Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»

(СГУГиТ)

С. А. Арбузов

# ЦИФРОВАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве учебно-методического пособия для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование (уровень бакалавриата)

> Новосибирск СГУГиТ 2025

УДК 528.7:004 A795

Рецензенты: доктор технических наук, доцент, СГУГиТ А. В. Комиссаров

кандидат географических наук, директор ЗСО ИЛ им. В. Н. Сукачева СО РАН Д. С. Дубовик

#### Арбузов, С. А.

А795 Цифровая фотограмметрия : учебно-методическое пособие / С. А. Арбузов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2025. – 81 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907998-10-0

Учебно-методическое пособие подготовлено кандидатом технических наук, доцентом С. А. Арбузовым на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ.

Пособие содержит конспект лекций в кратком изложении и методические указания к выполнению лабораторных работ.

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Цифровая фотограмметрия» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование, профиль подготовки «Дистанционное зондирование природных ресурсов» (уровень бакалавриата).

Рекомендовано к изданию кафедрой фотограмметрии и дистанционного зондирования, Ученым советом Института геодезии и менеджмента СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 527.7:004

ISBN 978-5-907998-10-0

© СГУГиТ, 2025

## оглавление

Введение	5
1. Цифровое изображение	6
1.1. Способы получения цифрового изображения	6
1.2. Форматы записи многоканальных данных	9
1.3. Съемочные системы	11
2. Трансформирование и ортотрансформирование снимков	14
2.1. Цифровое трансформирование кадровых снимков	14
2.2. Цифровое ортотрансформирование снимков	18
2.3. Трансформирование космических снимков	19
2.4. Трансформирование космических снимков с использованием RPC	22
2.4.1. Состав комплекта поставки космических снимков	24
3. Автоматизация поиска соответственных точек	26
3.1. Детекторы и дескрипторы	26
3.2. Метод идентификации соответственных точек SIFT	28
3.3. Построение плотных цифровых моделей поверхности	31
4. Алгоритмы слияния изображений. Pansharpening	34
5. Практический курс	40
5.1. Лабораторная работа № 1. Трансформирование космических снимков	40
5.2. Лабораторная работа № 2. Использование автоматизированных методов поиска соответственных точек	42
5.3. Лабораторная работа № 3. Построение ЦМР по стереопаре космических снимков	50
5.4. Лабораторная работа № 4. Ортотрансформирование космических снимков	61
5.5. Лабораторная работа № 5. PanSharpening	65

Заключение	. 72
Библиографический список	.73
Приложение 1. Содержание файла RPC	.76
Приложение 2. Содержание файла TIL	. 79
Приложение 3. Оценка точности	. 80

## ВВЕДЕНИЕ

С изобретением цифровой фотографии в середине XX в. возникли предпосылки для появления и развития цифровой фотограмметрии. Первые цифровые фотограмметрические системы были разработаны в 80-х гг. прошлого века, они пришли на смену аналитическим фотограмметрическим приборам, переняв математический аппарат аналитической фотограмметрии, лежащий в их основе.

Возможности цифровой фотограмметрии в настоящее время в значительной мере расширились благодаря использованию новых алгоритмов автоматизированной обработки и увеличению производительности компьютерных вычислительных систем.

В теоретической части настоящего учебно-методического пособия кратко изложены основы получения цифрового изображения, основные методы трансформирования цифровых снимков, полученных сканерными и кадровыми съемочными системами. Рассмотрены современные методы автоматизации поиска точек на цифровых снимках, методы слияния разномасштабных мультиспектральных и панхроматических изображений. Практическая часть состоит из методических указаний к лабораторным работам в современных программных продуктах, в которых применяются методы, рассмотренные в теоретической части.

Учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину «Цифровая фотограмметрия», а также для широкого круга бакалавров и магистрантов, занимающихся обработкой данных дистанционного зондирования.

5

## 1. ЦИФРОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

#### 1.1. Способы получения цифрового изображения

Растровое цифровое изображение представляет собой двумерную матрицу, элементами которой являются значения яркости. За начало системы координат цифрового изображения принимается пиксель, расположенный в верхнем левом углу изображения. Цифровое изображение реального объекта окружающего мира может быть получено путем сканирования аналогового снимка или непосредственно путем съемки цифровой камерой.

В цифровых съемочных системах для регистрации изображения используются электронные светочувствительные датчики – приборы с зарядовой связью (ПЗС) или КМОП (англ. CMOS) – комплементарная структура «металл – оксид – полупроводник». В современных бытовых цифровых камерах применяются КМОП-датчики, связано это с меньшим энергопотреблением и дешевизной КМОП-матриц по сравнению с ПЗС. Считается, что ПЗС имеет большую надежность, более низкий уровень теплового шума, большую светочувствительность поэтому в аэро- и космических съемочных системах до недавнего времени часто использовались матрицы именно этого типа [1–4]. В настоящее время благодаря развитию технологии КМОП такие матрицы начинают вытеснять ПЗС в профессиональном аэросъемочном оборудовании [5].

Коротко рассмотрим устройство прибора с зарядовой связью на примере так называемой полнокадровой ПЗС-матрицы (с устройством работы других типов матриц можно ознакомиться в [6]).

ПЗС состоит из кремниевых детекторов, в которых под действием фотонов света возникают и накапливаются электроны. Электрический заряд, накопленный на светочувствительном элементе, прямо пропорционален энергии падающего на него света. Между рядами светочувствительных элементов расположены электроды переноса, при синхронной подаче потенциала на которые происходит перетекание зарядов (зарядовая связь) к так называемому последовательному регистру сдвига. Последовательный регистр сдвига – это устройство, подключенное к последней строке матрицы, представляющее собой строку ПЗС-элементов, заряды которой считываются поочередно (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема работы ПЗС

Электроды переноса занимают значительную часть сенсора [7, 8], поэтому для увеличения эффективной площади фотоприемника каждый датчик матрицы может быть покрыт микролинзой (рис. 2).

		0				0	
	0		0		0		۰
		0		0		0	
	0				0		
0	0	0		0	0	0	
	0		0	0	0		

Рис. 2. Увеличенный фрагмент светочувствительной матрицы

На выходе последовательного регистра сдвига при считывании зарядов ПЗС формируется аналоговый электрический сигнал. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой формат в съемочных системах используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), при этом он может являться частью матрицы или реализован как отдельная микросхема. Аналоговый сигнал представляет собой непрерывную функцию изменения интенсивности по времени. При переводе в цифровую форму сигнал, по временной шкале, с определенной частотой делится на дискретные значения. Этот процесс называется дискретизацией аналогового сигнала [9–13]. Процесс дискретизации схематически представлен на рис. 3.



Рис. 3. Дискретизация

Выбор частоты дискретизации зависит от максимальной частоты сигнала. Согласно теореме Котельникова, исходный сигнал может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой большей, чем удвоенная предельная частота спектра:

$$\omega_{\text{дискр}} \ge 2 \cdot \omega_{\text{пред}},$$
 (1)

где  $\omega_{\text{пред}}$  – предельная частота спектра.

Вместе с дискретизацией при преобразовании аналогового сигнала в цифровой выполняется квантование [9–13] – это разбиение исходного диапазона на заданное число интервалов (рис. 4).



Рис. 4. Квантование

Результат применения квантования и дискретизации к исходному аналоговому сигналу представлен на рис. 5.



Рис. 5. Результат квантования и дискретизации исходной функции

## 1.2. Форматы записи многоканальных данных

Съемка современными системами дистанционного зондирования Земли как аэро-, так и космического базирования обычно выполняется в нескольких зонах электромагнитного спектра. При этом для каждого диапазона используется свой набор датчиков (сгруппированных в линейку или матрицу). Данные, полученные с разных сенсоров, должны быть соответствующим образом организованны для обеспечения их просмотра и обработки в программных продуктах.

В дистанционном зондировании применяют следующие три основных способа организации данных в многоканальных изображениях: BIP (Band Interleaved by Pixel), BIL (Band Interleaved by Line), BSQ (Band Sequential).

Формат BIP основан на попиксельной записи информации, при которой пиксели с одинаковым порядковым номером, но относящиеся к разным спектральным каналам съемки, записываются подряд. Последовательность записи данных в формате BIP показана на рис. 6.

	Пиксел(1,1)				Пиксел(1,n)			
Строка 1								
	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п	 Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п
Строка 2	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п	 Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п
Строка п	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п	 Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал п

Рис. 6. Последовательность записи данных в формате BIP

Формат ВІР непригоден для большинства практических задач с большим объемом данных. Использование формата ВІР не позволяет быстро отсортировать данные, относящиеся к определенному спектральному диапазону, для которого формируется изображение.

В формате BIL строки, соответствующие разным каналам съемки, но имеющие один и тот же порядковый номер, записываются последовательно. Этот формат обеспечивает компромисс между производительностью в пространственной и спектральной обработке. Пример размещения данных в формате BIL показан на рис. 7.



Рис. 7. Последовательность записи данных в формате BIL

В формате BSQ сначала записываются все данные для первого канала, затем для второго, третьего и т. д. (рис. 8).



Рис. 8. Последовательность записи данных в формате BSQ

Формат BSQ широко применяется на практике, поскольку способ размещения данных ближе всего отвечает задачам их просмотра и анализа. Главным недостатком формата BSQ является то, что если необходимо выполнить обработку не всего снимка, а лишь его части, то в любом случае необходимо считывать весь набор данных.

Выбор оптимального формата зависит от условий поставленных задач. Если изучается вся сцена во всех спектральных диапазонах съемки, удобнее использовать форматы BSQ и BIL. Если анализируется небольшой участок с известным местоположением, то в этой ситуации лучше использовать формат BIP, поскольку для этого участка известны значения яркостей во всех спектральных диапазонах [14].

#### 1.3. Съемочные системы

Космические съемочные системы. В настоящее время орбитальная группировка спутников состоит из большого количества аппаратов, принадлежащих различным странам. Эти съемочные системы различаются по способу формирования изображения, пространственному и радиометрическому разрешению, периодичности съемки одного и того же участка местности и другим параметрам. Подробнее с современными космическими системами можно ознакомиться в [15, 16].

Аэросъемочные системы. Независимо от технологии реализации сенсора (ПЗС или КМОП), цифровые фотограмметрические камеры по способу формирования кадра делятся на системы, использующие матричные датчики, и оптоэлектронные сканеры с линейками светочувствительных элементов. Принцип работы камер на основе матричного сенсора, расположенного в фокальной плоскости, такой же, как и у пленочных аэрофотоаппаратов (кадр строится в единый момент времени, аэрофотосъемочный маршрут строится из перекрывающихся кадров). На рис. 9 показана схема получения снимка кадровой съемочной системой.



Рис. 9. Формирование кадра кадровой съемочной системой

КМОП-матрицы современных аэросъемочных камер достигают разрешения 25 728 × 14 592 (DMC III) [5]; сопоставимое или большее разрешение можно получить, увеличивая число матриц. Например, система UltraCam Eagle 4.1 [17] выполняет съемку четырьмя камерами с интервалом 1 миллисекунда из единого центра фотографирования, формируя таким образом на 9 КМОП-матриц снимок с разрешением 28 110 × 18 060.

С характеристиками современных кадровых аэросъемочных камер можно ознакомиться в [18].

Примером сканерных камер являются зарубежные модели Leica Geosystems ADS 80, ADS 100, а также российские камеры ЦТК-140

и ЦМК-70 [18]. Построение изображения этими камерами принципиально отличается от кадровых систем и аналогично процессу космической сканерной съемки. При съемке сканерной съемочной системой изображение земной поверхности фокусируется на линейку светочувствительных элементов, расположенную в фокальной плоскости объектива. Линейка ориентирована поперек направления движения носителя. Из последовательных строк формируется кадр (снимок). Ширина снимка соответствует размеру линейки ПЗС, а длина зависит от количества строк, зафиксированных в процессе съемочного сеанса (рис. 10).



Рис. 10. Формирование сканерного снимка

Основное отличие сканерных снимков от кадровых – это отсутствие единого центра фотографирования и различие элементов внешнего ориентирования для каждой строки снимка.

Для получения элементов внешнего ориентирования каждой строки при выполнении аэросъемки, используются системы ГНСС и IMU (Inertial Measurement Unit).

## 2. ТРАНСФОРМИРОВАНИЕ И ОРТОТРАНСФОРМИРОВАНИЕ СНИМКОВ

#### 2.1. Цифровое трансформирование кадровых снимков

При трансформировании выполняется преобразование снимка в заданную проекцию (центральную, ортогональную, картографическую); трансформированные снимки используются для построения фотопланов.

При трансформировании в том числе выполняется исправление искажений координат точек снимка, обусловленных влиянием угла наклона. Смещения точек снимка вызваны изменениями масштаба наклонного снимка, который совпадает с горизонтальным на линии нулевых искажений. Вычислить величину смещения точек снимка, вызванную его наклоном, можно по формуле

$$\delta r = -\frac{r^2 \sin\varphi \sin\alpha_0}{f - r \cdot \sin\varphi \sin\alpha_0},\tag{2}$$

где  $\phi$  – угол между линией нулевых искажений и радиус-вектором;

α<sub>0</sub> – угол наклона снимка;

*r* – радиус-вектор, расстояние от точки до точки нулевых искажений;

f-фокусное расстояние.

Соответствующие элементы центральной проекции изображены на рис. 11.



Рис. 11. Элементы центральной проекции

Здесь *S* – центр проекции;

о – главная точка снимка;

*p* – картинная плоскость;

*n* – точка надира;

с-точка нулевых искажений;

к – угол поворота снимка;

*vv* – главная вертикаль;

*h*<sub>c</sub>*h*<sub>c</sub> – линия нулевых искажений.

В «докомпьютерную» эпоху трансформирование аналоговых снимков выполнялось на специальных приборах – фототрансформаторах. В настоящее время трансформирование цифровых снимков выполняется в специализированном программном обеспечении.

Цифровое трансформирование снимков заключается в преобразовании координат элементов матрицы исходного цифрового изображения таким образом, чтобы положение элемента в матрице преобразованного изображения соответствовало трансформированным координатам. Трансформирование осуществляется по формулам [19–21]:

$$x^{0} = -f \frac{a_{1}(x - x_{0}) + a_{2}(y - y_{0}) - a_{3}f}{c_{1}(x - x_{0}) + c_{2}(y - y_{0}) - c_{3}f};$$

$$y^{0} = -f \frac{b_{1}(x - x) + b_{2}(y - y_{0}) - b_{3}f}{c_{1}(x - x_{0}) + c_{2}(y - y_{0}) - c_{3}f},$$
(3)

где *f* , *y*<sub>0</sub> , *x*<sub>0</sub>– элементы внутреннего ориентирования снимка;

*с*, *b*, *a* – направляющие косинусы углов  $\alpha$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$ .

После вычисления координат пикселей они округляются до целых значений, и соответствующим элементам  $P_{xy}^{0}$  присваиваются значения яркостей элементов  $P_{xy}$ .

Этот способ трансформирования называют «прямым цифровым трансформированием».

На рис. 12 изображен принцип прямого трансформирования.



Рис. 12. Прямое цифровое трансформирование

При прямом трансформировании возможны пропуски элементов (см. рис. 12), вызванные тем, что рассчитанные координаты элементов округляются до целочисленных значений. Пропуски пикселей возникают также по причине «растягивания» изображения в положительном направлении оси *у* от точки нулевых искажений.

Для заполнения пропущенных элементов трансформированного изображения выполняется интерполяция яркостей (метод ближайшего соседа, билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция). При обратном цифровом трансформировании создается пустой массив для записи трансформированного изображения. Для каждого  $P_{i,j}^0$  элемента массива по нижеприведенным формулам [19–21] выполняется расчет координат элемента исходного нетрансформированного изображения, и элементу трансформированного изображения присваивается яркость элемента с рассчитанными координатами нетрансформированного изображения:

$$x = x_{0} - f \frac{a_{1}x^{0} + b_{1}y^{0} - c_{1}f}{a_{3}x^{0} + b_{3}y^{0} - c_{3}f}$$

$$y = y_{0} - f \frac{b_{1}x^{0} + b_{2}y^{0} - c_{2}f}{a_{3}x^{0} + b_{3}y^{0} - c_{3}f}$$
(4)

Схема выполнения обратного цифрового трансформирования показана на рис. 13.



Рис. 13. Обратное цифровое трансформирование

Из рис. 13. видно, что в случае использования обратного цифрового трансформирования не будет пропущенных элементов, так как выполняется расчет координат на исходном изображении с использованием координат каждого элемента трансформированной матрицы.

#### 2.2. Цифровое ортотрансформирование снимков

Аэроснимок является изображением местности в центральной проекции, а топографический план создается в ортогональной проекции. Изображения в этих проекциях совпадают только в случае, если местность плоская и угол наклона α равен 0. Любые отклонения от плоскости приводят к смещению положения точек вдоль вектора, направленного от точки надира снимка по законам центральной проекции. Смещения точек снимка, вызванные рельефом местности, можно вычислить по формуле

$$\delta r_h = \frac{r \cdot h}{H},\tag{5}$$

где *H* – высота фотографирования;

*г* – радиус-вектор, расстояние от точки до точки надира;

*h* – высота точки местности.

Процесс исправления искажений снимка, вызванных углами наклона снимка и рельефом местности, т. е. приведение снимка в ортогональную проекцию, называется ортотрансформированием.

Для цифрового ортотрансформирования используется информация о рельефе, представленная в виде цифровой модели рельефа (ЦМР).

При обратном цифровом ортотрансформировании для каждого элемента пустого массива будущего ортотрансформированного изображения выполняется вычисление координат точек местности *X*, *Y* по формулам, при этом используется среднее значение *Z* из ЦМР:

$$X = (Z_{s} - Z_{cp}) \frac{x^{0}}{f}$$

$$Y = (Z_{s} - Z_{cp}) \frac{y^{0}}{f}$$
(6)

Затем с использованием высотной отметки элемента матрицы высот (ЦМР) с рассчитанными координатами *X*, *Y* вычисляются новые координаты *X*, *Y*. После завершения вычисления *X*, *Y*, *Z* по формулам (3) вычисляются координаты соответствующего элемента на нетрансформирован-

ном изображении. Значение яркости элемента нетрансформированного изображения присваивается элементу пустого массива ортотрансформированного изображения [21]. Схема цифрового ортотрансформирования представлена на рис. 14.



Рис. 14. Обратное цифровое ортотрансформирование

#### 2.3. Трансформирование космических снимков

При космической съемке в начальный момент времени, соответствующий первой строке изображения, и через определенные интервалы времени на протяжении формирования всего снимка выполняются навигационные и инерциальные измерения; в результате в память съемочной системы записывается набор линейных и угловых элементов внешнего ориентирования. Время формирования строки изображения известно, поэтому элементы внешнего ориентирования рассчитываются с высокой точностью для каждой строки и могут быть использованы при обработке снимков с использованием строгой математической модели связи координат точек местности и сканерного снимка.

Кроме строгого математического способа фотограмметрической обработки космических снимков применяются и параметрические методы (полиномы различных порядков, прямое линейное преобразование, параллельно-перспективная модель), которые используют полиномиальную и другие зависимости для установления связи между плоской системой координат снимка и пространственной системой координат местности. Достоинством этих методов является отсутствие необходимости использования сведений о параметрах съемки и сенсоре. К недостаткам полиномиальных методов можно отнести необходимость измерения координат большого количества опорных точек, расположенных равномерно по снимку.

Для трансформирования сканерных снимков полиномы различного порядка получили весьма широкое распространение. В общем виде полином можно записать следующим образом:

$$x = a_{0} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{i} a_{ij} X^{i-j} Y^{j}$$

$$y = b_{0} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{i} b_{ij} X^{i-j} Y^{j}$$

$$(7)$$

$$i + j \le n,$$

где *х*, *у* – координаты точки на изображении;

Х, *Y* – координаты точки на местности;

 $a_0, a_{ij}, b_0, b_{ij}$  – коэффициенты полиномов;

*n* – степень полинома.

Количество опорных точек должно быть не менее чем (n+1)(n+2)/2.

Рассмотрим алгоритм трансформирования снимков с использованием полиномов на примере *аффинного преобразования*:

$$x = a_0 + a_1 X_{\Gamma} + a_2 Y_{\Gamma}$$

$$y = b_0 + b_1 X_{\Gamma} + b_2 Y_{\Gamma}$$

$$(8)$$

Аффинное преобразование выполняет поворот, масштабирование и сдвиг изображения. Для трансформирования с использованием аффинного преобразования нужны минимум 3 точки, не лежащие на одной прямой. При трансформировании необходимо измерить координаты опорных точек на снимке (в системе координат цифрового изображения). Имея координаты точек в системе координат цифрового изображения и во внешней (геодезической) системе координат, можно вычислить коэффициенты полиномов, после чего при помощи рассчитанных коэффициентов – координаты точек изображения в геодезической системе координат. Кроме аффинного преобразования часто при трансформировании используется полином второй степени:

$$x = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X Y + a_4 X^2 + a_5 Y^2$$
  

$$y = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 X Y + b_4 X^2 + b_5 Y^2$$
(9)

Для определения коэффициентов  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ полинома второй степени необходимо минимум 6 опорных точек, но обычно при трансформировании снимков для обеспечения надежного результата их требуется значительно больше. Полином второй степени вносит в изображение искажения, нарушающие прямолинейность исходных линий, что может быть весьма заметно на снимках городской территории.

Кроме полинома второй степени программные продукты по обработке данных дистанционного зондирования, как правило, позволяют использовать полиномы и более высоких порядков, но использование таких полиномов вносит в геометрию изображения значительные искажения. Кроме того, увеличивается минимальное количество опорных точек, поэтому полиномы выше второй степени реже применяются на практике.

Еще одним методом трансформирования, используемым в программных продуктах, является *прямое линейное преобразование* (DLT – Direct Linear Transformation) [21]

$$x = \frac{A_{1}X + A_{2}Y + A_{3}Z + A_{4}}{C_{1}X + C_{2}Y + C_{3}Z + 1}$$
  

$$y = \frac{B_{1}X + B_{2}Y + B_{3}Z + B_{4}}{C_{1}X + C_{2}Y + C_{3}Z + 1}$$
(10)

где Х, Ү, Z – координаты точки на местности;

 $A_i, B_j, C_k$  – параметры модели.

Для расчета коэффициентов модели DLT необходимо минимум 6 опорных точек, но при трансформировании космических снимков не рекомендуется использовать меньше 10.

## 2.4. Трансформирование космических снимков с использованием RPC

В сентябре 1999 г. был запущен спутник IKONOS, который стал первым коммерческим космическим аппаратом дистанционного зондирования

с пространственным разрешением 1 м. Компания Space Imaging – владелец спутника – для обработки снимков включила в комплект поставки потребителю файл с коэффициентами рациональных полиномов RPC Rational Polynomial Coefficients, что позволило не раскрывать точных параметров системы для применения строгих фотограмметрических формул, а многочисленные исследования показали, что такой подход позволяет получать точности, сопоставимые с применением строгой модели [22].

RPC в настоящее время является стандартным методом фотограмметрической обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения. Рациональные полиномы представляют собой функции вида

$$r_{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} LineNumCoef_{i} \cdot p_{i}(P,L,H)}{\sum_{i=1}^{20} LineDenCoef_{i} \cdot p_{i}(P,L,H)}$$

$$c_{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} SamNumCoef_{i} \cdot p_{i}(P,L,H)}{\sum_{i=1}^{20} SamDenCoef_{i} \cdot p_{i}(P,L,H)}$$

$$(11)$$

где *r<sub>n</sub>*, *c<sub>n</sub>* – нормированные координаты строк и столбцов снимка;

*LineNumCoef* – список 20 коэффициентов для строки (полином числителя); *LineDenCoef* – список 20 коэффициентов для строки (полином знаменателя);

*SamNumCoef* – список 20 коэффициентов для столбца (полином числителя);

SamDenCoef – список 20 коэффициентов для столбца (полином знаменателя).

В модели RPC используются нормализованные координаты

$$P = \frac{(Latitude - LatOff)}{LatScale};$$
(12)

$$L = \frac{(Longitude - LonOff)}{LonScale};$$
(13)

$$H = \frac{(Height - HgtOff)}{HgtScale};$$
(14)

$$r_n = \frac{(Row - LinOff)}{LineScale};$$
(15)

$$c_n = \frac{(Column - SamOff)}{SamScale};$$
(16)

где LatOff – сдвиг по широте, °;

LonOff - cдвиг по долготе, °;

*Latitude* – широта;

Longitude – долгота;

*LinOff* – сдвиг строки в пикселах;

*SamOff* – сдвиг колонки в пикселах;

*HgtOff* – сдвиг высоты в метрах;

LinScale – нормализующий коэффициент для строки;

*SamScale* – нормализующий коэффициент для столбца;

LatScale – нормализующий коэффициент для широты;

*LonScale* – нормализующий коэффициент для долготы;

*HgtScale* – нормализующий коэффициент для высоты.

Числитель и знаменатель рациональной функции полиномиального уравнения представляет собой полиномы третьего порядка вида [22]

$$f(P, L, H) = c_{1} + c_{2}L + c_{3}P + c_{4}H + c_{5}LP + c_{6}LH + c_{7}PH + c_{8}L^{2} + c_{9}P^{2} + c_{10}H^{2} + c_{11}PLH + c_{12}L^{3} + c_{13}LP^{3} + c_{14}LH^{2} + c_{15}L^{2}P + c_{16}P^{3} + c_{17}PH^{2} + c_{18}L^{2}H + c_{19}P^{2}H + c_{20}H^{3}.$$
(17)

Внешнее ориентирование снимков с помощью RPC-модели можно выполнять без опорных точек, при этом средние квадратические ошибки на равнинной местности будут составлять в среднем около 3–7 м. Для ориентирования снимков с точностью 1–3 м или лучше рекомендуется уточнить RPC по опорным точкам. Количество точек зависит от рельефа местности и типа сенсора. Так, для снимков Pleiades и WorldView достаточно использовать всего одну опорную точку (параллельный сдвиг) для значительного увеличения точности, а, например, для снимков QuickBird необходимо не менее трех опорных точек (сдвиг, разворот и масштабирование).

В прил. 1 представлено содержимое файла RPC, входящего в комплект поставки космического снимка QuickBird [23–29].

#### 2.4.1. Состав комплекта поставки космических снимков

Рассмотрим подробнее, какие данные входят в комплект поставки космического снимка, на примере снимка QuickBird уровня обработки Orthoreadystandart (с уровнями обработки снимков можно ознакомиться в [15]):

– файл BASE.TXT содержит текст лицензионного соглашения с пользователем;

- файл README.TXT - информационный файл;

– файл BROWSE.JPG представляет собой обзорный снимок в формате jpeg, предназначенный для предварительного просмотра снимка без использования специализированного программного обеспечения;

– файлы с расширениями IMD (imagemetadata) и XML содержат метаданные снимка (дата съемки, уровень обработки, параметры привязки и т. д.);

- файл с расширением RPB содержит RPC;

– файл с расширением ТІГ – снимок;

– файл с расширением TIL (прил. 2) содержит имена и координаты тайлов. Тайловая структура используется для работы с растровыми изображениями большого размера. Такая организация данных позволяет быстро считывать с диска и отображать на экране отдельные участки целого снимка.

Если изображение состоит из отдельных тайлов, то файл RPC будет использоваться для целого изображения, составленного из тайлов.

Файл TIL содержит в себе имена соответствующих тайлов и координаты их углов во внешней системе координат и системе координат цифрового изображения.

## 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА СООТВЕТСТВЕННЫХ ТОЧЕК

#### 3.1. Детекторы и дескрипторы

Поиск и идентификация соответственных точек – одна из распространенных задач, возникающих при обработке данных дистанционного зондирования. Задача поиска соответственных точек имеет место при корегистрации космических снимков, выполнении взаимного ориентирования аэроснимков, а также при построении цифровых моделей рельефа стереофотограмметрическим способом.

Первые исследования в области автоматизации стереоскопических измерений были выполнены в МИИГАиК профессором А. С. Скиридовым в 1924–1932 гг. Но в то время из-за недостаточно высокого уровня развития технических средств эти исследования не привели к широкому применению методов автоматизации на практике. В настоящее время алгоритмы отождествления соответственных участков изображений нашли широкое применение в специализированном программном обеспечении [19].

Для поиска и идентификации соответственных точек сперва необходимо выявить некие локальные особенности (экстремумы) на изображениях, выполнить их описание и лишь потом идентифицировать на смежных изображениях по описанию. Для решения этой последовательности задач применяется два типа алгоритмов – детекторы (их задача – выявить локальные особенности на изображении) и дескрипторы (алгоритмы описания точки). При визуальном поиске соответственных точек оператор выбирает на перекрывающихся снимках локальные участки с хорошо различимым экстремумом яркости, например камни, а при определенном разрешении – пни деревьев или крышки канализационных люков. Хорошим вариантом точки являются углы бордюров, дорожной разметки, фундаментов зданий и т. д. Для автоматического выявления на изображении образованных сходящимися или пересекающимися гранями точек, (т. е. углов), применяются алгоритмы – детекторы углов, такие как Moravec, Harris, Shi-Tomasi, Förstner и т. д. [21].

Для описания обнаруженных локальных особенностей распространение получили так называемые площадные алгоритмы. Ключевым в таких алгоритмах является понятие площадного образа (дескриптора) – некоторой произвольной по размеру области снимка. С математической точки зрения образ представляет собой матрицу *R* как совокупность элементов изображения (пикселов), каждый из которых характеризуется положением и значением яркости. Опознавание точки левого снимка на правом (при идентификации точек на стереопаре) сводится к определению эталонного образа R на левом снимке с центром в отождествляемой точке и поиску максимально похожего образа на правом снимке. Практически для автоматического опознавания точки нужно выполнить следующие действия.

На левом снимке необходимо выбрать образ r в виде области размером  $m \times n$  пикселов. На правом снимке определить зону R поиска размером  $M \times N$  пикселов (R >> r). Далее необходимо в границах зоны поиска размером  $M \times N$  на правом снимке создать с определенным шагом (например один пиксел) серию образов  $r_i$  или сформировать образы точек, выделенных дескриптором в области поиска, и определить меру близости между образом с левого снимка с множеством образов, находящихся в области поиска на правом. В качестве меры близости между образами могут выступать различные функции. Распространение получил алгоритм, предложенный еще профессором А. Н. Лобановым и основанный на расчете коэффициентов нормированной корреляции между оптическими плотностями элементов (значениями яркости пикселов) образа на левом снимке и множеством образов из зоны поиска на правом снимке. Автоматические измерения выполняются путем вычисления нормализованной корреляции по формуле

$$K(\tau,\nu) = \frac{\sum_{x=0}^{M} \sum_{y=0}^{N} P(x,y) P(x+\tau,y+\nu)}{\sum_{x=0}^{M} \sum_{y=0}^{N} P^{2}(x,y) \sum_{x=0}^{M} \sum_{y=0}^{N} P^{2}(x+\tau,y+\nu)},$$
(18)

для  $\tau = 0 \div k_1$ ,  $v = 0 \div k_2$ , где  $k_1 \times k_2$  – это размер участка эталона;  $M \times N$  – размер зоны. Очевидно, что искомая точка лежит в центре образа на правом снимке с максимальным коэффициентом корреляции.

Размер выбираемого образа напрямую зависит от пространственного разрешения снимков и местности, отображенной на снимках. Размер зоны поиска на правом снимке должен превышать удвоенные ожидаемые смещения точек, вызванные влиянием рельефа местности.

Алгоритм идентификации соответственных точек на основе взаимной корреляции устойчиво работает только при взаимных углах наклона и разворота снимков, не превышающих 20–30°, разномасштабности снимков менее 20–30 % и при условии, что снимаемая местность плоская [19, 21].

#### 3.2. Метод идентификации соответственных точек SIFT

Для поиска и идентификации соответственных точек на снимках необходимо, чтобы признаки, описывающие характерные точки, были инвариантны К таким факторам, как изменение освещенности, разномасштабность, разворота Этим углы И СДВИГ. критериям SIFT (Scale Invariant Feature Transform), соответствует алгоритм запатентованный в 2004 г. Дэвидом Лоу [30] (действие патента закончилось в 2020 г.).

Идентификация точек с помощью SIFT включает в себя несколько этапов.

На первом этапе проводится гауссова фильтрация изображения и создается гауссова пирамида изображений (инвариантность к разномасштабности достигается благодаря анализу изображения на разных уровнях пирамиды, т. е. при разном масштабе). Фильтрация выполняется путем свертки двумерной функции изображения и функции Гаусса

$$L_{j}(x, y, \sigma_{j}) = P_{I}(x, y) \cdot G(x, y, \sigma_{j});$$
(19)

$$G(x, y, \sigma_j) = \frac{1}{2\pi\sigma_j^2} e^{-(x^2 + y^2)/\sigma_j^2},$$
(20)

где  $\sigma^2$  – дисперсия.

На рис. 15 изображен график функции Гаусса.



Рис. 15. Трехмерный график функции Гаусса

Новый уровень пирамиды Гаусса формируется путем прореживания каждого второго пиксела изображения предыдущего уровня.

Каждый уровень пирамиды состоит из нескольких изображений, полученных путем фильтрации гауссианом с различной σ<sup>2</sup>. Эти изображения формируют так называемую октаву.

Затем подчеркиваются контуры путем определения разностного изображения для соседних уровней в октавах гауссова пространства изображений. Это так называемый DoG (Difference of Gaussian) фильтр (рис. 16, 17). Количество изображений в октаве каждого уровня получившейся DoG-пирамиды на 1 меньше, чем в октавах пирамиды Гаусса. График разностной гауссовой функции представлен на рис. 16.



Рис. 16. Трехмерный график разностной гауссовой функции DoG (Difference of Gaussian)

Схема получения DoG-пирамиды из пирамиды Гаусса представлена на на рис. 17.



Рис. 17. Уровни гауссовой и DoG-пирамид

На следующем этапе выполняется выделение характерных точек (локальных экстремумов) на разностном изображении  $D_j$  (x, y,  $\sigma_j$ ), с помощью маски 3 × 3 элемента вычисляется разность между значениями яркости центральной точки и восемью соседними элементами уровня j, а также соответствующими девятью элементами изображения  $D_{j+1}$  (x, y,  $\sigma_{j+1}$ ) уровня выше и девятью элементами нижележащего уровня  $D_{j-1}$  (x, y,  $\sigma_{j-1}$ ).

Далее выполняется описание локальной области выделенной вокруг точки путем задания масштаба и ориентации локальной системы координат, связанной с этой локальной областью. Локальная область определяется «масштабом», радиусом *r* окружности с центром в точке *m* и начальным направлением, заданным как направление максимального градиента.

Величина градиента gr(x, y) и угол, определяющий ориентацию локального изображения, вычисляются по формулам:

$$gr(x,y) = \sqrt{\left(L(x+1,y) - L(x-1,y)\right)^2 + \left(L(x,y+1) - L(x,y-1)\right)^2}, \quad (21)$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \left( \frac{(L(x,y+1) - L(x,y-1))}{(L(x+1,y) - L(x-1,y))} \right).$$
(22)

Таким образом, локальная область задает локальную систему координат и описывается с помощью параметров: x, y – координаты характерной точки в системе координат исходного изображения,  $\theta$  – угол между осью x и начальным направлением, определенным как максимум градиента в окрестности точки.

На последнем этапе выполняется описание точки с помощью градиентов по направлениям, заданным относительно ориентации локальной области. Точка описывается вектором, размерность которого зависит от размера локальной области. Алгоритм SIFT применяется к паре изображений, а затем выполняется идентификация соответственных точек по вектору признаков.

К плюсам SIFT можно отнести инвариантность по отношению к сдвигу, развороту, масштабу (разномасштабность может быть 4-кратной) и изменению яркости. Признаки также устойчивы к шумам и теням.

Главным недостатком алгоритма является большое количество вычислений, что требует значительных затрат ресурсов компьютера [31].

#### 3.3. Построение плотных цифровых моделей поверхности

Цифровая модель поверхности (ЦМП, англ. DSM – Digital Surface Model) – модель, образованная множеством точек, расположенных на видимых открытых поверхностях снимаемой местности, и включающая в себя цифровую модель рельефа и цифровую модель объектов (ЦМО). При построении таких моделей стереофотограмметрическим способом применяются алгоритмы отождествления соответственных точек, которые можно разделить на 3 группы: локальные, глобальные и полуглобальные. К первой группе относят алгоритмы, выполняющие поиск соответствий между точками, обнаруженными на снимках детектором (Moravec, Harris, Shi-Tomasi, Förstner и т. д.); отождествление точек выполняется по дескрип-

торам (например, отождествление площадных дескрипторов при помощи функции корреляции Пирсона).

При построении плотных цифровых моделей глобальным методом для каждого пикселя левого изображения выполняется поиск соответствующего пикселя на правом [21].

Каждой точке на одном из двух изображений стереопары соответствует прямая на втором изображении, называемая эпиполярной линией. Эпиполярные линии (базисные линии) – это линии пересечения базисных плоскостей стереопары с плоскостями снимков. При известных параметрах ориентирования снимков поиск соответственной точки можно ограничить лишь отвечающей ей базисной линией на втором изображении (рис. 18). Высотная отметка точки зависит от ее положения на базисной линии.



Рис. 18. Эпиполярные линии

Для упрощения поиска точек на практике используют трансформированные изображения, на которых базисные линии совпадают со строками пикселей (рис. 19).

Для поиска соответствия точки с множеством точек на эпиполярной (базисной) линии второго изображения могут применяться различные способы отождествления, например, уже рассмотренный площадной корреляционный алгоритм или разности яркостей пикселей.

Поиск по всей строке с шагом в один пиксел в масштабе всего изображения требует больших вычислительных ресурсов и очень много времени даже при использовании мощных графических станций. Для сокращения количества шагов (а значит, и времени) при поиске точек применяются алгоритмы оптимизации. Примерами таких алгоритмов могут быть метод градиентного спуска, метод имитации отжига (используется для построения цифровых моделей рельефа в программном комплексе SkanEx Image Processor) [32], метод динамического программирования и т. д.



Рис. 19. Поиск точек на эпиполярных изображениях

## 4. АЛГОРИТМЫ СЛИЯНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ. PANSHARPENING

Современные космические съемочные системы высокого и сверхвысокого разрешения, как правило, выполняют съемку в панхроматическом, охватывающем видимый диапазон, и нескольких узких спектральных каналах. Пространственное разрешение панхроматическомго канала обычно в 2–4 раза выше мультиспектрального сенсора. Для увеличения пространственного разрешения мультиспектрального изображения применяются специализированные алгоритмы получения синтезированных изображений с увеличением пространственного разрешения [33]. При разработке таких алгоритмов первостепенной задачей является улучшение качества результирующего изображения и уменьшение яркостных искажений. В специализированном программном обеспечении широкое применение нашли методы PCA, IHS, Brovey Transform и др. [33].

Синтезирование на основе метода главных компонент (PCA – Principal Component Analysis).

Сущность метода главных компонент заключается в том, что вектор яркостей для элемента многоспектрального изображения выглядит как

$$\overline{P}_{ij} = \left\{ P_{ij}^{I}, P_{ij}^{II}, \dots, P_{ij}^{k} \right\},$$
(23)

где *k* – количество каналов;

*ij* – номер пикселя.

В результате преобразования каждое из изображений получается линейно-независимым от изображений в других каналах [33].

Для этого используется преобразование Карунена – Лоева, в результате которого рассчитывается матрица собственных векторов ковариационной матрицы и вектор собственных значений, удовлетворяющие условию

$$U^T K_{ii} U = \lambda, \tag{24}$$

где *K*<sub>*ij*</sub> – ковариационная матрица;

U – матрица, составленная из собственных векторов ковариационной матрицы K<sub>ii</sub>;

 $\lambda$  – собственные значения, соответствующие собственным векторам матрицы U.

Затем вычисляется преобразованное изображение:

$$\overline{P}_{ij}^2 = U\overline{P}_{ij}U^T.$$
(25)

В результате применения преобразования оси координат спектрального пространства поворачиваются так, чтобы первая главная компонента соответствовала наибольшей оси эллипсоида рассеяния – направлению наибольшего разброса значений яркости. Вторая главная компонента будет соответствовать наибольшему поперечному сечению эллипсоида, ортогональному к первой главной компоненте. Она отражает наибольшее значение разброса данных, которые еще не охвачены первой главной компонентой. Каждая последующая компонента является одним из поперечных сечений эллипсоида рассеяния, ортогональным к предыдущим сечениям (компонентам), и характеризует снижающее значение вариаций В учтенных данных, еще не предыдущими главными компонентами, поэтому первые из них содержат большую часть информации мультиспектрального изображения [33].

Первая главная компонента по информативности близка к панхроматическому (Pan) изображению, поэтому при слиянии первая главная компонента заменяется панхроматическим снимком высокого разрешения [33]. Схема слияния изображений по методу *PCA* описывается формулой

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} PC_1 \\ PC_2 \\ PC_3 \end{bmatrix}^{\leftrightarrow PAN} \rightarrow \begin{bmatrix} PAN \\ PC_2 \\ PC_3 \end{bmatrix}^{-1} \rightarrow \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}.$$
(26)

Операция слияния состоит из следующих этапов: преобразование мультиспектрального изображения по методу главных компонент, замена

35

первой главной компоненты на панхроматическое изображение высокого разрешения, обратное преобразование главных компонент (вместе с панхроматическим изображением). После обратного преобразования получаем синтезированное изображение высокого разрешения.

Преобразование «интенсивность – оттенок – насыщенность» – (Intensity, Hue, Saturation) IHS.

При использовании этого метода цветное изображение из пространства RGB (рис. 20) трансформируется в IHS (рис. 21).



Рис. 20. Пространство RGB



Рис. 21. Пространство IHS

IHS-преобразование описывается соотношениями [8, 11, 14]:
$$H = \begin{cases} \theta & \text{при } B \le G \\ 360 - \theta & \text{при } B > G \end{cases};$$
(27)

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{0, 5 \cdot ((R - G) + (R - G))}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B) \cdot (G - B)}} \right);$$
(28)

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)};$$
 (29)

$$I = \frac{1}{3} \cdot (R + G + B).$$
 (30)

После выполнения преобразования в пространство IHS компонента *I* цветного изображения заменяется на изображение высокого разрешения из панхроматического канала. Затем выполняется обратное преобразование в пространство RGB. Преобразование из IHS в RGB выполняется по следующим формулам.

Сектор RG (0 <=  $H < 120^{\circ}$ ):

$$B=I(1-S), \tag{31}$$

$$R = I \cdot \left[ 1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60^\circ - H)} \right], \tag{32}$$

$$G=3\cdot I - (R+B). \tag{33}$$

Сектор *GB* (120° <=*H* < 240°):

$$H=H-120^{\circ},$$
 (34)

$$R=I\cdot(1-S),\tag{35}$$

$$G = I \cdot \left[ 1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60^\circ - H)} \right], \tag{36}$$

 $B=3 \cdot I - (R+G). \tag{37}$ 

Сектор *BR* (240°  $\leq H \leq 360°$ ):

$$H = H - 240^{\circ},$$
 (38)

$$G=I(1-S), \tag{39}$$

$$B = I \cdot \left[ 1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60^\circ - H)} \right],\tag{40}$$

$$R = 3 \cdot I - (G + B). \tag{41}$$

Схема синтеза по методу IHS характеризуется формулой (28).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I \\ S \\ H \end{bmatrix} \stackrel{\leftrightarrow PAN}{\rightarrow} \begin{bmatrix} I \\ S \\ H \end{bmatrix}^{-1} \rightarrow \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}$$
(42)

Brovey Transform.

Для получения каждой из трех компонент цветного изображения по методу Brovey Transform панхроматическое изображение перемножается с масштабированным изображением одного из спектральных каналов и делится на сумму изображений красного, зеленого и синего каналов (30) [33]:

$$R' = \frac{R}{(R+G+B)} \cdot P$$

$$G' = \frac{G}{(R+G+B)} \cdot P$$

$$B' = \frac{B}{(R+G+B)} \cdot P$$
(43)

Метод Brovey Transform был разработан для повышения визуального контраста в нижних и верхних частях гистограммы (т. е. он позволяет обеспечить контраст в тени, водных поверхностях и в областях с высокой отражательной способностью). Поэтому этот метод не пригоден для

сохранения высоких радиометрических характеристик исходного изображения.

Программные комплексы, реализующие процедуру слияния изображений.

Β наиболее распространенных программных комплексах (ПК) обработки данных ДЗЗ, таких как ENVI, PCI Geomatica, ERDAS, ScanEx Image Processor и др. реализованы различные методы слияния изображений. В ПК ENVI 4.2 используются 5 алгоритмов (обозначенных как Transforms-Image Sharpening): IHS, Color Normalized (Brovey), Gram-Schmidt Transform, PCA и CN Spectral. В базовой поставке ПК ERDAS реализованы 3 разновидности таких алгоритмов (PC, Multiplicative и BroveyTransform). В программном комплексе ScanEx Image Processor основанный реализован алгоритм, на сочетании метода главных компонент и метода вейвлет-преобразования [21].

# 5. ПРАКТИЧЕСКИЙ КУРС

## 5.1. Лабораторная работа № 1

### Трансформирование космических снимков

*Цель:* изучение теоретических основ и получение практических навыков трансформирования космических снимков в программном комплексе ENVI.

Задачи:

выполнить трансформирование снимков при помощи методов, реализованных в инструменте «image to image» программного комплекса
 ENVI (аффинное преобразование, полиномиальный, триангуляция Делоне);

 изучить доступные в программном обеспечении методы интерполяции;

– выполнить оценку точности результатов трансформирования и заполнить таблицу из прил. 3.

Используемое программное обеспечение: ENVI, MS Excel.

Исходные данные: трансформированный панхроматический космический снимок SPOT(пространственное разрешение 10 м).

Нетрансформированный мультиспектральный космический снимок Landsat 5 TM (пространственное разрешение 30 м).

#### Порядок выполнения работы

1. Загрузить снимки.

2. Выполнить измерение координат соответственных точек (27–30 равномерно расположенных точек).

3. Исключить 10 точек из процесса трансформирования (контрольные точки) и выполнить трансформирование снимка при помощи полиномов 1-й, 2-й, 3-й степеней, аффинного преобразования и триангуляции Делоне.

4. Выполнить трансформирование теми же методами с использованием минимально возможного для каждого из методов количества опорных точек. Выполнить оценку точности по 10 контрольным точкам с использованием таблицы MS Excel (см. прил. 3, табл. П.3.1). Заполнить табл. П.3.2, прил. 3. При выполнении трансформирования с использованием полинома 3-й степени использовать различные методы интерполяции. Сделать выводы об изменении качества трансформированного изображения и точности измерения контрольных точек в зависимости от использованного метода интерполяции.

5. Оценка точности и заполнение табл. П.3.1 прил. 3;

6. Написание отчета.

В качестве методических указаний в лабораторной работе можно использовать учебное пособие Л. Г. Евстратовой «Трансформирование космических снимков с использованием программного комплекса ENVI».

### Требования к отчету

Отчет должен быть оформлен согласно требованиям СТО СГУГиТ и должен содержать теоретическое описание использованных методов трансформирования и интерполяции, скриншоты основных этапов трансформирования, схемы расположения опорных и контрольных точек, скриншоты трансформированных изображений, таблицу с результатами оценки точности, выводы об эффективности использованных методов трансформирования и интерполяции.

Для защиты отчета по лабораторной работе необходимо прокомментировать результаты из табл. П.3.2 и ответить на следующие вопросы.

1. Характеристики съемочных систем Landsat5 и SPOT4.

2. Современные космические съемочные системы среднего пространственного разрешения.

3. Полиномиальные методы трансформирования снимков.

4. Количество точек, необходимое для трансформирования снимка с использованием полиномов 1-й, 2-й, 3-й степеней.

5. Методы интерполяции, используемые при трансформировании снимков в программном комплексе ENVI.

41

## 5.2. Лабораторная работа № 2

# Использование автоматизированных методов поиска соответственных точек

*Цель:* изучение теоретических основ и применение на практике методов автоматизированного поиска соответственных точек.

Задачи:

 – выполнить поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков IKONOS при помощи алгоритма SIFT;

– выполнить поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков IKONOS при помощи алгоритма, реализованного в ПК ENVI;

 проанализировать результаты применения использованных алгоритмов;

Используемое программное обеспечение: ENVI, MATLAB.

Исходные данные: фрагмент стереопары космических снимков IKO-NOS.

### Порядок выполнения работы

1. Поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в среде MATLAB.

2. Отбраковка точек в ENVI.

3. Автоматизированный поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в ENVI (с использованием настроек коррелятора, выставленных по умолчанию).

4. Отбраковка точек в ENVI.

5. Автоматизированный поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в ENVI (с самостоятельно введенными параметрами коррелятора).

6. Анализ результатов.

7. Автоматизированный поиск соответственных точек на разномасштабных космических снимках в среде MATLAB и ENVI.

8. Написание отчета.

# Описание программы, реализованной в среде MATLAB для поиска соответственных точек по методу SIFT.

лабораторной работе, В Программа, использованная написана в университете Британской Колумбии (Канада) и реализует метод SIFT, разработанный профессором Дэвидом Лoy. Запуск программы осуществляется в среде MATLAB при помощи м-файла siftcomp.m. Также компоненты: sift.m, plotframe.m, частью программы являются plotsiftdescriptor.m, appendimages.m. Непосредственно сам поиск точек осуществляется исполняемым файлом siftWin32.exe.

М-файл sift.m считывает изображение и возвращает 128-мерные векторы-дескрипторы точек; остальные м-функции служат для интерпретации и визуализации результатов.

#### Методические указания

## Поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в среде MATLAB.

Выполнение работы начинается с запуска MATLAB и загрузки mфайла siftcomp.m: File> Open> адрес рабочей директории/siftcomp.m.

В файле siftcomp.m, открывшемся в редакторе m-файлов, необходимо прописать имена левого и правого изображений в форматах \*.png и \*.pgm. На первом этапе работы используется фрагмент стереопары снимков IKONOS (в папке с заданием это файлы A.png, B.png, A.pgm и B.pgm). Запускаем программу при помощи 🔊 кнопки Run или клавиши F5.

Если программа сработала корректно, то на каждом из снимков должно быть найдено около 2 300 точек (количество точек на левом и правом снимках выводится в основном окне MATLAB), причем их количество на левом и правом снимках различно. На рис. 22 и 23 представлен результат работы метода SIFT в среде MATLAB.

43



Рис. 22. Результат поиска точек

На рис. 22 в виде желтых квадратов изображены образы точек; их размер зависит от уровня масштаба, на котором была обнаружена точка.



Рис. 23. Результат сопоставления точек на снимках IKONOS

Координаты точек программа сохраняет в рабочую директорию в файле myfile.pts, который можно использовать в ENVI.

Отбраковка точек в ENVI. Отбраковка некорректно измеренных точек выполняется в программном комплексе ENVI. Для этого в главном меню ENVI необходимо выбрать File>Open Image File. В открывшемся диалоговом окне выберите рабочую директорию с изображениями A.png и B.png, затем, для визуализации изображений во вьювере, в окне Available Band List выберите Gray Scale, укажите снимок A.png и нажмите на Load Band. Открываем новый вьювер (кнопка New Display) и по аналогии загружаем изображение B.png. Далее в главном меню выбираем вкладку Map>Registration>SelectGCPs: Image to Image. В открывшемся окне Image to Image Selection в качестве базового изображения (Base Image) укажите A.png, в качестве трансформируемого (Warp Image) – B.png. В окне Ground Control Point Selection загрузите файл с координатами точек myfile.pts (File>RestoreGCPs from ASCII...), затем нажмите на кнопку Show List и в появившемся окне Image to ImageGCP List выполните отбраковку точек до величины средней квадратической ошибки (RMS Error) не больше 1 пиксела. Для удобства отбраковки выстроите в окне Image to ImageGCP List при помощи Options>Order Points by Error точки в порядке убывания ошибки  $RMS(\Delta XY)$ . Результат отбраковки точек показан на рис. 24.



Рис. 24. Точки до и после отбраковки

Для последующего использования координаты точек левого и правого изображений необходимо сохранить в файле *\*.pts* (Save GPS to ASCII...).

Журнал измерений, отображаемый в окне Image to Image GCP List, нужно сохранить для отчета (File>Save Table to ASCII...).

# Автоматизированный поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в ENVI.

*На первом этапе* выполняем загрузку изображений A.png и B.png. и выбираем Map>Registration>SelectGCPs: Image to Image, выбираем базовый и трансформируемый снимки. Функция автоматизированного поиска точек (Automatically Generate Tie Points) доступна в Ground Control Point Selection>Options. Прежде чем выполнять автоматизированный поиск точек, необходимо вручную измерить координаты не менее четырех точек или загрузить файл \*.*pts* с координатами точек (в рабочей директории есть файл *1234.pts*). При выборе Automatically Generate Tie Points Parameters (рис. 25).

Automatic Tie Points Parameters	J
Area Based Matching Parameters	]
Number of Tie Points 25	
Search Window Size 81 🜩	
Moving Window Size 11 🗢	
Area Chip Size 128 🗢	
Minimum Correlation 0.70	
Point Oversampling 1	
Interest Operator Moravec 💌	

Рис. 25. Окно Automatic Tie Points Parameters

В окне Automatic Tie Points Parameters доступны для ввода следующие параметры поиска соответственных точек:

Number of Tie Points – необходимое количество точек;

Search Window Size – размер окна поиска, т. е. области, в пределах которой будет осуществляться поиск наилучшего соответствия образу точки левого изображения. Этот параметр зависит от качества первоначальной привязки и вычисляется следующим образом. В меню

Tools>Link>Geographic Link необходимо установить Оп напротив номеров соответствующих дисплеев (рис. 26).

	🎱 Geographi 💻 🏹	ſ
	Select the Displays for the Geographic Link.	1
	Display #1 Off	
1	Display #2 Off	1
	Display #3 Off	
	Display #4 Off	
	OK Cancel	

Рис. 26. Geographic Link

Затем кликнуть два раза левой клавишей мыши, наведясь указателем на пиксел, принадлежащий точке с первого изображения; при этом указатель во втором окне переместится примерно в это же место. Необходимо посчитать, на сколько пикселов указатель на втором изображении оказался удален от искомого. Размер окна поиска для этого пиксела может быть рассчитан как 2\*(расстояние в пикселах +1). При этом окно поиска должно быть всегда значительно больше скользящего окна и не может быть меньше 21 пиксела.

Moving Window Size – размер скользящего окна (образа точки) в пикселах. От размера скользящего окна зависит скорость и точность работы алгоритма. При увеличении размера скользящего окна снижается скорость обработки, но увеличивается точность. Минимальный размер скользящего окна 5 × 5 пикселов. Существуют рекомендации по выбору размера скользящего окна для снимков различного разрешения. При разрешении снимков до 10 м рекомендованный размер 9–15 пикселов; 5–10 м – 11–21 пикселов; при разрешении 5–1 м размер окна 15–41 пикселов; при сверхвысоком пространственном разрешении скользящее окно должно иметь размер от 21 до 81 пиксела. Area Chip Size – размер окрестности (окна), в которой выполняется поиск экстремума яркости, т. е. точки. По умолчанию установлен размер 121 × 121, минимальное значение 64, максимальное 2 048. Большие размеры параметра наилучшим образом подходят для малоконтурной местности.

Minimum Correlation – минимальное значение корреляции. Стоит помнить, что чем больше значение корреляции, тем более надежно выполняется сопоставление точек, но их количество может в значительной мере уменьшаться.

Point Oversampling – этот параметр указывает, сколько экстремумов используется в пределах одной области (Area Chip Size).

Interest Operator – выбор метода поиска точки (Moravec или Förnster).

Если оставить параметры, установленные по умолчанию, то на используемой в лабораторной работе стереопаре коррелятор обнаружит порядка пятнадцати точек. Нетрудно заметить, что множество точек расположены неправильно (положение точек на правом изображении не соответствует положению соответственных точек на левом снимке). Далее необходимо выполнить отбраковку точек (как в предыдущем примере с методом SIFT). Результат отбраковки точек показан на рис. 27. Сохраняем для последующего использования координаты точек и Image to Image GCP List в текстовые файлы.



Рис. 27. Точки до и после отбраковки

Автоматизированный поиск соответственных точек на стереопаре космических снимков в ENVI (с самостоятельно введенными параметрами коррелятора). Познакомившись с основными настройками коррелятора и рекомендациями по их выбору, а также опираясь на теоретические знания, полученные на лекционных занятиях, подберите параметры, обеспечивающие более надежный результат по сравнению с настройками, установленными по умолчанию. Проанализируйте результаты, полученные по методу SIFT, и алгоритмом, использующимся в ENVI.

Выполните автоматизированный поиск соответственных точек на разномасштабных снимках по методу SIFT и алгоритмом, использующимся в ENVI с самостоятельно введенными параметрами коррелятора. Проанализируйте результат.

## Требования к отчету

Отчет должен быть оформлен согласно требованиям СТО СГУГиТ. Отчет должен содержать теоретическое описание использованных методов автоматизированного поиска соответственных точек, скриншоты и описание основных этапов работы в среде MATLAB и ENVI, схемы расположения точек, журналы измерений, выводы об эффективности использованных методов автоматизированного поиска точек.

Для защиты отчета по лабораторной работе необходимо проанализировать полученные результаты и ответить на следующие вопросы.

1. Метод взаимной корреляции для поиска точек.

2. Уголковые детекторы.

3. Схема работы метода SIFT.

4. Преимущества и недостатки методов, использованных в лабораторной работе.

49

# 5.3. Лабораторная работа № 3

#### Построение ЦМР по стереопаре космических снимков

*Цель*: изучение теоретических основ построения цифровых моделей рельефа по стереопарам снимков и применение на практике полученных теоретических знаний.

Задачи: построить по стереопаре космических снимков цифровую модель рельефа в программном комплексе ENVI. Выполнить оценку качества цифровой модели рельефа.

Используемое программное обеспечение: ENVI.

Исходные данные: стереопара космических снимков IKONOS, полученных на городскую территорию, каталог координат опорных точек, файл

с изображениями опорных точек.

#### Порядок выполнения работы

1. Построение цифровой модели рельефа в программном комплексе ENVI:

а) загрузка снимков;

- б) построение эпиполярных изображений;
- в) построение цифровой модели рельефа;

2. Оценка качества ЦМР.

#### Методические указания

Для построения ЦМР в лабораторной работе используется стереопара космических снимков IKONOS. Снимки расположены в папках po\_201905\_0000000 и po\_201905\_0010000 рабочей директории. Загружаем в программу снимки po\_201905\_pan\_0000000.tif и po\_201905\_pan\_0010000.tif.

Чтобы приступить к построению цифровой модели рельефа, выберите Topographic>DEM Extraction>DEM Extraction Wizard>New. Инструмент DEM Extraction Wizard позволяет выполнить построение ЦМР за 9 этапов. На первом этапе выполняется загрузка левого (Left image) и правого (Right image) изображений и ввод максимальной и минимальной высот (вводится автоматически при наличии файла RPC). Окно загрузки стереопары показано на рис. 28.

	DEM Extraction Wizard: Step 1 of 9
	Stereo Image Pair
	Select Stereo Images
	Left Image
	Band 1:po_201905_pan_0010000.tif
	Right Image
	Band 1:po_201905_pan_0000000.tif
	Scene Elevation in Meters
	Minimum Elevation 142.00
	Maximum Elevation 372.00
1	
	Cancel Help Save <- Prev Next ->

Рис. 28. DEM Extraction Wizard: Step 1 of 9

На втором шаге предлагается выбрать источник опорных точек GCP (рис. 29).

1	DEM Extraction Wizard: Step 2 of 9		x
	- Source of Stereo GCPs		
	No GCPs (relative DEM values only)		
	Define GCPs Interactively		
	Read GCPs From File		
	Examine and Edit Stereo GCPs No		
	Cancel Help Save	Next>	

Рис. 29. DEM Extraction Wizard: Step 2 of 9

В этом окне можно выбрать No GCPs (relative DEM values only) – не использовать опорные точки. Define GCP interactive – выполнять измерение координат опорных точек в интерактивном режиме. Read GCPs From File – загрузить опорные точки из файла. Для перехода на следующий этап выберите Define GCP interactive и нажмите на Next. В папке «Опора» в директории с лабораторной работой № 3 расположен файл с изображениями опорных точек «Опорные точки.docx» и текстовый файл с геодезическими координатами опорных точек «Координаты.txt». Измерьте координаты шести равномерно расположенных опорных точек, вписывая геодезические координаты в соответствующие поля окна DEM Extraction Wizard: Step 3 of 9 (рис. 30) из каталога координат «Координаты.txt». Затем нажмите на Next.

[	DEM Extraction Wizard: Step 3 of 9
	Left/Right Stereo Image Coordinate
	Left X 268.64 Right X 265.38
	Left Y 55.18 Right Y 67.13
	Map (x.y.z) Coordinate
	It Proj : UTM, Zone 41 North Datum: WGS-84
	352111.7089 E Change Proj
	6308937.2964 N Units: Meters
	Elevation (Meters) 277.6193
	View and Edit Stereo GCPs
	Current Stereo GCP: 4 of 4 +
	Go to Add Update Reset Delete Delete All
	Show Table Save Restore
	Auto Predict
	Predict Map Predict Left/Right
	Cancel Help Save < Prev Next ->

Рис. 30. Измерение координат опорных точек

На следующем этапе выполняется поиск и измерение координат связующих точек (они используются для построения эпиполярных изображений).

Связующие точки можно загрузить из файла Read Tie Points From File, выполнить поиск точек в интерактивном режиме Define Tie Points Interactively или найти автоматически Generate Tie Points Automatically. Вы-

берите автоматический режим. В окне DEM Extraction Wizard появятся поля для ввода параметров автоматизированного поиска связующих точек (рис. 31).

O DEM Extraction Wizard: Step 4 of 9	3						
Source of Tie Points							
Generate Tie Points Automatically							
Define Tie Points Interactively							
Read Tie Points From File							
Automatic Tie Points Generation							
Number of Tie Points 25							
Search Window Size 81 🗢							
Moving Window Size 11 🗢							
Minimum Correlation 0.65 🗢							
Region Elevation 257.00							
Examine and Edit Tie Points Yes <u>It</u>							
Cancel Hep Save							

Рис. 31. Настройка параметров поиска соответственных точек

Оставьте предлагаемые по умолчанию значения настроек коррелятора и нажмите на Next.

На рис. 32 показана схема расположения связующих точек, найденных коррелятором.



Рис. 32. Схема расположения соответственных точек

В окне DEM Extraction Wizard: Step 5 of 9 расположены функции управления связующими точками. На этом этапе выполняется редактирование положения точек с целью снижения поперечного параллакса (при поперечном параллаксе больше 10 программа не позволяет перейти на следующий этап). Окно редактирования связующих точек показано на рис. 33.

OEM Extraction Wizard: Step 5 of 9
Left/Right Stereo Image Coordinate
Left X 3126.00 Right X 3157.00
Left Y 1009.00 Right Y 1033.00
View and Edit Tie Points
Current Tie Point: 1 of 19 🔶 🔶
Go to Add Update Reset Delete All
Show Table Save Restore
Likely Evor Rankings 🔻
Maximum Y Parallax: 69.1143
Auto Predict
Predict Left Predict Right Params
Region Elevation 257.00
Cancel Help Save < Prev Next ->

Рис. 33. DEM Extraction Wizard: Step 5 of 9

Стоит заметить, что из-за наличия теней от зданий и достаточно больших смещений точек крыш зданий (и других возвышающихся объектов), вызванных большими углами наклона снимков, автоматизированный поиск соответственных точек на стереопаре в значительной мере затруднен. Для примера на рис. 34 приведен один и тот же участок отображенной на стереопаре местности.



Рис. 34. Многоэтажные здания на левом и правом изображениях

Необходимо проверить правильность положения всех точек. Для редактирования точки нужно выбрать ее номер в окне Stereo Tie Point List, навестись перекрестием на пиксел (на левом и правом изображениях), в положение которого необходимо перенести точку, и нажать на кнопку Update. Окно Stereo Tie Point List открывается нажатием кнопки Show Table (рис. 35). Чем меньше значение в колонке Error Rank, тем больше ошибка в положении точки.

Stere	o Tie Points Li	ist		10.0		
	Left X	Left Y	Right X	Right Y	Error Rank	
#4	7215.000	1104.000	7242.998	999.998		*
#15	5234.000	7271.000	5138.000	7298.997	2	
#12	3076.000	5248.000	3092.999	5178.997	3	
#14	3071.000	7272.000	3120.000	7298.996	4	
#16	5139.000	7286.000	5148.999	7257.998	5	
#3	7291.000	1012.000	7255.998	1000.998	6	
#13	987.000	7276.000	986.999	7272.997	7	
#2	5139.000	1026.000	5130.999	1052.996	8	
#19	5119.000	9291.000	5115.999	9313.997	9	-
	Image:					Þ
Go to	Add Upda	te Reset	Delete Delet	e Al Sout 1	able By 🔻	
Hide T	able Save	Restore		✓	Tie Point Num Error Rank	nber

Рис. 35. Stereo Tie Points List

Редактируя точки, добейтесь значения поперечного параллакса равного или меньше 1 и нажмите на Next.

Перейдя на 6-й этап, выберите директорию, в которую будут сохранены левое и правое эпиполярные изображения (рис. 36).

OEM Extraction Wizard: Step 6 of 9
Left Epipolar Image
Output Result to 💿 File 💿 Memory
Output Image Filename Choose
D:\Hoвaя nanka (2)\snimki\f\lkonos\po_201905_C
Right Epipolar Image
Output Result to 💿 File 💿 Memory
Output Image Filename Choose
D:\Новая папка (2)\snimkiV\lkonos\po_201905_C
Epipolar Parameter
Epipolar Reduction Factor 1.00
Examine Epipolar Results
RGB=Left,Right,Right
RGB=Right,Left,Left
Cancel Help Save < Prev Next ->

Рис. 36. Построение эпиполярных изображений

На 7-м этапе выбирается система координат и размер элемента ЦМР (рис. 37). Оставьте значения, предлагаемые программой по умолчанию, и перейдите на следующий этап, нажав на кнопку Next.

O DEM Extraction Wizard: Step 7 of 9
Output Projection and Map Extent
Upper Left Comer Coordinate
Proj: UTM, Zone 41 North Datum: WGS-84
351353.3863 E Change Proj
6309531.2589 N Units: Meters
X Pixel Size 1.00000000 Meters
Y Pixel Size 1.00000000 Meters
Output X Size 11065  pixels
Output Y Size 11110  pixels
Options -
Cancel Help Save <- Prev Next ->

Рис. 37. Параметры создаваемой ЦМР

Чтобы построить ЦМР по эпиполярным изображениям, на этапе 8 необходимо задать параметры коррелятора (рис. 38). Программа будет осуществлять поиск соответствий для пикселов левого изображения на правом снимке.

	DEM Extraction Wizard: Step 8 of 9	1	
	Minimum Correlation 0.70		
	Background Value -999.00		
	Edge Trimming 0.00 👄		
	Moving Window Size 5x 5 -		
	Terrain Relief Moderate 💌		
	Terrain Detail Level 4 💌		
	DEM Result		
	Output Data Type Integer		
	Output Result to 🔘 File 🛛 Memory		
	Output DEM Filename Choose		
1	Cancel Help Save   < Prev Next>	1	

Рис. 38. Параметры коррелятора

Minimum Correlation – минимальное значение корреляции Background Value – значение, присваиваемое фоновым пикселам.

Edge Trimming – отступ от краев исходного изображения (указывается в процентах). Moving Window Size – размер скользящего окна (образа точки) в пикселах. Terrain Relief – выбор преобладающего типа рельефа. Параметр Terrain Detail указывает, сколько уровней пирамиды изображения будет использовано для поиска соответственных точек, по плоским координатам которых будут вычисляться высотные отметки ЦМР. Самый грубый результат получается при использовании одного уровня. Максимальное количество уровней для используемой стереопары равно семи. Естественно, что чем большее количество уровней используется, тем лучше результат, но и больше время, требуемое на обработку. На рис. 39 представлены ЦМР, полученные с использованием значения Terrain Detail 1 и 7.



Рис. 39. ЦМР, построенные с использованием различного количества масштабных уровней изображений

Output Data Туре – тип выходных данных.

На рис. 40 показана ЦМР, построенная с параметром Terrain Detail, заданным программой по умолчанию. Цифровая модель рельефа представлена в виде матрицы в формате geo tif с размером элемента 1 м. По умолчанию ЦМР отображается в полутоновом режиме, но можно применить одну из множества цветовых палитр, доступных в ENVI. Для смены цветовой палитры выберите Tools (в окне image)>Color Mapping>ENVI Color Table. Как видно на рис. 40, ЦМР водной поверхности озера имеет значительные перепады высот, что является дефектом, так как высотные отметки водной поверхности стоячего водоема должны быть постоянными на всей его площади. Для исправления высотных отметок на этапе редактирования ЦМР для выделенной «Области интересов» можно задавать значения высот вручную.



Рис. 40. Цифровая модель рельефа

Выполните редактирование ЦМР. Для этого выберите Load DEM Result to Display with Editing Tool (рис. 41).

DEM Extraction Wizard: Step 9 of 9
Examine DEM Result
Load DEM Result to Display
Load DEM Result to Display with Editing Tool
Finish Help Save < Prev Next ->

Рис. 41. DEM Extraction Wizard: Step 9 of 9

В открывшемся окне DEM Editing Tool задаются параметры редактирования ЦМР (рис. 42).

#3 DEM Editing Tool	
Region Of Interest Definition	
Window: 💿 Image 🔵 Scroll 🤅	🗇 Zoom 💿 Off
Type Polygon   Color	
Edit Pixel Values	Undo
Method Replace with value 💌	Edits: 0
Value	Undo Last Edit Undo All Edits
Apply to Region of Interest	
Apply to Entire Band	
Cancel Save Changes	

Рис. 42. DEM Editing Tool

В группе настроек Region of Interest задаются параметры региона интереса (тип полигона, цвет), в группе настроек Edit Pixel Values вводится значение высоты (Value) и выбирается метод коррекции ЦМР (Method). Replace With Value – замена на значение, введенное с клавиатуры (Value).

Replace With mean – усреднение высот внутри области интереса.

Smooth – сглаживание.

Median filter – используется медианная фильтрация значений, попавших в регион интереса.

Triangulate – значения высотных отметок внутри области интереса пересчитываются методом триангуляция Делоне с использованием высотных отметок в узлах полигона.

Thin Plate Spline – значения внутри области интересов являются интерполированными при помощи сплайнов значениями высот в узлах полигона области.

В группе настроек Region of Interest выберите Polygon и обведите водные объекты. Затем в поле Value введите значение высоты. Результат представлен на рис. 43.



Рис. 43. Исправленная цифровая модель рельефа

### Требования к отчету

Отчет должен быть оформлен согласно требованиям СТО СГУГиТ. Он должен содержать теоретические основы построения ЦМР по стереопаре снимков и краткое описание этапов построения ЦМР в программном комплексе ENVI, с соответствующими скриншотами. Для защиты лабораторной работы необходимо ответить на следующие вопросы.

1. Алгоритмы поиска соответственных точек.

2. Локальные и глобальные алгоритмы отождествления точек.

3. Основные этапы построения ЦМР по стереопаре космических снимков в программном комплексе ENVI.

### 5.4. Лабораторная работа № 4

## Ортотрансформирование космических снимков

Цель: выполнить ортотрансформирование космического снимка с использованием RPC-коэффициентов и ЦМР, построенной по стереопаре космических снимков.

Используемое программное обеспечение: ENVI.

Исходные данные: цифровая модель рельефа, космический снимок IKONOS, координаты опорных и контрольных точек, файл с изображениями опорных и контрольных точек.

ENVI позволяет использовать RPC-модель сенсора при выполнении ортотрансформирования космических снимков, полученных современными космическими системами высокого и сверхвысокого разрешения. Для выполнения ортотрансформирования кроме снимка требуются RPC-коэффициенты и цифровая модель рельефа.

#### Порядок выполнения работы

Процедура ортотрансформирования разбита на следующие этапы.

- 1. Запуск ENVI.
- 2. Загрузка исходного изображения и DEM (ЦМР).
- 3. Ортотрансформирование изображения.
- 4. Проверка результатов ортотрансформирования.

Загрузка исходного изображения и цифровой модели рельефа. Выполните загрузку в программу снимка po\_201905\_pan\_0000000.tif (снимок расположен в рабочей директории). Загрузите цифровую модель рельефа File>Open External File>Digital Elevation > USGS DEM.

*Ортотрансформирование изображения.* Для того чтобы приступить к выполнению ортотрансформирования снимка, необходимо выполнить загрузку модуля Orthorectification Map>Orthorectification>Orthorectify IKONOS. В открывшемся диалоговом окне выберите файл ро 201905 рап 0000000.tif и нажмите на OK.

Для обработки изображения понадобится файл с RPC-коэффициентами.

*Примечание:* если ENVI не сможет найти служебный файл, содержащий RPC-коэффициенты, система предложит пользователю самому указать его директорию.

Откроется диалоговое окно для ввода параметров ортотрансформирования (рис. 44).

Orthorectification Parameters	<b>X</b>
Image Resampling Bilinear Background 0 Input Height DEM 11 (None Selected> Select DEM File DEM Resampling Bilinear  Geoid offset 0.00	Output Projection and Map Extent         Upper Left Comer Coordinate         Image: Proj : UTM, Zone 41 North Datum: WGS-84         351723.1431       E         Change Proj         6309176.0103       N         Units: Meters         X Pixel Size       1.00000051         Y Pixel Size       1.0000002         Meters
Output Result to  File Memory Orthorectified Image Filename Choose OK Cancel	Output X Size 10352

Рис. 44. Диалоговое окно для ввода параметров ортотрансформирования

В диалоговом окне введите следующие параметры: Image Resempling – способ определения значений (интенсивности) пиксела в изображении IKONOS, когда оно будет преобразовано из текущего состояния в новое. По умолчанию будет использоваться Bilinear (билинейная интерполяция). Варианты выбора: Cubic Convolution (кубическая свертка), Nearest Neighbor (ближайший сосед).

Примечание: если размеры пикселов цифровой модели рельефа больше, чем размеры пикселов изображения, выбор метода ближайшего соседа может привести к нежелательным последствиям. В таких случаях рекомендуется выбирать другие способы интерполяции.

Значение в поле Background соответствует значению, которое будут иметь все граничные пикселы в результирующем изображении. Оставьте в поле значение, равное 0.

Input Height (исходная высота) указывает на то, будет ли использоваться при обработке изображения цифровая модель рельефа или фиксированное значение высоты. Оставьте отмеченной опцию DEM и нажмите на кнопку Select DEM (выбор DEM). В диалоговом окне выбора результирующего файла укажите файл, содержащий цифровую модель рельефа, который создан заранее.

DEM Resampling (дискретизация цифровой модели рельефа) – это метод, который будет использоваться для определения значения (интенсивности) пиксела для внутренней расчетной высотной версии изображения, которая имеет ту же самую ориентацию и размер пиксела, что и исходное изображение IKONOS. Оставьте отмеченную по умолчанию билинейную (Bilinear) дискретизацию.

Geoid Offset (отклонения геоида) – высота геоида относительно среднего уровня моря для территории, изображение которой обрабатывается. Это постоянная величина, которая прибавляется к каждому значению DEM для вычисления разницы между сфероидом среднего уровня моря, который используется в большинстве DEM, и поверхностью геоида. RPCкоэффициенты создаются на основе высот геоида, и эта информация необходима для обеспечения точности ортотрансформирования.

Save Computed DEM (сохранить вычисленную DEM) – параметр определяет, будет ли сохранена дискретизированная DEM, которая рассчитывается в процессе ортотрансформирования. Выберите «No».

В правой части диалогового окна находятся параметры, связанные со степенью и размерами пиксела получаемого изображения. По умолчанию значения рассчитываются, исходя из данных геопозиции исходного изображения IKONOS, которых обычно бывает достаточно. При желании можно

изменить проекцию для результирующего ортотрансформированного изображения, нажав на кнопку Change Proj...

Примечание: если информации о привязке нет в исходном файле, ENVI вычислит приблизительные значения, исходя из значений RPC коэффициентов.

Orthorectified Image Filename (имя файла ортотрансформированного изображения) – имя выходного файла. Введите имя IKONOS ortho.dat.

После выбора всех параметров нажмите на ОК для того, чтобы начать процесс ортотрансформирования.

На экране появится шкала прогресса, отражающая состояние запущенного процесса. Ортотрансформирование может занять несколько минут, в зависимости от мощности компьютера и размеров обрабатываемого изображения.

Когда процесс завершится, ортотрансформированное изображение станет доступно в списке окна AVAILABLE BANDS LIST.

Проверка результатов ортотрансформирования

1. Выведите на экран ортотрансформированное изображение в окне Display #2.

2. Сравните исходное изображение IKONOS с ортотрансформированным изображением, выполнив команду Tools>Link Displays>Link в меню окна Display #2.

3. Щелкните левой кнопкой мыши по одному из окон, чтобы увидеть другое изображение. Разница в ориентациях между двумя изображениями и есть результат процесса ортотрансформирования.

Выполните измерение величины смещения точек ортотрансформированного изображения относительно соответственных точек исходного снимка (выполнить для пяти пикселей из разных частей снимка).

Использованная для ортотрансформирования ЦМР имеет дефекты, которые приводят к искажениям очертаний объектов застроенной территории на ортотрансформированном снимке. Найдите несколько участков с такими искажениями.

### Требования к отчету

Отчет должен быть оформлен согласно требованиям СТО СГУГиТ и содержать теоретические основы ортотрансформирования снимков и краткое описание этапов построения ортофотоплана в программном комплексе ENVI с соответствующими скриншотами. Для защиты лабораторной работы необходимо ответить на следующие вопросы.

1. Обратное цифровое ортотрансформирование.

2. Что такое True Orto?

3. Смещения, вызванные перепадами высот местности и углом наклона космического снимка.

4. Основные этапы ортотрансформирования космических снимков в программном комплексе ENVI.

## 5.5. Лабораторная работа № 5

## PanSharpening

*Цель:* изучение теоретических основ методов слияния изображений и применение изученных методов на практике.

*Задачи:* выполнить обработку снимков с использованием методов PCA, Brovey, HSV, GrammaShmidt, результаты оформить в виде отчета.

Используемое программное обеспечение: ENVI.

Исходные данные: космический снимок IKONOS (в панхроматическом и спектральных каналах).

#### Порядок выполнения работы

Сначала необходимо открыть панхроматический и мультиспектральный снимки IKONOS (рис. 45).



Рис. 45. Панхроматический и мультиспектральный снимки IKONOS

Для слияния отдельных каналов снимка в единый файл программный комплекс ENVI имеет инструмент Layer Stacking (рис. 46), расположенный во вкладке Basic tools. Если каналы содержат информацию о привязке, то она будет использована автоматически, если нет, то необходимо задать систему координат и проекцию вручную.



Рис. 46. Окно Layer Stacking Parameters

Для добавления спектральных каналов используется кнопка Import file, после нажатия на нее появляется диалоговое окно Layer Stacking Input File, в котором необходимо указать спектральные каналы, из которых будет состоять файл (рис. 47, 48).



Рис. 47. Диалоговое окно Layer Stacking Input File

Q Layer Stacking Parameters	X
Selected Files for Layer Stacking: po_201905_nir_0000000 tif [Band 1] po_201905_red_0000000 tif [Band 1] po_201905_m_0000000 tif [Band 1] po_201905_tw_0000000 tif [Band 1]	Output Map Projection New Arbitrary Geographic Lat/Lon
	UIM State Plane (NAD 27) State Plane (NAD 83) Argentina - Zone 1 Argentina - Zone 2 Amentina - Zone 3
Import File Reorder Files Delete	Datum WGS-84
Output File Range: Inclusive: range encompasses all the files	Units Meters
Exclusive: range encompasses file overlap	Zone 41 🗢 💿 N 💿 S Set Zone
Output Result to 🔘 File 🛛 Memory	X Pixel Size 4.00000000 Meters
Enter Output Filename Choose	Y Pixel Size 4.00000000 Meters
	Resampling Nearest Neighbor
OK Cancel	

Рис. 48. Диалоговое окно LayerStacking

Файл необходимо сохранить в рабочую директорию.

Для выполнения слияния изображений применяется функция pansharpening программного комплекса ENVI, при этом инструменты для выполнения слияния изображений можно запустить из различных участ-ков меню программного комплекса. Например, Transform>image sharpening>pansharpening>metod (HSV, Brovey, Gramm Schmidt Spectral Sharpening, PC Spectral Sharpening, CN Spectral Sharpening) или Spectral>SPEAR Tools>Pan Sharpening, или Spectral>метод (Gramm-Schmidt Spectral Sharpening) или Spectral Sharpening.

ening, PC Spectral Sharpening, CN Spectral Sharpening). Для выполнения процедуры pansharpening выберите Transform > image sharpening>pansharpening>метод (HSV, Brovey, PCA, Gramm Schmidt). Необходимо выполнить слияние изображений с использованием первых четырех методов. Первый метод HSV(HSI): после выбора соответствующей вкладки программа предложит выбрать мультиспектральный (рис. 49) и панхроматический (рис. 50) снимки.



Рис. 49. Диалоговое окно выбора мультиспектрального снимка



Рис. 50. Выбор панхроматического снимка

Затем будет выведено диалоговое окно, в котором вы сможете выбрать директорию для сохранения изображения и метод интерполяции (рис. 51).

HSV Sharpening Parameters
Input RGB Bands: R: Layer (Band 1:po_201905_red_0000000.tif):1 G: Layer (Band 1:po_201905_gm_0000000.tif):1 B: Layer (Band 1:po_201905_blu_000000.tif):1
Resampling Cubic Convolution 💌
Output Result to 🖲 File 💿 Memory
Enter Output Filename Choose
C:\Users\пользователь\Desktop\hsv
OK Cancel

Рис. 51. Диалоговое окно выбора директории

Действия при использовании метода Brovey аналогичны.

При использовании метода Gram-Schmidt появляется диалоговое окно, позволяющее вносить параметры преобразования (рис. 52).



Рис. 52. Диалоговое окно настройки метода Gram-Schmidt

Для внесения в файл изображения информации о длинах волн каждого из каналов применяется инструмент Edit ENVI Header>Header Info Edit>Atributes Edit Wavelength (рис. 53). В окно Edit Selected Item впишите длину волны соответствующего канала (рис. 54).

Header Info:C:\Users\пользователь\Desktop\1		
File Size: 53,830,400 bytes		
Input Header Info From + Edit Allabutes +		
Samples 2588  Lines 2600  Bands 4		
Offset 0 🔷 xstart 1 🗢 ystart 1 🗢		
File Type ENVI Standard   Byte Order Host (Intel)	-	
Data Type Unsigned Int		
Create Layer File Result [Mon Jul 13 22:04:40 2015]	^	
	*	
OK Cancel		

Рис. 53. Диалоговое окно ввода параметров снимка

Carl Wavelength values		
Reset Current Wavelength Values:		
Layer (Band 1:po_201905_nir_0000000.tif): 0.80000 Layer (Band 1:po_201905_red_0000000.tif): 0.65000 Layer (Band 1:po_201905_gm_0000000.tif): 0.55000 Layer (Band 1:po_201905_blu_0000000.tif): 0.48000		
Edit Selected Item:		
Layer (Band 1:po_201905_nir_0000000)		
Wavelength/FWHM Units: Micrometers		
OK Cancel Import ASCII Clear		

Рис. 54. Диалоговое окно ввода длины волны

На рис. 55 показан пример результата применения PanSharpening.



Рис. 58. Результат PanSharpening:

*a*) фрагмент панхроматического снимка IKONOS (разрешение 1 м);  $\delta$ ) фрагмент мультиспектральногоснимка IKONOS (разрешение 4 м); *в*) фрагмент снимка IKONOS после процедуры PanSharpening (разрешение 1 м)

### Требования к отчету

Отчет должен быть оформлен согласно требованиям СТО СГУГиТ и содержать теоретическое описание использованных методов. Основные этапы обработки должны быть подробно описаны и проиллюстрированы соответствующими скриншотами. По результатам лабораторной работы должны быть сделаны выводы об эффективности использованных алгоритмов. Необходимо проанализировать результаты обработки, создать регион интереса во вьювере с мультиспектральным снимком, вывести статистику распределения яркости в спектральных каналах для каждого результата Pansharpening и сравнить с соответствующими показателями исходного изображения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебно-методическом пособии представлены некоторые алгоритмы цифровой фотограмметрии, которые реализованы в современных программных продуктах для обработки данных дистанционного зондирования. Часть рассматриваемых методов опирается и дополняет материал, изученный в предыдущих семестрах в рамках курсов «Фотограмметрия и дистанционное зондирование» и «Современные методы и средства фотограмметрии и дистанционного зондирования». Методические указания к выполнению лабораторных работ, представленные в практической части учебно-методического пособия, предоставляют возможность закрепить на практике знания, полученные обучающимися при освоении теоретического курса.

Учебно-методическое пособие призвано:

вырабатывать умение систематизировать и обобщать усвоенный материал;

– способствовать закреплению знаний, полученных обучающимися на лекциях и во время самостоятельной подготовки;

 – служить основой для самоконтроля знаний при изучении дисциплины «Цифровая фотограмметрия».

72
### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цифровые камеры для топографической аэрофтотосъемки 2013 [Электронный ресурс] // Ракурс. – 2025. – URL: http://www.racurs.ru/wiki/index.php/Цифровые\_камеры\_для\_топографической\_аэро фотосъемки\_2013.

2. Оптико-физический отдел 2007–2013 [Электронный ресурс] // Институт космических исследований РАН. – 2025. – URL: http://ofo.ikiweb.ru/publ/booklet 2.pdf.

3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модель и методы обработки изображений. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

4. Property of the large format digital aerial camera DMC II 2012 [Электронный pecypc] // ResearchGate. – 2025. – URL: https://www.researchgate.net/publication/276021205\_Property\_of\_the\_large\_format\_digital\_a erial\_camera\_DMC\_II.

5. Leica DMC III 2017 [Электронный ресурс] // GeoSpace. – 2025. – URL: https://www.geospace.co.za/wpcontent/uploads/2017/10/Leica\_DMCIII\_Brochure. pdf.

6. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир [Электронный ресурс] // АВТЭКС Санкт-Петербург. – 2025. – URL: http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf.

7. Взгляд изнутри: матрицы цифровых камер [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2025. – URL: http://geektimes.ru/post/253968/.

8. Как выглядит датчик CMOS под микроскопом? [Электронный реcypc] // ResearchGate. – 2025. – URL: http://cameralabs.org/3431-kakvyglyadit-datchik-cmos-pod-mikroskopom.

9. Цифровая обработка изображений в информационных системах : учеб. пособие / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор. – Новосибирск : НГТУ, 2000. – 168 с.

10. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М. : Техносфера, 2007. – 584 с.

11. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2 кн. – М. : Мир, 1982. – 670 с.

12. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

13. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.

14. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.

15. Спутники ДЗЗ [Электронный ресурс] // Иннотер. – 2025. – URL: https://innoter.com/sputniki/.

16. Космический аппарат «Ресурс-П» / А. Н. Кирилин, А. И. Бакланов, Р. Н. Ахметов, В. М. Федоров, Н. Р. Стратилатов, М. В. Новиков // Геоматика. – 2010. – № 4. – С. 23–26.

17. ULTRACAM EAGLE 4.1 [Электронный ресурс] // Vexcel imagin. – 2025. – URL: https://www.vexcel-imaging.com/brochures/UC Eagle 4.1 en.pdf.

18. Дистанционное зондирование с беспилотного воздушного судна: оборудование и обработка : монография / С. А. Арбузов, В. В. Дедкова, А. В. Комиссаров, В. Н. Никитин, А. В. Семенцов. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – 180 с.

19. Назаров А. С. Фотограмметрия : пособие для студ. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : ТетраСистемс, 2010. – 398 с.

20. Лобанов, А. Н., Буров М. И., Краснопевцев Б. В. Фотограмметрия : учеб. для втузов. – М. : Недра, 1987. – 308 с.

21. Чибуничев А. Г. Фотограмметрия : учеб. для вузов. – М. : Московский государственный университет геодезии и картографии, 2022. – 328 с. – EDN PNFVSS.

22. On RPC model of satellite imagery [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2025. – URL: https://www.researchgate.net/publication/248137804\_On\_RPC\_model\_of\_satellite\_imagery.

23. Программный комплекс обработки информации сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» / А. Е. Кузнецов, В. И. Побаруев, В. И. Пошехонов, О. А. Пресняков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 287–300.

24. Mapping of IKONOS Images Using Minimum Ground Control / P. Cheng, F. Gómez, M. Weber, C. Flingelli // Geoinformatics. – 2008. – Vol. 11– Pp. 52–57.

25. Mapping of QuickBird Images. Improvement in Accuracy since Release of First QuickBird / P. Cheng, D. Smith, S. Sutton // Geoinformatics. – 2005. – № 6. – Pp. 50–52.

26. Hanley H. B., Fraser C. S. Sensor Orientation for High-Resolution Satellite Imagery: Further Insights into Bias-compensated RPCs // XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. – July 2004. – Pp. 12–23.

27. Mapping Towns from QuickBird Imagery [Электронный ресурс] / GIM International. – URL: http://www.gim-international.com/issues/articles/id464-Mapping Towns from QuickBird Imagery.html. – Загл. с экрана.

28. Toutin T., Cheng P. Demystification of IKONOS // Earth Observation Magazine.  $-2000. - N_{2} 9 (7). - P. 17-21.$ 

29. Toutin T., Cheng P. QuickBird A Milestone for High-Resolution Mapping // Earth Observation Magazine. – 2002. – Vol. 11, № 4. – P. 14–18.

30. Method and apparatus for identifying scale invariant features in an image and use of same for locating an object in an image 2000 [Электронный ресурс] // GooglePatents. – 2025. – URL: https://patents.google.com/patent/US6711293B1/- en?inventor=David+G.+Lowe&oq=David+G.+Lowe.

31. Гук А. П., Иехия Хассан Мики Хассан, Арбузов С. А. Исследование точности автоматического измерения координат точек снимков с помощью масштабно-инвариантного преобразования SIFT // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 4, ч. 1. – С. 35–38.

32. Сонюшки А. В. Сравнение методов построения ЦМР по стереопарам космической съемки высокого пространственного разрешения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 1. – С. 43–52. – EDN TSXJWN.

33. Benchmarking of Multispectral Pansharpening: Reproducibility,Assessment, and Meta-Analysis [Электронный ресурс] // ResearchGate. – 2025. –URL:https://www.researchgate.net/publication/387397428\_Benchmarking\_of-\_Multispectral\_Pansharpening\_Reproducibility\_Assessment\_and\_Meta-Analysis.

### СОДЕРЖАНИЕ ФАЙЛА RPC

```
satId = "QB02";
bandId = "P";
SpecId = "RPC00B";
BEGIN GROUP = IMAGE
     errBias = 19.94;
     errRand =
                 0.16;
     lineOffset = 4196;
     sampOffset = 4204;
     latOffset = 54.8344;
     longOffset = 83.0995;
     heightOffset = 113;
     lineScale = 4218;
     sampScale = 4393;
     latScale = 0.0234;
     longScale = 0.0404;
     heightScale = 500;
     lineNumCoef = (
                +2.761271E-03,
                -3.072224E-02,
                -1.028630E+00,
                +4.165263E-03,
                -5.359907E-05,
                -8.715256E-05,
                +3.678947E-04,
                -2.958128E-04,
                -1.419593E-03,
                -4.110511E-06,
                +1.132993E-06,
                +1.017891E-06,
                -7.839431E-08,
                -1.589864E-07,
                -1.655401E-06,
                -2.160949E-06,
                +4.962138E-07,
                -8.687981E-06,
                +7.339841E-07,
                +1.142071E-06);
     lineDenCoef = (
                +1.00000E+00,
                +2.111245E-05,
                +1.376572E-03,
```

#### Продолжение приложения 1

```
+3.634040E-04,
           -4.821888E-08,
           +6.885399E-07,
           +1.333438E-06,
           -9.263498E-07,
           +1.698099E-06,
           +1.131046E-06,
           +2.103686E-07,
           -2.370590E-06,
           -1.416335E-07,
           +6.269583E-07,
           +1.950562E-06,
           +1.546882E-06,
           -1.521145E-06,
           +4.252932E-06,
           +1.013198E-06,
           -2.144031E-06);
sampNumCoef = (
           -2.406202E-03,
           +9.842813E-01,
           -2.959988E-02,
           +4.336420E-02,
           -3.327386E-04,
           +6.707702E-04,
           -4.781496E-04,
           +1.162012E-03,
           -1.220072E-05,
           +2.598437E-05,
           -1.117064E-06,
           +1.135672E-06,
           -2.459909E-07,
           +1.691040E-07,
           -3.917887E-07,
           +6.511295E-08,
           -3.828799E-07,
           +2.526496E-06,
           -2.905275E-07,
           -2.831164E-07);
sampDenCoef = (
           +1.00000E+00,
           +1.185508E-03,
           +2.767442E-04,
           -5.767579E-04,
           -2.141217E-07,
           -1.144067E-06,
```

#### Окончание приложения 1

```
+8.753136E-08,
                 +1.385107E-06,
                 -1.355571E-08,
                 -4.773501E-07,
                +3.010492E-08,
                 -9.962255E-07,
                 +4.585584E-07,
                +5.532211E-08,
                 -3.716872E-07,
                 +1.904359E-08,
                +1.035698E-07,
                +1.793737E-05,
                +3.178056E-08,
                +7.547142E-08);
END GROUP = IMAGE
END;
```

### СОДЕРЖАНИЕ ФАЙЛА TIL

```
bandId = "P";
numTiles = 1;
tileSizeX = 8400;
tileSizeY = 8400;
tileUnits = "Pixels";
tileOverlap = 0;
BEGIN GROUP = TILE 1
     filename = "080CT22055850-P2AS-052122175010 01 P001.TIF";
     ULColOffset = 0;
     ULRowOffset = 0;
     URColOffset = 8399;
     URRowOffset = 0;
     LRColOffset = 8399;
     LRRowOffset = 8399;
     LLColOffset = 0;
     LLRowOffset = 8399;
     ULLon = 83.06150994;
     ULLat = 54.85774377;
     URLon = 83.13995769;
     URLat = 54.85638629;
     LRLon = 83.13756415;
     LRLat = 54.81113045;
     LLLon = 83.05920399;
     LLLat = 54.81248566;
     ULX = 632328.30002688;
     ULY = 6080908.49999885;
     URX = 637367.70003490;
     URY = 6080908.49999878;
     LRX = 637367.70003464;
     LRY = 6075869.09999878;
     LLX = 632328.30002667;
     LLY = 6075869.09999886;
END GROUP = TILE 1
```

END;

# Приложение 3

# ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ

## Таблица П.З.1

#### Оценка точности

N⁰	SPOT		Landsat		Δx	Λv	$\Lambda x^2$	$\Lambda v^2$	mx	mv
точки	Х	У	Х	У		<u> </u>				

### Таблица П.3.2

#### Сводная таблица оценки точности результатов трансформирования

кол-во опорных точек	метод трансформирования	mx	my
18	polynomial 3		
18	polynomial 2		
9	polynomial 2		
18	polynomial 1		
6	polynomial 1		
18	RST		
4	RST		
18	Triangulation		
6	Triangulation		

Учебное издание

Арбузов Станислав Андреевич

# ЦИФРОВАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Редактор О. В. Георгиевская Компьютерная верстка В. А. Рыжовой

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997. Подписано в печать 16.05.2025. Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 4,71. Тираж 90 экз. Заказ 56. Гигиеническое заключение № 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8