На правах рукописи

ПОГОРЕЛОВ ВЯЧЕСЛАВ ВИКТОРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБНОВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЦИФРОВЫХ КАРТ И ПЛАНОВ ГОРОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦФС «ORTHO/NEVA»

Специальность 25.00.34 –
аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2009

Диссертационная работа выполнена на кафедре аэрофотогеодезии Государственного университета по землеустройству.

Научный руководитель: доктор технических наук
Чекалин Владимир Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Нехин Сергей Степанович
кандидат технических наук
Воронин Евгений Геннадьевич

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский и производственный центр «Природа», ФГУП «Госцентр «Природа»**

Защита диссертации состоится « 26 » ноября 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064 г. Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан « 10 » октября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета Б.В.Краснопевцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Большая часть картматериалов России создана в 80-х годах прошлого века и нуждается в обновлении. Причем более целесообразно обновлять не бумажные топографические карты, а цифровую продукцию по материалам космической съемки с применением современных ЦФС, что и определяет актуальность выбранной темы диссертации.

Геометрические свойства цифровых спутниковых изображений радикальным образом отличаются от геометрии изображения традиционных аналоговых аэрофотоснимков. Это требует разработки соответствующих методов и средств их обработки. В этой связи, по инициативе автора, на Сев. - Кав. АГП в период 2005 - 2006 г.г. была разработана и внедрена ЦФС «Ortho-Neva», которая предназначена для обработки космических снимков высокого разрешения. В разработке и внедрении ее на производство АГП автор принимал непосредственное участие [6].

Объект исследования и предмет исследования. Объектом исследования являются методы и технологии обновления картографической продукции по материалам ДЗЗ. Предметом исследования являются основные этапы процесса обновления крупномасштабных цифровых карт и планов городов по космическим изображениям с применением серийной ЦФС «Ortho/Neva».

Цель и задачи исследования. В процессе поиска и анализа темы диссертационной работы было выявлено, что ввиду сравнительно небольшого срока внедрения на производство ЦФС «Ortho/Neva» остается открытым вопрос о ее реальной точности и рентабельности применения для обновления крупномасштабной картографической продукции по материалам космического ДЗЗ. В этой связи целью диссертационной работы является научный анализ, совершенствование методов и технологии данной системы при обновлении цифровых карт и планов городов масштабов 1:5 000 – 1:25 000 по материалам космической съемки высокого разрешения и апробация ее основных научных

положений. Для достижения поставленной цели в диссертации определены следующие **задачи**:

1.Анализ правовых, научных и экономических аспектов задачи обновления цифровых карт и планов городов масштабов 1:5 000 – 1:25 000 на сельскохозяйственные районы и городские территории страны:

-оценка современного состояния национальной координатной основы крупномасштабных цифровых карт и планов городов России;

-оценка уровня программного обеспечения, функциональных возможностей и технических характеристик ЦФС «Ortho/Neva»;

-экспериментальное определение значений элементов внутреннего ориентирования наиболее распространенных на рынке ДЗЗ России спутниковых изображений.

2.Подготовка планово-высотной основы территории картографического проекта:

-разработка, исследование и реализация на ЦФС «Ortho/Neva» метода создания локального Datum'а на основе аффинного преобразования систем координат: МСК и СК WGS-84;

-теоретическое обоснование и апробация способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению.

3.Исследование методов 3D-моделирования рельефа:

-исследование существующих методов 3D-моделирования по традиционной схеме: TIN-модель ↔ ЦМР;

-теоретическое обоснование альтернативной методики генерации ЦМР на основе кригинг-процесса высот дискретных точек, орографических линий и динамических GPS-треков.

4.Апробация основных научных положений диссертации:

-экспериментальное исследование технологии обновления цифровой карты г. Сочи масштаба 1:25 000 с применением ЦФС «Ortho/Neva»;

-исследование основных экономических показателей технологии обновления крупномасштабных цифровых карт и планов городов с применением ЦФС «Ortho/Neva».

Методы исследования. Решение поставленных задач выполнено с использованием методов цифровой фотограмметрии, картографии, математической статистики и вычислительной геометрии. Для проверки правильности основных научных положений разработанной технологии обновления использован экспериментальный метод исследований.

Экспериментальные исследования осуществлены с помощью цифровой системы «Ortho/Neva» и картографической системы «Neva», имеющихся на производстве Сев.-Кав. АГП, с использованием производственных материалов космической съемки.

Научная новизна. Основные результаты диссертационной работы, представляющие научную новизну и выносимые на защиту:

-научный анализ современного состояния задачи обновления картографической продукции, по результатам которого установлен факт отсутствия в России на текущий момент времени единой координатной основы для крупномасштабного картографирования;

-методика быстрой генерации ЦМР путем проведения кригинг-процесса на основе разнообразной информации о высотах точек местности;

-методика подготовки планово-высотного обоснования территории картографического проекта, базирующаяся на создании для каждого района работ своего локального Datum'а. Обоснование теоретических положениий предложенного способа определения параметров локального Datum'а на основе аффинного преобразования исходной системы координат;

-теоретическое обоснование и результаты апробации строгого способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению, позволяющего повысить точность фотограмметрических определений;

-результаты экспериментальных работ с целью определения ранее неизвестных значений элементов внутреннего ориентирования снимков 10-ти наиболее распространенных спутников ДЗЗ;

-результаты экспериментальных работ по обновлению цифровой карты масштаба 1:25 000 на регион г. Сочи по космическим снимкам Alos высокого разрешения;

-результаты исследования экономической эффективности разработан-ной технологии обновления крупномасштабных цифровых карт и планов городов с применением ЦФС «Ortho/Neva» на основе обработки космических снимков высокого разрешения.

Практическая значимость работы. Разработанные методы и технология обработки цифровых изображений ЦФС «Ortho/Neva» позволяют обновлять цифровые карты и планы городов масштабов 1: 5 000 – 1: 25 000 по космическим снимкам высокого разрешения: GeoEye, WorldView-1, QuickBird, IKONOS, SPOT-5, OrbView-3, Alos, IRS.

Апробация работы и реализация результатов исследования.

Основные результаты исследований опубликованы в 3-х научных статьях и 2-х докладах на научно-технических конференциях.

В настоящее время в Сев.-Кав. АГП с использованием разработанной технологии ЦФС «Ortho/Neva» осуществляются производственные работы по обновлению цифровых топографических карт и планов городов масштабов 1: 5 000 – 1: 25 000. За период 2006-2009г.г. выполнены проекты по обновлению цифровой картографической продукции на территорию Северного Кавказа общей площадью свыше 140 000 км^2.

Основные научные положения диссертации реализованы в программном обеспечении ЦФС «Ortho/Neva».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы - 119 страниц машинописного текста, 34 рисунка и 21 таблица. Список литературы включает 104 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** дана общая постановка проблемы, обоснована актуальность задачи обновления цифровых карт и планов городов масштабов 1:5 000 – 1:25 000, сформулирована цель работы и предмет исследования, определены научные задачи исследования.

В **первой главе «Современное состояние задачи обновления картографической продукции в России»** выполнен анализ современного состояния задачи обновления картографической продукции в России. По результатам анализа установлено, что в стране отсутствует единая координатная основа для обновления крупномасштабной картографической продукции и выбран путь решения этой задачи.

Сформулированы обобщенные требования к конечной продукции. На их основе определены целесообразные к обработке виды исходных материалов дистанционного зондирования Земли.

Производен анализ существующих средств обновления с целью определения их соответствия требованиям обработки космических изображений высокого разрешения. Показана целесообразность использования для решения этой задачи ЦФС «Ortho-Neva».

В открытой печати практически отсутствуют сведения о геометрической модели сенсоров спутниковых съемочных систем, необходимых для строгой фотограмметрической обработки их изображений. Поэтому автором, на основе данных тестового полигона, был выполнен ряд экспериментальных исследований на ЦФС «Ortho/Neva» по обработке снимков наиболее распространенных спутников с целью определения значений их элементов внутреннего ориентирования.

Использование материалов и данных космического ДЗЗ имеет несколько взаимосвязанных аспектов, включая правовой, научный и экономический, которые исследованы и учтены при разработке методов и технологии процесса обновления.

Официально в настоящее время в качестве опорных систем координат России приняты СК–95 и СК ПЗ–90, а также большое количество местных систем координат (МСК). Однако на практике в территориальных инспекциях государственного геодезического надзора (ТИГГН’а) исполнителями картографических проектов, в соответствии с требованиями заказчиков, по-прежнему востребованы каталоги пунктов государственной триангуляции в системе СК-63. Но данная система, с закрытыми ключами перехода к старой

базовой системе СК-42, юридически заменена системой СК-95, которая уже показала недостаточную свою практическую востребованность пользователями.

На основе анализа состояния национальной координатной основы выявлено несоответствие между требуемой точностью обновления картографической продукции масштабов 1:5 000 – 1:25 000 и реальной возможностью сохранения точности исходных полевых при использовании существующих координатных систем России. Установлена необходимость создания для каждого района работ своего локального Datum'a, устанавливающего непосредственную связь между геодезическими координатными системами МСК и СК WGS-84.

Во **второй главе «Исследование основных этапов обновления крупномасштабных цифровых карт и планов городов с применением ЦФС «Ortho/Neva»** представлены результаты теоретических исследований, направленные на совершенствование основных этапов технологии обновления крупномасштабной цифровой картографической продукции. Традиционный подход к 3D-моделированию рельефа местности заключается в реализации технологической схемы: TIN-модель ⇔ ЦМР, которая включает следующие этапы (см. рис. 1).

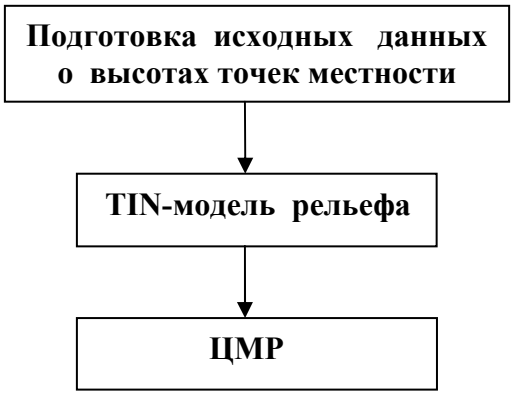

Рис.1. Традиционное 3D-моделирование рельефа местности.

В начале подготовительного этапа производится сбор и систематизация всей имеющейся информации о рельефе местности на территорию района картографирования. Далее на основе этой информации строится

триангуляционная модель высот точек (TIN-модель рельефа) в виде нерегулярных треугольников. Обычно для этой цели используется метод Делоне, который обеспечивает построение треугольников, наиболее близких к правильному виду.

В TIN-моделях рельефа точки располагаются таким образом, чтобы на основе исходного массива данных построить многогранную поверхность, которая наилучшим образом “огибает” земную поверхность. Исходные точки местности соединяются прямыми отрезками, образующими треугольники, внутри которых земная поверхность аппроксимируется плоскостью. Треугольники соединены между собой и поэтому TIN-поверхность рельефа непрерывна. Отличительной особенностью и преимуществом TIN-моделей рельефа является то, что в них нет преобразований исходных высот. Поэтому в моделях рельефа этого типа нет привнесенных ошибок, которые содержат ЦМР, построенные на базе интерполяционной функции исходных данных.

TIN-модели рельефа обладают и другими преимуществами по сравнению с ЦМР. В первую очередь, это то, что расположение точек в них адаптировано по отношению к земной поверхности: на равнинных участках точки расположены реже, а гористых – чаще. Поэтому структуры данных в TIN-моделях более компактны и экономичны: растровой ЦМР из десятков тысяч точек может соответствовать адекватная по морфологическим характеристикам TIN-модель рельефа из сотен точек.

На следующем этапе путем преобразования сети треугольников точек TIN-модели рельефа создается регулярная матрица высот ЦМР. Эта модель рельефа используется для решения задач ГИС-анализа и выполнения ортотрансформирования. Причем в последнем случае фигурируют две матрицы высот: исходная и конечная. Исходная матрица загружается при создании рабочего проекта, конечная непосредственно используется для получения ортоизображения. Шаг исходной матрицы – произвольный, для конечной матрицы он выбирается, исходя из разрешения снимка. Перед началом ортотрансформирования исходная ЦМР преобразуется таким образом,

чтобы каждая ячейка получаемой конечной ЦМР пространственно соответствовала размеру пикселя создаваемого ортоизображения.

Модель рельефа в виде ЦМР имеет свои преимущества перед другими моделями: которые выражаются в быстроте работы алгоритмов интерполяции данных, обусловленной простотой их организации.

Ошибки преобразования высот ЦМР традиционно и вполне оправдано рассматривается как главный фактор, снижающий точность 3D-моделирования рельефа на их основе:

$$\sigma_H^2 = \sigma_{исх.}^2 + \sigma_{преобр.}^2, \qquad (1)$$

где $\sigma_{исх.}$ - ср. кв. погрешность исходных данных;

$\sigma_{преобр.}$ - ср. кв. погрешность преобразования TIN-модели рельефа в ЦМР.

Указанные ошибки можно существенно уменьшить, если применить альтернативный метод построения ЦМР непосредственно на основе массива исходных данных. Из анализа математического описания известных методов генерации ЦМР автор выбрал и выполнил теоретические и экспериментальные исследования метода кригинг-процесса, который обеспечивает более высокую точность создания ЦМР за счет отсутствия процесса ошибок преобразования TIN-модели рельефа. Вместо них в кригинг-процессе присутствует погрешность интерполяции исходных данных, которые меньше $\sigma_{преобр.}$ по величине и поддается априорной оценке:

$$\sigma_H^2 = \sigma_{исх.}^2 + \sigma_{интер.}^2. \qquad (2)$$

Кригинг-процесс – это метод статистического прогнозирования высот в узлах ЦМР путем анализа исходных данных. По его результатам выявляются локальные закономерности в скорости изменения высот исходных точек, находящихся в ближайшей окрестности размера r вокруг определяемой узловой точки.

1.В кригинг-процессе каждое имеющееся значение высоты точки и ее достоверность ассоциируются с понятием вариации. При этом за аксиому принимается утверждение, что любое измерение, даже вполне достоверное,

содержит в своем значении статистическую оценку - (статистику) $\gamma(d)$, которая называется вариацией высоты.

По определению вариация – это неопределенность значения высоты определяемого узла, изменяющаяся от 0 до 1 (по нормализованной шкале) в пределах отрезка d, соединяющего ее с известной точкой. Если значение высоты абсолютно точно известно, то ее вариация $\gamma(d) = 0$. Напротив, если какое-то измерение высоты является абсолютно недостоверным, ее вариация $\gamma(d) = 1$. Математические модели вариации высоты в пределах от 0 до 1 могут быть линейного, параболического или экспоненциального типа. Наиболее простой является линейная модель изменения уровня неопределенности $\gamma(d)$ высоты узловой точки.

2.Указанные закономерности количественно выражаются значениями уровня неопределенности (вариации) высот исходных точек и фиксируются в виде вариограмм. При этом каждое известное значение высоты H_a из набора исходных данных имеет вариационную функцию $\gamma(d_i)$, которая определяется по значениям известных высот в окрестности определяемого узла:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)}\left[\sum_{i=1}^{N(d)}\left\{(H_i - H_{i+r}) - \frac{(H_i - H_{i+r})}{N(d)}\right\}^2\right]. \qquad (3)$$

Вариограммы высот исходных точек имеют свои минимумы, совпадающие с известными точками, и максимумы - при выходе за пределы окрестности.

3.На основе значений последних составляется система коррелат для определения весов известных точек в окрестности определяемой:

$$\begin{aligned} W_1\gamma(d_{11}) + W_2\gamma(d_{12}) + W_3\gamma(d_{13}) &= \gamma(d_{1p}) \\ W_1\gamma(d_{21}) + W_2\gamma(d_{22}) + W_3\gamma(d_{23}) &= \gamma(d_{2p}), \\ W_1\gamma(d_{31}) + W_2\gamma(d_{32}) + W_3\gamma(d_{33}) &= \gamma(d_{3p}) \end{aligned} \qquad (4)$$

где $\gamma(d_{ij})$ - вариация изменений высоты между известной точкой i и определяемой точкой j поверхности, находящейся на расстоянии d_{ij}.

4.С учетом вычисленных весов производится интерполяция высоты текущего узла регулярной сетки ЦМР по методу среднего взвешенного:

$$H_i(p) = \sum W_i \bullet H(p_i) \qquad (5)$$

Описанным способом определяются высоты всех узлов ЦМР, несмещенные в пределах выделенной области r, и обеспечивается стационарность процесса генерации поверхности рельефа.

5.При оценке точности создания ЦМР значение ошибки интерполяции $\sigma_{интер.}$ определяется в соответствии с зависимостью:

$$\sigma^2_{интер.} = \sum W_1 \gamma(d_{ip}) \qquad (6)$$

Производственные испытания предложенного способа построения ЦМР были выполнены автором путем моделирования поверхности рельефа по точкам 1-го сегмента и горизонталям векторной карты масштаба 1:25 000 в районе г. Сочи. Анализ результатов моделирования рельефа показал, что кригинг-процесс обеспечивает хорошие результаты в горной местности в том случае, когда на участке картографирования имеется избыточная информация о высотах точек местности.

В случае недостатка данных, при построении ЦМР могут возникнуть неадекватные грубые «выбросы» в определении высот ее отдельных узлов (рис.2).

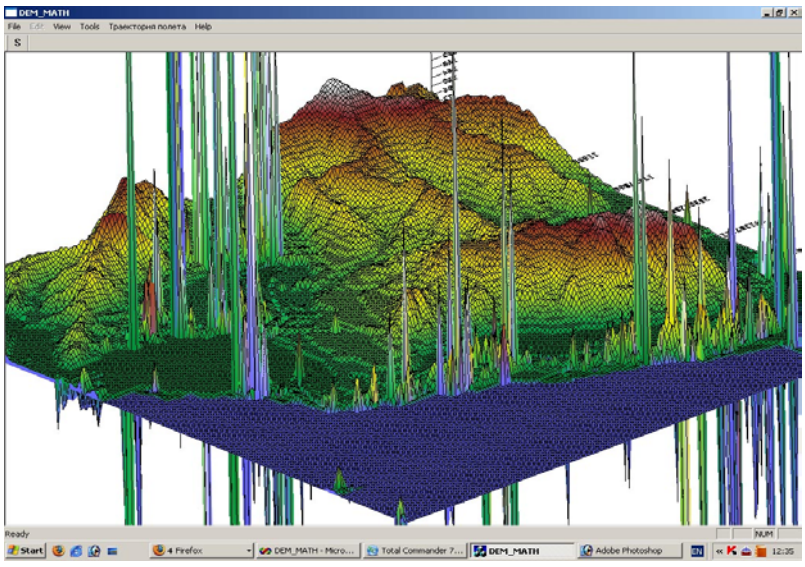

Рис.2. ЦМР для района Кавказа с неадекватными «выбросами» высот.

Путем анализа массива исходных данных выявлены соответствующие места, в которых недостаточно информации о рельефе. На рис. 3 такие места

(на равнинных участках) отмечены белыми контурами. Как показала практика, избавиться от подобных ошибок возможно путем введения дополнительной информации о высотах точек, а также путем

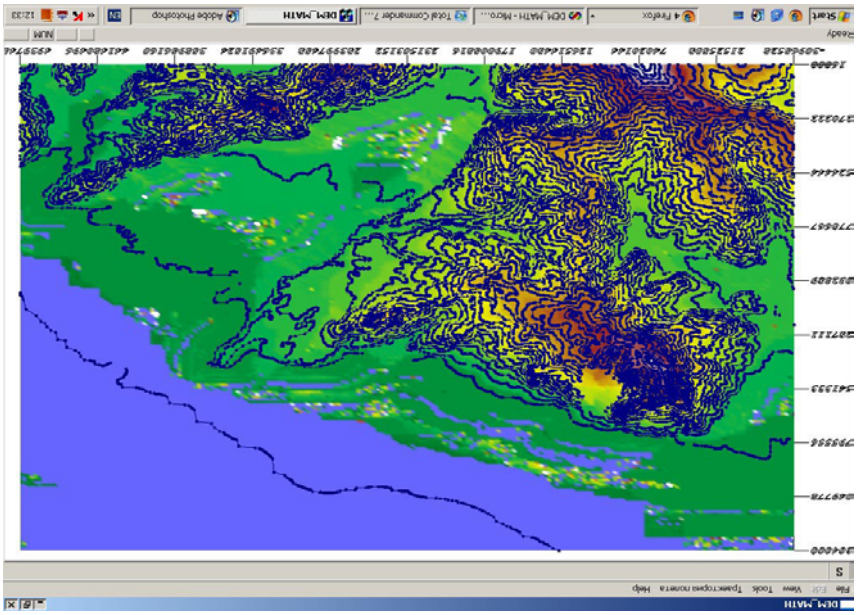

Рис.3. Места с недостатком информации отмечены белыми контурами.

увеличения размера r окрестности для текущего узла ЦМР.

В настоящее время работы по обеспечению планово-высотным обоснованием (ПВО) района картографических работ в крупном масштабе осуществляются на базе GPS-измерений. В этой связи, как было указано выше, возникает задача преобразования различных геодезических координатных систем и, в частности, задача перехода от системы геодезических координат BLH эллипсоида WGS-84 к местным системам координат МСК различных регионов нашей страны и обратно.

Существующими ГОСТ и нормативными документами по методикам преобразования геодезических координат точек рекомендован переход от одной геодезической системы к другой осуществлять на основе их ортогонального преобразования с применением строгих зависимостей Гельмерта или их упрощенного варианта в виде кососимметрической матрицы.

В случае использования метода Гельмерта на преобразованные координаты переносятся внутренние деформации исходной системы координат. Т.е. при переходе в направлении: WGS-84 $\Rightarrow$ МСК сохраняется высокая внутренняя точность исходной системы. При этом происходит наилучшая с позиции

способа наименьших квадратов вставка преобразованных положений используемых пунктов ГГС в сетку координат системы МСК. При обратном переходе точность положения данных пунктов ГГС не улучшается.

Таким образом, при помощи данного преобразования результаты GPS-измерений обычно могут быть преобразованы в местные системы координат МСК с наименьшими общими смещениями и одновременно с наименьшими внутренними деформациями исходных координат. Поэтому ортогональное преобразование широко применяется на практике.

Однако, в некоторых регионах страны внутренние деформации местных систем координат МСК, как производных системы СК-42, носят нелинейный характер, которые плохо учитываются ортогональным преобразованием. Поскольку малое количество параметров преобразования не может адекватно описать все многообразие существующих деформаций базовой системы СК-42. Поэтому в некоторых случаях ортогональное преобразование координат может не дать нужной точности согласования указанных систем координат.

Наконец, практическое решение данной задачи осложняется тем обстоятельством, что лучшие известные геокалькуляторы как российского производства – “Transco”, «Геомастер», так и зарубежного – “Pinacle”, “ERDAS” и др. реализуют необходимые вычисления в два этапа по схеме:

входная система $\Rightarrow$ базовый эллипсоид $\Rightarrow$ выходная система

При этом в качестве базового эллипсоида принимается:

- в России: общеземной эллипсоид ПЗ-90;
- за рубежом: общеземной эллипсоид WGS-84.

При использовании указанных вычислительных средств должны быть введены параметры связи базового эллипсоида с входными и выходными системами. В случае МСК задача трансформирования координат на основе ортогонального преобразования становится неопределенной, поскольку координатная система ПЗ-90 не обеспечена пока официальными параметрами перехода к системам МСК.

По этой причине целесообразно построить новую вычислительную схему, которая связывает обе системы координат непосредственно напрямую:

входная система $\Rightarrow$ выходная система

Для этой цели автором предложено использовать общее аффинное преобразование пространственных прямоугольных систем координат [1].

Для сравнительного анализа точностных характеристик исследуемых методов преобразования координат автором были осуществлены две схемы вычислений: на основе преобразования Гельмерта и с использованием предложенного метода аффинных преобразований.

Результаты вычислений по методу Гельмерта

Вычисленные параметры локального Datum'a:

$\Delta X =$ 202 786. 790 м; $\Delta Y =$ 9 039.837 м; $\Delta Z =$ - 6 234 498.739 м;
$\omega_X = 0^0\ 03'\ 56.''840$; $\omega_Y = -\ 35^0\ 04'\ 08.''426$; $\omega_Z = 61^0\ 32'\ 37.''090$
$m =$ 1.000 000

Оценка точности согласования систем координат:

$СКО_X = \pm$ 0.075 м $СКО_Y = \pm$ 0.053 м $СКО_{X,Y} = \pm$ 0.092 м
$\underline{СКО_H = \pm 0.090\ м}$

Результаты вычислений по методу аффинного преобразования

Алгоритм представляет собой линейное преобразование систем координат МСК $\leftrightarrow$ WGS-84 на основе зависимостей вида:

$$\begin{matrix} X^* = a_{11}X_г + a_{12}Y_г + a_{13}Z_г + a_{14} \\ Y^* = a_{21}X_г + a_{22}Y_г + a_{23}Z_г + a_{24} \\ H^* = a_{31}X_г + a_{32}Y_г + a_{33}Z_г + a_{34} \end{matrix} = M \cdot \begin{pmatrix} X_г \\ Y_г \\ Z_г \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{vmatrix}, \qquad (7)$$

где матрица M представляет матрицу направляющих косинусов в функции от углов поворота ω_X, ω_Y, ω_Z одной системы координат относительно другой. Вектор $(X_г Y_г Z_г)$ представлен в геоцентрической системе координат общеземного эллипсоида WGS-84.

Оценка точности согласования систем координат:

$СКО_X = \pm$ 0.039 м $СКО_Y = \pm$ 0.002 м $СКО_{X,Y} = \pm$ 0.039 м
$\underline{СКО_H = \pm 0.027\ м}$

Вычисленные углы поворота:

ω_Y = - 36^0 19’ 59.76”, ω_X = 0^0 01’ 06.91”, ω_Z = - 62^0 30’ 44.59”.

Сравнительный анализ результатов выполненных экспериментальных исследований позволяет сделать следующий вывод.

Разработанный метод аффинного преобразования устанавливает связь систем координат МСК и WGS-84 примерно такого же порядка – в плане и по высоте. При этом метод обеспечивает достаточную точность определения параметров локального Datum’а на участке местности размером 50 х 50 км. К его премуществам относится то, что данный способ является более универсальным и точность определения параметров локального Datum’а не зависит от типа и взаимного положения систем координат.

При планировании современного развития городских территорий необходима информация о высотах зданий. В настоящее время на практике используются два способа определения высот зданий по изображению одиночного снимка: путем подсчета количества этажей, изобразившихся на наклонной стороне здания, и на основе измерения длины тени здания на местности. Оба способа имеют ограничения по практическому применению и дают примерно одну и ту же приближенную оценку высоты здания, хотя и по разным причинам.

В настоящей работе разработан более точный и производительный способ определения высот зданий на основе результатов непосредственного измерения длины боковой стороны здания по изображению, известным значениям ЭВО снимка и высотам точек местности (участка ЦМР) в районе измеряемого здания

На ЦФС в каждый момент времени, с дискретностью Δt, величина которой обусловливается быстродействием процессора используемого компьютера, решаются два строгих уравнения связи пиксельных координат точки сканерного снимка и геодезических координат соответственной точки местности:

$$x - x_0 = -f\frac{\bar{a}_1(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_1(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_1(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}{\bar{a}_3(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_3(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_3(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}; \qquad (8)$$

$$y - y_0 = -f\frac{\bar{a}_2(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_2(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_2(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}{\bar{a}_3(X - X_S - \bar{X}_S) + \bar{b}_3(Y - Y_S - \bar{Y}_S) + \bar{c}_3(Z - Z_S - \bar{Z}_S)}.$$

Принимая во внимание огромные значения тактовой частоты процессоров у современных компьютеров ЦФС, можно с большой долей достоверности утверждать, что вычисления на них производятся практически в реальном времени. Следовательно, на основе результатов решения уравнений (8) для любой точки ориентированного сканерного снимка может быть установлено однозначное соответствие между входными значениями геодезических координат X_i, Y_i, Z_i точек местности и вычисляемыми величинами пиксельных координат x_i, y_i их изображений:

$$X_i\, Y_i\, Z_i \;\Rightarrow\; x_i\, y_i. \qquad (9)$$

В рассматриваемой задаче для каждого измеряемого здания мы имеем дело с двумя точками: подножием здания 1 и его карнизом 2. Для точки 1 известны все параметры уравнений (8), поскольку ее геодезическая высота Z_1 определяется из ЦМР в районе здания по исходным плановым геодезическим координатам X_1, Y_1 (рис. 4).

Таким образом, задача определения высоты здания по одиночному космическому снимку сводится к измерению пиксельных координат x_2, y_2 точки карниза здания и последующему решению системы из 2-х уравнений вида (8) с одним неизвестным - Z_2.

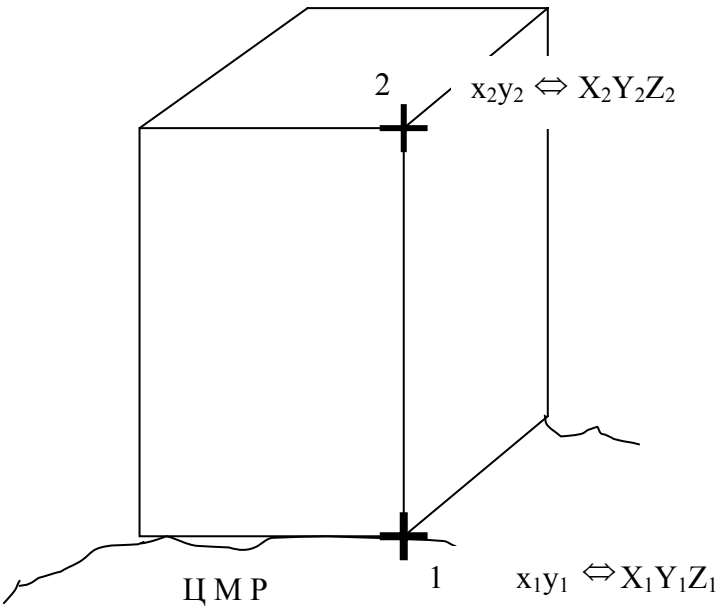

Рис.4. Измерение высоты здания.

Другими словами, необходимо решить прямую фотограмметрическую

засечку для точки 2 – карниза здания. Разность значений аппликат Z точек подножия и карниза здания дает его искомую высоту:

$$h = Z_2 - Z_1 . \qquad (23)$$

Алгоритм решения данной задачи состоит из следующих операций.

Выполняется внешнее ориентирование снимка по измерениям координат опорных точек и загрузка ЦМР на участок местности в районе измеряемого здания.

- В ЦМР находится значение высоты точки местности Z_1 для подножия здания по ее плановым координатам X_1,$У_1$.
- На основе решения уравнений вида (22) для точки подножия здания устанавливается однозначное соответствие координат точки на снимке и местности вида (21). При этом курсор наводится по изображению на т.1 подножия здания.
- Оператор постепенно изменяет значение аппликаты Z_1 в сторону ее увеличения. Поскольку смещение точки на снимке из-за влияния рельефа происходит вдоль направления к точке надира, то курсор начнет двигаться на изображении вверх по ребру наклонной стороны здания до тех пор, пока он не будет наведен на карниз здания. В этот момент времени на основе решения уравнений вида (22 устанавливается аналогичное соответствие координат для т.2 на крыше здания. В результате становится известным значение высоты Z_2. Производится решение конечного уравнения (23).

Данный алгоритм реализован в программном обеспечении ЦФС «Ortho/ Neva» в виде специальной утилиты и используется при выполнении картографических проектов на территорию городов, где требуется определение высот зданий.

Практическая проверка предложенного в диссертации способа проводилась путем определения высот $(h)_i$ 16 тестовых зданий г. Пятигорска по их изображению на снимке QuickBird и сравнения их с данными h_i наземных измерений (см. таблицу 1).

Таблица 1

Номер здания	Δ_h= (h)-h	Номер здания	Δ_h= (h)-h	Номер здания	Δ_h= (h)-h	Номер здания	Δ_h= (h)-h
1	- 0.4	5	+0.6	9	+ 0.5	13	-0.6
2	-0.8	6	+0.4	10	-0.5	14	-0.7
3	+0.3	7	+0.7	11	-0.4	15	+0.8
4	-0.7	8	-0.3	12	+0.4	16	-0.5

$\mu_h = \pm 0.60$ м

Результаты сравнения вычисленных и тестовых высот h показывают, что точность предложенного метода зависит от точности определения ЭВО сканерного снимка и точности наведения курсора на контур здания. Причем при использовании в качестве ОТ GPS-точек величина последней ошибки преобладает. В целом, по результатам данного эксперимента точность определения зданий колебалась в пределах 0.3–0.8 м.

На основании сказанного можно сделать обобщающий вывод.

С учетом результатов проведенного в АГП эксперимента можно утверждать, что точность предложенного метода определения высот зданий по одиночному космическому снимку сканерного типа составляет порядка 0.5 – 1.2 pxl в масштабе обрабатываемого изображения. Это в 2 раза выше точности известного способа определения высот зданий по теням или этажам и более, чем в 6 раз выше способа определения высот с использованием RPC-полиномов.

Предложенный способ имеет ограничения по применению только для снимков, снятых в надир.

Экспериментально исследовано теоретическое и экономическое обоснование разработанной технологии обновления векторной карты масштаба 1:25 000 с применением ЦФС «Ortho/Neva». В этой связи выполнены работы по созданию локального Datum’а на район г. Сочи, определению элементов внешнего ориентирования спутникового изображения Alos, построения TIN-

модели рельефа по горизонталям с карты масштаба 1:25 000 и создания ортоизображения. Сравнение полученного ортоизображения с соответствующими фрагментами векторной карты показывает, что точность ее обновления на основе описанной технологии находится в пределах графической точности: $СКО_{x,y} = \pm$ 0.2 мм.

Полученные в процессе экспериментальных работ результаты подтверждают правильность сформулированных в диссертации основных теоретических положений.

В **третьей главе** дан анализ экономической эффективности технологии обновления цифровых карт и планов городов с применением ЦФС «Ortho/Nava».

Для обновления картографической продукции на производстве ФГУП «Сев. - Кав. АГП» до последнего времени использовались материалы аэросъемки. С целью сравнения эффективности новой и традиционной технологий были выполнены экспериментальные работы по обновлению цифровых карт с использованием космических снимков. Для выполнения картографического проекта был выбран горный район в окрестностях г. Пятигорска, ограниченный 48 номенклатурными листами масштаба 1:10 000, общей площадью порядка 1 000 км^2. В перечень выполняемых работ входили: подбор необходимых исходных материалов, создание цифровых ортофотопланов по космическим изображениям, оценка их точностных и дешифровочных характеристик, а также сравнение этих параметров и сметных затрат с аналогичными параметрами в традиционной технологии.

При расчетах использованы данные СУР-2002, изд. 2003г., табл.11.7 по созданию цифровых ортофотопланов по материалам аэрофотосъемки 4-й категории трудности. Стоимость создания цифровых ортофотопланов по материалам космической съемки были определены прямым расчетом, с использованием Временных норм на создание ортофотопланов по космическим фотоснимкам с помощью системы «Ortho/Neva», утвержденных приказом генерального директора ФГУП «Сев. - Кав. АГП» 01.08.06 года. Для более точного сравнения расчеты на создание ортофотопланов по космическим

снимкам были приведены к уровню 2003 года с минимальной заработной платой в размере 700 рублей и единым социальным налогом в размере 37,4%. Размер накладных расходов составлял 40% и рентабельность - в пределах 10%.

Создание цифровых ортофотопланов по традиционной технологии состоит из следующих основных производственных процессов:

Таблица 2

Наименование	Стоимость снимков, руб.	Стоимость работы, руб.	Трудозатраты, техн/мес.
Создание цифровых ортофотопланов м-ба 1:10 000 по материалам аэро-фотосъемки м-ба 1:25 000, f=152 мм	827 000	447 482	6.64

Для создания цифровых ортофотопланов были выбраны 5 космических цветных изображений со спутника QuickBird съемки 2006г., с уровнем начальной обработки Basic, наиболее сравнимых по дешифровочным свойствам с материалами аэросъемки (R = 0.6 м). Планово-высотная подготовка района работ производилась путем определения по векторным картам геодезических координат опорных точек в картографической системе Нева. Для внешнего ориентирования космических снимков использовалось 20-25 опорных точек для каждого кадра. Построение TIN-моделей рельефа производилось по оцифрованным в системе Нева горизонталям, формат . DXF, сечение рельефа 5 м.

Соответствующая технологическая схема включает следующие основные процессы:

1. Получение и преобразование к исходному виду материалов космической съемки.
2. Подготовка схемы расположения опорных точек для внешнего ориентирования космических снимков в программе «PHOTOSHOP».

3. Планово-высотная подготовка района картографирования.
4. Создание TIN-моделей рельефа по горизонталям векторной карты масштаба 1:10 000 в цифровой системе «Ortho/Neva».
5. Ортотрансформирование космических изображений в системе «Ortho/Neva» и создание картографической основы по цифровым ортоизображениям.
6. Полевое обследование обновленной картографической основы.

Контроль точности полученных ортофотопланов ($СКП_{общ}$ = ± 2.1 м) показал их соответствие точностным характеристикам, требуемым по нормативам.

В результате произведенных расчетов получены следующие данные.

Таблица 3

Наименование	Стоимость снимка, руб.	Стоимость работы, руб.	Трудозатраты, техн/мес.
Создание цифровых ортофотопланов м-ба 1:10 000 по материалам космосъемки	640 620	121 513	4.78

Таким образом, преимущества разработанной технологии обновления картографической продукции на основе обработки материалов космической съемки с помощью цифровой системы «Ortho/Neva» – отсутствие разрешения на проведение съемки, получение материалов съемки сразу в цифровом виде, меньший объем исходных данных на одинаковую площадь, сокращение работ по полевой привязке исходных снимков – дополняются экономией времени в 1.39 раза, экономией финансовых затрат в 1,44 раза.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1.Разработана технологическая схема обновления цифровых карт и планов городов масштабов 1:5 000 – 1:25 000 по космическим снимкам высокого и сверхвысокого разрешения с применением ЦФС «Ortho/Neva» на основе новых методов их фотограмметрической обработки. Применение указанной технологии на производстве Сев.-Кав. АГП позволило повысить

производительность труда в 1.39 раза и снизить финансовые затраты в 1,44 раза. Основные теоретические положения разработанной технологии апробированы в процессе обработки производственных материалов и реализованы в программном обеспечении ЦФС «Ortho/Neva», защищенной авторским свидетельством № 2006612680 от 28 июля 2006 г. В разработке и внедрении данной ЦФС автор принимал непосредственное участие [ ].

2.Разработана методика сохранения в технологическом процессе обновления уровня точности исходных GPS-измерений от начального этапа до конечного продукта, базирующаяся на создании для каждого района работ своего локального Datum'а. Обоснованы теоретические положения предложенного способа определения параметров локального Datum'а на основе аффинного преобразования, который реализован в координатном калькуляторе ЦФС «Ortho/Neva». Произведена апробация способа путем определения численных значений параметров локального Datum'а между МСК и WGS-84 для г. Челябинска.

3.Предложен строгий метод измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению, позволяющий повысить точность фотограмметрических определений в 2-6 раз. Выполнено теоретическое обоснование и реализация предложенного способа в программном обеспечения ЦФС «Ortho/Neva». Разработанный метод опубликован автором и апробирован при выполнении картографических проектов по обновлению топографических навигационных планов городов масштаба 1:10 000 по заказам Роскартографии и мобильных телефонных компаний.

4.Разработана методика 3D-моделирования рельефа местности по методу кригинг-процесса на основе информации о высотах дискретных точек местности. Указанная методика позволяет производить быструю генерацию ЦМР за один проход и повышает производительность на 40-50%. Производственные испытания данного способа, выполненные автором для территории Ставропольского края площадью 140 000 км^2, показали, что он обеспечивает точность восстановления рельефа в пределах 0.3-0.5 м.

5.Получены результаты экспериментальных работ с целью калибровки

неизвестных значений элементов внутреннего и внешнего ориентирования снимков для 10-ти наиболее распространенных в России коммерческих спутников ДЗЗ. Полученные автором параметры калибровки позволяют применять строгую модель снимка при фотограмметрической обработке материалов космической съемки.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. Погорелов В.В., Шавук В.С. Создание локального Datum'а на территорию картографического проекта. М.,«Геодезия и картография», № 7, 2007.

2. Погорелов В.В., Шавук В.С. Теоретическое обоснование способа измерения высот зданий по одиночному спутниковому изображению. М., «Геодезия и картография», № 4, 2008.

3. Погорелов В.В., Шавук В.С. Анализ математических моделей при фотограмметрической обработке космических снимков. М.,«Геодезия и картография», № 3, 2009.

4. Погорелов В.В., Шавук В.С. Использование спутниковой навигации транспортных средств для различных потребителей. Международный транспортный форум "Транспорт России - 2007".Сочи, 2007.

5. V.V. Pogorelov. Maps for tourism. Moscow, IV Международный конгресс геодезистов и картографов. 2007.

6. Чекалин В.Ф., Семененко А.А., Аксенов А.Л., Погорелов В.В., Шавук В.С., Воробьев Ю.Д. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 200 661 2680 от 28 июля 2006г. Система «Ortho/Neva», v. 1.0.