



005053911

На правах рукописи

*Чер*

Чермошенцев Александр Юрьевич

ОЦЕНКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ  
КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

25.00.34 – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

25 ОКТ 2012

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (ФГБОУ ВПО «СГГА»).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
Широкова Тамара Антоновна.

Официальные оппоненты: Кузин Виктор Иванович,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБУН «Институт вычислительной математики и  
математической геофизики Сибирского отделения  
Российской академии наук»,  
Заведующий лабораторией математического мо-  
делирования процессов в атмосфере и гидросфере;

Кобзева Елена Александровна,  
кандидат технических наук,  
ООО «Технология 2000»,  
главный инженер.

Ведущая организация – ОАО «Сибирский научно-исследовательский и  
производственный центр геоинформации и при-  
кладной геодезии», г. Новосибирск.

Защита состоится 15 ноября 2012 г. в 12-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 в ФГБОУ ВПО «СГГА» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «СГГА».

Автореферат разослан 03 октября 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Середович В.А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 28.09.2012. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 101

Редакционно-издательский отдел СГГА  
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, Плеханова, 8

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* В последние годы отчетливо обозначились основные тенденции в области данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, особенно высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, а именно: появление на орбите новых спутников, значительное увеличение архива космических снимков на территорию многих стран, разработка и совершенствование программных продуктов для обработки космических снимков, снижение стоимости космических снимков.

Космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения заменяют или дополняют традиционные фотоснимки, а во многих случаях являются единственно возможным, безальтернативным источником исходных геопространственных данных.

Данные дистанционного зондирования, получаемые космическими съемочными системами высокого и сверхвысокого разрешения, нашли применение в самых разных областях деятельности человека. Запуск новых космических систем производится регулярно и характеристики систем совершенствуются довольно стремительно. Ежегодно на орбиту выводятся 10–20 спутников ДЗЗ. Только в 2011 году осуществлены запуски 19 гражданских, коммерческих и военных спутников для съемки Земли.

Большое разнообразие космических съемочных систем требует учета особенностей если не каждой из них, то, по крайней мере, принадлежащих одному разработчику, поскольку они могут значительно отличаться. Необходимость геометрической обработки космических снимков для получения высокоточной продукции обусловлена наличием достаточно большого числа искажений, возникающих в процессе формирования изображения под влиянием различных факторов, исследование которых является важной задачей.

Отсутствие стандартизованного и систематизированного свода правил по выбору программных продуктов для обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, равно как и законодательно утвержденных требо-

ваний к технологии выполнения этих процессов, требует разработки методики проведения исследований оценки точности данных ДЗЗ, а также методик выбора космических снимков для решения различных практических задач.

Учет особенностей космических снимков, полученных различными сенсорами, обеспечение соответствия исходных материалов поставленным задачам, выбор оптимальных параметров обработки служат залогом успеха получения на их основе необходимых конечных продуктов требуемой точности.

*Степень разработанности проблемы.* Исследования измерительных свойств космических снимков выполняются различными организациями многих стран мира. Этой тематике посвящены работы известных ученых: Гук А. П., Журкин И. Г., Погорелов В. В., Злобин В. К., Еремеев В. В., Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Jacobsen K., Dial G., Grodecki J., Toutin T., Fraser C. и др.

Проводимые в настоящее время работы посвящены, главным образом, исследованию точности, достигаемой при обработке космических снимков с использованием различных алгоритмов. Однако отсутствуют конкретные систематизированные рекомендации по выбору тех или иных снимков, программного продукта, метода обработки, минимального набора опорных точек.

В связи с этим требуется выполнить анализ существующих алгоритмов, средств и методов обработки космических снимков высокого разрешения для того, чтобы разработать единый подход к выбору исходных данных, средств и методов решения конкретной задачи в зависимости от поставленной цели.

*Цель и задачи исследования.* Цель диссертационной работы заключается в разработке методики исследования измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения и разработке методики выбора технологических схем их обработки для получения топографической продукции с заданными метрическими характеристиками.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

– провести анализ математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения, используемых для обработки космических снимков высокого разрешения;

– выполнить исследования измерительных свойств космических снимков высокого разрешения (оценить внутреннюю метрическую точность измерений) в зависимости от различных вариантов исходных данных;

– разработать методику исследования измерительных свойств космических снимков высокого разрешения;

– выбрать оптимальные технологические схемы получения топографической продукции на основе обработки космических снимков различного типа.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования служат космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения. Предметом исследования являются математическая модель спутниковых изображений, параметры обработки космических снимков, влияющие на измерительные свойства космических снимков, такие как количество и взаимное расположение опорных точек и др.

*Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования.* В работе использованы методы цифровой обработки изображений, аналитической и цифровой фотограмметрии.

Базой для исследования являются выполненные ранее эксперименты в области обработки космических снимков высокого разрешения для создания топографической продукции различного назначения. При проведении экспериментальных работ использованы космические снимки сверхвысокого разрешения IKONOS, QuickBird, WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1, геодезические координаты опорных точек.

Для выполнения исследований использовались программные комплексы PHOTOMOD 4.4, PHOTOMOD 5, Geomatica 10.3, ERDAS 9.1, ENVI 4.5, INPHO.

*Основные положения диссертации, выносимые на защиту:*

– методика исследования измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения;

– технологические схемы получения различной топографической продукции на основе обработки космических снимков различного типа.

*Научная новизна результатов исследования* заключается в следующем:

– разработана методика исследования измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, отличающаяся использованием комплексных материалов, включающих как наземные опорные данные, так и материалы съемок, выполненных другими съемочными системами;

– разработаны технологические схемы выбора программных продуктов и методов обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения для получения топографической продукции.

*Практическая значимость работы.* Практическая ценность работы заключается в следующем:

– выполнен сравнительный анализ математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения, используемых для обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения и предложены рекомендации по применению тех или иных моделей;

– выполненные практические исследования измерительных и изобразительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения позволяют сформулировать общие требования к исходным данным для решения поставленных задач;

– предложены практические рекомендации по выбору математических моделей и опорных точек для обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения;

– применение комплексного критерия для оценки измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения позволяет автоматизировать процесс проектирования, сократить трудозатраты, повысить точность обработки.

Практическая значимость работы состоит в том, что рекомендации по обработке космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения для целей крупномасштабного картографирования использованы при создании ортофотопланов по космическим снимкам QuickBird, WorldView-1, WorldView-2 и GeoEye-1 на территорию 27 населенных пунктов Болотнинского района Новосибирской области.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертация соответствует п. 3 «Теория, технология и технические средства сгущения по аэрокосмическим снимкам геодезических сетей, создания и обновления топографических, землеустроительных, экологических, кадастровых и иных карт и планов» паспорта научной специальности 25.00.34 – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия», разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ.

*Апробация и реализация результатов исследования:* Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение: на VI Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2010», 19–23 апреля 2010 г., г. Новосибирск; на Международном студенческом форуме «ГЕОМИР – 3S 2010», 21–25 сентября, 2010 г., г. Новосибирск; на VII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2011», 27–29 апреля 2011 г., г. Новосибирск; на VIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», 10–20 апреля 2012 г., г. Новосибирск.

Разработанные методики и рекомендации использованы при выполнении научно-исследовательских работ по теме: «Разработка технологии и методов создания реалистичных трехмерных моделей техногенных и природных объектов на основе комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли». Номер государственной регистрации НИР: 5.5834.2011.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс СГГА и используются при изучении специальных дисциплин студентами специальностей «Аэрофотогеодезия» и «Исследование природных ресурсов аэрокосмическими средствами».

*Публикации по теме диссертации.* Основное содержание работы отражено в 9 опубликованных статьях, две из которых – в рецензируемых журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 130 страниц печатного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа содержит

12 рисунков, 15 таблиц, 6 приложений и список использованных источников из 107 наименований.

Диссертация и автореферат диссертации оформлены в соответствии с СТО СГГА 012-2011.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*В первом разделе* рассмотрены современные космические съемочные системы высокого и сверхвысокого разрешения, их основные характеристики, геометрические искажения космических снимков, получаемых этими системами, приведены методы предварительной обработки космических снимков и выполнен их анализ.

Отмечается, что с 2000 г., космические системы высокого и сверхвысокого разрешения стали доступны для широкого круга пользователей. Постоянно увеличивается число этих систем, повышается разрешающая способность на местности. Космические снимки по изобразительным свойствам и точности определения координат стали сопоставимы с аэрофотоснимками, что позволило частично заменить традиционную аэрофотосъемку для решения задач составления и обновления топографических, кадастровых и специальных карт, выполнения детального мониторинга территорий. При практическом использовании космических снимков всегда возникает вопрос: какую съемочную систему использовать т. е. какой тип снимков выбрать?

Для решения этого вопроса необходимо выбрать критерий эффективности применения снимков, полученных той или иной съемочной системой.

Необходимость геометрической обработки космических снимков для получения высокоточной продукции обусловлена наличием достаточно большого числа искажений, возникающих в процессе формирования изображения под влиянием различных факторов, исследование которых является важной задачей.

Поставляемые космические снимки сверхвысокого разрешения могут иметь различный уровень обработки. Изображения с начальным уровнем обра-

ботки характеризуются минимальными исправлениями и пригодны для трансформирования с применением строгой модели, однако минимальная площадь местности в пределах таких изображений по условиям поставщиков космических снимков должна составлять сотни квадратных километров, что часто превышает потребности заказчиков и приводит к дополнительным финансовым затратам. К наиболее распространенным относятся снимки, прошедшие геометрическую коррекцию для учета систематических ошибок и приведенные к картографической проекции без учета влияния рельефа. Указанные уровни обработки космических снимков сверхвысокого разрешения с практической точки зрения наиболее интересны, так как при их использовании можно добиться максимальной точности создания различных видов топографической продукции.

Анализ многочисленных публикаций показал, что нет четких рекомендации по выбору тех или иных космических снимков, программного продукта, метода, количества и расположения опорных точек для обработки спутниковых изображений высокого и сверхвысокого разрешения. Поэтому задача систематизации и обобщения результатов исследований, посвященных точности обработки космических снимков сверхвысокого разрешения, актуальна до сих пор.

*Во втором разделе* выполнен анализ математических моделей, используемых для обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения.

Самый точный метод обработки космических снимков, выполняемой с целью цифрового трансформирования или ортотрансформирования, требует учета геометрических параметров сенсора в момент формирования каждой строки изображения. Классический фотограмметрический метод ортотрансформирования основан на построении цифровой модели рельефа по снимкам стереопары и трансформировании одного из двух изображений с введением поправок за рельеф. Однако получение стереопар космических снимков не всегда представляется возможным, и в большинстве случаев производится обработка одиночных снимков. Сложная геометрия космических систем, отсутствие характеристик внутреннего и внешнего ориентирования сенсора приводит к тому, что

выбор строгой модели не является предпочтительным. Поэтому в последние десятилетия было разработано большое число различных аппроксимирующих моделей. Широко используются обобщенные модели, в виде рациональных функций, прямого линейного преобразования (DLT), параллельного проектирования и др.

В результате установлено, что различные математические модели используют разные группы данных, такие как коэффициенты рациональных полиномов, опорные точки, полученные в результате полевых геодезических измерений, с топографических карт, либо по снимкам более высокого разрешения. Для оценки точности определения координат по космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения предложена технологическая схема исследования их измерительных свойств (рисунок 1).

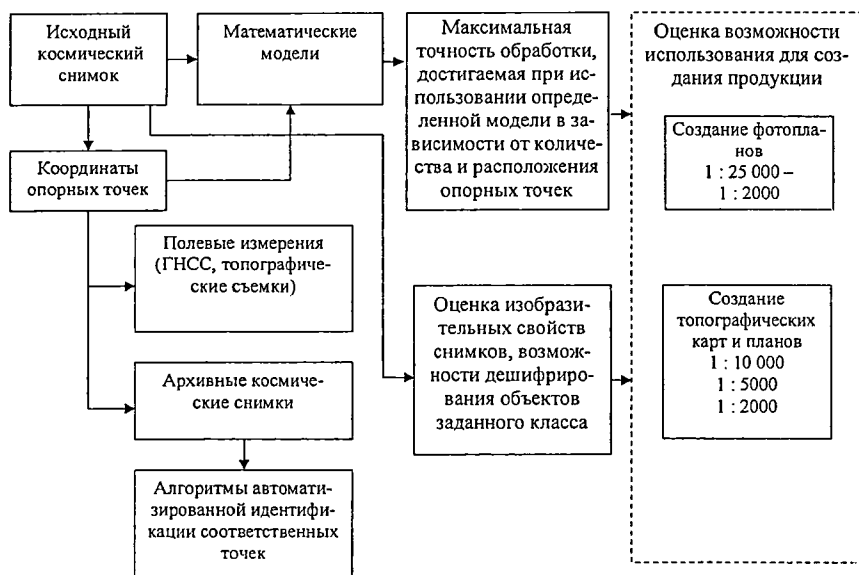


Рисунок 1 – Технологическая схема исследования измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения

При создании топографических или других типов карт по снимкам необходимо, чтобы снимки обеспечивали:

- возможность получения информации об объектном составе, который отображается на карте. Объектный состав определяется инструкцией по созданию топографических карт и условными знаками соответствующего масштаба;
- возможность определения координат точек местности с точностью, необходимой для отображения на карте.

При выборе съемочной системы необходимо учитывать геометрическую точность определения положения контуров и объектов на карте и, конечно, большую роль играет такой фактор как стоимость выполнения работ.

Для оценки эффективности применения космических снимков определенного типа введем комплексный критерий:

$$Q = \sum_{i=1}^n p_i \cdot \bar{x}_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – весовой коэффициент;

$\bar{x}_i$  – параметр, характеризующий эффективность.

В комплексный критерий может входить различное количество параметров, среди которых выделим основные, обеспечивающие принципиальную возможность использования снимков для решения задачи, и производные – факторы, обеспечивающие получение основных параметров в процессе съемки и обработки изображений.

Предлагается использовать следующие параметры:

- процентное соотношение требуемого и возможного получения объектного состава в результате камерального дешифрирования снимков;
- затраты, необходимые для получения требуемой точности определения координат;
- стоимость исходных материалов и время, необходимое для получения материалов съемки;

- трудозатраты и время, необходимое для получения продукции;
- потенциальная возможность дальнейшего использования исходных материалов и результатов их обработки.

Задача численной оценки каждого критерия и получения оценки обобщенного критерия весьма сложная. Действительно, значение каждого критерия зависит как от исходных материалов, так и от технологии обработки данных. Вклад каждого из параметров в обобщенный критерий определяется весовым коэффициентом  $p$ , который изменяется в зависимости от целевой функции – например, приоритетной важности того или иного фактора – стоимости, времени, необходимого для создания продукта, и т. д.

*Геометрическая точность.* Основополагающим параметром, влияющим на выбор исходных материалов, средств и методов их обработки является вид создаваемой продукции и его точность, которая, как правило, определяется масштабом соответствующих топографических карт и планов. В зависимости от требуемой точности выбирается разрешение снимков, рассчитывается требуемое количество опорных точек для их обработки с использованием определенного алгоритма.

*Точность опорных данных.* Опорные данные для обработки могут быть получены с использованием имеющихся топографических карт и планов либо путем геодезических измерений. Основная часть затрат в случае крупномасштабного картографирования приходится на определение координат опорных точек. Стоимость привязки космического снимка зависит от количества необходимых опорных точек с известными геодезическими координатами. Для их определения наиболее целесообразно применять спутниковые навигационные системы. При наличии картографических материалов, обеспечивающих точность определения координат точек местности на порядок выше, чем точность создаваемой продукции, возможно их использование для получения опорных данных. Также для трансформирования исходных снимков целесообразно использовать космические снимки более высокого разрешения и аэрофотоснимки,

так как они позволяют идентифицировать максимальное количество точек, которые можно использовать в качестве опорных.

*Наличие и полнота вспомогательных данных.* В зависимости от того, какие вспомогательные данные имеются для каждого снимка, определяется метод, с помощью которого может быть обработан данный снимок. Наиболее точные результаты могут быть получены с помощью метода RPC, менее точные – с помощью аппроксимационных моделей. Обработка космических снимков менее трудоемка, чем обработка аэроснимков. Наибольшую сложность представляет получение цифровой модели рельефа, которая может быть создана на основе сторонних источников (топографических карт), поскольку использование для этих целей стереопар космических снимков является более затратным и требует выполнения новой съемки. Исходные материалы, а именно – координаты опорных точек, цифровые модели рельефа, необходимые для ортотрансформирования снимков, могут использоваться в дальнейшем для обработки снимков на ту же территорию для целей мониторинга.

*Информационная емкость (изобразительные свойства)* определяется, главным образом наличием спектральных каналов, их количеством, степенью распознавания объектов. Информативность космических снимков, возможность распознавания как можно большего количества объектов и их свойств зависит от качества изображений, пространственного и радиометрического разрешения, количества спектральных каналов, а также величины отражающей способности самих объектов.

На основе анализа точности обработки космических сформулированы основные требования к параметрам исходных материалов космической съемки и приведены технологические схемы создания топографической продукции по космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения (рисунок 2).



Рисунок 2 – Технологическая схема создания цифровой топографической продукции по космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения

В третьем разделе описаны исследования измерительных и изобразительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения.

Экспериментальные работы выполнены по космическим снимкам сверхвысокого разрешения IKONOS, QuickBird, WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1. Исследования проводились для оценки возможности создания по космическим снимкам конкретного типа следующих топографических материалов: фотопланов, ортофотопланов и ортофотокарт, цифровых моделей рельефа, топографических карт и планов.

Исследование измерительных свойств космических снимков выполнялось с использованием математических моделей обработки космических снимков, реализованных в программных комплексах ERDAS 9.1, ENVI 4.4, PHOTOMOD 4.4, Geomatica 10.3 и INPHO.

В рамках исследований выполнено определение координат точек местности по космическим снимкам при использовании одинакового количества опорных точек, равномерно распределенных по всей площади снимков, с целью установления оптимального количества точек для каждого метода обработки. Также исследовано влияние расположения опорных точек на точность обработки снимков при количестве опорных точек, обеспечивающем более высокие показания точности.

Обработка снимков производилась на основе одних и тех же результатов измерений координат точек изображений с использованием различных математических моделей. Анализ результатов (таблицы 1 и 2) показывает, что при использовании метода RPC средние квадратические ошибки (СКО) планового положения контрольных ( $m_{L,км}$ ) точек, соответствующие размеру пикселя изображения (0,5 м), могут быть достигнуты при наличии минимум 1 опорной точки.

Таблица 1 – Результаты обработки снимков WorldView-1

Метод обработки снимков	Количество опорных точек	Снимок 1	Снимок 2
		$m_{L,км}$ , М	$m_{L,км}$ , М
DLT	6	1,69	3,40
	7	0,81	1,58
	8	0,95	1,35
Параллельно-перспективное преобразование	6	2,59	1,80
	7	1,61	1,82
	8	0,76	1,23
RPC	0	8,16	8,64
	1	0,47	0,39
	2	0,38	0,27
	3	0,40	0,16
	4	0,42	0,26
	5	0,38	0,24
	6	0,38	0,60
	7	0,38	0,21
	8	0,38	0,25

Аппроксимационные методы требуют для своей работы как минимум 6 опорных точек. При одинаковом количестве опорных точек метод RPC обеспе-

чивает более высокую точность обработки снимков. Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о целесообразности использования метода RPC для обработки снимков сверхвысокого разрешения GeoEye-1 и WorldView-1 при небольшом количестве опорных точек. Алогичные выводы получены при обработке снимков QuickBird и IKONOS.

Таблица 2 – Результаты обработки снимков GeoEye-1

Метод обработки снимков	Количество опорных точек	Снимок 1	Снимок 2
		$m_{LxM}, M$	$m_{LxM}, M$
DLT	7	1,33	1,27
	8	1,34	1,18
	9	1,12	1,07
Параллельно-перспективное преобразование	7	1,41	1,53
	8	0,62	1,13
	9	1,26	1,33
RPC	0	3,47	3,50
	1	0,33	0,45
	2	0,36	0,49
	3	0,31	0,42
	4	0,31	0,33
	5	0,32	0,29
	6	0,30	0,28
	7	0,38	0,35
	8	0,38	0,27
9	0,35	0,31	

В результате исследований точности обработки снимков GeoEye-1 и WorldView-1, выполненных в программном продукте PHOTOMOD с использованием метода RPC, можно сделать вывод, что метод рациональных функций для обработки космических снимков сверхвысокого разрешения является на сегодняшний момент наиболее эффективным по сравнению с аппроксимационными, так как он обеспечивает более высокую точность и требует небольшого количества опорных точек.

На основе анализа результатов выполненных исследований выработаны практические рекомендации по выбору количества опорных точек в зависимости от метода обработки космических снимков сверхвысокого разрешения и масштаба создаваемого фотоплана (рисунок 3).

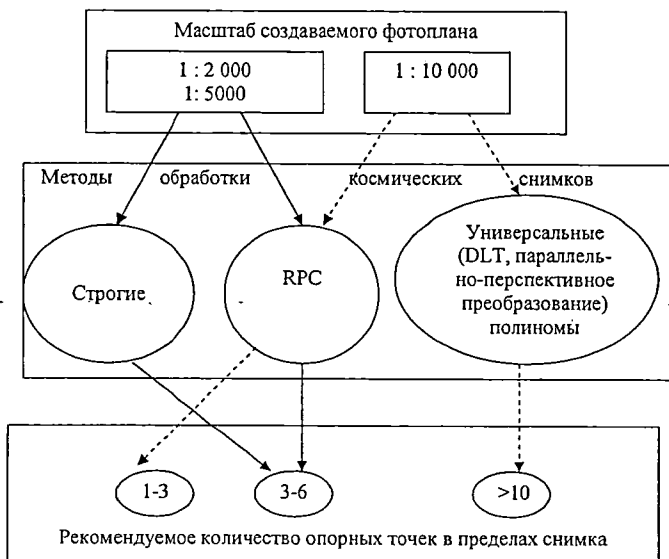


Рисунок 3 – Рекомендуемое число опорных точек для обработки космических снимков сверхвысокого разрешения в зависимости от масштаба создаваемого фотоплана

Одним из основных факторов, вызывающих смещения положения точек на космических снимках сверхвысокого разрешения, является рельеф местности. Значительные углы отклонения оптической оси космической съемочной системы от надира существенно «снижают» пороговое значение перепада высот, при котором смещениями точек под влиянием рельефа местности можно пренебречь.

В соответствии с требованиями, приведенными в Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, ошибки создания цифровой модели рельефа (ЦМР) не должны приводить к смещениям точек более 0,3 мм в масштабе ортофотоплана. Предельная величина этих ошибок вычисляется по формуле:

$$\Delta h_{\text{пред}} = 0,3M_k / \text{tg}\alpha, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол отклонения проектирующего луча от вертикали;

$M_k$  – знаменатель масштаба создаваемой карты или плана.

Если перепад высот точек местности не превышает удвоенной величины  $\Delta h_{\text{пред}}$ , то для создания карт и планов заданного масштаба трансформирование снимков производится на среднюю горизонтальную плоскость. В остальных случаях необходимо выполнять ортотрансформирование снимков.

Поскольку космические снимки сверхвысокого разрешения используются главным образом для создания крупномасштабных фотопланов, в таблице 3 приведены значения смещений точек на фотоплане масштаба 1 : 2 000 под влиянием рельефа местности.

Таблица 3 – Ошибки планового положения (мм) точек на фотоплане масштаба 1 : 2 000 в зависимости от превышения точек над средней плоскостью и угла отклонения оптической оси от надира

Угол отклонения оптической оси от надира	Превышение точек местности над средней плоскостью, м							
	2	5	10	15	30	50	100	150
5°	0,1	0,2	0,4	0,7	1,3	2,2	4,4	6,6
10°	0,2	0,4	0,9	1,3	2,6	4,4	8,8	13,2
15°	0,3	0,7	1,3	2,0	4,0	6,7	13,4	20,1
20°	0,4	0,9	1,8	2,7	5,5	9,1	18,2	27,3
25°	0,5	1,2	2,3	3,5	7,0	11,7	23,3	35,0
30°	0,6	1,4	2,9	4,3	8,7	14,4	28,9	43,3

Как следует из таблицы 3, смещения, вызванные рельефом местности с перепадом высот 10 м и более, необходимо учитывать при трансформировании снимков, полученных со значительными углами (более 5°) отклонения оптической оси от надира.

Цифровые модели рельефа, используемые для обработки космических снимков, могут быть созданы:

- на основе построения геометрической модели местности по паре перекрывающихся космических снимков;
- с использованием геометрической модели местности, полученной по результатам аэрофотосъемки;
- по результатам векторизации горизонталей с топографической карты;
- по данным воздушного лазерного сканирования;
- на основе данных радарной съемки.

В ходе исследований в программном продукте ENVI выполнена обработка двух космических снимков IKONOS и двух снимков WorldView-1 с пространственным разрешением 0,8 и 0,5 м на территорию населенных пунктов сельского типа с применением разных данных для построения ЦМР. В таблице 4 приведены допустимые погрешности определения высот точек местности по ЦМР для ортотрансформирования космических снимков с точностью создания планов масштаба 1 : 2 000.

Таблица 4 – СКО определения планового положения контрольных точек по ортотрансформированным космическим снимкам

Снимок	Перепад высот в пределах снимка, м	Угол отклонения оптической оси от надира, °	$\Delta h_{\text{пред}}$ , м	СКО планового положения контрольных точек $m_{\Delta L}$ на фотоплане, м				
				Без ЦМР	SRTM	ЦМР, построенная по горизонталям с сечением, м		
						5	1	
IKONOS	20	24	1,35	8,23	1,08	0,71	0,66	
	16	29	1,08	2,83	1,17	0,89	0,60	
WorldView-1	17,5	9	3,79	6,15	0,82	0,49	0,46	
	17,5	22	1,49	1,31	0,91	0,68	0,68	

Результаты проведенных исследований показали, что при использовании ЦМР, построенной по горизонталям с топографической карты с сечением рельефа 1 м, точность ортотрансформирования соответствует требованиям, предъявляемым к планам масштаба 1 : 2 000. Применение общедоступных ЦМР SRTM обеспечивает точность ортотрансформирования масштаба 1 : 5 000 и мельче.

В работе проведено исследование изобразительных свойств космических снимков IKONOS, QuickBird, WorldView-1, WorldView-2 и GeoEye-1 с целью определения возможности дешифрирования объектов при создании и обновлении топографических карт и планов. Анализ результатов показал, что объем распознаваемых объектов по космическим снимкам сверхвысокого разрешения при камеральном дешифрировании может достигать 80 %.

Немаловажным является точность визирования на точки снимков, определяющая точность их привязки, а также точность нанесения объекта на карту. Ошибка визирования зависит от таких факторов, как разрешение космического снимка, тип наблюдаемого контура, масштаб изображения, опыт наблюдателя. При обработке стереопар космических снимков с целью создания ортофотопланов и ЦМР необходимо учитывать точность визирования на точки модели как в плане, так и по высоте.

На основании исследований, проведенных с использованием снимков GeoEye-1, можно сделать вывод, что для решения таких задач, как привязка космических снимков сверхвысокого разрешения, в качестве опорных точек следует выбирать элементы дорожной разметки, основания деревьев, углы малозэтажных зданий, так как при наблюдении этих объектов обеспечивается наиболее высокая точность визирования. При обработке стереопары космических снимков не рекомендуется принимать в качестве опорных точки береговой линии, а также углы и пересечения ограждений, так как точность визирования по высоте на них самая низкая по сравнению с точностью стереонаблюдения на другие объекты.

Использование обобщенных рекомендаций по выбору программных продуктов, методов обработки космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, сформулированных на основе информации, приведенной в литературных источниках, и проведенных практических исследований, позволит повысить эффективность работы пользователей данных дистанционного зондирования, так как правильный выбор программных продуктов, алгоритмов, количества, размещения и типа опорных точек обеспечивает повышение точности,

скорости и экономичности обработки космических снимков сверхвысокого разрешения с целью создания топографической продукции крупного масштаба (фотопланов, цифровых моделей рельефа, топографических карт и планов).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа современных методов обработки космических снимков высокого разрешения было выявлено, что для оценки возможности использования космических снимков необходимо проводить специальные исследования измерительных и изобразительных свойств снимков, полученных каждой съемочной системой. Основные результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, следующие:

- разработана методика исследования измерительных свойств космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения, основанная на использовании комплексных материалов, включающих наземные опорные данные и материалы съемок, выполненных другими съемочными системами;
- разработаны технологические схемы выбора программных продуктов и методов обработки космических снимков высокого разрешения для получения топографической продукции;
- предложены рекомендации по обработке космических снимков высокого разрешения (QuickBird, WorldView-1, WorldView-2 GeoEye-1) для крупномасштабного картографирования территории;
- разработанные методики внедрены в учебный процесс кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования СГГА;
- рекомендации по обработке космических снимков сверхвысокого разрешения для целей крупномасштабного картографирования использованы при создании ортофотопланов по космическим снимкам QuickBird, WorldView-1, WorldView-2 и GeoEye-1 на территорию 27 населенных пунктов Болотнинского района Новосибирской области.

## СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1 Широкова, Т. А. Исследование точности обработки космических снимков сверхвысокого разрешения с использованием рациональных функций [Текст] / Т. А. Широкова, А. Ю. Чермошенцев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 2. – С. 99–103.

2 Чермошенцев, А. Ю. Разработка практических рекомендаций по повышению качества обработки космических снимков сверхвысокого разрешения [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // Геодезия и картография. – 2012. – № 7. – С. 51–56.

3 Чермошенцев, А. Ю. Исследование точности определения координат точек местности по космическим снимкам сверхвысокого разрешения [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // ГЕО-Сибирь-2010. Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. Ч. 1 : сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010», 19–29 апреля 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 66–71.

4 Чермошенцев, А. Ю. Создание ортофотопланов по космическим снимкам сверхвысокого разрешения для эффективного управления территориями муниципальных образований [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // ГЕО-Сибирь-2011 Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология : сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 60–66.

5 Чермошенцев, А. Ю. Обновление топографических планов масштаба 1:5 000 с использованием космических снимков сверхвысокого разрешения [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. научн. конгр. 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 28–32.

6 Chermoshentsev, A. Yu. Accuracy assessment of GeoEye-1 image orthorectification / A. Yu. Chermoshentsev, A. E. Pinegina // SSGA, 3S, 2010. – PP. 23–26.

7 Широкова, Т. А. Исследование точности визирования на точки космических снимков высокого и среднего разрешения [Текст] / Т. А. Широкова, А. Ю. Чермошенцев, А. Т. Бармитова // Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии) : науч.-техн. журн. – 2010. – № 2(13). – С. 31–36.

8 Чермошенцев, А. Ю. Исследование влияния рельефа местности на точность ортотрансформирования космических снимков сверхвысокого разрешения [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии) : науч.-техн. журн. – 2011. – № 2(15). – С. 58–61.

9 Чермошенцев, А. Ю. Исследование возможности использования космических снимков сверхвысокого разрешения для целей кадастра сельскохозяйственных угодий [Текст] / А. Ю. Чермошенцев // Сборник научных трудов аспирантов и молодых ученых Сибирской государственной геодезической академии. – Новосибирск: СГГА, 2010. – Вып. 7. – С. 19–24.