом полиномов рациональных функций с точностью 0,39 м по опорным точкам и 0,53 м по контрольным точкам. Оба результата показывают, что трансформирование космических снимков методом рациональных функций удовлетворяют требованиям точности для составления крупномасштабных карт и планов [1].

Цель и задачи работы. Целью данного исследования является произвести точное трансформирование космического снимка с высоким пространственным разрешением методом рациональных полиномов и провести оценку точности.

Материалы и методы. В исследовании использовались космические снимки полученные со спутников Kompsat 3 Республики Корея. Спутник Kompsat 3, разработанный Корейским институтом аэрокосмических исследований, оснащен оптико-электронным сенсором MSC (Multi-Spectral Camera). Этот сенсор позволяет получать изображения с пространственным разрешением 0,7 м в панхроматическом режиме и 2,8 м в мультиспектральном режиме. Общие сведения о Kompsat 3 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики Kompsat 3 [14]

Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Высота, км	685
Период съёмки, дней	3
Сенсор	AEISS
Пространственная разрешающая способность, м	0,4; 1,6
Количество спектральных каналов	5
Ширина полосы съемки, км	12
Геопозиционная точность, м	CE90 = 48,5

Съёмка исследуемого района была произведена 21 сентября 2016 года. Угол отклонения от надира 12°. Космический снимок имеет уровень обработки 1R, т.е. в процессе предварительной обработки снимок прошел радиометрическую и сенсорную коррекцию. Снимок также содержит метаданные в виде коэффициентов рациональных полиномов (RPC-коэффициенты). На рис. 1 показан космический снимок Kompsat 3 для исследуемой территории.

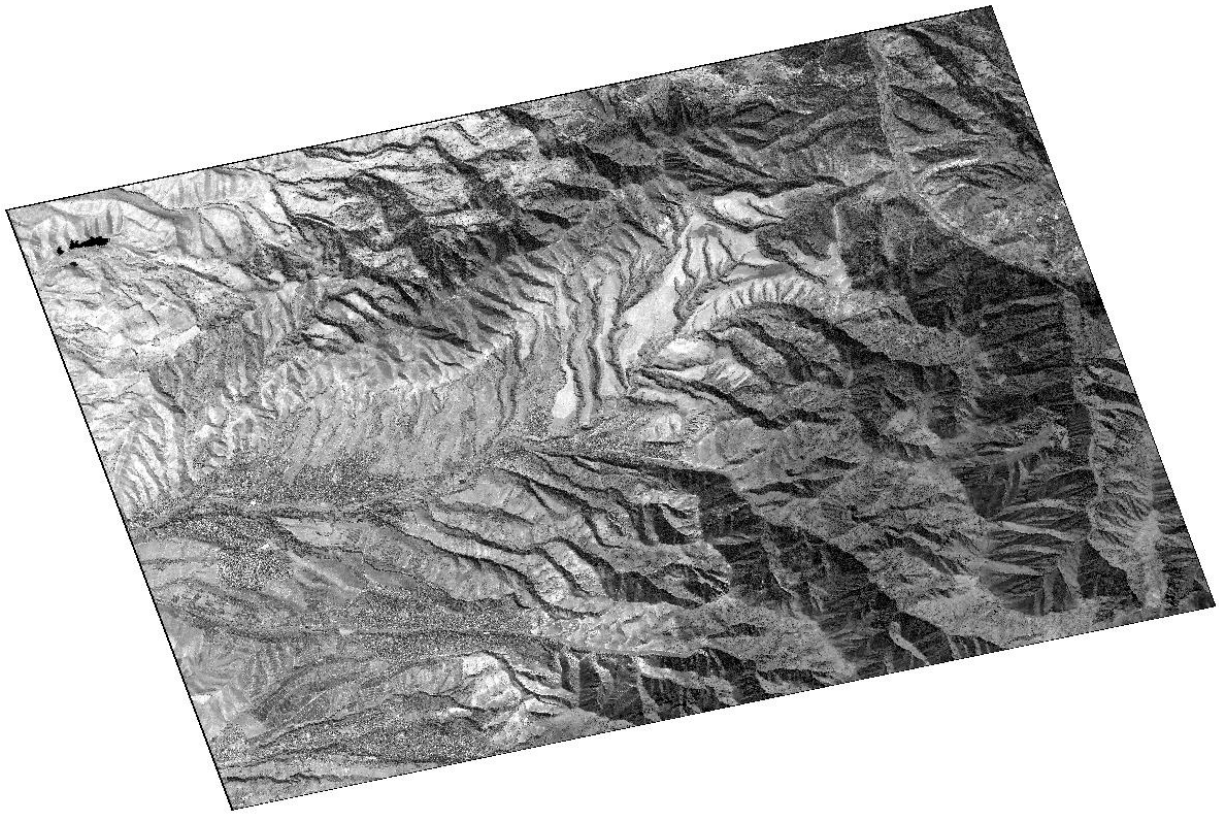


Рис. 1. Космический снимок Kompsat 3 для исследуемой территории

Основная часть. Экспериментальные исследования по трансформированию космического снимка с высоким пространственным разрешением Kompsat 3 были проведены в Паркентском ройоне, Ташкентской области (рис. 2).

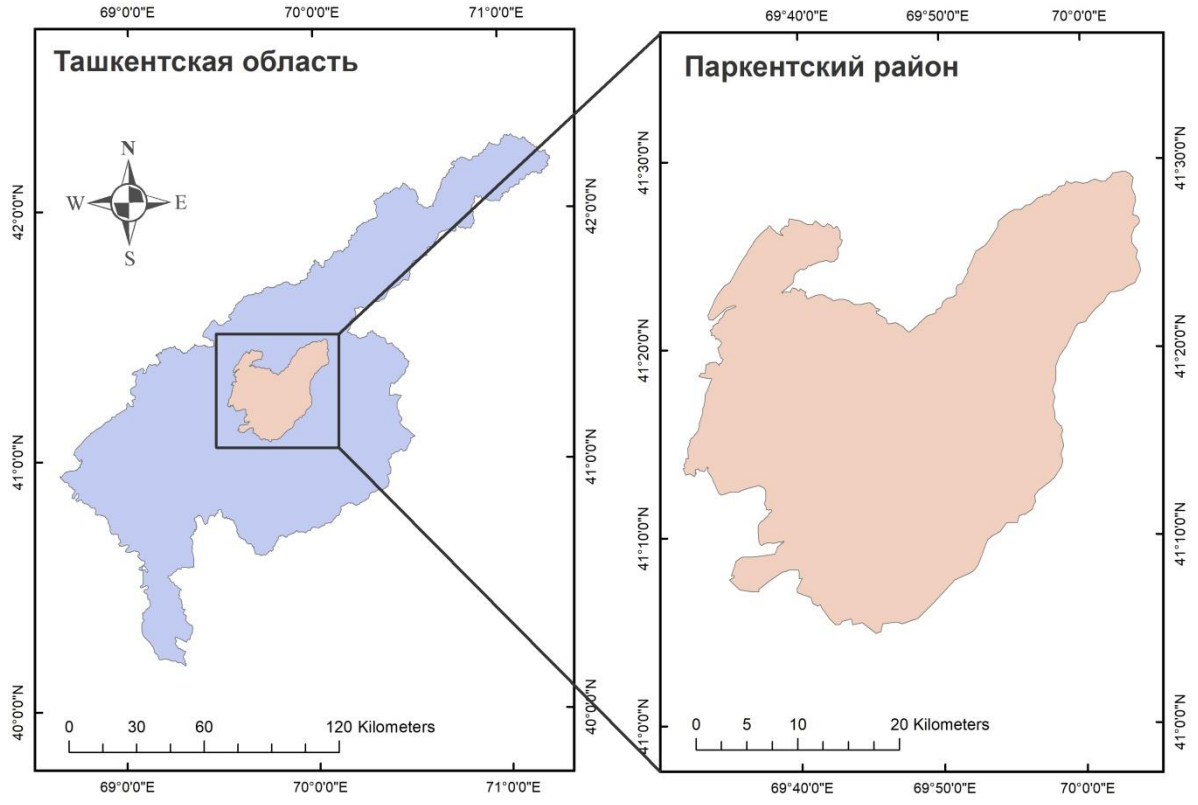


Рис. 2. Объект исследования – Паркентский район Ташкентской области

Перед трансформированием космического снимка, были проведены полевые измерительные работы на объекте исследования, в результате которых были определены положения опорных точек. При выборе места для опорных точек учитывалось, чтобы они были легко распознаваемы и не менялись с течением времени. В качестве опорных точек выбраны твердые контуры: малоэтажные здания и сооружения, их стены, перекрестки дорог, оградительные сооружения дорог (бордюры), изгибы газовых и водопроводных труб и тому подобные контуры. Местоположение опорных точек определялось по ГНСС-наблюдениям в режиме быстрой статики с использованием ГНСС-приемника Trimble R4. (Рис. 3).

В пределах космического снимка найдены 22 опорные точки, планово-высотное положение которых определены относительно общеземного эллипсоида WGS-84, в проекции UTM 42 зоны. Часть из точек обозначены как опорные (ground control points), которые учувствовали в трансформировании, остальные точки применялись как контрольные (check points), которые служили для оценки точности трансформирования космического снимка.

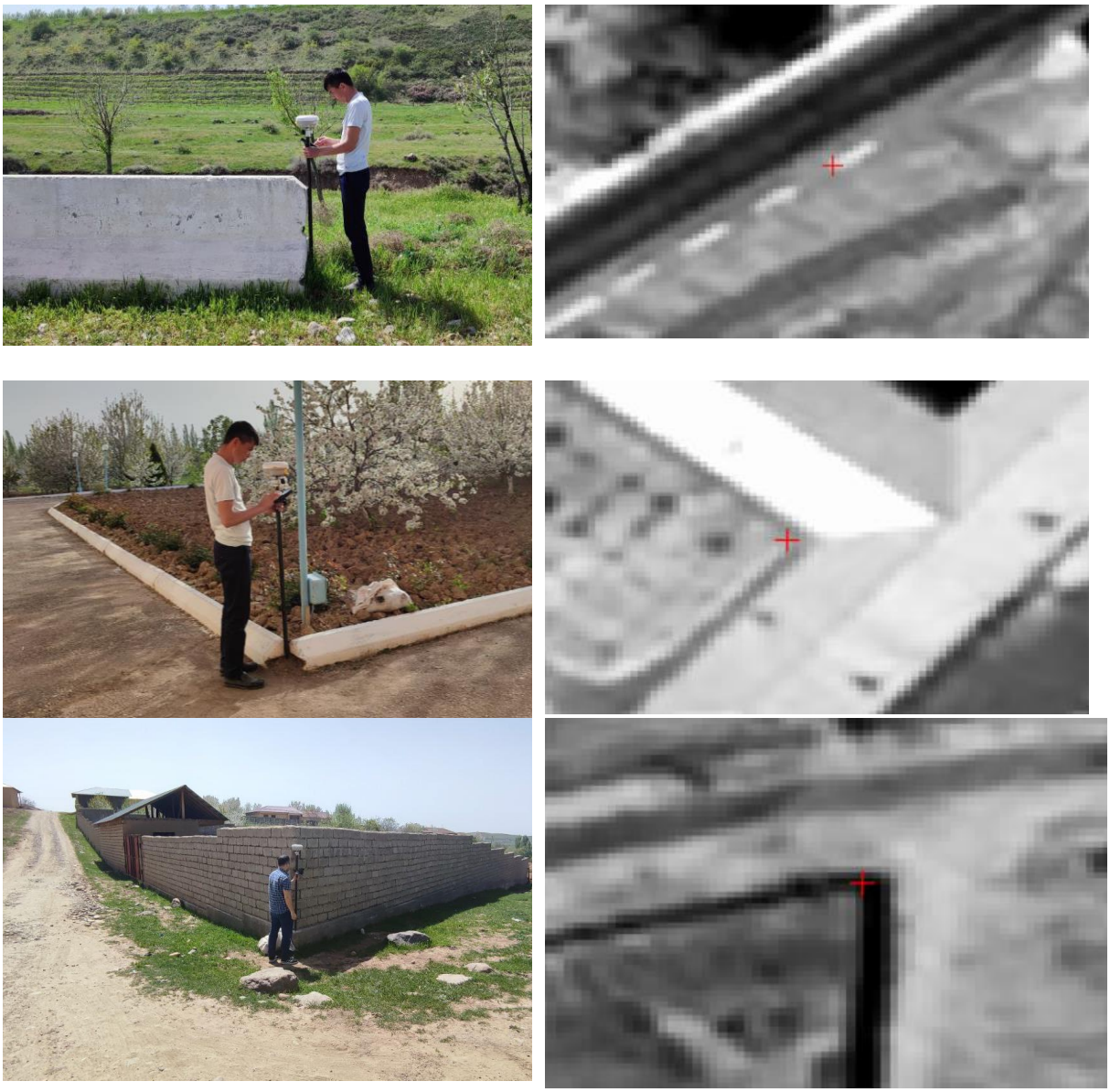


Рис. 3. Изображение опорных точек на местности и на снимке

Следует отметить, что из-за сложности рельефа местности (горные и предгорные формы рельефа) не удалось равномерно расположить опорные точки в пределах космического снимка (рис. 4). Это, в свою очередь, позволило исследовать влияние расположения опорных точек на точность трансформирования.

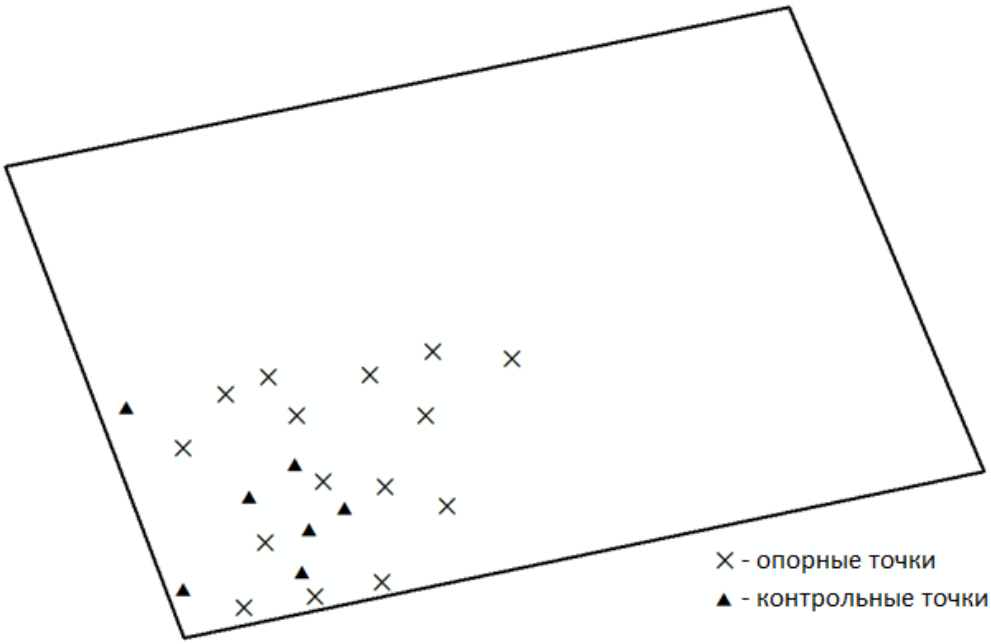


Рис. 4. Расположение опорных и контрольных точек в пределах космического снимка

Трансформирование космического снимка Kompsat 3 выполнено в программном обеспечении PCI Geomatica 2016 способом полиномов рациональных функций. Программный продукт PCI Geomatica 2016 обеспечивает трансформирование космических снимков с RPC коэффициентами в разных порядках, начиная 0-порядка до 2-порядка в зависимости от количества опорных точек.

Таблица 2

Результаты трансформирования космических снимков способом полиномов рациональных функций с использованием различного количества опорных точек

Количество опорных точек	**СКО, м**		
	0-порядок	1-порядок	2-порядок
1	1,04	-	-
2	1,18	-	-
3	0,83	-	-
4	0,88	0,90	-
5	0,94	0,90	-
6	0,86	0,80	1,02
7	0,83	0,73	1,08
8	0,91	0,82	1,14
9	0,88	0,84	1,03
10	0,86	0,78	0,78
11	0,76	0,71	0,73
12	0,68	0,67	0,75
13	0,66	0,68	0,77
14	0,68	0,66	0,72
15	0,72	0,68	0,69

Результаты трансформирования показывают, что космический снимок Kompsat 3 можно точно трансформировать способом рациональных полиномов с приминением RPC коэффициенов. Для этого можно применять разные порядки трансформирования в зависимости от количества опорных точек. Для трансформирования 0-го порядка достаточно иметь на снимке одну точку, но для достижения более точного результата необходимо большее количество опорных точек. Более точные результаты можно получить с 12-14 опорными точками. При таком количестве опорных точек точность трансформирования составляет 0,66-0,68 м.

RPC трансформирование 1-порядка, также обеспечивают получение точных результатов. Для 1-порядка минимальное количество опорных точек должно быть не менее 4. Здесь также наблюдается, что увеличение числа опорных точек приведет к повышению точности трансформирования. Наиболе точные результаты можно получить применив 12-15 опорных точек. Такое количество опорных точек позволяет производить трансформированию с точностью до 0,66-0,68 м.

Трансформирования с помощью RPC коэффициентов 2-порядка применим для 6 и более опорных точек. Более точные результаты наблюдались при количестве опорных точек от 10-15. При таком количестве опорных точек точность трансформирования варьируется в пределах 0,69-0,78 м.

Выводы. Результаты исследования трансформирования космического снимка Kompsat 3 с высоким пространственным разрешением показывают, что рациональное полиномиальное трансформирование снимка с использованием RPC-коэффициентов может обеспечить получение высокоточных выходных данных. Трансформирование космического снимка осуществлялась по 22 опорным точкам, которые из-за сложности рельефа местности были неравномерно распределены в пределах космического снимка. Неравномерность распределения опорных точек может в некоторой степени повлиять на точность трансформирования, но анализ результатов исследования с использованием снимка высокого пространственного разрешения Kompsat 3 показывает, что с увеличением количества опорных точек можно добиться более точных результатов, что в свою очередь отвечает требованиям к точности составления крупномасштабных карт и планов.

Использованная литература:

1. Болсуновский М.А. Геометрическая коррекция данных со спутника QuickBird // Геопрофи. 2006. №1. С. 16-19.
2. Евстратова Л.Г. Трансформирование космических снимков с использованием программного комплекса ENVI: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во СГГА, 2008. 53 с.
3. Коберниченко В.Г., Иванов О.Ю., Зраенко С.М. Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты: учебное пособие. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 168 с.
4. Козлов О.И. Совершенствование методов геодезической привязки сканерных снимков в целях повышения точности и надежности создания ортофотопланов: дисс. … канд. тех. наук. Москва, 2021. 142 с.
5. Обиралов А.И., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование: учебник. Москва: КолосС, 2006. 334 с.
6. Пономарчук А.И., Черепанова Е.С., Шихов А.Н. Дистанционное зондирование в картографии. Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. у-та, 2013. 100 с.
7. Титаров П.С. Исследование геометрических характеристик продукта ДЗЗ Cartosat-1 Stereo Orthokit // Пространственные данные. 2007. №2. С. 32-38.
8. Титаров П.С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2004. № 3. С. 45-46.
9. Чермошенцев А. Ю. Оценка измерительных свойств космических снимков высокого разрешения: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Новосибирск, 2012. 23 с.

10. C.Vincent Tao and Yong Hu (2001), A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 67. No. 12. P. 1347-1357.

11. Gayrat Yakubov, Khamid Mubarakov, Ilkhomjon Abdullaev and Azizjon Ruziyev (2021), Creating large-scale maps for agriculture using remote sensing, *E3S Web Conf*., 227. 03002. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122703002

12. JRC Technical Reports. New sensors benchmark report on KOMPSAT-3. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2015.

13. Hongying Zhang, Ruiliang Pu and Xiuguo Liu (2016), A New Image Processing Procedure Integrating PCI-RPC and ArcGIS-Spline Tools to Improve the Orthorectification Accuracy of High-Resolution Satellite Imagery, *Journal of Remote Sensing*, Vol. 8. Issue 10. 827. https://doi.org/10.3390/rs8100827 10.3390/rs8100827

14. Korea Aerospace Research Institude, Si Imaging Services Co., LTD. Kompsat-3 Products Specification. Image Data Manual. Vesrion 1.2. 2015.

15. Longhui Wang, Tao Wang, Yan Zhang, Kun Zhang (2020), Accuracy and Efficiency: The Comparison of Different RPC Parameters Solving Methods, *Journal of Geoscience and Environment Protection*. Vol. 8. No. 10. P. 117-126.

References:

1. Bolsunovsky M.A. (2006), Geometric correction of data from the QuickBird satellite, *Geoprofi*, No. 1, pp. 16-19. (In Russ.).

2. Evstratova L.G. (2008), *Transformation of space images using the ENVI software package: a tutorial*. Novosibirsk, 53 p. (In Russ.).

3. Kobernichenko V.G., Ivanov O.Yu., Zraenko S.M. et al. (2013), *Data processing of remote sensing of the Earth: practical aspects: textbook*. Ekaterinburg, 168 p. (In Russ.).

4. Kozlov O.I. (2021), *Improving the methods of geodetic referencing of scanner images in order to improve the accuracy and reliability of creating orthophotomaps*: *diss. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 142 p. (In Russ.).

5. Obiralov A.I., Limonov A.N., Gavrilova L.A. (2006), *Photogrammetry and remote sensing: textbook*, Moscow, 334 p. (In Russ.).

6. Ponomarchuk A.I., Cherepanova E.S., Shikhov A.N. (2013), *Remote sensing in cartography*, Perm, 100 p. (In Russ.).

7. Titarov P.S. (2007), Study of the geometric characteristics of the remote sensing product Cartosat-1 Stereo Orthokit, *Spatial data*, No. 2. C. 32-38. (In Russ.).

8. Titarov P.S. (2004), Practical aspects of photogrammetric processing of high-resolution scanner satellite images, *GIS-Association Information Bulletin*, No. 3, P. 45-46. (In Russ.).

9. Chermoshentsev A.Yu. (2012), *Evaluation of the measurement properties of high-resolution satellite images: abstract of diss. ... cand. tech. sciences*. Novosibirsk, 23 p. (In Russ.).

10. C.Vincent Tao and Yong Hu (2001), A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 67. No. 12. P. 1347-1357.

11. Gayrat Yakubov, Khamid Mubarakov, Ilkhomjon Abdullaev and Azizjon Ruziyev (2021), Creating large-scale maps for agriculture using remote sensing, *E3S Web Conf*., 227. 03002. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122703002

12. JRC Technical Reports. New sensors benchmark report on KOMPSAT-3. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2015.

13. Hongying Zhang, Ruiliang Pu and Xiuguo Liu (2016), A New Image Processing Procedure Integrating PCI-RPC and ArcGIS-Spline Tools to Improve the Orthorectification Accuracy of High-Resolution Satellite Imagery, *Journal of Remote Sensing*, Vol. 8. Issue 10. 827. https://doi.org/10.3390/rs8100827 10.3390/rs8100827

14. Korea Aerospace Research Institude, Si Imaging Services Co., LTD. Kompsat-3 Products Specification. Image Data Manual. Vesrion 1.2. 2015.

15. Longhui Wang, Tao Wang, Yan Zhang, Kun Zhang (2020), Accuracy and Efficiency: The Comparison of Different RPC Parameters Solving Methods, *Journal of Geoscience and Environment Protection*. Vol. 8. No. 10. P. 117-126.

Сведения об авторах:

Якубов Гайрат Заидович – Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Ташкент, Узбекистан), базовый докторант. E-mail: yakubov1203@gmail.com

Щукина Ольга Георгиевна – Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Ташкент, Узбекистан), доцент. E-mail: olga.shukina53@mail.ru

Тошонов Бегзод Шермамат угли – Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека (Ташкент, Узбекистан), преподаватель. E-mail: toshonovbek@gmail.com

Information about authors:

Yakubov Gayrat – National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Uzbekistan), PhD student. E-mail: yakubov1203@gmail.com

Shchukina Olga – National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Uzbekistan), Associate professor. E-mail: olga.shukina53@mail.ru

Toshonov Begzod – National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (Tashkent, Uzbekistan), teacher. E-mail: toshonovbek@gmail.com

Для цитирования:

Якубов Г.З., Щукина О.Г., Тошонов Б.Ш. Анализ точности трансформирования космического снимка KOMPSAT 3 методом рациональных функций // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2022. № 1-2. С. 110-118.

For citation:

Yakubov G.Z., Shchukina O.G., Toshonov B.Sh. (2022), Accuracy analysis of the rectification of the KOMPSAT 3 satellite image by the method of rational functions, *Central Asian journal of the geographical researches*, No. 1-2, pp. 110-118. (In Russ.).