

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ КА «РЕСУРС-П»

А.Э. Зубарев
АО «РАКУРС»

Введение

Среди задач, решаемых с использованием данных с космического аппарата (КА) «Ресурс-П», особое место занимает построение цифровой модели поверхности (ЦМП) на территориях поселений (городских агломераций). В работе описана методика автоматической стереообработки данных ДЗЗ с использованием опорных точек, полученных в результате обработки аэрофотосъемки (АФС) камерой VisionMap А3, оценены характерные погрешности (ошибки) при реализации методики. Выполнено сравнение ЦМП, полученной по космическим изображениям КА «Ресурс-П» (размер пикселя на местности лучше 1.0 м в надире) с опорной (эталонной) ЦМП высокого разрешения (размер пикселя на местности 6 см).

Космический аппарат (КА) «Ресурс-П» позволяет производить съемку со значительными углами конвергенции. В некоторых случаях эти углы достигают 90.5 градусов. Возможность автоматической стереообработки данных ДЗЗ, полученных в разные моменты съемки, значительно повышает конкурентное преимущество данных, полученных с КА «Ресурс-П» при выборе исходной информации для построения ЦМП.

Описание экспериментальных исследований

Для оценки качества автоматической стереообработки блока снимков КА «Ресурс-П» Госкорпорация «Роскосмос» пре-

доставил две стереопары, полученные с разницей в 17 дней, 21.08.2017 и 06.09.2017, с углами конвергенции 58 и 65 градусов соответственно. Здесь уместно сделать два замечания: съемка для обеих стереопар проводилась при схожей высоте солнца, а именно с 10:48 - 10:53, интервал между съемками обеспечил сохранение стабильной ситуационной обстановки на местности (не должны были происходить значительные изменения местности, способные повлиять на точность ЦМП).

При исследовании помимо основных пар снимков, были составлены межвитковые пары с углами конвергенции 11, 12, 61 и 63 градуса. Таким образом в обработке участвовали 6 стереопар, составленные из 4 снимков. Средний размер пикселя на местности составил 73 см. Для уравнивания блока снимков были использованы 4 опорные точки, полученные по эталонной ЦМП с размером пикселя на местности 6 см в результате обработки аэрофотосъемки (АФС) камерой VisionMap А3 со средним размером пикселя на местности 5.9 см. Точки выбраны на характерных контурах (крышах зданий или хорошо различимых объектах (Рисунок 1).

Далее в тексте под эталонной ЦМП будем понимать ЦМП, построенную в результате обработки АФС камерой VisionMap А3. Элементы внешнего ориентирования (ЭВО) снимков VisionMap А3 были представлены точные и не требовали дополнительного уравнивания. Поэтому в цифровой фотограмметрической системе (ЦФС) PHOTOMOD был выполнен только импорт точных ЭВО и выполнено прямое геопози-



Рисунок 1 – Расположение опорных точек на блоке снимков КА «Ресурс-П»

ционирование, что позволило сформировать стереопары снимков для дальнейшей обработки. Далее по всем стереопарам снимков было выполнено построение эталонной ЦМП с размером пикселя на местности 6 см.

В результате полуавтоматической обработки (измерение опорных точек произведено оператором) на ЦФС PHOTOMOD блока изображений КА «Ресурс-П» были получены расхождения на опорных и связующих точках (Рисунок 2).

Ошибки		Ошибки	
СКО	Ср. модуль	СКО	Ср. модуль
Eх(пикс.), Eу(пикс.), Eху(пикс.), Eху(м)		Eх(пикс.), Eу(пикс.), Eху(пикс.), Eху(м)	
Опорные точки		Опорные точки	
0.414, 0.395, 0.572, 0.418		0.751, 0.812, 0.812, 0.562	
Контрольные точки		Контрольные точки	
0.000, 0.000, 0.000, 0.000		0.000, 0.000, 0.000, 0.000	
Связующие точки		Связующие точки	
0.449, 0.384, 0.591, 0.434		1.108, 0.936, 1.130, 0.836	
Точки сгущения		Точки сгущения	
0.000, 0.000, 0.000, 0.000		0.000, 0.000, 0.000, 0.000	
-----		-----	
EХ(м), EУ(м), EZ(м), EХУ(м)		EХ(м), EУ(м), EZ(м), EХУ(м)	
Опорные точки		Опорные точки	
0.156, 0.152, 0.295, 0.218		0.28, 0.239, 0.472, 0.329	
Контрольные точки		Контрольные точки	
0, 0, 0, 0		0, 0, 0, 0	
Связующие точки		Связующие точки	
между стереопарами		между стереопарами	
0.489, 0.503, 0.861, 0.683		0.983, 1.14, 1.77, 1.18	
от уравниваемого положения		от уравниваемого положения	
0.26, 0.264, 0.457, 0.354		0.493, 0.595, 0.912, 0.605	
Точки сгущения		Точки сгущения	
между стереопарами		между стереопарами	
0, 0, 0, 0		0, 0, 0, 0	
от уравниваемого положения		от уравниваемого положения	
0, 0, 0, 0		0, 0, 0, 0	

Рисунок 2 – Оценка точности в результате уравнивания блока снимков «Ресурс-П» (приведены краткие отчеты об ошибках блока после уравнивания: слева средние квадратические ошибки, справа максимальные)

На основе отчета по обработке блока изображений можно сделать вывод, что остаточные расхождения на опорных и связующих точках не превосходят допустимых: допустимая ошибка определения координат связующих точек на снимках не должна превышать 1.5 пикселя (в данном случае максимальная ошибка 1.13 пикселя), отклонение исходных координат опорных точек от уравненного положения не должно превышать 1.0 пикселя на местности (в нашем случае 1 пиксель составляет 73 см, а максимальная ошибка составляет 33 см в плане и 47 см по высоте).

Расхождения уравненных значений координат связующих точек при решении засечек между стереопарами позволяют ожидать точности окончательной ЦМП со средней квадратической ошибкой (СКО) не хуже 2-3 метрового диапазона. Для этого рассмотрим составляющие результирующей ошибки по высоте ЦМП и получим предельную ошибку измерения по высоте отдельного пикселя:

$$\sigma_{рез}^2 = \sigma_{уравнивания}^2 + \sigma_{измерения}^2$$

$$\sigma_{измерения}^2 = \frac{\sigma_{ху}^2}{\left(2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}$$

$$\sigma_{рез1}^2 = 0.86_M^2 + \frac{0.73_M^2}{\left(2 \cdot \tan(30^\circ)\right)^2} = 1.13_M^2$$

$$\sigma_{рез2}^2 = 0.86_M^2 + \frac{0.73_M^2}{\left(2 \cdot \tan(5^\circ)\right)^2} = 4.26_M^2$$

$$f_{пред1} = 2.5 \cdot \sigma_{рез} = 2.5 \cdot 1.13_M = 2.8_M$$

$$f_{пред2} = 2.5 \cdot \sigma_{рез} = 2.5 \cdot 4.26_M = 11.0_M$$

где $\sigma_{рез}$ – суммарная СКО по высоте, $\sigma_{уравнивания}$ – СКО по высоте, характеризующая точность ориентирования стереомоделей, оцененную в результате уравнивания на основе расхождений измеренных связующих и опорных точек, $\sigma_{измерения}$ – СКО по высоте единичного измерения в стереопаре, соответствующее ошибке в 1 пиксель на снимке, $f_{пред}$ – суммарная предельная (максимальная) ошибка по высоте, α – средний для стереопары угол засечки (конвергенции).

Для получения максимальной точности окончательной ЦМП в обработке участвовали все стереопары одновременно. Все 6 стереопар имели общее перекрытие, что позволило выполнить статистическую отбраковку грубых ошибок.

Оценка качества полученной ЦМП произведена в разделе «Анализ результатов экспериментальных исследований» визуально (пункты 1-4) и по разностной матрице (матрица отклонений от эталона, пункты 5-6) (Рисунок 3).

Визуальная оценка, проведенная на основе Рисунка 3.в позволяет выявить характерные рассогласования результатов обработки стереопар КА «Ресурс-П» и эталона. Обратим внимание на область 1 на рисунке 3в, в которой выделяется фигура правильной формы, так же заметны множественные области подчеркивающие границы строений и «пятна», которые можно классифицировать как отдельные деревья или их группы.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Рассмотрим основные характерные рассогласования:

- 1) имеются пустоты в той части города, где преобладает высотное строительство, что вызвано геометрией съемки (при значительных углах отклонения от надира высотные здания закрывают значительную область снимка и образуют невидимые зоны, именно эти зоны составляют пустоты);
- 2) пустоты в северо-западной части ЦМП связаны с облачностью на одной из стереопар;
- 3) низкоэтажные объекты (до 5 метров по высоте) «сливаются» с соседними зданиями, что в большей степени объясняется разрешающей способностью данных;
- 4) улицы и мелкие дороги шириной порядка 3-4 метров в плотно застроенной территории не различимы в основном из-за геометрии съемки (при углах отклонения от надира порядка 30 градусов все линейные объекты (узкие улицы) закрываются соседними зданиями).

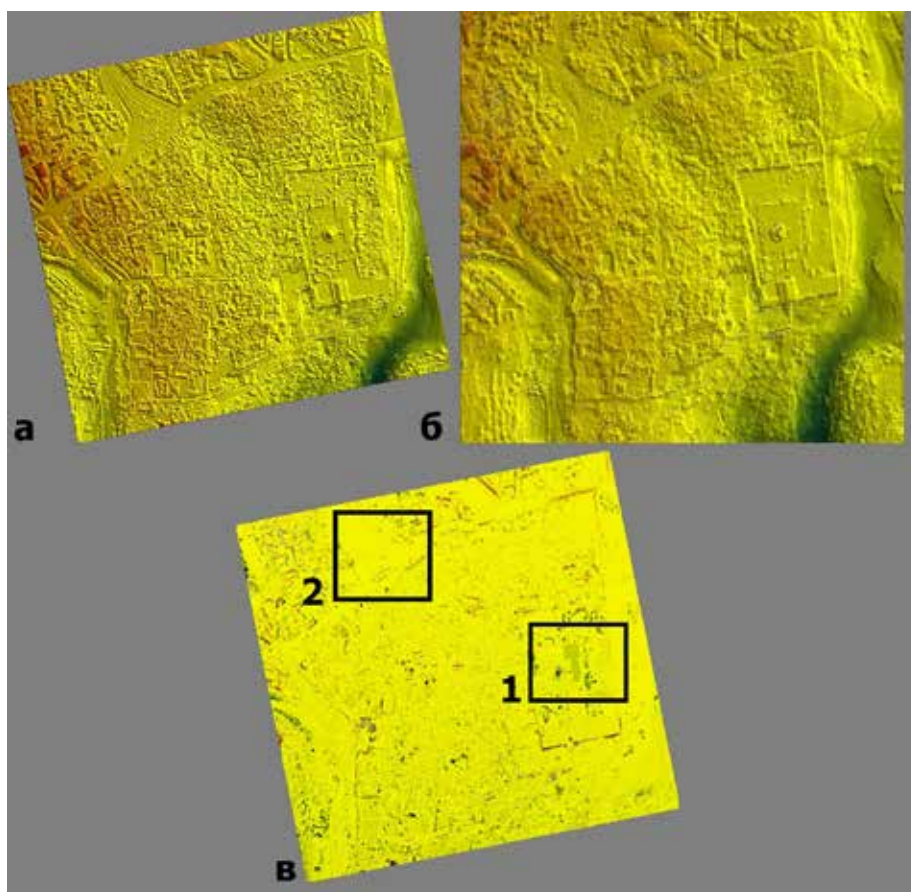


Рисунок 3 – Результат обработки стереопар Ресурс-П и матрица разностей высот.
 а) ЦМП, полученная в результате обработки 6 стереопар Ресурс-П
 б) опорная ЦМП, в) матрица отклонений от эталона (б)-(а)



Рисунок 4 – Наличие облачности на снимках.

Это хорошо видно на Рисунке 5: фактически поверхность земли вдоль улицы различима на одном снимке, а на втором видны только стены домов.

5) на разностной матрице (Рисунок 3.в. область 1) характерное заметное пятно правильной формы в восточной части объясняется новым строением, возведенным в промежутке времени, прошедшем после АФС и до начала съемки «Ресурс-П».

б) так же можно обратить внимание на отдельные группы регулярных структур окрашенных в зеленый цвет (Рисунок 3.в. область 2). Это посадки деревьев, которые в результате генерализации не имеют четких очертаний в ЦМП (по данным КА «Ресурс-П»).

На Рисунке 6 можно заметить, что распределение гистограммы носит в основном случайный характер, и не содержит систематических ошибок, вызванных горизон-

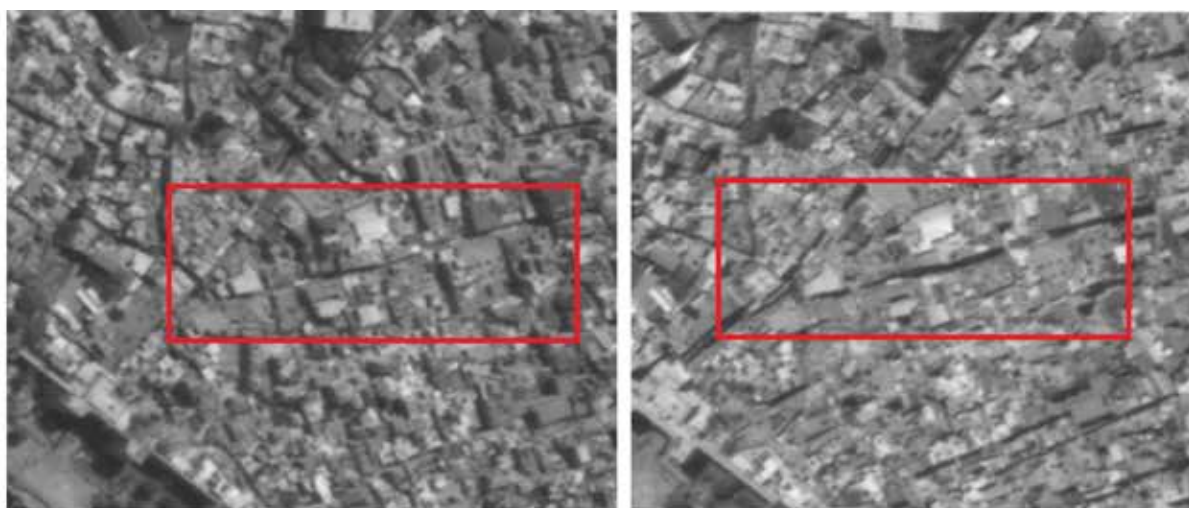


Рисунок 6 – Пример изображения улицы на разных снимках стереопары

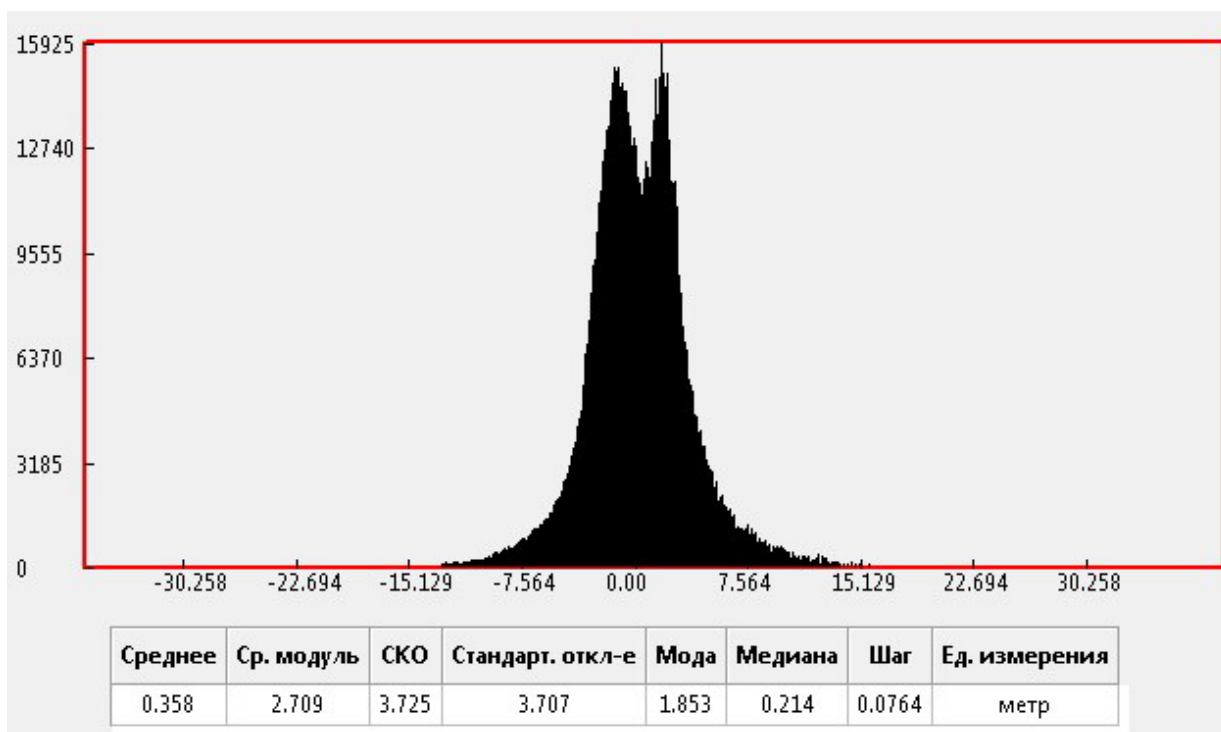


Рисунок 6 – Пример изображения улицы на разных снимках стереопары

тальным или вертикальным смещением построенной ЦМП от опорной. Плановые систематические ошибки (смещения) были компенсированы за счет уравнивания с учетом опорных точек. Среднее значение разности составляет всего 0.3 метра, что также подтверждает отсутствие систематического смещения по высоте для всей модели в це-

лом. Наличие двух пиков в области +2.5 м и -2.5 м, можно интерпретировать как области около небольших зданий (до 5 метров) и узких улиц шириной до 3-5 метров.

На Рисунке 7 представлен профиль отклонений высот ЦМП (Ресурс-П) от опорной ЦМП вдоль линии длиной порядка 600 м. Вдоль всего профиля можно заме-

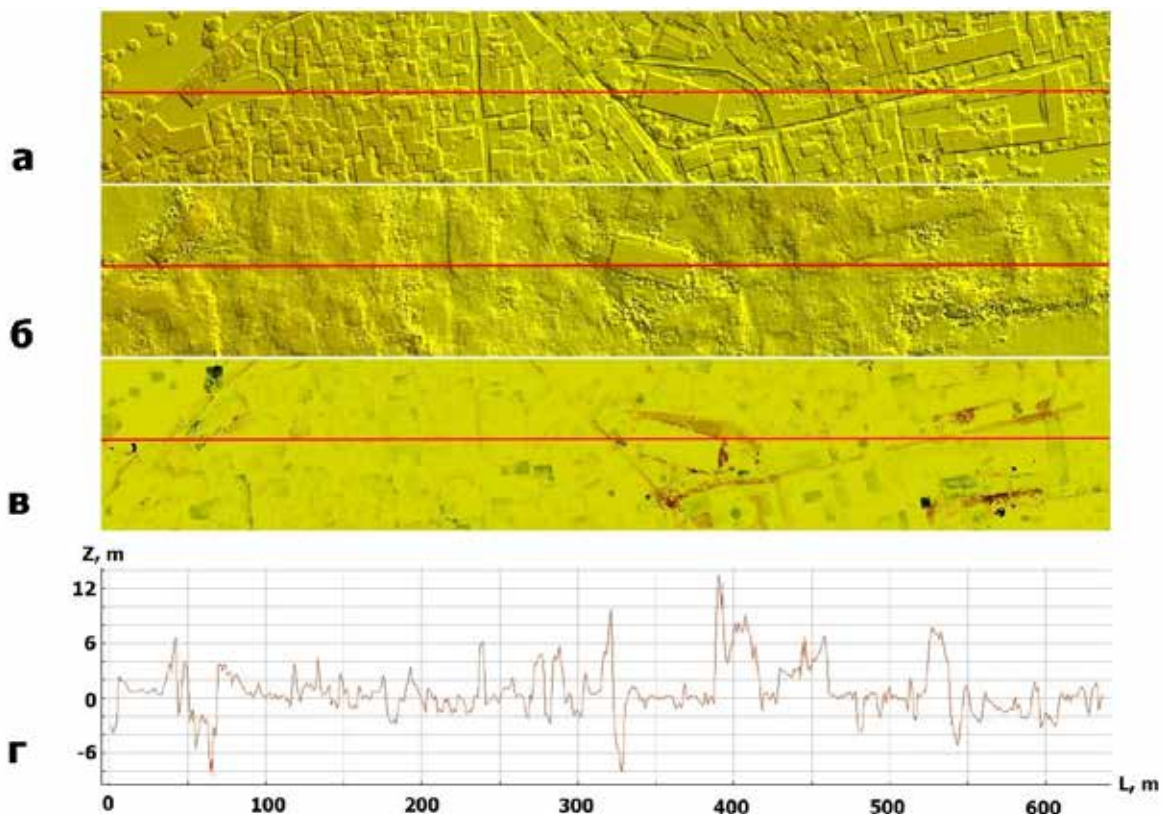


Рисунок 7 – Сравнение ЦМП
 а) эталонная ЦМП; б) ЦМП (Ресурс-П); в) разница (б)-(а);
 г) вертикальный профиль вдоль линии, построенный на основе (в)

тить следующую тенденцию: если мы видим широкий объект, например, дом или открытая местность, то отклонения близки к 0 ближе к центру объекта и нарастают к краю. Однако, если встречаются дороги или границы перехода между крышей и землей, то мы видим значительные отклонения порядка 3-5 метров (что соответствует высоте характерного объекта). При этом все контуры объектов различимы, однако, из-за естественной генерализации более чем в 12 раз (6 см против 74 см) границы объектов расширяются и, соответственно, точность снижается.

Выводы

В работе проведен анализ возможности стереообработки данных КА «Ресурс-П» в области плотной городской застройки. В результате обработки получена ЦМП с разрешением 0.75 м и СКО по высоте 3.7 м. Сравнительный анализ полученной ЦМП с эталонной ЦМП показывает хорошую согласованность данных (с СКО на уровне 3-4 метров), что может говорить о хорошей внутренней геометрии сенсора и высокой точности внешней привязки по опорным данным. ЦМП с аналогичными характе-

ристиками могут быть использованы для получения топографических планов вплоть до масштаба 1:10000, в также с целью получения рельефа местности в труднодоступных и горных районах с сечением рельефа порядка 10-15 м.

В дальнейшем планируется провести исследование точности ЦМП, построенной по данным КА «Ресурс-П» в области от-

крытой местности, для практически полного исключения антропогенных объектов и высокой растительности из результатов обработки. При таких условиях можно ожидать получения высокоточных моделей с СКО по высоте порядка 1.5 м и меньше, что позволит расширить область применения данных КА «Ресурс-П» в хозяйственной деятельности. ■