

Создание цифровой модели рельефа по снимкам с КА ALOS/PRISM с использованием фотограмметрических методов*

В отчете от 21 сентября 2008 г., подготовленном компанией Terranean Mapping Technologies для австралийского правительственного агентства Geoscience Australia (оригинал см. на www.microimages.com/papers/DEMsandContoursfromALOSPRISM.pdf), приводится подробная оценка фотограмметрических методов создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) по космическим снимкам, сделанным съемочной системой PRISM космического аппарата (КА) ALOS.

Фотограмметрические методы использовались для:

- создания ЦМР с шагом 10 м;
- построения горизонталей с сечением 5 м;
- получения ортотрансформированных панхроматических изображений с разрешением 2,5 м.

В качестве полигона был выбран участок площадью 1520 км² в районе города Харден (Harden), штат Новый Южный Уэльс (Австралия) (рис. 1). Исследования проводились с целью определения точности и экономической эффективности применяемых методов.

Особенностью съемочной аппаратуры PRISM является то, что на одной платформе установлены три съемочные камеры, снимающие «в надир», «вперед» и «назад». Шесть снимков, сделанных картографической стереокамерой PRISM (3 снимка «вперед» и 3 – «назад»), были загружены в фотограмметрический программный комплекс SOCET SET (разработка компании BAЕ Systems), в котором с использованием наземных опорных точек, предоставленных агентством Geoscience Australia, была выполнена геопространственная привязка. Для определения внутренней гео-

метрии снимков в SOCET SET использовались коэффициенты рационального многочлена (RPC), которые поставлялись вместе со снимками.

Наземные опорные точки были тщательно подобраны, но для точной геопространственной привязки снимков и определения параметров внешнего ориентирования их количество было минимально необходи-



Рис. 1.

Границы полигона (розовая линия) и контуры сцен с КА ALOS/PRISM, наложенные на топографическую основу масштаба 1:1 000 000, составленную агентством Geoscience Australia

* Перевод отчета и его подготовка к публикации выполнены А.В. Беленовым и Б.А. Дворкиным (Компания «Совзонд»).

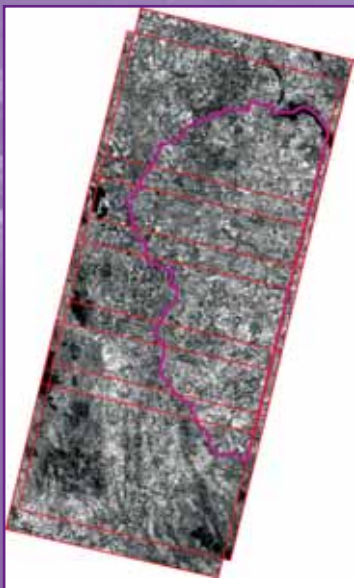


Рис. 2.
Снимки с КА ALOS/PRISM, использованные для стереообработки

мым. Результаты фототриангуляции показали, что точность стереомодели с КА ALOS/PRISM составляет около 3,5 м. Протокол о невязках основывается на примере небольшого размера.

Для создания цифровой модели рельефа в стереоскопическом режиме были измерены параметры отдельных высотных точек, линий перегибов и контуров форм рельефа. ЦМР с шагом 10 м была построена путем интерполирования по методу минимальной кривизны. По ЦМР были построены горизонтали с сечением в 5 м.

Точность построения ЦМР оценивалась путем сравнения параметров наземных точек, вычисленных по ЦМР и полученных путем геодезических измерений на местности. Только пять точек попали в исследуемый район, что является недостаточным для детальной оценки точности. Среднеквадратичная погрешность составила 3,5 м. Как показывают результаты, снимки с КА ALOS/PRISM можно использовать для создания ЦМР с точностью 5 м, а значит тем более, они пригодны для построения ЦМР с точностью 10 м.

Было установлено, что для создания ЦМР такого уровня точности с охватом одной сцены с КА ALOS/PRISM (1600 км²) потребуется около 400 часов стереообработки. При этом затраты составят около 10-20 дол. за 1 км², что намного меньше, чем при использовании других методов. Для создания ЦМР с точностью 10 м потребуется меньше половины этих затрат. Экономическая эффективность использования снимков с КА ALOS/PRISM для трехмерного картографирования в крупном масштабе, по сравнению с другими методами, будет наибольшей для небольших территорий, из-за отсутствия необходимости затрат на работы непосредственно на местности.

Данный метод выгодно отличается тем, что объекты, включая гидрографическую сеть, можно картографировать в трехмерном виде. При этом получаются ортотрансформированные изображения высокого качества.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

В Австралии существует большой интерес к соответствующим методам создания ЦМР обширных областей



Рис. 3.
Фрагмент снимка, выполненного картографической стереокамерой PRISM с КА ALOS с разрешением 2,5 м

более высокого разрешения и точности, чем существующие континентальные ЦМР с шагом по широте и долготе 3'' или 9''. Пространственное разрешение снимков с КА ALOS/PRISM в 2,5 м и возможность получения стереопар позволяют создавать ЦМР высокой точности.

Для получения рельефа по стереоснимкам могут использоваться два метода: автокорреляция и фотограмметрическая обработка. Они позволяют рассчитывать параллакс точек, расположенных на левом и правом снимках стереопары. С помощью первого метода можно локализовать точки за счет автоматической корреляции значений пикселей на левом и правом снимках. Его недостатком является то, что объекты, не

являющиеся элементами рельефа, например, деревья или здания, не удаляются автоматически, и таким образом, создаваемые модели поверхности не являются истинными моделями рельефа. Метод фотограмметрической обработки представляет собой метод графического построения модели земной поверхности с использованием высотных точек и характерных линий перегиба рельефа в стереорежиме. Этот метод более трудоемкий, поскольку осуществляется оператором, но в то же время более точный. Именно он применялся в данном исследовании для получения точной и высококачественной ЦМР, которую можно построить на базе снимков с КА ALOS/PRISM.

Таблица 1

Параметры изображений

Наименование параметра	Значение параметра					
Номер сцены (изображения)	ALPSMF 045064235	ALPSMF 045064240	ALPSMF 045064245	ALPSMB 045064350	ALPSMB 045064355	ALPSMB 045064360
Направление съемки	Вперед			Назад		
Смещение изображения	1			-1		
Вид продукции	O1B1__F			O1B1__B		
Точность орбитальных данных	Precision					
Точность положения в пространстве	OnSitePrecision					
Дата и время в центре сцены	20061129 00:13:31,636	20061129 00:13:35,753	20061129 00:13:39,870	20061129 00:15:04,708	20061129 00:15:08,825	20061129 00:15:12,948
Широта/долгота центра сцены, 0	-34,415/ 148,287	-34,662/ 148,218	-34,910/ 148,148	-34,449/ 148,261	-34,695/ 148,192	-34,942/ 148,122
Широта/долгота левого верхнего угла сцены, 0	-34,196/ 148,121	-34,443/ 148,052	-34,690/ 147,982	-34,232/ 148,095	-34,478/ 148,025	-34,725/ 147,956
Широта/долгота правого верхнего угла сцены, 0	-34,279/ 148,554	-34,526/ 148,486	-34,773/ 148,417	-34,312/ 148,530	-34,558/ 148,461	-34,805/ 148,393
Широта/долгота левого нижнего угла сцены, 0	-34,551/ 148,021	-34,799/ 147,951	-35,046/ 147,881	-34,587/ 147,995	-34,833/ 147,925	-35,079/ 147,855
Широта/долгота правого нижнего угла сцены, 0	-34,635/ 148,456	-34,882/ 148,387	-35,129/ 148,318	-34,666/ 148,432	-34,912/ 148,363	-35,159/ 148,294

Пример формуляра с уточненными пространственными координатами наземной опорной точки № 15 по результатам GPS-измерений

№ пункта	015	№ фотографии	GCP_015a/B
Дата	12/02/2008	Время	17:05
Широта, 0	-34,68155417	Долгота, 0	148,2718463
X, м	616509,3077	Y м	6161534,558
Зона	MGA551	Высота	см. GPS_Heights shapefile2
Штат	Новый Южный Уэльс	Топокарта 100K	Cootamundra – 8528
Топограф	R. Coghlan & J.Wilford	Оборудование	Спутниковый приемник Trimble XT с внешней антенной и программным обеспечением ArcPad 7.0
PDOP	2,952124357	Количество наблюдаемых спутников GPS	6
Метод наблюдения	Среднее значение из 180 измерений (180 сек)	Высота антенны, м	1,26

Примечания:

¹ MGA55 – Map Grid of Australia (картографическая сетка Австралии), 55 зона.

² GPS_Heights shapefile – значение измеренной высоты приведено в формате ArcPad 7.0 (ESRI).

ДАННЫЕ

Шесть снимков (рис. 2, 3), сделанных картографической стереокамерой PRISM с КА ALOS, были загружены в фотограмметрический программный комплекс SOCET SET.

Для расчета ориентирования снимков с КА ALOS/PRISM использовались коэффициенты рационального многочлена (RPC), которые описывают внутреннюю геометрию снимков и вместе с наземными опорными точками используются для расчета точного ориентирования снимков и их привязки к пространственной системе координат. Были использованы только снимки, выполненные объективами «вперед» и «назад»; у стереопар, включающих снимок отснятый «в надир», меньше параллакс, а значит и меньшая вертикальная точность. Параметры шести изображений, приобретенных у оператора спутника ALOS – компании RESTEC (Remote Sensing Technology Center of Japan), приведены в табл. 1.

Агентство Geoscience Australia отобрало наземные опорные точки и предоставило их для проекта

(рис. 4). Для каждой из них были сделаны схемы привязки (рис. 5) и фотография окружающей мест-

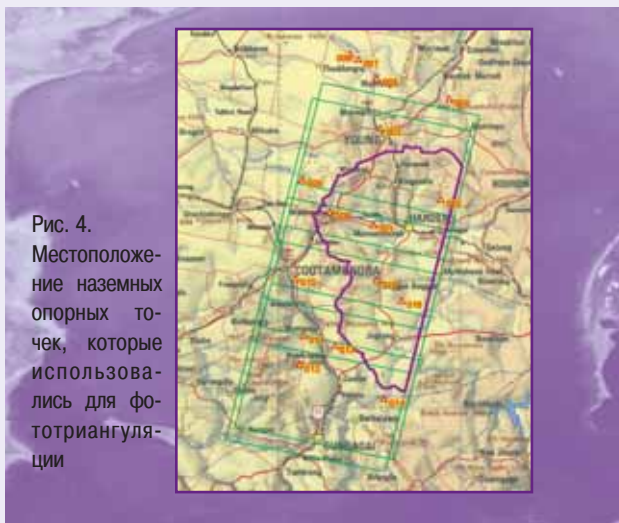


Рис. 4. Местоположение наземных опорных точек, которые использовались для фототриангуляции

ности (рис. 6) с тем, чтобы определить их точное местоположение на снимках (рис. 7). Кроме того, для каждой наземной опорной точки были предоставлены формуляры с их уточненными пространственными координатами по результатам GPS-измерений (табл. 2).

МЕТОДЫ

Снимки, сделанные картографической стереокамерой PRISM со спутника ALOS, были импортированы в фотограмметрический программный комплекс SOCET SET. Затем были предприняты многочисленные попытки определения внутренней геометрии и ориентирования снимков. После консультаций с BAE Systems было установлено, что для определения внутренней геометрии снимков в SOCET SET необходимо иметь значения коэффициентов рационального многочлена (RPC), без которых создание фотограмметрических моделей не представляется возможным. Коэффициенты RPC были получены и затем использованы для создания фотограмметрических моделей в SOCET SET. Был выполнен импорт снимков в SOCET SET, и проведена проверка их качества. Все изображения на снимках оказались на 100% без облаков и имели хорошие радиометрические параметры с небольшой насыщенностью на освещенных участках и отсутствием насыщенности на темных участках.

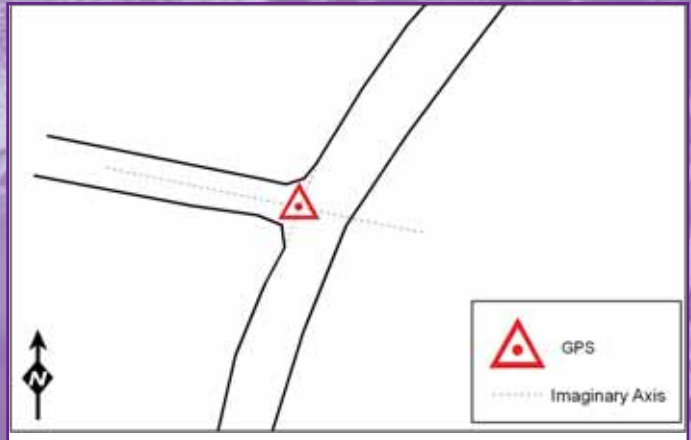


Рис. 5.
Схема планового положения наземной опорной точки № 15 (GCP_015a/b) на местности



Рис. 6.
Фотография наземной опорной точки № 15

Протокол о невязках SOJET SET (пиксели)

Номер опорной точки	Номер сцены (изображения)	Невязка по строкам, пиксель	Невязка по столбцам, пиксель
GCP_01	ALPSMB045064350-01B1__B	0,059	-0,043
	ALPSMB045064355-01B1__B	0,088	0,005
	ALPSMF045064235-01B1__F	-0,023	-0,069
	ALPSMF045064240-01B1__F	-0,297	0,075
GCP_02	ALPSMB045064350-01B1__B	-0,124	0,108
	ALPSMF045064235-01B1__F	0,198	-0,011
GCP_03	ALPSMB045064350-01B1__B	0,108	-0,048
	ALPSMF045064235-01B1__F	-0,618	0,116
GCP_08	ALPSMB045064350-01B1__B	-0,047	-0,048
	ALPSMF045064235-01B1__F	0,397	0,072
GCP_09	ALPSMB045064350-01B1__B	0,004	0,031
	ALPSMB045064355-01B1__B	0,066	0,112
	ALPSMF045064235-01B1__F	0,046	-0,107
	ALPSMF045064240-01B1__F	-0,268	0,118
GCP_10	ALPSMB045064355-01B1__B	-0,059	0,223
	ALPSMF045064240-01B1__F	0,090	-0,156
GCP_11	ALPSMB045064355-01B1__B	-0,244	-0,099
	ALPSMB045064360-01B1__B	-0,105	-0,001
	ALPSMF045064245-01B1__F	0,203	-0,024
GCP_12	ALPSMB045064360-01B1__B	0,444	0,158
	ALPSMF045064245-01B1__F	-0,362	-0,058
GCP_13	ALPSMB045064355-01B1__B	0,091	-0,399
	ALPSMB045064360-01B1__B	-0,019	-0,302
	ALPSMF045064245-01B1__F	-0,191	0,403
GCP_14	ALPSMB045064360-01B1__B	-0,317	0,144
	ALPSMF045064245-01B1__F	0,348	-0,321
GCP_15	ALPSMB045064355-01B1__B	0,697	0,255
	ALPSMF045064240-01B1__F	-0,331	-0,117
GCP_16	ALPSMB045064355-01B1__B	-0,638	-0,097
	ALPSMF045064240-01B1__F	0,804	0,081
Среднеквадратическое значение (RMSE) = 0,364 пикселя			

Таблица 4

Сводный протокол о невязках

RMS x, м	1,172
RMS y, м	2,299
RMS z, м	3,425
Среднеквадратическое значение (RMSE), м	4,288

Шесть снимков были собраны в блок для уравновешивания. Определение положения наземных опорных точек на космических снимках осуществлялось по предоставленным схемам их привязки и фотографиям окружающей местности. Отчет о фототриангуляции приведен в табл. 3 и 4. Модель фототриангуляции позволяет рассчитывать параметры внешнего ориентирования каждого снимка с возможностью из-



Рис. 7.
Расположение наземной опорной точки
№ 15 на снимке с КА ALOS/PRISM

мерения координат X, Y, Z с помощью плавающего курсора.

Для измерения линий перегиба рельефа и высотных точек использовался специальный модуль SOCET SET. Линия перегиба фиксировалась везде, где наблюдалось изменение уклона земной поверхности. Высотное положение точек хорошо определялось на вершинах холмов, а на плоских участках поверхности для точной интерполяции форм рельефа информации было недостаточно. Первоначальная оценка показала, что снимки с КА ALOS/PRISM пригодны для построения горизонталей с сечением 10 м (± 5 м). Поэтому плотность фиксации линий перегиба, а также высот отдельных точек проводилась с частотой, необходимой для построения горизонталей с сечением 10 м. Многие линии перегибов имеют форму контуров, которые располагаются на возвышениях или совпадают с направлением изменения уклона (рис. 8).

После создания первоначальной ЦМР с шагом 10 м и ее проверки по наземным опорным точкам, а также после сравнения высот опорных точек, полученных в результате геодезической съемки и измеренных фотограмметрическим способом, было установлено, что стереомодели могут обладать достаточной точностью для отображения рельефа горизонталями с сечением 5 м (точность по высоте $\pm 2,5$ м). Для этого потребовались дополнительные измерения высот по линиям перегиба и отдельным точкам рельефа.

Высоты по линиям перегиба и отдельным точкам рельефа экспортировались в AutoCAD в формате DXF как цифровая модель местности (ЦММ), по ним с помощью ГИС-приложения TNTmips методом мини-

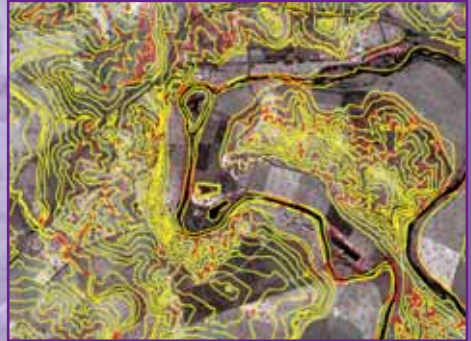


Рис. 8.
Фрагмент результатов стереоскопической рисовки рельефа на ортотрансформированном снимке с КА ALOS/PRISM (линии перегиба, горизонталы и высотные точки)

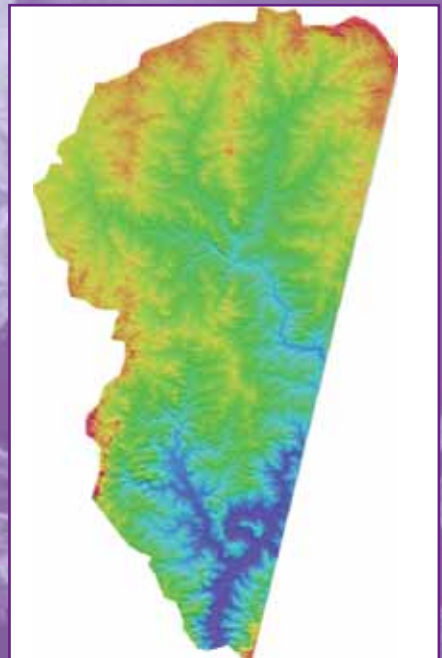


Рис. 9.
Окончательная ЦМР с шагом 10 м

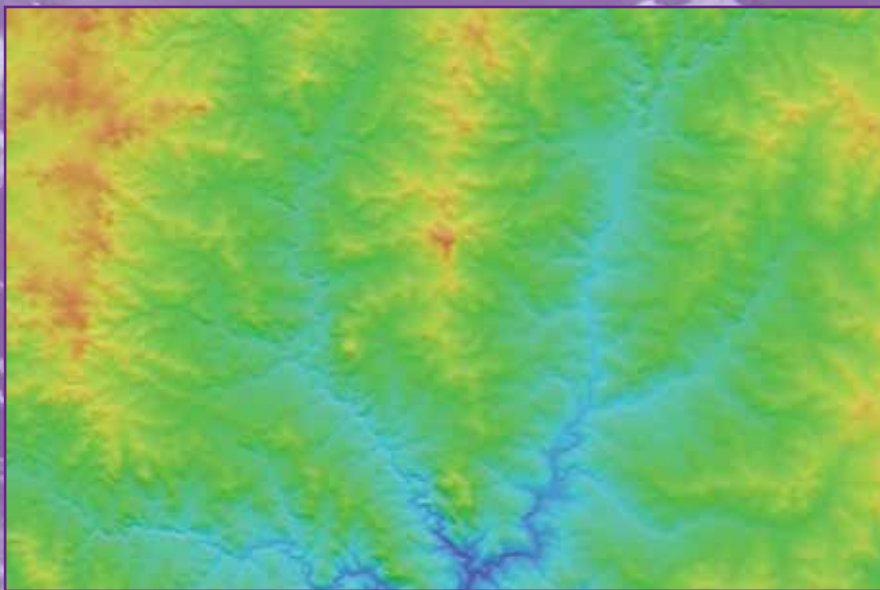


Рис. 10.
Фрагмент ЦМР с шагом 10 м

мальной кривизны строилась ЦМР. Методом проб и ошибок определялись параметры интерполяции, чтобы получить сглаженную поверхность без явных

аномалий, появляющихся в результате использования точек с ошибочными значениями высот, не слишком обобщенную, но сопрягающуюся с высотным положением заданных линий перегиба и отдельных точек рельефа.

Первоначально была построена ЦМР с шагом пикселей 2,5 м. Она подходит для построения горизонталей с сечением рельефа 5 м, поскольку согласно качественной оценке, данная ЦМР имеет аналогичный уровень генерализации, что и карты с сечением рельефа 5 м, опубликованные Департаментом земельных ресурсов штата Новый Южный Уэльс.

Несмотря на то, что ЦМР с шагом 2,5 м подходит для построения горизонталей с сечением рельефа 5 м, было установлено, что этот шаг существенно меньше, чем требуется для правильного отображения рельефа. Был построен ряд ЦМР с шагом 5, 10, 15 и 20 м. Отоб-

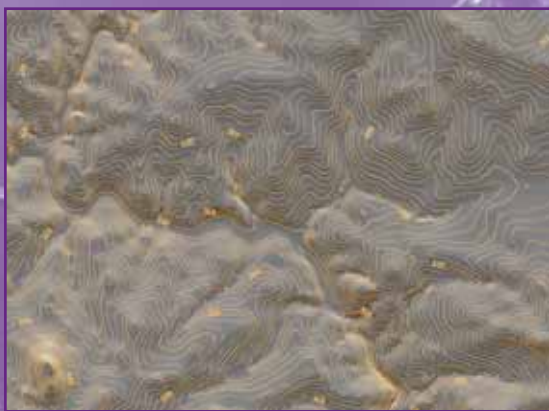


Рис. 11.
Горизонталы с сечением рельефа 5 м

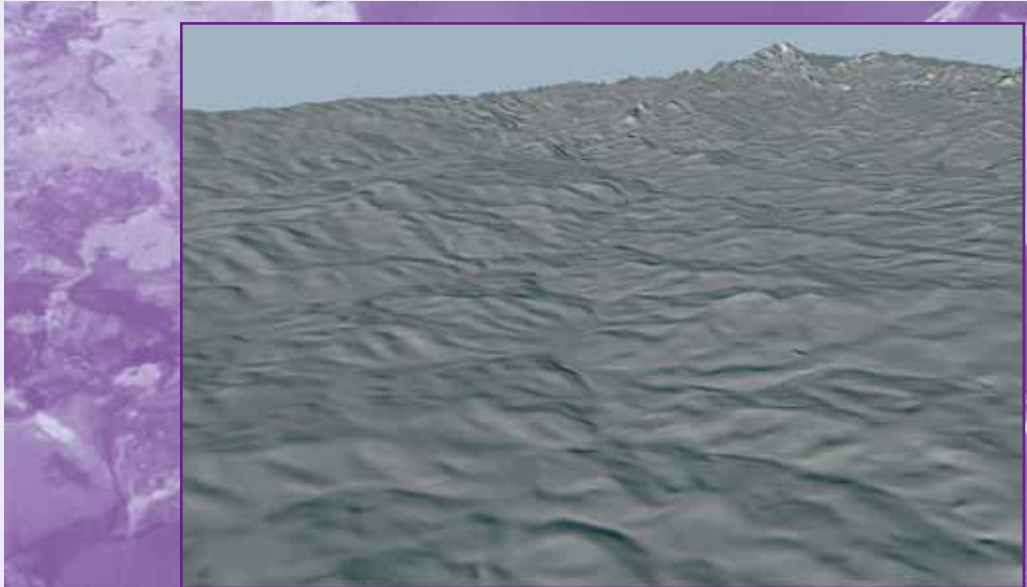


Рис. 12.
Перспективное трехмерное изображение ЦМР

ражение рельефа в виде отмывки на каждой ЦМР оценивалось субъективно для определения соответствия размера пикселей уровню детализации цифровой модели местности, на основе которой она была построена (рис. 9-12).

Оценка точности построенной ЦМР проводилась по отклонениям (DZ_{TIN} и $DZ_{ЦМР}$) между высотами наземных опорных точек, полученными из GPS-измерений (Z_{GPS}), и высотами этих точек, вычисленными по ЦМР с шагом 10 м ($Z_{ЦМР}$) и по сетке TIN (Z_{TIN}). Результаты

оценки по пяти наземным опорным точкам, попавшим в район исследования, приведены в табл. 5.

ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ

Программа TNTmips использовалась для ортотрансформирования снимков, полученных картографической стереокамерой PRISM, по созданной ЦМР. TNTmips позволяет проводить ортотрансформирование любого космического снимка с использованием соответствующей

Таблица 5

Оценка точности построенной ЦМР

№ наземной опорной точки	X, м	Y, м	Z, м	$Z_{ЦМР}$, м	$DZ_{ЦМР}$, м	Z_{TIN} , м	DZ_{TIN} , м
15	616508,7609	6161534,1430	429,2810	426,2307	3,0503	425,9333	3,3477
1	615777,3502	6176674,6090	446,0681	439,9567	6,1114	440,5193	5,5488
16	622681,5175	6155809,7240	458,9979	464,1004	-5,1025	464,7564	-5,7585
2	632975,6749	6183448,2100	466,6729	468,4985	-1,8256	468,1329	-1,4600
9	604752,5797	6180590,6140	506,7633	504,9649	1,7984	505,8243	0,9390
				RMSE	3,57764	3,4108	



Рис. 13.

Ортотрансформированная мозаика снимков с КА ALOS/PRISM

щих коэффициентов RPC. Параметры внешнего ориентирования снимков с КА ALOS/PRISM определялись с помощью их пространственной привязки по наземным опорным точкам. Затем выполнялось ортотрансформирование снимков по ЦМР с шагом 10 м и их монтаж в ортомозаику в программе TNTmips (рис. 13). Далее проводилась субъективная оценка мозаики по наземным опорным точкам, структурным линиям рельефа, данным GPS-измерений и перекрытию снимков. Наблюдаемая погрешность не превышала 2-3 пикселя, которые соответствуют 5-7,5 м.

КОММЕНТАРИИ

Попытки определения внутренней геометрии космических снимков в SOcET SET с помощью обобщенных моделей космической съемки оказались неудачными. После того, как были использованы коэффициенты RPC, определить внутреннюю геометрию снимка не составило труда.

Информация о наземных опорных точках представлялась в очень удобном виде. Схематические планы и фотографии, сделанные на местности, позволили определять положение наземных опорных точек на снимках с высокой точностью. На шесть снимков попали лишь 12 из 16 наземных опорных точек. На каждом снимке присутствовали от 2 до 4 опорных точек, что является минимально необходимым количеством для определения параметров внешнего ориентирования, но недостаточным для составления детального протокола о невязках. Только 5 наземных опорных точек попали в исследуемый район.

Связующие точки между снимками не измерялись. При съемке обширного участка точки привязки могли использоваться для создания расширенной триангуляционной модели, что, в свою очередь, повлияло бы на объем наземной съемки, необходимой при реализации крупных проектов.

Величины невязок модели фототриангуляции показывают, что на основе этих данных нельзя построить горизонталь с сечением рельефа 5 м, которые требуют определения высотных отметок рельефа с точностью порядка 2,5 м. Точность, подтвержденная фототриангуляцией, составила порядка 3,5 м.

Первоначально элементы рельефа снимались с плотностью, необходимой для построения горизонталей с сечением 10 м (± 5 м). После создания ЦМР с шагом 10 м и построения горизонталей, в результате первоначальной обработки, было установлено, что точность фототриангуляции существенно выше, чем требуется для данной задачи. Для повышения плотности точек, линий перегиба и контуров, пригодных для построения горизонталей с сечением рельефа 5 м была применена повторная итерация с использованием стереоизображения, которая показала, что, судя по всему, полученные значения вертикальной точности будут недостаточны для построения горизонталей с сечением рельефа 5 м. Несмотря на это, было очевидно, что можно достичь большей точности, чем требуется для построения горизонталей с сечением 10 м, поэтому представлялось целесообразным определить достижимое значение точности.

Несмотря на то, что в исследуемый район попали только 5 наземных опорных точек, которых недостаточно для достоверной оценки точности, полученные невязки между данными, измеренными спутниковыми приемниками GPS на наземных опорных точках и

данными, полученными по ЦМР и сети TIN, показывают, что погрешность составляет порядка 3,5 м и совпадает с результатами фототриангуляции. Необходимо отметить, что опорные точки не отображались при стереообработке, однако смещения объектов, расположенных рядом с опорными точками, не наблюдались.

Для создания цифровых моделей местности и получения производной информации могут использоваться различные данные. Выбор подходящего метода картографирования земной поверхности зависит, в основном, от уровня точности, требуемого разрешения и площади района. Ниже приводится перечень методов в порядке возрастания стоимости работ:

1. Наземная съемка.
2. Наземное лазерное сканирование.
3. Аэрофотосъемка.
4. Воздушная радиолокационная съемка (интерферометрия).
5. Воздушное лазерное сканирование.
6. Космическая стереосъемка.
7. Космическая радиолокационная съемка (интерферометрия).

Из вышеуказанного списка только аэрофотосъемка, воздушная радиолокационная съемка, воздушное лазерное сканирование и космическая стереосъемка могут применяться для создания ЦМР с шагом от 5 до 25 м.

Было установлено, что для создания ЦМР на базе стереоснимков с КА ALOS/PRISM с точностью от 5 до 10 м требуется приблизительно 200-400 часов на каждую сцену площадью 1600 км² в зависимости от сложности рельефа. При расчете по коммерческим расценкам это приблизительно соответствует затратам от 15 000 до 30 000 дол. на каждую сцену или от 4 до 8 дол. за 1 км².

Затраты на воздушное лазерное сканирование и воздушную радиолокационную съемку составляют порядка 100-150 дол. за 1 км², в зависимости от площади района.

Применение снимков КА ALOS/PRISM экономически выгоднее при съемке небольших районов ввиду того, что с увеличением площади затраты на работы, связанные с созданием наземных опорных точек, увеличиваются в большей пропорции, чем при воздушном лазерном сканировании, воздушной радиолокационной съемке и аэрофотосъемке.

Преимуществом снимков КА ALOS/PRISM также является и то, что затраты на построение ЦМР находятся в пропорциональной зависимости от требуемой точности. Поэтому затраты на построение ЦМР с точностью от 10 до 15 м будут составлять менее половины тех затрат, которые необходимы для создания ЦМР с точностью от 5 до 10 м.

По результатам выполненного проекта можно сделать следующие выводы:

1. Для фотограмметрической обработки с целью создания ЦМР с помощью снимков с КА ALOS/PRISM в SOGET SET необходимо иметь значения коэффициентов RPC.

2. С помощью наземных опорных точек можно точно определить параметры внешнего ориентирования снимков с КА ALOS/PRISM с точностью до субпикселя.

3. При наличии точной блочной модели, созданной в SOGET SET, параллакс между изображениями, полученными картографической стереокамерой PRISM в режимах «вперед» и «назад», достаточен для измерения высот точек с точностью приблизительно 3,5 м (среднеквадратическое значение). Это соответствует пределу теоретической точности, которую можно достичь при небольшом количестве наземных опорных точек и применении данных методов.

4. Из результатов данного проекта непонятно, насколько дополнительные наземные опорные точки и увеличение блока космических снимков может повысить точность.

5. Точность ЦМР и построения горизонталей зависит от плотности измерения высот отдельных точек и элементов рельефа, сложности рельефа вплоть до теоретического предела 3,5 м (среднеквадратичное значение).

6. Снимки с КА ALOS/PRISM можно ортотрансформировать для создания высококачественных панхроматических изображений с точностью приблизительно до 2 пикселей.

7. Применение изображений с КА ALOS/PRISM экономически выгодно при создании ЦМР и построения горизонталей с вертикальной точностью от 5 до 10 м.

8. Преимуществом изображений с КА ALOS/PRISM также является возможность создания трехмерных моделей с точностью, обеспечивающей создание картографических материалов в масштабе 1:25 000. Нанесение линий водоразделов позволяет согласовать ЦМР с гидрографической сетью.