

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

БЕРЕГОВОЙ ДМИТРИЙ ВИКТОРОВИЧ

**СОЗДАНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНОВ НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕШИФРИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мустафин Мурат Газизович

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Анализ современных методов выполнения топографической съемки.....	11
1.1 Тахеометрическая съемка	12
1.2 Съемка с применением глобальных навигационных спутниковых систем	14
1.3 Съемка с использованием лазерного сканирования.....	18
1.4 Аэрофотосъемка.....	22
1.5 Аэрофотосъемка с применением БЛА	25
1.6 Выводы по первой главе	29
Глава 2 Подготовительные, полевые и летно-съемочные работы.....	33
2.1 Определение количества и местоположения точек съемочного обоснования	33
2.2 Оценка стабильности положения опорной сети в зависимости от ошибки отдельного пункта и рельефа местности.....	36
2.3 Расчет параметров АФС и выбор мультикоптера	41
2.4 Тригонометрическое нивелирование	46
2.5 Летно-съемочные работы с применением БЛА	51
2.6 Выводы по второй главе.....	53
Глава 3 Камеральные работы.....	55
3.1 Построение ортофотоплана и карт высот местности и рельефа.....	56
3.2 Автоматизированная классификация объектов местности	61
3.3 Автоматизированная векторизация объектов местности	70
3.4 Выводы по третьей главе	75
Глава 4 Проведение практических исследований	77
4.1 Подготовительные работы	77
4.2 Полевые и летно-съемочные работы	81
4.3 Камеральные работы	84

4.4 Выводы по четвертой главе	101
Заключение	103
Список литературы	105
Приложение А	122
Приложение Б.....	126
Приложение В	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Топографические планы используются практически во всех сферах человеческой деятельности, особенно они важны в навигации, строительстве, военном и горном деле. На основе топографических планов выполняется проектирование и строительство любых объектов. В связи с этим оперативное и качественное их построение представляется важной задачей.

Для этого существует большое количество современных методов, например, лазерное сканирование, съемка на основе глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и тахеометрия. В последнее время становится весьма эффективным альтернативный вид съемки с беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Это связано с ее главными достоинствами: низкой стоимостью оборудования и высокими автоматизацией и производительностью полевых работ, которые достигаются в том числе за счет того, что с помощью полученных аэрофотоснимков выполняется как создание трехмерной модели, так и автоматизированное дешифрирование территории.

Несмотря на то, что уже существуют удачные методики создания топографического плана на основе данных съемки с БЛА, которые используются в профильных компаниях, например в ГК «Геоскан» и *GmbH «MAVinci»*, остается ряд вопросов, которые требуют проведения специальных исследований. Во-первых, это практически полностью ручная классификация объектов оператором. Данный этап обычно является самым продолжительным и трудоемким. Во-вторых, недостаточная изученность влияния рельефа и количества опорных точек на точность положения координат плотного облака точек, построенного по данным съемки с БЛА. Перечисленные вопросы практически никак не регламентированы в нормативных документах.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методики, которая полностью соответствует требованиям построения топографических планов и имеет более высокую производительность этого процесса по сравнению с существующими.

Степень разработанности проблемы. Использование аэрофотосъемки местности применялось еще в XIX веке. Однако лишь с интенсивным развитием вычислительной техники стало возможным эффективное применение БЛА в геодезии и фотограмметрии.

Вопросами теории и практики создания цифровой модели местности в том числе при помощи БЛА посвящены труды Р. Лаутеншлагера, А. Чарфа, П. Тымкова, Я. Э. Солема, Б. Т. Мазурова, В. А. Середовича и других авторов. В частности, А. Чарфом разработана методика, повышающая точность съемки с помощью БЛА, а Р. Лаутеншлагер применяет полученную на основе данных с БЛА цифровую модель рельефа в маркшейдерском деле.

Вопросами теории и практики выполнения автоматизированного дешифрирования, в том числе при помощи нейросетевых методов, занимались А. В. Волков, А. С. Ярмоленко, Р. Тадеусевич, С. Микрут и П. Тымков. Использование современного метода дешифрирования по алгоритму *OBIA* и оценка его точности рассмотрена у Х. М. Пенья, Т. Блашке и К. де ла Торре.

Цель исследований заключается в разработке автоматизированной методики построения топографического плана с применением технологии съемок с беспилотного летательного аппарата для повышения оперативности и качества проектирования при изысканиях.

Идея работы заключается в возможности автоматизированного построения топографического плана за счет оптимизации количества опорных точек, высотное положение которых определяется тригонометрическим нивелированием при помощи электронных тахеометров и дешифрирования ортофотоплана на основе методов машинного обучения.

Задачи исследований:

1. Проанализировать существующие способы создания топографических планов местности и принципиальные отличия классической аэрофотосъемки от альтернативной, выполненной с помощью беспилотного летательного аппарата.

2. Определить зависимость точности местоположения модели от характера рельефа и оценить минимальное количество и позицию на местности опорных точек с помощью моделирования плотного облака точек.

3. Разработать методику тригонометрического нивелирования для определения высотной основы точек съемочного обоснования, которая соответствует по точности техническому геометрическому нивелированию.

4. Разработать метод автоматизированного дешифрирования объектов по данным съемки с беспилотного летательного аппарата, оценить точность этого метода.

5. Экспериментально проверить предложенную методику создания топографического плана на реальных объектах.

Научная новизна исследований:

1. Обосновано количество и расположение опорных точек, необходимых для построения плотного облака точек, которое обеспечивает создание топографических планов нелинейных объектов масштаба 1 : 1 000 и площадью до 200 Га.

2. Обоснована возможность использования методики высокоточного тригонометрического нивелирования и разработана модель стабильного в полете гексакоптера для выполнения полевых и летно-съемочных работ, что позволяет повысить оперативность и качество создания топографического плана масштаба 1 : 1 000.

3. Определен алгоритм автоматизированного дешифрирования, позволяющий с высокой точностью распознавать объекты местности.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований:

Обоснована целесообразность использования методики высокоточного тригонометрического нивелирования для определения высотной основы точек съемочного обоснования. Обоснована конфигурация расположения опорных точек необходимых для точного построения плотного облака точек. Установлен

метод автоматизированного дешифрирования территории по ортофотоплану для создания топографических планов нелинейных объектов масштаба 1 : 1 000 и площадью до 200 Га.

Полученные результаты могут быть использованы организациями, занимающимися строительством и топографической съемкой, а также внедрены в научный и учебный процесс.

Положения, выносимые на защиту:

1. Автоматизированное построение топографических планов нелинейных объектов местности масштаба 1 : 1 000 и площадью до 200 Га по данным съемки с беспилотного летательного аппарата должно предусматривать не менее пяти опорных точек, равномерно расположенных по всей снимаемой территории, при этом необходимо обеспечивать нормальное к земной поверхности положение оси объектива камеры.

2. Летно-съемочные работы целесообразно выполнять с использованием гексакоптера, при этом высотное положение точек съемочного обоснования определяется с помощью тригонометрического нивелирования электронным тахеометром, которое соответствует по точности техническому геометрическому нивелированию.

3. Модификация автоматизированной классификации объектов местности по алгоритму OBIA путем использования карты их высот обеспечивает достаточную точность для построения топографических планов масштаба 1 : 1 000.

Методы исследований. Метод наименьших квадратов и дифференцирование для оценки точности измерений, статистические методы, нейронные сети и машинное обучение для классификации объектов изображения, методы аналитической геометрии, компьютерного зрения и вычислительной математики для построения плотного облака точек, а также компьютерное моделирование плотного облака точек.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на международной «56-й студенческой научной конференции» (Краковская горно-металлургическая академия, декабрь 2015 г.), XII всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии при недропользовании» (Санкт-Петербургский горный университет, октябрь 2016 г.), международной конференции «Транспортная геотехника и геоэкология» (TGG-2017) (Петербургский государственный университет путей сообщения, май 2017г.), международной конференции «День горняка и металлурга 2017» (Технический университет «Фрайбергская горная академия», июнь 2017 г.).

Результаты исследований по теме диссертации обсуждались и были одобрены в ходе включенного обучения на базе Горного университета г. Леобен (февраль – август 2016 г.) и стажировки на базе Вроцлавского университета природообустройства (ноябрь – декабрь 2017 г.).

Предполагаемые объекты внедрения результатов исследований.

Представленная методика выполнения полевых работ аэрофототопографической съемки с применением беспилотного летательного аппарата рекомендована к выполнению на базе Санкт-Петербургского горного университета и Горного университета г. Леобен (Австрия). Результаты и выводы работы могут быть использованы геодезическими компаниями, в частности ГК «Геоскан» и *Agisoft PhotoScan*, а также внедрены в учебный процесс при изучении студентами дисциплин геодезической направленности.

Достоверность научных и практических результатов подтверждается согласованностью теоретических расчетов с результатами многократных полевых и камеральных работ на реальных объектах, сопоставимы с исследованиями других авторов, в частности преподавателей и аспирантов кафедры «горного дела и минеральной экономики» Горного университета г. Леобен. Для выполнения моделирования использовались современные методы исследований, включающие программирование и профессиональные

программные продукты, позволяющие обрабатывать большой объем информации.

Личный вклад автора. Автор участвовал во всех стадиях выполнения диссертационной работы, в частности проводились:

- сформулированы задачи исследований, проанализированы существующие способы создания топографических планов местности;
- смоделированы плотные облака точек при разном количестве опорных точек и разном их расположении;
- определена зависимость точности плотного облака точек от рельефа;
- разработана методика высокоточного тригонометрического нивелирования;
- разработана конфигурация мультикоптера для выполнения топографических работ;
- разработан алгоритм автоматизированного дешифрирования на основе машинного обучения и карты высот объектов местности;
- написаны авторские программы на языке программирования *Python*.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и 1 в изданиях, индексируемых международной базой данных *SCOPUS*.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 15 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 139 наименований и 3 приложений.

Благодарности

Благодарю моего научного руководителя д.т.н., проф. М.Г. Мустафина за помощь и поддержку в написании диссертационной работы. Выражаю признательность преподавателям и аспирантам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета, в частности, доц., к.т.н. Ю. Н. Корнилову, к.т.н., доц. А. В. Зубову, к.т.н., доц. А. А. Боголюбовой и

Р. А. Губайдуллиной, а также А. В. Аспедникову за конструктивные замечания и пожелания по диссертационной работ.

Благодарю преподавателей кафедры «Горного дела и минеральной экономики» Горного университета г. Леобен Г. Майера, Р. Пилграма, А. Чарфа и Б. Кнолл, а также сотрудников института геодезии и геониформатики Вроцлавского университета природообустройства А. Борковски и П. Тымкова за помощь в практической реализации выполнения полевых и камеральных работ.

Выражаю признательность моей семье и друзьям, чью ежедневную поддержку невозможно переоценить.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Топографическая карта всегда была неотъемлемой частью жизни человека еще со времен палеолита около 25 тыс. лет назад, когда примитивные чертежи взаимного расположения пунктов изображались на песке, коре, кости и камне [32, 67]. С тех пор прошло большое количество времени и прогресс не стоял на месте, а вместе с ним развивались и методы создания топографических карт, повышалась производительность работ. Так, например, изобретение мензулы значительно упростило полевые и камеральные работы, благодаря возможности не рассчитывать координаты точек по сложным формулам и непосредственно в поле наносить их на план (рисунок 1.1) [41]. Однако с появлением электронных тахеометров, сканеров и ГНСС аппаратуры, а также современной вычислительной техники ситуация значительно изменилась, стало возможным использование множества видов съемки с последующей обработкой на персональном компьютере.

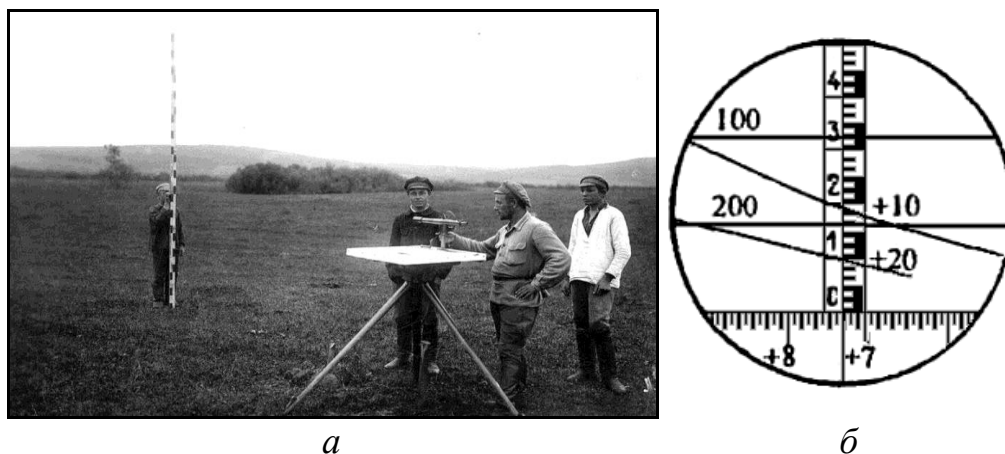


Рисунок 1.1 – Мензульная съемка (а) и поле зрения трубы при круге лево (б)

В настоящее время создание топографического плана выполняется на основе аэрофототопографической, тахеометрической, горизонтальной (только съемка ситуации), мензульной, спутниковой и сканерной съемки [80, 83].

1.1 Тахеометрическая съемка

Тахеометрическая съемка – это топографическая съемка, выполняемая при помощи тахеометра. Основное ее достоинство, в отличие от теодолитной, заключается в том, что нет необходимости использовать мерные ленты или дальномер для определения расстояний [19]. Таким образом, за счет увеличения площади съемки с одной станции достигается более высокая эффективность работ [70]. Более того, благодаря современным электронным тахеометрам появляется возможность автоматической записи полученных данных на съемный носитель информации с последующей обработкой на персональном компьютере, что даёт возможность автоматизировать не только камеральные, но и полевые работы [11].

Данный вид съемки предназначен в первую очередь для создания топографического плана крупного масштаба. Обычно идет речь о составлении планов небольших или вытянутых участков или об отображении рельефа застроенных территорий [31, 41].

Работы выполняются с точек заранее подготовленного съемочного обоснования. Определяются характерные точки рельефа и местности при помощи линейно-угловых измерений полярным способом. Для последующего построения электронного топографического плана в память тахеометра рекомендуется вносить координаты точек в прямоугольной системе. Помимо этого, для совершенствования выполнения и обработки съемки наряду с автоматизированными системами электронной тахеометрии и различных ГИС также вносят код условного знака объекта местности [82].

Для повышения производительности и решения большинства задач, решаемых в системе автоматизированного проектирования (САПР) непосредственно в поле можно дополнительно использовать модуль контроллера – встроенного или внешнего (рисунок 1.2). Это дает возможность вести трехмерную базу съемочных данных, строить цифровую модель рельефа и отображать ее в виде горизонталей, создавать разрезы, сечения, профили,

решать задачи координатной геометрии и многие другие. В последнее время также широко применяются полевые графические пен-компьютеры или компьютеры с активным экраном. С их помощью можно не только управлять работой тахеометра и/или геодезического спутникового приемника, но и обработать на месте, просматривая графическое отображение результатов съемок на экране пен-компьютера [86].



Рисунок 1.2 – Тахеометр с функцией фото-/видеосъемки *Leica Viva TS15* и контроллер *Leica CS10 3.5G*

В последнее время на рынке стали чаще появляться электронные роботизированные тахеометры с устройством автоматического наведения на точки визирования (могут задаваться лазерным лучом) на основе ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью) – видеотахеометры (рисунок 1.2). Использование вычислительных устройств позволило упростить конструкцию тахеометров, снизить требования к оптикомеханическим узлам, существенно упростить порядок проведения измерений [69]. Их применение в целом повышает эффективность работ практически вдвое по сравнению с использованием механических тахеометров, что позволяет, по меньшей мере, удвоить годовые объемы подрядных геодезических работ [86].

После выполнения полевых работ производится импорт данных полевых измерений в персональный компьютер с целью их последующей камеральной обработки, для автоматизации которой необходимо использовать программные продукты. Одной из таких программ является система *Credo_Dat*. Ее основные

функции – импорт данных в форматах электронных тахеометров, настройка и использование классификаторов, ввод и редактирование данных, предварительная обработка измерений, поиск грубых ошибок, совместное уравнивание по методу наименьших квадратов (МНК), обработка тахеометрической съемки с формированием топографических объектов и их атрибутов по данным полевого кодирования, экспорт и печать результатов, создание ведомостей и каталогов [113].

Автоматизация камеральных работ не только позволяет повысить производительность, но и максимально снизить человеческий фактор. В настоящее время ручная обработка результатов геодезических измерений встречается крайне редко.

В целом, технология тахеометрической съемки автоматизирована почти до предела: съемка местности, запись результатов, произведение камеральных работ происходит во многом автоматически и с минимальным участием человека [84]. Основным недостатком данного метода является большой объем, а следовательно, продолжительное время выполнения полевых работ.

1.2 Съемка с применением глобальных навигационных спутниковых систем

В настоящее время методы и средства измерений с использованием искусственных спутников Земли (ИСЗ) как носителей координат находят широкое применение в геодезии. [10, 16]. Съемка с применением ГНСС не зависит от погодных условий и времени суток, а измерения выполняются быстро и просто, что многократно повышает производительность труда и удешевляет стоимость работ [16, 94].

Согласно инструкции [29] применение спутниковой технологии (аппаратуры и методов) в общем случае не имеет ограничений для развития съемочного обоснования. Эта технология может быть применена также для крупномасштабных съемок ситуации и рельефа с высотами сечения 5,0; 2,5; 2,0;

1,0; 0,5 м [29]. При этом в работе [10] приводятся рекомендации по использованию спутниковых определений для создания и обновления карт более мелких масштабов (1 : 10 000 – 1: 200 000).

В последние годы с развитием ГНСС-технологий в топографо-геодезическом производстве широко применяется так называемый *RTK*-режим (*Real Time Kinematic* – кинематика реального времени) спутниковых геодезических измерений (определений) [52]. Его суть сводится к применению двух и более приемников, один из которых является «базовым», установленным на пункт с исходными координатами (пункт опорной или государственной сети), а остальные являются роверами – подвижными приемниками. При этом для работы данной схемы необходимо отслеживание одних и тех же спутников роверами и базовой станцией. Последняя, используя исходные координаты пункта, на котором установлена, вычисляет необходимые коррекции и по средствам радиосвязи, голосового канала связи стандарта *GSM* или мобильного интернета (*GPRS* и др.) передает полученные поправки роверам [50].

Несмотря на то, что точность *RTK* на порядок ниже статических определений координат, ее вполне достаточно для создания топографического плана (для плановых измерений около 8 мм + 1 мм/км, и 15 мм + 1 мм/км для определения высотной составляющей положения точки), при этом съемка одной точки выполняется буквально за несколько секунд [50].

Полевые работы начинаются с развития съемочного обоснования ровером, для этого на исходных пунктах устанавливаются базовые станции [52], а геометрическое нивелирование для определения высотного положения пунктов можно заменить спутниковым нивелированием [77]. Затем происходит топографическая съемка территории, которая также может быть выполнена в режиме *RTK* с установкой базовой станции на пункт съемочного обоснования [47].

Определение координат недоступных объектов (высоты столбов, подвесов проводов и др.) выполняют с помощью недорогого лазерного

дальномера, а в местах, где сигнал сильно затруднен (мосты, тоннели, районы с многоэтажной застройкой), определение координат осуществляется, например, с использованием функции пересечения, реализованной в программном обеспечении полевого контроллера [47].

Как и в случае с тахеометрической съемкой, для повышения производительности работ рекомендуется во время съемки указывать топографический код объекта в соответствии с принятым кодификатором. Это в свою очередь обеспечит более высокую продуктивность камеральных работ [47, 82].

Для обработки полученных полевых измерений производится импорт данных в программный продукт (ПП), например в *Credo_DAT*, и далее создается электронный топографический план в САПР [94].

Возможность пользоваться на территории съемки постоянно действующими станциями с прямым постоянным *IP*-адресом позволяет сократить время выполнения полевых работ, а также несмотря на необходимость оплаты пользования станциями, сократить расходы за счет уменьшения затрат на приобретение оборудования и уменьшения объема работ, связанного с рекогносцировкой и определением координат базовой станции (рисунок 1.3) [84].



Рисунок 1.3 – Постоянно действующая референсная станция, расположенная на территории Санкт-Петербургского горного университета

В итоге съемка с применением ГНСС в режиме *RTK* обладает высокой производительностью работ и достоверностью определения координат. Исполнитель записывает и контролирует снимаемые данные непосредственно в поле. Также режим *RTK* позволяет работать в любых системах координат, включая местные системы координат, и не зависит от погодных условий и времени суток. Но в режиме *RTK* есть ограничение по дальности действия радиоканала, связывающего базовую станцию и ровер. Более того, необходима открытая местность для выполнения полевых работ [47, 94, 97].

Стоит также заметить, что существует и комбинированная технология создания планово-высотного обоснования, объединяющая в себе как определение координат при помощи ГНСС, так и линейно-угловые измерения, причем вместо геометрического нивелирования возможно применение спутникового или тригонометрического. Полученные результаты обрабатываются совместно в наиболее широко используемой на практике плоской прямоугольной системе координат, например, в программном продукте *Credo_DAT*. Такая технология создания планово-высотного обоснования позволяет использовать преимущества и традиционных, и современных технологий [9, 77].

При высокой степени автоматизации и легкости выполнения камеральных работ съемка с применением ГНСС и тахеометрическая съемка включают достаточно большой объем полевых работ, поэтому стоимость создания топографического плана такими методами высока¹. Однако, например, лазерное сканирование, в котором также выполняются линейно-угловые измерения и используется ГНСС-аппаратура для создания обоснования, обеспечивает на порядок более высокую производительность полевых работ.

¹ 20 000 рублей за 1 Га в черте КАД г. Санкт-Петербург на 20 июля 2018 г. у геодезической фирмы «Лимб» (<http://limb.su/topograficheskaya-semka>)

1.3 Съёмка с использованием лазерного сканирования

Одним из наиболее значительных технологических достижений начала XXI века в геодезии и ряде смежных отраслей стало внедрение в практику лазерных сканирующих систем [22]. Сущность метода заключается в измерении с высокой скоростью расстояний от сканера до точек объекта и регистрации соответствующих направлений (вертикальных и горизонтальных улов) в безотражательном режиме. Это достигается за счет блока развертки, в качестве которого выступают сервопривод и полигональное зеркало или призма [22, 59, 83, 123]. Все лазерно-сканирующие системы можно разделить на крупные классы: системы воздушного лазерного сканирования (ВЛС), системы наземного лазерного сканирования (НЛС) [37, 22].

НЛС применяется для создания крупномасштабных топографических планов [37, 83], тогда как создание картографической продукции масштаба 1:500 и крупнее с помощью ВЛС при пространственной точности 10–15 см не представляется возможным [37].

Полевые работы начинаются с создания планово-высотного обоснования (ПВО) – основного для ВЛС и сочетающего в себе основное и рабочее для НЛС. Способ определения координат пунктов основного ПВО аналогичен тому, что используется при выполнении тахеометрической съёмки или съёмки с использованием ГНСС. Координаты рабочего ПВО определяются с пунктов основного ПВО с использованием линейно-угловых измерений в безотражательном режиме и закрепляются специальными сканерными марками. Также может применяться методика проложения сканерных ходов, в которой часть точек рабочего ПВО предыдущей сканерной станции является точками рабочего ПВО последующей (рисунок 1.4) [22, 81, 83].

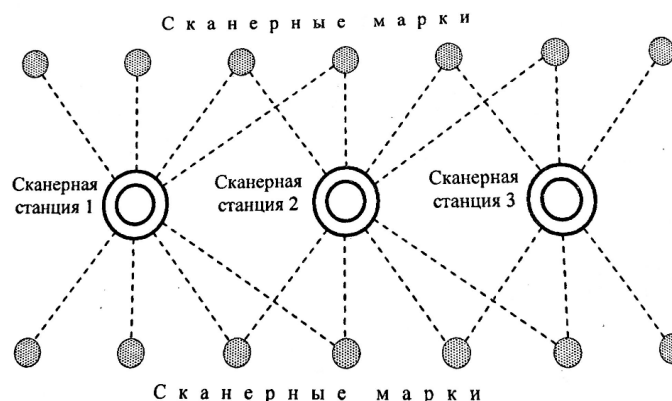


Рисунок 1.4 – Создание рабочего ПВО путем прокладки сканерного хода [22]

Далее выполняется сканерная съемка. В случае НЛС происходит выбор углового шага сканирования и местоположения сканерных станций, при котором достигается наибольший захват окружающих объектов. Особенностью сканерной съемки является то, что у большинства современных моделей сканеров нет устройств для точного горизонтирования и центрирования прибора. Это связано с тем, что геодезическая привязка выполняется к пунктам рабочего ПВО, а не основного [81].

Система ВЛС состоит из сканера, ГНСС и инерциальной навигационной системы (ИНС). Определение координат с помощью высокоточной ГНСС-аппаратуры, работающей в дифференциальном режиме совместно с ИНС, позволяет знать местоположение сканера в момент съемки, а также ориентацию сканера в пространстве, то есть углы тангажа, крена и рыскания (рисунок 1.5). Таким образом, можно однозначно определить абсолютные координаты каждой точки лазерного отражения (ТЛО) в пространстве [15, 20, 37, 137]. Стоит заметить, что в последнее время также стали широко применяться и БЛА, на которые устанавливается малогабаритный лазерный сканер [51].

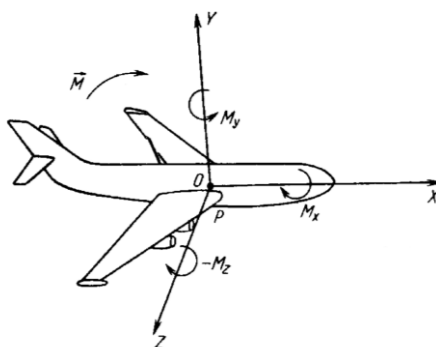


Рисунок 1.5 – Аэродинамические моменты крена (M_x), рыскания (M_y) и тангажа (M_z) и их результирующий момент (M)

Для выполнения дешифрирования территории часто параллельно с лазерным сканированием выполняют и фотосъемку. Полученные изображения при камеральной обработке совмещают с полученным при лазерном сканировании облаком точек для получения их цвета [38, 83].

В последнее время для картографирования линейных объектов используется также и мобильное лазерное сканирование (МЛС), которое за короткий промежуток времени позволяет получить высокодетальную трехмерную информацию обо всех объектах, находящихся в зоне видимости сканирующей системы [37, 45, 87]. Более того, совместная съемка при помощи НЛС, МЛС и ВЛС позволяет снимать как горизонтальные, так и вертикальные объекты местности и получать их координаты с высокой точностью и надежностью [37].

Полученные с НЛС, МЛС и/или ВЛС данные обрабатываются в программном продукте, который обычно поставляется производителем сканера [83]. В ходе камеральных работ выполняется процедура формирования единой модели, подгружается файл с координатами всех марок рабочего ПВО, определяется средняя квадратическая погрешность (СКП) измерений и производится автоматическое определение точек класса «земля», на основе которого происходит построение цифровой модели рельефа (ЦМР) и последующее создание горизонталей [20, 81, 83]. Для его создания ВЛС

является оптимальным видом лазерного сканирования [46].

На основе полученного облака точек происходит векторизация объектов местности с помощью программных инструментов для создания полигонов, линий и точек [38]. Внешний вид этих объектов оформляют в соответствии с принятым кодификатором условных знаков [17].

Съемка с использованием лазерного сканирования обладает высокой точностью и производительностью полевых работ. Благодаря лазерным сканерам возможно удаленно снимать труднодоступные объекты, а также рельеф, расположенный под густой растительностью. При выполнении камеральных работ оператор имеет перед собой трехмерную модель, на которой видна реальная ситуация местности, а не отдельные точки как в случае с тахеометрической съемкой или съемкой с использованием ГНСС. В совокупности с фотоснимками это позволяет производить камеральное дешифрирование и получать достоверный результат [37, 46, 76, 81, 85, 87]. Однако, данный метод съемки не лишен и недостатков. Во-первых, из-за высокой стоимости оборудования данный вид съемки нецелесообразно выполнять для небольших территорий [34]. Во-вторых, процесс векторизации объектов местности достаточно долго выполняется оператором, так как практически не поддается автоматизации из-за большого разнообразия объектов местности. Например, при продолжительности полевых работ в течение 2 дней обработка полученных данных может занять 3 месяца [101]. И, наконец, съемку на основе ВЛС невозможно выполнить без одновременной аэрофотосъемки, необходимой для дешифрирования территории. Таким образом, для создания топографического плана необходимо совмещать сразу два вида съемки, что повышает стоимость и сложность проводимых работ. При этом в результате полевых работ получают сразу два разнородных вида данных: растровое изображение и облако точек. Это усложняет и камеральные работы [38, 83].

1.4 Аэрофотосъемка

Аэрофотосъемкой (АФС) называется процесс фотографирования земной поверхности с самолета или другого летательного аппарата с целью создания топографических карт (планов) или решения различных народнохозяйственных задач. По количеству и расположению аэрофотоснимков АФС подразделяют на одинарную, маршрутную и многомаршрутную (площадную). Также в зависимости от положения главной оптической оси аэрофотоаппарата (АФА) АФС может быть плановой (оптическая ось в вертикальном положении) и перспективной (оптическая ось в произвольном положении) [66].

АФС – один из основных методов для создания топографических карт и планов. Стереотопографический метод является главным для съемки в масштабах 1:10000 и 1:25000. Для более крупных масштабов, при условии заполнения территории сплошной высокой растительностью (масштаб 1:5000 и 1:2000 с сечением рельефа через 1 м и 0,5 м), используется комбинированный способ [30, 31, 56]. Этот способ так же подходит и для плотной многоэтажной застройки (масштаб 1:1000 – 1:500).

Перед выполнением аэрофотосъемки выполняется расчет ее параметров (высота фотографирования, перекрытия, базис, количество маршрутов и др.), составляется полетная карта и создается съемочное обоснование для определения элементов внешнего ориентирования (ЭВО) снимков и оценки точности построения модели местности. Для развития такой сети используется определение координат с помощью технологии ГНСС, которая является значительно более эффективной по сравнению с традиционными методами [42, 66, 96, 115].

Для проведения АФС обычно используется самолет или вертолет, оборудованный АФА, который синхронизирован с бортовой и трассовой системой ГНСС, а также вспомогательное оборудование [23, 66, 99]. Для цифровой обработки изображений необходимо использовать цифровое изображение, поэтому при использовании аналоговых камер полученные

снимки необходимо сканировать, что приводит к потере качества, информации и снижению точности [89]. Однако аналоговые АФА все еще находят применение. Это связано с тем, что в настоящее время пока очень сложно добиться такого высокого разрешения (около 200 Мп) цифровыми камерами [61].

Полет выполняется на основе выполненного расчета параметров АФС и полетной карты, после чего полученные материалы отправляются на камеральную обработку, где в первую очередь выполняется оценка их качества [65]. При помощи специального программного обеспечения (например, фотограмметрическая станция *Photomod*) производится создание ортофотоплана, который является по существу растровым аналогом топографической карты. Для этого определяются ЭВО снимков, выполняется построение ЦМР, а также ориентирование (привязка к опорным точкам) и оценка точности модели [23, 60, 66].

Камеральное дешифрирование часто совмещают с полевым, которое выполняется по результатам произведенной АФС. Топограф обходит по намеченному маршруту территорию и вычерчивает объекты с помощью условных обозначений карандашом на распечатанном фотоплане (рисунок 1.6) [14, 95].

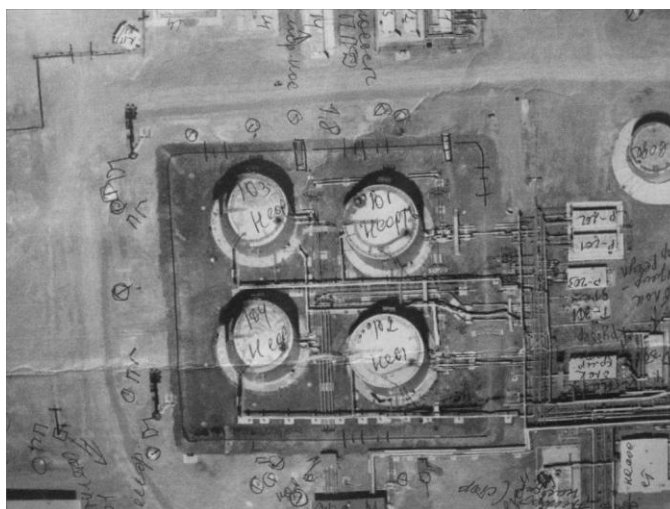


Рисунок 1.6 – Полевое дешифрирование аэрофотоснимка

Таким образом, на основе ортофотоплана, ЦМР и данных дешифрирования посредством векторизации создается топографический план. Данный процесс выполняется в программном продукте, например, в *ArcGIS* или *AutoCAD* [23, 95, 115].

Повышение оперативности выполнения полевых работ возможно благодаря современным инерциальным системам и ГНСС, с высокой точностью определяющих ЭВО снимков. Для этого один приемник устанавливают на борту воздушного судна, а два других – на наземные базовые станции. Данный способ позволяет предельно сократить объем наземных полевых работ [26].

К достоинствам данного метода съемки можно отнести оперативность, детальность, охват обширных и труднодоступных территорий [36]. Также как при выполнении лазерного сканирования, во время камеральных работ геодезист видит трехмерную модель местности, что позволяет выполнять дешифрирование быстро и надежно. Таким образом, на основе полученных аэроснимков происходит комплексное выполнение всех необходимых видов геодезических работ, а именно: построение ЦМР, ортофотоплана, а также выполнение дешифрирования [23, 95].

Среди недостатков АФС можно выделить очень высокую стоимость производимых работ, которые обусловлены дорогим АФА² и включают в себя дорогостоящее выполнение полета, требуют высоких экономических затрат на обслуживание и заправку. Это приводит к повышению стоимости конечной продукции [25, 61, 89]. Малоэффективным является использование комбинированной аэрофотосъемки из-за необходимости выполнения не только летно-съемочных, но и полевых работ [30, 31]. Более того, в облачную погоду невозможно обеспечить оперативное выполнение аэрофотосъемки, поэтому необходимо определить время, когда наблюдается ясная погода. А в случае

² около 250000\$ для 3-DAS-1 компании НПП «Геосистема» и >1 000 000 \$ для ADS40 компании *Leica Geosystems* [64]

большого количества облачных дней в году возможно использование аэрокосмической съемки, включающей комплексное использование комбинаций разновременных снимков оптического и радарного диапазонов [2]. Также не решен вопрос автоматизированного дешифрирования и векторизации аэрофотоснимков для создания топографического плана [23].

Однако в последнее время при выполнении АФС стали заметно чаще применяться беспилотные летательные аппараты (БЛА), цена и сложность производства которых стали значительно снижаться. Нашли применение и более дешевые неметрические фотокамеры. Благодаря такому комплексу стало возможным выполнять полет на более низких высотах и выполнять стереотопографическую съемку крупного масштаба небольшой по площади территории [25, 43, 60, 111] .

1.5 Аэрофотосъемка с применением БЛА

Беспилотное воздушное судно, или БЛА, – воздушное судно, управляемое, контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (внешний пилот) (рисунок 1.7) [12]. Также под БЛА часто понимают аппарат, управляемый с помощью автопилота, координаты для которого задаются пользователем перед полетом [111].



Рисунок 1.7 – БЛА *DJI Mavic Pro* (слева – в полете, справа – БЛА и его комплектующие)

Основными отличиями съемки с помощью БЛА от классической аэрофотосъемки являются:

- возможность выполнения крупномасштабной съемки небольших участков местности при более низкой высоте полета воздушного судна [71, 125];
- использование более дешевых неметрических камер [111];
- использование недорогих БЛА, для которых нет необходимости использования специальных аэродромов для взлета и посадки [25, 43];
- проведение такой съемки не требует от оператора специальных навыков пилотирования, длительного обучения и лицензии [43];
- возможность выполнения полета в облачную погоду [78].

В настоящее время аэрофотосъемка с применением БЛА набирает все большую популярность. Значительное уменьшение габаритов летательных аппаратов, их стоимости, при этом без потери в точности и полезной нагрузки приводит к их все большему использованию [7, 48, 78].

Перед выполнением полевых работ, как и в классической аэрофотосъемке, выполняется расчет параметров полета, определяется местоположение точек съемочного обоснования (опознаков). По заданному маршруту БЛА в ручном или автоматизированном режиме выполняет полет. Обычно устанавливаются бóльшие перекрытия снимков, нежели в классической аэрофотосъемке (не менее 80 и 60 продольных и поперечных перекрытий соответственно). Более того, важной является информация о погоде в полетный день [78, 111, 125, 128].

Полевые работы начинаются с определения пространственных координат по крайней мере 10–15 точек съемочного обоснования – *GCPs* (*Ground Control Point*), большая часть которых выступает в качестве опорных (*transformation points*), а оставшиеся играют роль контрольных (*check points*). Для этой цели определения координат выполняют при помощи линейно-угловых и спутниковых измерений в режиме «статика» или «быстрая статика». При этом

используются и спутниковые измерения в режиме *RTK*, которые достаточно высокоэффективны [73, 78, 106, 111, 125, 128].

Далее производится полет и съемка с помощью бортовой фотокамеры. Процедура запуска БЛА зависит от его типа и модели. Для мультироторных аппаратов необходима небольшая ровная площадка, а для самолетного типа либо используется пусковое устройство, либо выполняется запуск с руки. Аэрофотосъемка осуществляется по заранее составленному маршруту, фотографирование местности происходит через заданный интервал времени. Если сравнивать два этих разных вида БЛА, то мультироторные более стабильны в полете, проще и дешевле в обслуживании. У них меньше механических узлов, а следовательно, меньше вероятность механических повреждений. Важным преимуществом является и то, что у мультироторных БЛА отсутствуют перегрузки при взлете и посадке (толчки, удары) [78, 107, 108, 111].

Далее получают данные – аэрофотоснимки, координаты точек съемочного обоснования и/или положения центров проекций снимков, а также их углы наклона от горизонтального положения. Оценивается качество фотографий, отбраковываются «технические кадры». Их обработка производится в специализированном программном обеспечении, в ходе которого производится оценка точности и построение ЦМР на основе автоматизированной фильтрации созданной цифровой модели местности (ЦММ). Также строится ортофотоплан [57, 121, 126, 133].

По полученным данным выполняется построение топографического плана. По ЦМР производится создание горизонталей, а по ортофотоплану – векторизация объектов местности. При этом дешифрирование выполняется на порядок легче, так как геодезист видит ортофотоплан и ЦММ высокого разрешения. Однако, к сожалению, при возникновении вопросов и недочетов все равно необходимо выезжать на местность для полевого дешифрирования снимков [4, 78].

Для повышения оперативности выполнения полевых работ используются БЛА с приемником *RTK* в сочетании с микроэлектромеханической системой (МЭМС) гироскопа и акселерометра на борту, служащие для определения местоположения центра проекции камеры. Это позволяет без потери в точности выполнять полет без точек съемочного обоснования, сокращая полевые работы до минимума, однако стоимость такой комбинации довольно высока [76, 131]. Кроме того, существуют участки, где использование опознаков может быть сложным и опасным, особенно в случае большого перепада высот картографируемого участка [111]. Процент автоматизации камеральных работ достаточно высок, за исключением векторизации ортофотоплана, в связи с большим разнообразием объектов местности [23, 101].

Достоинства данного вида съемки:

- рентабельность: часто аэрофотосъемка, выполненная с помощью БЛА, делает нерентабельными такие виды работ как ГНСС-съемка в *RTK*-режиме и тахеометрическая съемка [43, 71, 78];
- оперативность получения данных [43];
- аэрофотосъемка возможна при небольшой высоте полета и вблизи объектов местности, позволяя получать снимки высокого разрешения [43, 71];
- возможность выполнения аэрофотосъемки в зонах чрезвычайных ситуаций без угрозы здоровья и жизни пилотов [71];
- БЛА могут работать в обширном температурном диапазоне, таким образом появляется возможность их использования во многих широтах Земного шара [78].

Отметим также недостатки:

- невозможность использования данного метода на территории с плотной многоэтажной застройкой и сплошной высокой растительностью [30, 31];
- высокая цена БЛА с *RTK*-приемником на борту, а также дорогостоящее специализированное программное обеспечение [118];
- сложность и продолжительность выполнения камерального

дешифрирования [4, 23, 78].

Стоит заметить, что если аэрофотосъемка с БЛА выполняется на малозастроенной территории с отсутствием сплошной высокой растительности, а также количество опорных и контрольных точек невелико, то недостатки данного метода практически сводятся к нулю. Однако, несмотря на большой спрос как в России, так и за рубежом, в данное время можно столкнуться с большими трудностями при выполнении аэрофотосъемки, так как отсутствует нормативно-правовая база. Эта проблема пока не решена ни в одной стране мира [78].

1.6 Выводы по первой главе

На данный момент существует множество современных технологий, позволяющих создать топографический план; наиболее популярные и эффективные из них представлены в этой главе (таблица 1.1 [134] и рисунок 1.8 [114]). Первые две из них – тахеометрическая съемка и съемка с использованием ГНСС – при высокой производительности камеральных работ показывают низкую эффективность полевых. Однако важно понимать, что для повышения производительности работ гораздо легче автоматизировать камеральные работы, нежели те, что выполняются непосредственно на местности. Поэтому реализация эффективной методики создания топографического плана на основе таких технологий как лазерное сканирование и аэрофотосъемка (в том числе и с применением БЛА) являются более перспективными в сравнении с остальными способами.

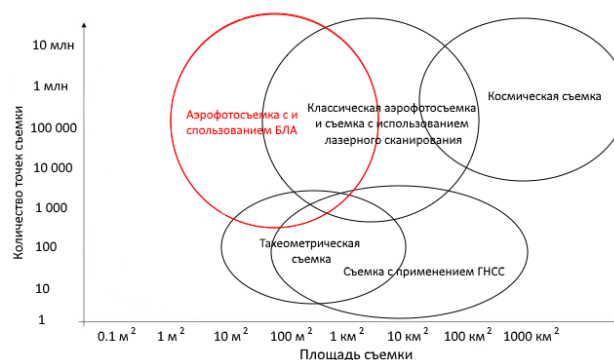


Рисунок 1.8 – Сравнение современных технологий съемки по количеству точек и охватываемой площади местности

Таблица 1.1 – Ориентировочное сравнение различных технологий съемки

№	Технология съемки	Полевые работы				Камеральные работы			Итог *
		Время	Автоматизация	Стоимость	Труднодоступность	Время	Автоматизация	Стоимость	
1	Тахеометрическая съемка	-	+/-	-	-	+	+	+	3.5
2	ГНСС	-	+/-	-	-	+	+	+	3.5
3	ВЛС, НЛС, МЛС	+	+	-	+/-	-	+/-	+/-	3.5
4	Классическая аэрофотосъемка	+	+	-	+/-	-	+/-	+/-	3.5
5	Аэрофотосъемка с применением БЛА	+	+	+	+	-	+	+/-	5.0
6	Аэрофотосъемка с применением БЛА по предложенной в диссертации методике	+	+	+	+	+/-	+	+	6.5

* – итог рассчитан как количество знаков “+” в строке плюс количество знаков “+/-” в строке деленное на два

Топографические планы в настоящее время широко применяются в строительстве, промышленности, геологии, сельском хозяйстве, при проектировании железных и автомобильных дорог, а также магистральных каналов. Среди них особо выделяется строительная отрасль, которая является весьма весомым сектором экономики нашей страны и наиболее развита, в частности, в гражданском строительстве (рисунок 1.9) [35, 93]. Интенсивное освоение территорий страны, включая города, сельские поселения,

промышленные регионы и рекреационные зоны обуславливает задачу качественного и быстрого построения топографических планов местности как основы любого строительства.

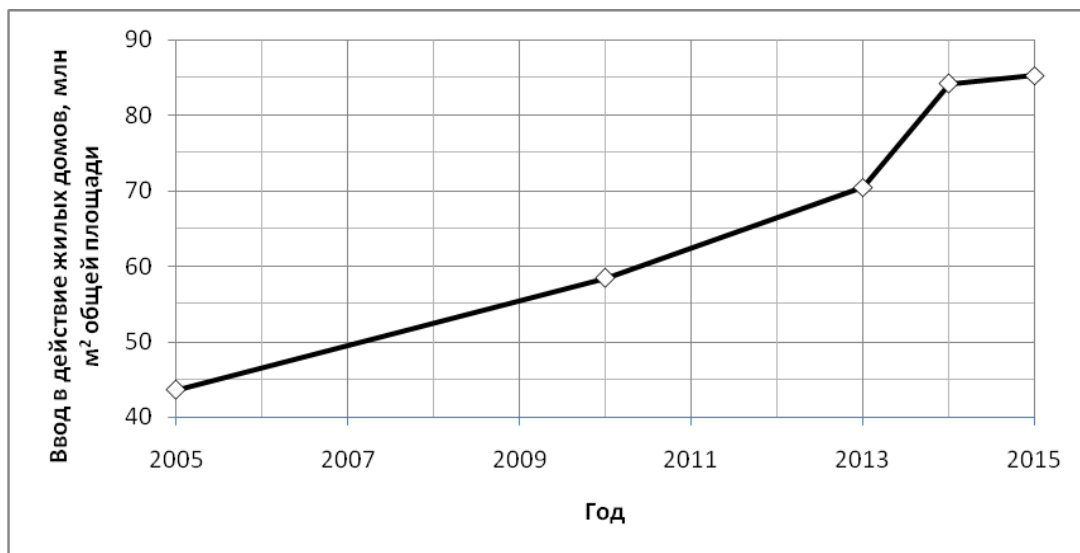


Рисунок 1.9 – Тенденции ввода в действие жилых домов в Российской Федерации

Достаточно часто строительство домов происходит на окраинах городов, а следовательно, необходимо работать с незастроенными или малозастроенными территориями с небольшим количеством подземных и надземных сооружений и без густой растительности, так как это выгодно с экономической и экологической точек зрения. С учетом того, что во время проведения изысканий согласно приложению Б инструкции [91] при данных условиях необходимо создание топографического плана масштаба 1 : 1000 [53] и площадь территории не превышает 200 Га, съемка с применением мультироторного БЛА становится довольно эффективной и рентабельной, что достигается в первую очередь за счет мобильности и автономности: проведение всего комплекса съемочных работ возможно с участием только одного-двух специалистов. Компактность и открытость – эти свойства дают возможность методике с использованием БЛА развиваться с помощью электронных и компьютерных технологий технические модули и повышать качество съемки.

Кроме того, особенностью методики является невысокая стоимость выполнения работ. Эти преимущества создают предпосылки к созданию автоматизированной технологии съемки топографических планов с использованием мультироторного БЛА.

Несмотря на всю ее привлекательность, для устранения трудностей, с которыми можно столкнуться во время работы, необходимо решить некоторые задачи. При условии использования данной технологии на малозастроенной территории до 200 Га и отсутствия сплошной высокой растительности, во-первых, возникает проблема подбора недорогого БЛА вместо дорогостоящего с *RTK*-приемником на борту. Во-вторых, требуется уточнение нормативной базы по выполнению аэрофотосъемки и создания съемочного обоснования. Третья задача – создание автоматизированной методики камерального дешифрирования.

Для разрешения первой и второй задач необходимо использование съемочного обоснования. Таким образом, необходимо определить их количество, местоположение и методику создания опознаков. Также стоит установить принципиальные различия между выполнением аэрофотосъемки классическим методом и методом с применением БЛА.

Для решения третьей задачи необходимо создать автоматизированные алгоритмы классификации объектов местности и их векторизации с учетом условных знаков и требований по точности, установленных в нормативных документах. При условии практически полного автоматизированного создания ортофотоплана и горизонталей при помощи программных продуктов камеральные работы будут выполняться в кратчайшие сроки при минимальной затрате физического труда.

ГЛАВА 2 ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ, ПОЛЕВЫЕ И ЛЕТНО-СЪЕМОЧНЫЕ РАБОТЫ

Комплекс аэрофотосъемочных работ по созданию топографического плана начинается с выполнения подготовительных работ, которые предшествуют полевым и летно-съемочным работам. Для их выполнения необходимо осуществить рекогносцировку местности, назначить дату и время полевых и летно-съемочных работ, определить положение точек съемочного обоснования (опознаков), выбрать оборудование и выполнить расчет параметров аэрофотосъемки, от которого зависит успешность создания топографического плана.

Прежде всего, подготовку следует начать с выбора времени полевых работ. В зависимости от времени года изменяется ландшафт и густота растительного покрова. В большинстве случаев оптимальными для съемок являются осень и весна, когда деревья не покрыты листвой, а земля не находится под сезонным снежным покровом [49]. В пункте 9.9 инструкции [17] разрешено выполнение фотографирования с 10 до 17 часов, хотя наилучшим временем является полдень, когда падающие тени минимальны. Перед летно-съемочными работами необходимо уточнять соответствие паспортных характеристик компонентов БЛА и погодных условий, в которых он применяется: температуры, влажности и возможности работы во время выпадения осадков.

Далее выполняется определение количества и местоположения точек съемочного обоснования, однако в данной задаче есть несколько вопросов, вызывающих трудности и требующих разрешения.

2.1 Определение количества и местоположения точек съемочного обоснования

Создание цифровой модели местности (ЦММ) выполняется на основе опорных точек. В частности в пункте 12.14.3 инструкции [31] установлено, что

опорные точки необходимо располагать по периметру и в середине блока, а также на свободных границах участка не реже чем через 4–5 базисов фотографирования (рисунок 2.1). Однако аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата (БЛА) является альтернативной и имеет ряд принципиальных отличий от классической и поэтому необходимо выполнить определение оптимального количества опорных точек.

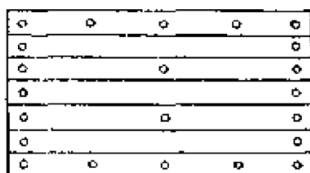


Рисунок 2.1 – Схема расположения опорных точек согласно инструкции [31]

Определить минимальное количество опорных точек можно при помощи моделирования облака точек (рисунок 2.2), построенного на основе аэрофотосъемки с применением БЛА и точек съемочного обоснования. Для этого использовался ПП *Agisoft PhotoScan* [6].

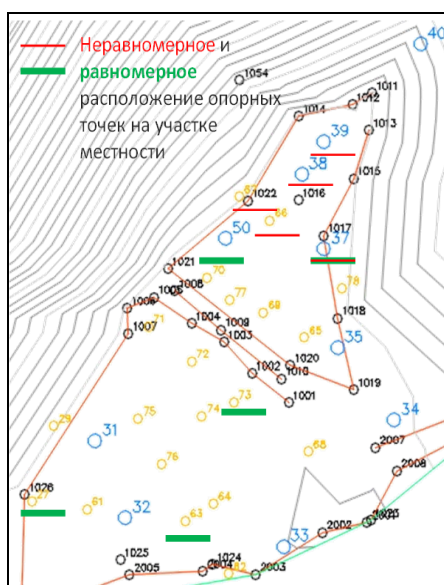


Рисунок 2.2 – Схема расположения точек съемочного обоснования экспериментального полигона (обозначены желтым и синим)

Оценка точности положения точек облака осуществлялась с помощью метода наименьших квадратов. Рассматривались последовательно 3 и более опорных точек (марок). Также принималось во внимание значение среднего количества фотоснимков, на которых располагается одна и та же марка (среднее количество проекций). Такой подход, применявшийся для трёх облаков точек разной конфигурации (близкие к квадратной, прямоугольной с соотношением сторон 1 к 3 и окружности), обеспечил его достоверность, что подтверждается рассчитанной на основе контрольных марок средней квадратической погрешностью (СКП) (таблица 2.1) [6].

Таблица 2.1 – Расчёт СКП положения плотного облака точек для трёх участков при вариации числа контрольных точек. Последовательность цветов ‘красный – оранжевый – желтый – зеленый’ иллюстрирует превышение СКП своего минимального значения от большего к меньшему соответственно.

Участок 1, карьер					
Количество марок	Среднее количество проекций	СКП по Y, см	СКП по X, см	СКП по H, см	СКП, см
3	10,33	6,71	4,99	7,03	10,93
4	11,50	5,27	4,00	1,38	6,76
5	10,80	4,52	3,13	1,14	5,62
6	11,33	4,15	2,86	1,06	5,15
7	11,00	3,94	2,81	0,99	4,94
8	11,25	3,98	2,81	1,01	4,98
9	11,11	3,86	2,82	0,89	4,87
10	11,20	3,82	2,65	0,88	4,73
11	11,36	3,83	2,61	0,89	4,72
12	10,92	3,69	2,56	0,83	4,57

Участок 2, поле					
Количество марок	Среднее количество проекций	СКП по Y, см	СКП по X, см	СКП по H, см	СКП, см
3	8,67	10,02	12,98	117,38	118,52
4	8,25	9,09	9,36	24,64	27,89
5	7,60	7,60	8,37	15,89	19,50
6	7,83	6,78	7,97	14,66	18,01

Участок 3, карьер					
Количество марок	Среднее количество проекций	СКП по Y, см	СКП по X, см	СКП по H, см	СКП, см
3	14,67	8,01	3,62	44,88	45,74
4	13,50	2,79	2,85	16,02	16,51
5	15,20	1,26	2,63	8,95	9,41
6	13,50	1,02	2,22	8,24	8,59
7	14,29	1,01	1,66	6,06	6,36

Для ориентирования модели в пространстве необходимо определить семь элементов внешнего ориентирования (ЭВО), поэтому необходимы как минимум три опорные точки (9 значений координат) [66]. Однако из-за ошибок координат в облаке точек и опорных точках СКП значительна. Четыре опорные точки включают в себя одну избыточную, которая может послужить контролем, однако экспериментально показано, что ее может быть недостаточно в связи с непредсказуемостью получения ошибки. Результаты расчетов показали, что

пять опорных точек можно принять в качестве оптимального количества, так как начиная с этого значения величина СКП становится небольшой и далее уменьшается незначительно (таблица 2.1).

Для рационального расположения опорных точек были смоделированы различные варианты их расстановки и рассчитана СКП. По результатам моделирования (таблица 2.2) наибольшую точность обеспечило равномерное расположение опорных точек. На рисунке 2.2 зеленым подчеркнуты пять опорных точек, расположенных равномерно (СКП облака точек – 7,5 см), красным подчеркнуты точки с неравномерным расположением, которое показало самую низкую точность (СКП = 57 см). Данный вывод полностью согласуется с пунктом 12.14.3 инструкции [31]. Таким образом, пять опорных точек, расположенных равномерно по всей снимаемой территории, являются наиболее оптимальным решением, которое обеспечивает достаточную точность построения и ориентирования модели в пространстве. В таком случае полевые работы выполняются оперативно и в наименьшем количестве.

Таблица 2.2 – Значения СКП облака точек по результатам моделирования различной расстановки опорных точек

№	Номера опорных точек	Среднее количество проекций	Самая низкая точка		Самая высокая точка		Максимальное превышение опорных точек	СКП по Y, см	СКП по X, см	СКП по H, см	Общая СКП, см
			№	Высота, м	№	Высота, м					
1	27 29 31 32 61	8,8	27	608,44	29	609,80	1,36	16,91	28,19	30,39	44,77
2	27 32 61 62 63	9,6	27	608,44	32	609,58	1,14	14,35	28,28	39,77	50,87
3	37 38 39 66 67	10,2	67	609,29	37	610,59	1,30	26,90	34,29	36,78	57,03
4	29 50 67 70 71	9,4	71	608,80	29	609,80	1,00	10,38	11,44	1,80	15,55
5	33 34 35 68 78	8,0	33	608,31	68	609,63	1,32	16,51	8,62	6,90	19,86
6	72 73 74 75 76	13,2	73	608,27	76	609,62	1,35	8,72	11,09	12,02	18,53
7	69 72 73 74 77	16,4	73	608,27	69	610,19	1,92	8,56	8,74	11,29	16,65
8	27 31 37 69 75	11,6	27	608,44	37	610,59	2,15	7,60	6,63	10,49	14,55
9	29 31 68 73 75	10,2	73	608,27	29	609,80	1,53	10,15	12,02	6,26	16,93
10	27 37 50 63 73	12,6	73	608,27	37	610,59	2,32	5,08	4,84	2,76	7,54
	Среднее:	11,0									

2.2 Оценка стабильности положения опорной сети в зависимости от ошибки отдельного пункта и рельефа местности

Немаловажным фактором съемки является стабильность положения опорной сети. Для его оценки необходимо выполнить анализ влияния ошибки в

одном из пунктов сети, а также установить влияние рельефа на сеть.

Для подтверждения стабильности опорной сети в один из их пяти пунктов вводилось неверное значение координаты. При этом экспериментально показано, что при ошибке в 5 см точность плотного облака точек понижалась не более, чем на 6 мм (таблица 2.3). Эти результаты свидетельствуют о стабильности опорной сети.

Таблица 2.3 – Значения СКП плотного облака точек при введении неверного значения координаты опорной точки

Введенная ошибка в опорную точку	СКП по Y, см	СКП по X, см	СКП по H, см	СКП, см
Без ошибки	9,0	6,5	6,0	12,6
+5 см по оси X	8,8	<u>6,5</u>	6,0	12,5
-5 см по оси X	9,1	<u>6,7</u>	6,0	12,8
+5 см по оси Y	<u>9,7</u>	6,5	6,0	13,2
-5 см по оси Y	<u>8,3</u>	6,5	6,0	12,2
+5 см по оси H	9,0	6,5	<u>7,2</u>	13,2
-5 см по оси H	9,0	6,5	<u>5,6</u>	12,4

Для определения зависимости точности модели от рельефа местности необходимо разработать метод, позволяющий оценить точность построений в локально заданном участке облака точек. Учитывая то, что при более низком значении точности разброс точек по высоте будет большим, для решения поставленной задачи была написана программа на языке *Python* с применением библиотек *Matplotlib* и *Numpy*, работающая по следующему алгоритму:

- 1) выполняется загрузка облака точек;
- 2) между точками создаются ребра при помощи триангуляции Делоне;
- 3) для каждой точки выполняется поиск соседних пунктов, которые соединены ребрами триангуляции между собой (далее – соседние пункты);
- 4) рассчитываются расстояния между точкой и соседними пунктами по формуле

$$l_{ki} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}, \quad (2.1)$$

где l_{ki} – расстояние от текущей точки до соседнего пункта k ; x_i, y_i – абсцисса и ордината рассматриваемой точки; x_k, y_k – абсцисса и ордината соседнего пункта.

5) для каждой точки по формуле рассчитывается усредненное значение её высоты:

$$H_i' = \sum_{k=1}^n \frac{H_k}{l_{ki}} / \sum_{k=1}^n \frac{1}{l_{ki}}, \quad (2.2)$$

где H_i' – усредненная высота текущей точки, n – количество соседних пунктов, H_k – высота соседнего пункта.

6) выполняется вычисление квадрата разности исходной и усредненной высот для каждой точки:

$$vv_i = (H_i - H_i')^2, \quad (2.3)$$

где vv_i – квадрата разности исходной и усредненной высот, H – соответствующие высоты рассматриваемой точки.

7) вычисление СКП на основе полученных в пункте 5 значений по формуле [20]

$$m_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m vv_i}{p}}, \quad (2.4)$$

где m_H – СКП облака точек, p – количество точек облака.

Для наглядности упрощенный (точки равноудалены друг от друга) алгоритм продублирован в программном продукте *Microsoft Excel*, результат которого представлен на рисунке 2.3.

Определение зависимости точности модели от рельефа местности начато с создания фрагментов местности (вырезания из общего облака) с разными преобладающими углами наклона (рисунок 2.4). Далее для каждого участка выполнена фильтрация с помощью написанной программы по представленному выше алгоритму (рисунок 2.5).

Исходное облако точек											
5	5	5	5	2	4	6	8	5	5	5	5
5	5	5	5	2	4	6	8	5	5	5	5
5	5	5	5	2	4	6	8	5	1	5	5
5	5	5	5	2	4	6	8	5	5	5	5
Усредненное облако точек											
5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	4,0	6,0	8,0	5,0	5,0	5,0	5,0
5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	4,0	6,0	8,0	4,6	4,6	4,6	5,0
5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	4,0	6,0	8,0	4,6	4,6	4,6	5,0
5,0	5,0	5,0	5,0	2,0	4,0	6,0	8,0	4,6	4,6	4,6	5,0
Разница квадратов исходного и усредненного облаков точек											
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	12,6	0,2	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0
СКП: $\sigma_y = 0,0$				СКП: $\sigma_y = 0,0$				СКП: $\sigma_y = 14,2$			

Рисунок 2.3 – Результат выполнения предложенного алгоритма. Слева – идеальный равнинный участок с высотой 5, по центру – идеальный наклонный участок с перепадом высот от 2 до 8, справа – участок, в котором высота одной точки намеренно указана неправильно

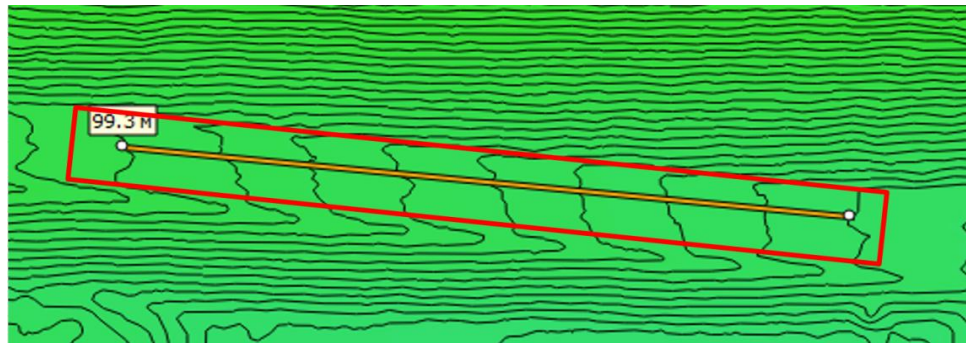


Рисунок 2.4 – Фрагмент местности с преобладающим углом наклона 4° (выделен красной рамкой)

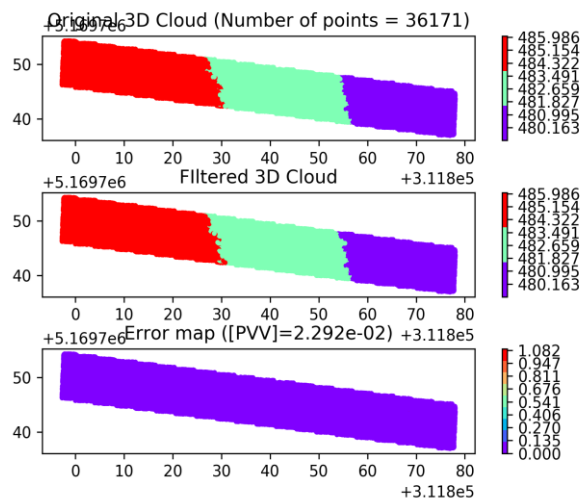


Рисунок 2.5 – Результат работы программы, выполняющей алгоритм усреднения высот облака точек и расчет СКП

Сравнение СКП фрагментов местности с разными преобладающими углами наклона представлено в таблице 2.4. В ней представлены преобладающий угол наклона фрагмента местности, количество точек, из которого он состоит, СКП, полученная с помощью представленного выше алгоритма, а также ошибка ошибки, рассчитанная по формуле [20]

$$m_{m_H} = \frac{m_H}{\sqrt{2N}}, \quad (2.5)$$

где N – количество точек, из которых состоит фрагмент, m_{m_H} – ошибка ошибки. С учетом погрешности определения преобладающего угла наклона местности и положения камеры относительно поверхности Земли было решено не учитывать значения углов, близкие к 45° (выделены серым в таблице).

Таблица 2.4 – Значения СКП фрагментов плотного облака точек в зависимости от преобладающего угла наклона фрагмента

№	Преобладающий угол наклона фрагмента, °	Количество точек	СКП, мм	Ошибка ошибки, мм
1	4	36171	22,9	0,1
2	9	16813	15,5	0,1
3	9	5078	24,8	0,2
4	23	11178	18,4	0,1
5	24	11661	16,8	0,1
6	37	2236	32,5	0,5
7	48	7153	25,0	0,2
8	48	3968	194	2,2
9	61	15600	68,7	0,4
10	71	15884	795	4,5
11	73	23616	112	0,5
12	76	43939	1706	5,8

Результат можно представить наглядно с помощью рисунка 2.6, где не учитываются фрагменты № 7 и 8 из таблицы 2.4, а ось СКП дана в логарифмической шкале. Очевидно, что рельеф не влияет на точность построения модели. Значительное увеличение ошибки при преобладающем угле наклона более 45° связано в первую очередь с тем, что при горизонтальном положении камеры достаточно сложно точно определить координаты точек,

которые лежат на поверхности Земли, расположенной почти отвесно.

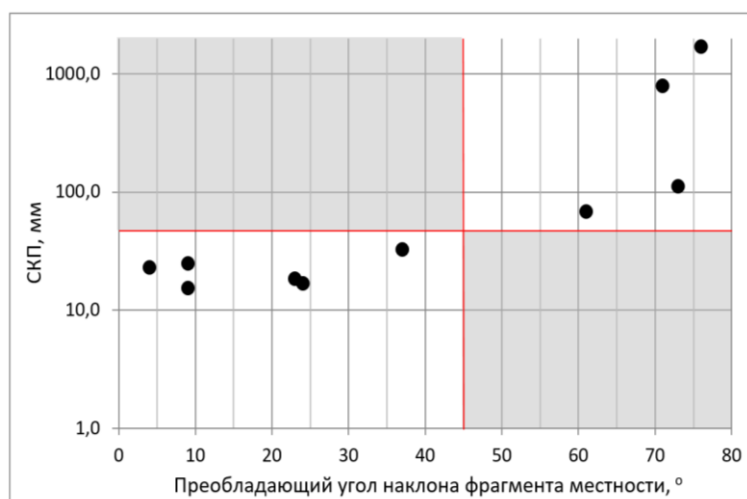


Рисунок 2.6 – Зависимость значения СКП фрагментов плотного облака точек от преобладающего угла наклона фрагмента

Таким образом, случай с пятью опорными точками показал высокую устойчивость по отношению к грубым ошибкам, а также при съемке на равнинной местности. Съемка холмистой и горной местности не должна быть плановой, при этом необходимо производить поворот оптической оси камеры перпендикулярно к касательной плоскости поверхности Земли.

В случае применения аэрофотосъемки с БЛА при составлении изыскательских планов необходимо создавать опорную и съемочную геодезические сети с плотностью не менее 16 на 1 км² для масштаба 1 : 1 000. Таким образом, для территории 2 км² получается соответственно не менее 32 пунктов. Этого избыточно для выполнения аэрофотосъемки, поэтому все оставшиеся точки, которые не использовались в качестве опорных, рекомендуется учитывать в качестве контрольных для расчета точности модели.

2.3 Расчет параметров АФС и выбор мультикоптера

Мультироторные БЛА набирают популярность, их цена с каждым днем падает, и уже почти каждый может позволить себе его приобрести. Таким

образом, их стали использовать во многих сферах деятельности человека, и геодезия не стала исключением. Мультикоптеры обладают рядом преимуществ, в том числе и перед самолетными БЛА: это высокая маневренность и стабильность, низкая высота полетов, небольшая скорость, достаточная грузоподъемность, удобные взлет и посадка практически с любой поверхности земли, они проще и дешевле в обслуживании. Все это позволяет использовать мультикоптеры для выполнения топографических съемок в крупных масштабах: 1 : 500 и 1 : 1 000 [78].

В настоящее время на рынке можно найти большое количество различных мультироторных БЛА (мультикоптеров), в связи с этим появляется новая проблема – выбор оптимальной модели. Однако, в основном, большинство компаний ориентируется на колоссальный спрос потребителей в области создания красивых фотокадров или видеосъемки для фильмов и сюжетов. Существуют и фирмы, ориентирующиеся, например, на доставку товаров или выполнения поисково-спасательных работ и даже на геодезию. Однако стоимость таких аппаратов достаточно высока и порой находится на несколько порядков выше себестоимости продукции. Решением данной проблемы может стать создание собственной модели мультикоптера.

К выбору ее комплектующих следует относиться весьма ответственно, так как от характеристик одной детали зависят характеристики другой. Рекомендуется начать с выбора рамы. Оптимальным решением для мультироторного БЛА является 6-лучевая рама, дополненная карбоновыми ножками и подвесом для камеры. Гексакоптеры являются более стабильными, чем квадрокоптеры, но при этом стоят дешевле и тратят меньше электроэнергии, чем октокоптеры. Они отлично подходят для выполнения аэрофототопографических съёмок.

Следующим шагом является выбор мотора и соответствующих ему элементов: регулятора скорости и размера пропеллера. Необходимо использовать двигатели с небольшим показателем оборотов на вольт (KV), так

как они обладают достаточным значением крутящего момента, поэтому способны поднять тяжелый груз [24]. Для выполнения аэрофотосъемки может подойти, например, мотор *Turnigy AСК-CQ-480* и пропеллер типа 1555 [6].

Для получения максимальной продолжительности полета необходимо использовать аккумуляторные батареи, вес которых составляет от 35,5 до 89 % веса самого мультикоптера [79]. В разработанной в ходе этого исследования модели с аккумулятором емкостью 20000 мА·ч (72 000 Кл) и напряжением 4S это значение составило 55% [6].

Далее выполняется подбор телеметрии и полетного контроллера. Оптимальным решением в выборе последнего является *ArduPilot Mega*. С его помощью можно пролетать по назначенному заранее маршруту, что необходимо для выполнения аэрофотосъемки. Более того, контроллер обладает возможностью двусторонней передачи телеметрических данных между воздушным судном и наземной станцией (планшетом, телефоном или ноутбуком), ведения журнала во встроенной памяти, а также является проектом с открытым программным обеспечением, что позволяет создавать новые программы и исправлять ошибки в них [1, 6].

Камера для выполнения аэрофотосъемки устанавливается на подвес и должна иметь высокое разрешение, фокусное расстояние около 50 мм (35 мм в пленочном эквиваленте) и желательно небольшой вес [74]. Такими характеристиками обладает *Sony Alpha 6000*, фокусное расстояние которой составляет 16–50 мм, разрешение – 4000х6000 (24 Мп), а размер пиксела – 3,9 мкм [6, 132].

Полученная модель гексакоптера имеет необходимые функции для выполнения фототопографических работ, а именно: имеет на борту *GPS*-приемник, производит полет по заданному маршруту благодаря автопилоту и гиростабилизирует установленную на нем камеру. Для расчета характеристик гексакоптера использовался «Калькулятор для мультикоптеров», разработанный Маркусом Мюллером (рисунки 2.7 – 2.8 [6]) [58].

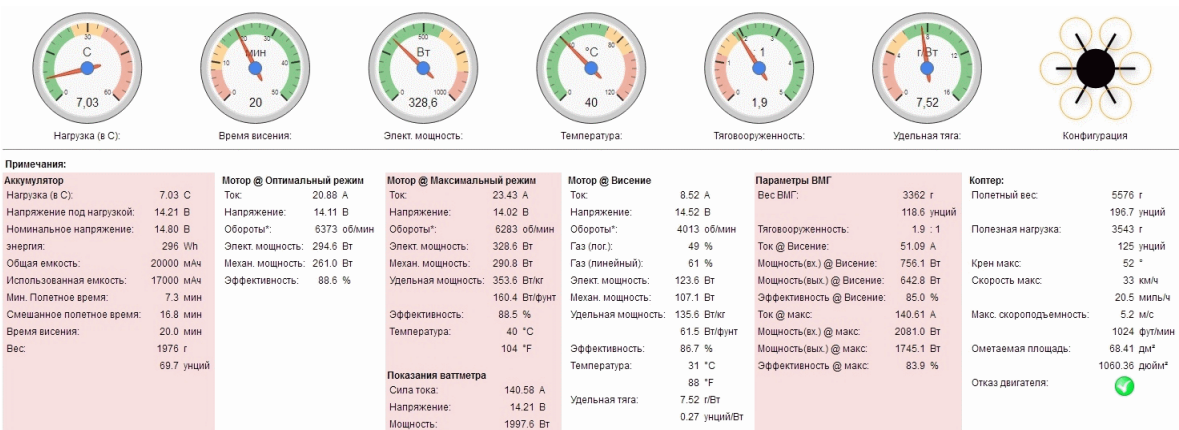


Рисунок 2.7 – Характеристики гексакоптера

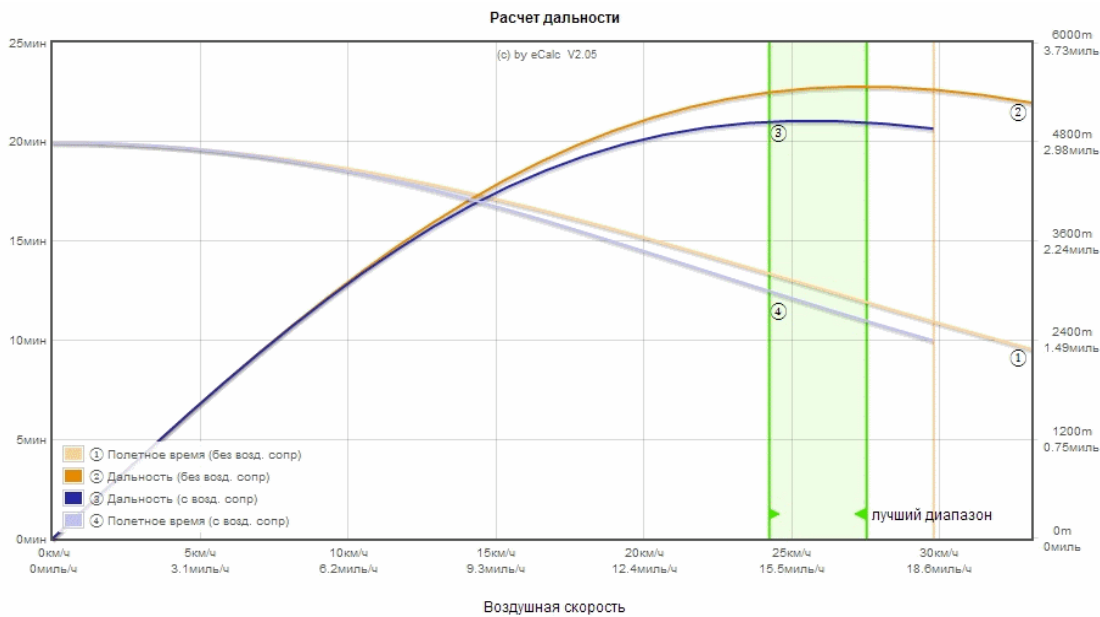


Рисунок 2.8 – Графики для расчета дальности полета гексакоптера

Все значения, представленные в верхней части рисунка 2.7, являются допустимыми. Значение показателя тяговооруженности 1,9 близко к двум, таким образом, можно сделать вывод, что гексакоптер стабилен во время полета. Время полета может составлять 20 минут, однако согласно рисунку 2.8 максимальная дальность полета с учетом воздушного сопротивления достигает около 5 км при скорости примерно 26 км/ч. Таким образом, продолжительность полета сокращается до 12 минут, но полет становится более эффективным.

Последним этапом предполевой подготовки является расчет параметров

аэрофотосъемки. Исходными данными являются границы картографируемого участка, масштаб создаваемого топографического плана, высота сечения рельефа, фокусное расстояние камеры f , размеры кадра l_x и l_y , крейсерская скорость БЛА V , время полета без смены аккумулятора T_{C0} и величина допустимого смаза изображения δ . Данный расчет для выполнения плановой аэрофотосъемки производится с помощью таблицы 2.5 [8, 42] на основании рисунков 2.7 – 2.8. В качестве примера, представлен расчет параметров плановой аэрофотосъемки для представленного выше гексакоптера с целью создания топографического плана масштаба 1 : 1 000 площадью 1 км² (квадрат со стороной 1 км, $A=C=1$ км) и значения GSD равным 5 см / пиксел (*Ground sample distance* – размер пиксела на местности), которое не превышает значение предельной графической точности (0,1 мм) для масштаба 1 : 1 000 – 10 см.

Таблица 2.5 - Расчет параметров аэрофотосъемки

№	Параметр	Формула	Значение
1	Высота фотографирования, м ($f = 4086 \text{ pix}$)	$H = f \cdot GSD$	122,6
2	Время подъема и спуска, минут (скорость подъема и спуска соответственно – $V_{\Pi} = V_C = 4 \text{ м/с}$)	$T_{\Pi C} = \frac{H}{V_{\Pi}} + \frac{H}{V_C}$	1,02
3	Расчетное (предварительное) продольное перекрытие аэрофотоснимков, %	$P = 80 \%$	80
4	Расчетное (предварительное) поперечное перекрытие аэрофотоснимков, %	$Q = 60 \%$	60
5	Расстояние между маршрутами на местности, м	$D = \frac{100 - Q}{100} \cdot l_y \cdot GSD$	72
6	Количество маршрутов на участке местности	$N = \frac{C}{D} + 1$	15
7	Базис фотографирования, м	$B = \frac{100 - P}{100} \cdot l_x \cdot GSD$	24
8	Количество снимков в маршруте	$n = \frac{A}{B} + 3$	45
9	Общее количество снимков	$\Sigma = N \cdot n$	675
10	Общая протяженность всех маршрутов, км	$L = (A + 3 \cdot B) \cdot N + (C + D)$	17,2
11	Продолжительность съемки участка, ч	$T = \frac{L}{V}$	0,67

Продолжение таблицы 2.5

12	Продолжительность полета, ч	$T_C = T_{C0} - T_{ПС}$	0,18
13	Число полетов	$K = \frac{T}{T_C}$	4
14	Интервал между экспозициями, с	$t = \frac{B}{V}$	3,35
15	Предельно допустимая выдержка при фотографировании, с ⁻¹	$\tau = \frac{\delta \cdot GSD}{V}$	1 / 470
16	Общее требуемое количество флеш-памяти, Мб	$J_{общ} = J \cdot \Sigma$	6264

2.4 Тригонометрическое нивелирование

Полевые работы начинаются с установки точек съемочного обоснования, которая выполняется перед аэрофотосъемкой. Их пространственные координаты определяют при помощи спутниковых [98] и/или линейно-угловых измерений [11]. После этого устанавливают кодовые марки, которые автоматически распознаются программой, производящей построение ЦММ.

Определение координат в режиме *RTK* выполняется быстро и просто, однако в случае использования линейно-угловых измерений тахеометром возникает проблема определения высот точек съемочного обоснования.

Согласно пункту 12.15.8 инструкции [31] высоты точек съемочного обоснования (опознаков) определяют техническим нивелированием при съемке с высотой сечения 0,25; 0,5; 1 и 2 м и тригонометрическим нивелированием при съемке всхолмленных и горных районов с высотой сечения рельефа 2 и 5 м.

Однако в последнее время многие геодезические компании используют тригонометрическое нивелирование для определения высотных отметок. Это связано с активным внедрением в производство современных электронных тахеометров, благодаря которым можно выполнить нивелирование наклонным лучом с высокой точностью [62]. Более того, данный метод позволяет использовать один прибор для определения как высотной, так и плановой

геодезической основы, а возможность отклонять луч визирования от горизонтали позволяет выполнять съемку в холмистой и низкогорной местности [5].

Однако, например, в инструкции [91] учитываются современные тенденции, и согласно таблице приложения Г3 тригонометрическое нивелирование приравнено по точности к техническому, которое может быть использовано для выполнения высотной привязки центров пунктов опорной геодезической сети; это может применяться для выполнения аэрофотосъемки при изысканиях в строительстве.

Для того чтобы достичь требуемой точности, соизмеримой с техническим нивелированием, необходимо устранить грубые ошибки тригонометрического нивелирования: неточность определения горизонта прибора (ГП) и высоты визирования. При этом нет необходимости устранять ошибки поправок, учитывающих влияние рефракции и кривизны Земли и перефокусировки трубы вследствие разных расстояний от прибора до вехи на станциях, так как они присутствуют и в техническом нивелировании.

Выполнение измерений зенитных расстояний в пасмурную погоду является наиболее благоприятным. В солнечную погоду их можно наблюдать утром, около 0,5 ч после окончания периода спокойных изображений и примерно за 2 ч до них вечером. Более того, вечерний период более благоприятен для измерений, чем утренний.

Точности определения ГП и высоты визирования при помощи рулетки недостаточно, поэтому предлагается следующая методика точного определения высоты визирной оси (рисунок 2.9). На марку (репер), имеющую высотную отметку, устанавливается вешка (рейка) с точно определенной высотой отметки (высотой визирования), а тахеометр располагают в 3 – 5 м от нее. Зенитное (z') и наклонное (S') расстояния измеряют два раза при двух положениях круга тахеометра, причем желательно добиться значения зенитного расстояния близкого к 90° .

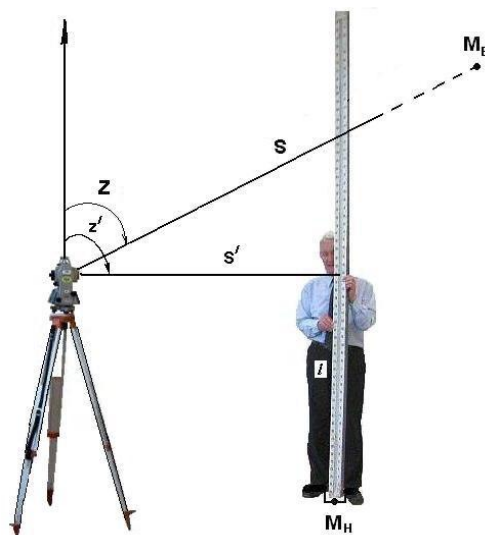


Рисунок 2.9 – Передача высотных отметок методом тригонометрического нивелирования

Отметку горизонтальной оси вращения трубы тахеометра (H_T) определяют по формуле

$$H_T = H_H + l - S' \cdot \cos z' \quad (2.6)$$

где H_H – отметка марки M_H ; l – высота штриха на вешке (рейке) [27].

Погрешность определения высоты горизонтальной оси вращения трубы тахеометра таким способом не превышает 0,1 – 0,2 мм. В период с 2012 по 2015 годы студенты специальности «Прикладная геодезия» строительного факультета Горного университета определяли отметку одной и той же марки, находящейся на стене. В итоге было накоплено около 150 определений этой отметки. Расхождения абсолютной отметки не превысили и 0,5 мм. [4].

Далее измерения на станции выполняют серией, последовательно визируя разные направления сначала при одном положении круга, а затем при другом, либо визируют каждое направление отдельно, измеряя его при двух кругах. В связи с тем, что большой точности определения наклонного расстояния не требуется, возможно наведение как на отражатели, так и в безотражательном режиме. С целью повышения точности и проведения дополнительного контроля измерений следует в каждом полуприеме выполнять по два

независимых наведения на визирную цель. Высотную отметку визирной цели в таком случае вычисляют по формуле

$$H_B = H_T + a - S \cdot \cos z + \frac{(1-k) \cdot S^2}{2 \cdot R}, \quad (2.7)$$

где a – высота штриха на вешке, а S и z – наклонное и зенитное расстояния до нее. Коэффициент k вертикальной рефракции в большинстве случаев можно принять равным 0,15, а радиус Земли R – приближенно равным 6400 км.

В случае необходимости точного определения высотной отметки на вешке возможно последовательное определение зенитного и наклонного расстояний на отметку и непосредственно на саму точку, на которой стоит вешка. Разность полученных по формуле 2.7 значений высот даст высоту штриха на вешке. При этом представленное выше ее определение необходимо выполнить в начале и конце проводимых работ для контроля стабильности.

После выполнения измерений на станции производится контроль следующих величин:

- а) колебания места зенита;
- б) разность расстояний до рейки при кругах лево и право;
- в) разность превышений, полученных при двух приемах.

Если считать, что высота оси вращения трубы тахеометра и высота визирования определены практически безошибочно, то продифференцировав формулу 2.6, можно найти желаемую инструментальную точность измерений (СКП высотной отметки визирной цели (марки) относительно марки M_H) по формуле

$$m_H^2 = m_s^2 \cdot \cos^2 z + S^2 \cdot \sin^2 z \cdot \frac{m_z^2}{\rho^2} + \frac{m_k^2 \cdot S^4}{4R^2}, \quad (2.8)$$

где m_k , m_z и m_s – соответственно СКП коэффициента вертикальной рефракции, зенитного и наклонного расстояний, $\rho = 206265''$.

Чтобы удостовериться в том, что тригонометрическое нивелирование

соответствует техническому, необходимо произвести предрасчет измерений. Например, при условии использования высокоточного тахеометра с предполагаемыми СКП $m_s = 3\text{ мм} + 2\text{ мм/км}$ и $m_z = 2''$, длиной луча визирования = 100 м, коэффициентом рефракции $k=0,15\pm0,05$, а также предельным отклонением луча визирования от горизонтали 2° ($z=88^\circ$) точность определения превышения между тахеометром и определяемой точкой по формуле 2.8 составит $0,98\text{ мм}$. Таким образом, на километр хода суммарная ошибка составит: $m_{h/\text{км}} = 0,98\text{ мм} \cdot \sqrt{1000\text{ м}/100\text{ м}} = 3,1\text{ мм}$, что соответствует требованиям не только для технического нивелирования, но и для нивелирования III и IV классов, для которых согласно таблице 4 инструкции [28] инструментальная ошибка составляет 3 и 6 мм на километр двойного хода (4,2 и 8,5 мм на км одинарного хода соответственно). Однако для их достижения необходимо также устранение ошибок в учете поправок, связанных с влиянием рефракции и кривизны Земли и перефокусировки трубы вследствие разных расстояний от прибора до вехи на станциях. Данное решение описано в работах [3, 5, 61, 63].

Таким образом, данный метод имеет следующие достоинства: значительно сокращает время измерений, применим в низкорослой и холмистой местности, позволяет проводить измерения для плановой и высотной основы только одним прибором – электронным тахеометром [5].

Более удобной может показаться методика, в которой нет необходимости определять ГП и высоту визирования. Это возможно за счет того, что постоянно используется одна рейка или вешка со стабильным положением отметки относительно нижнего ее конца, а постоянное значение ГП не участвует в расчетах, подобно геометрическому нивелированию. Тогда расчет превышения между двумя высотными отметками примет вид:

$$h = H_{B1} - H_{B2} = \left[H_T + a_{B1} - S_{B1} \cdot \cos z_{B1} + \frac{(1-k) \cdot S_{B1}^2}{2 \cdot R} \right] - \left[H_T + a_{B2} - S_{B2} \cdot \cos z_{B2} + \frac{(1-k) \cdot S_{B2}^2}{2 \cdot R} \right],$$

$$h = S_{B2} \cdot \cos z_{B2} - S_{B1} \cdot \cos z_{B1} + a_{B1} - a_{B2} + \frac{(1-k) \cdot (S_{B1}^2 - S_{B2}^2)}{2 \cdot R}, \quad (2.9)$$

где h – превышение между двумя визирными целями (B1 и B2). Таким образом, высота горизонтальной оси вращения трубы тахеометра (в случае ее стабильного положения) не влияет на точность определения превышения между точками.

При переходе на следующую станцию (перестановке тахеометра на другую точку) необходимо оставить вешку (рейку) на точке, определяемой на последней станции, и вычислить превышение между точками стояния:

$$h_T = -S_{T2} \cdot \cos z_{T2} + S_{T1} \cdot \cos z_{T1} + l_{T1} - l_{T2} + \frac{(1-k) \cdot (-S_{T1}^2 + S_{T2}^2)}{2 \cdot R}, \quad (2.10)$$

где h_T – превышение между отметками горизонтальной оси вращения трубы тахеометра на первой и второй точках. Полученное значение вводится в последующие измерения на новой станции.

2.5 Летно-съёмочные работы с применением БЛА

После определения точек съёмочного обоснования необходима установка на них кодовых марок, которые автоматически распознаются программой. Но в некоторых ПП, например, в *Agisoft PhotoScan* они имеют белую границу, а следовательно, в солнечную погоду могут быть сильно засвечены, в результате чего их определение на фотографии как автоматизированное, так и ручное невозможно (рисунок 2.10, слева). Поэтому марки с черной, контрастирующей границей (рисунок 2.10, справа) предпочтительнее, но в таком случае ПП *PhotoScan* не может ее автоматически распознать, так как поддерживаются только марки собственного производства. Выходами из данной ситуации могут стать выполнение полета в пасмурную погоду, использование другого ПП или расстановка полученных марок на аэрофотоснимках вручную [7, 57, 74, 129].

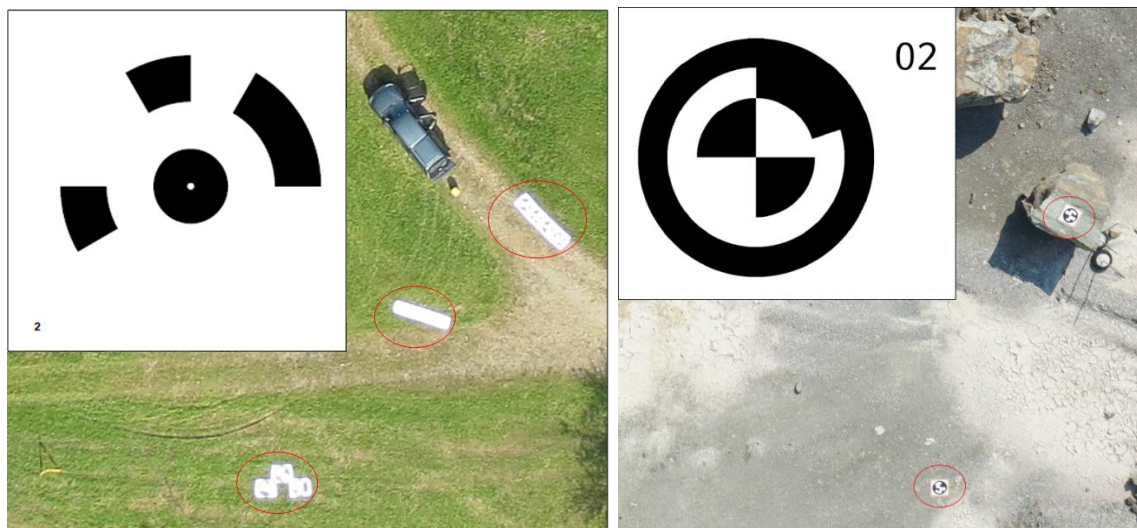


Рисунок 2.10 – Пример кодовой марки: слева – с белой границей, созданной в ПП *PhotoScan*, справа – с черной границей, используемой Техническим Университетом г. Грац

Далее возможно выполнение фотографирования поверхности Земли с БЛА. Сначала, находясь на месте съемки, следует повторно уточнить все запланированные параметры для выполнения полета, представленные в таблице 2.5. Не рекомендуется выполнять полет в дождливую погоду и при больших порывах ветра (более 15 м/с). Также важно обратить внимание на перепад высот местности во избежание столкновения с ней летательного аппарата [78].

После такого уточнения возможен полет БЛА как в ручном режиме, так и с помощью встроенного в него автопилота (рисунок 2.11), который движется по заранее заданному на местности маршруту, однако в любом случае необходимо выполнять контроль полета визуально и при помощи данных телеметрии в случае возникновения непредвиденных обстоятельств. В зависимости от типа летательного аппарата и модели различается старт: либо с ровной площадки для мультироторных аппаратов, либо с пускового устройства (катапульта) или с руки для летательных аппаратов самолетного типа [78].

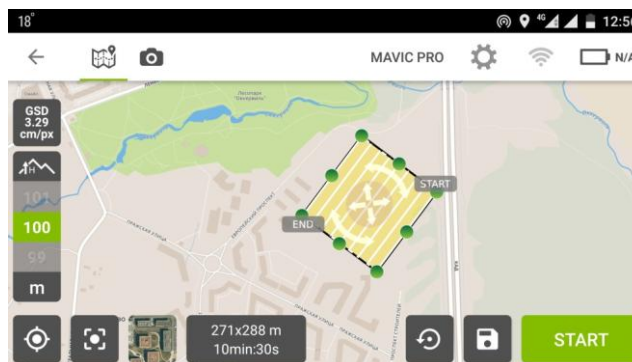


Рисунок 2.11 – Приложение для мобильного телефона *Pix4Dcapture* для выполнения полета по заданному маршруту с помощью автопилота

Во время полета БЛА придерживается установленной в таблице 2.5 высоты (высот), а положение главной оптической оси фотокамеры согласно рисунку 2.6 рекомендуется устанавливать перпендикулярно к снимаемой поверхности [57]. Фотографирование местности производится через рассчитанный интервал между экспозициями (таблица 2.5) в автоматическом режиме [106, 107].

Время съемки, включая подготовительные работы, но не учитывая определение координат точек съемочного обоснования, обычно составляет всего несколько часов. Результатом съемки является набор аэрофотоснимков, а также если на БЛА установлен приемник сигнала ГНСС, то и координаты положения воздушного судна в момент фотографирования, зная физические размеры которого, можно перейти к положению центра фотографирования, а если точность определения приемником низкая (первые значения метров), то эту поправку не учитывают [57, 106, 107, 108, 121].

2.6 Выводы по второй главе

В данном разделе было подробно описано выполнение подготовительных и полевых работ аэрофототопографической съемки с применением БЛА.

Установлено, что пять опорных точек, расположенных равномерно по всей снимаемой территории, достаточны и оптимальны для точного построения плотного облака точек, а также обеспечивают высокую

устойчивостью по отношению к грубым ошибкам.

Представлена модель гексакоптера, которая показывает высокую стабильность во время полета, обладает всеми необходимыми функциями для выполнения фототопографических работ. Данный результат проверен при помощи «Калькулятора для мультикоптеров», который отлично зарекомендовал себя во всем мире и гарантирует высокую точность рассчитанных характеристик (ошибка не более 15 %).

Несмотря на сложившееся негативное мнение о тригонометрическом нивелировании, благодаря внедрению электронных тахеометров, с его помощью возможно определять превышения с достаточно высокой точностью. Это также позволяет использовать один прибор для определения как высот точек, так и их планового положения, что значительно упрощает процедуру съемки и повышает производительность полевых работ. Достаточно удобной для выполнения тригонометрического нивелирования является методика, в которой не нужно определять ГП и высоту визирования, что возможно за счет использования одной вешки со стабильным положением отметки для выполнения наведения. С учетом рефракции и перефокусировки зрительной трубы тахеометра легко достигается точность геометрического нивелирования III и IV классов, а в некоторых случаях и II класса [3, 5, 61, 62, 63].

На точки съемочного обоснования предпочтительна установка кодовых марок с черной, контрастирующей границей. Это позволяет автоматизировано распознавать их при помощи ПП даже в солнечную, яркую погоду.

Полет БЛА удобно выполнять с помощью автопилота по заранее проложенному маршруту. Фотографирование местности выполняется через заданный промежуток времени автоматизировано. В случае съемки холмистой и горной местности необходимо производить поворот главной оптической оси камеры перпендикулярно к поверхности Земли. Предложенная методика выполнения полевых работ занимает несколько часов на рассмотренной территории до 200 Га.

ГЛАВА 3 КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

По результатам выполненных полевых работ на камеральную обработку поступают следующие данные:

- аэрофотоснимки;
- координаты точек съемочного обоснования;
- координаты центров проекций камер (если есть).

Полученные данные экспортируются со съемного носителя на персональный компьютер, после чего добавляются в ПП для построения плотного облака точек.

Камеральные работы выполняются поэтапно в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 3.1.

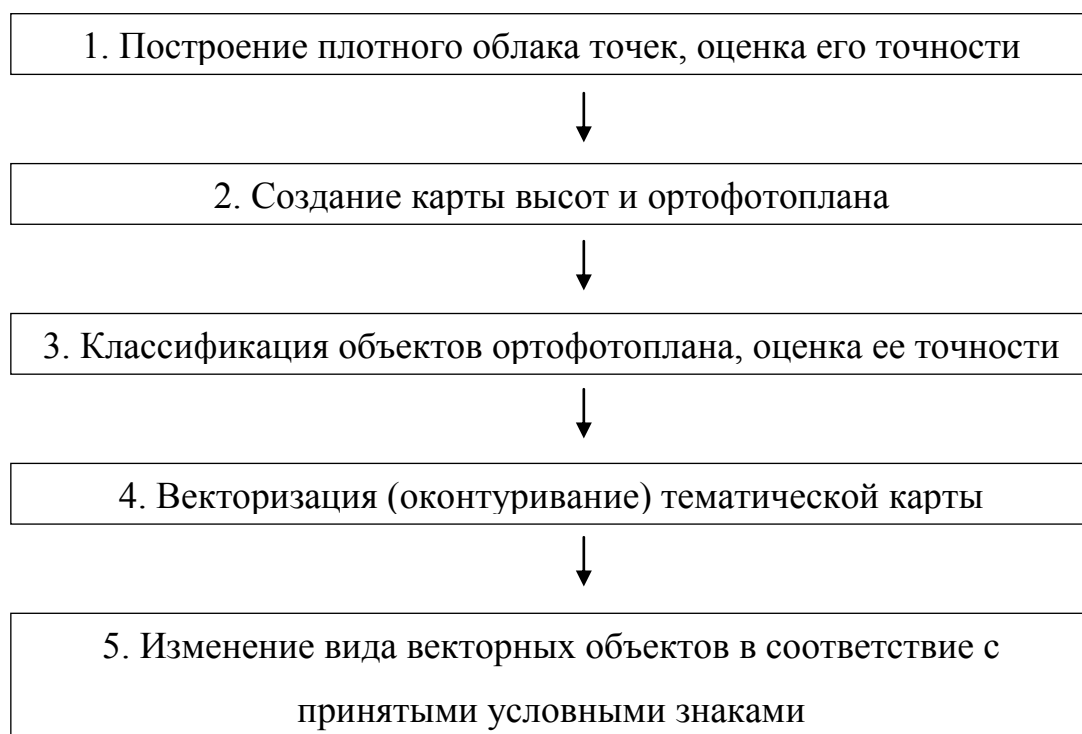


Рисунок 3.1 – Порядок выполнения камеральных работ аэрофотосъемки с применением БЛА

При высокой эффективности полевых и летно-съемочных работ обычно наблюдается достаточно длительное выполнение камеральных работ, поиск и

устранение малопродуктивных этапов которой позволяет создать успешную высокоавтоматизированную методику.

3.1 Построение ортофотоплана и карт высот местности и рельефа

Создание плотного облака точек производится в специализированных ПП. Наиболее популярные из них в настоящее время: *Agisoft PhotoScan* (Россия), *Pix4D* (Швейцария), *Photomodeler* (США), *3Dsurvey* (Словения) и другие. В связи с импортозамещением, проводимым в Российской Федерации в настоящий момент [72], на основе первого из перечисленных ПП рассмотрена методика создания плотного облака точек, а также карты высот и ортофотоплана, которая практически полностью автоматизирована. Программа *PhotoScan* петербургской компании *Agisoft* имеет большую популярность не только в России, но и используется ведущими организациями во всем мире. Поддерживается на операционных системах *Windows*, *Linux* и *MacOS*.

Блок-схема алгоритма создания плотного облака точек представлена на рисунке 3.2. Работы начинаются с настроек проекта: выбора параметров пользовательского интерфейса (язык, цвет фона), а также указания директории, в которую будет записываться журнал событий. Немаловажным является и выбор параметров компьютера. Предпочтение отдается графическим процессорам (ГП), обладающим более высокой производительностью по сравнению с центральным процессором (ЦП).

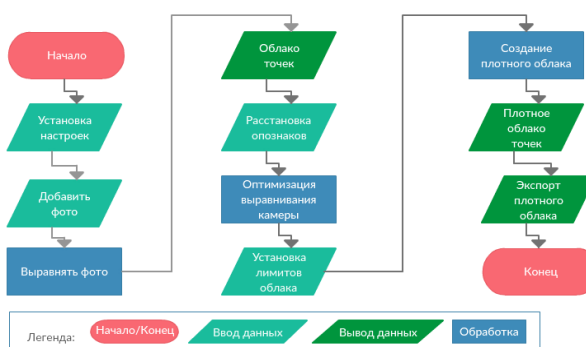


Рисунок 3.2 – Блок-схема создания плотного облака точек в ПП *Agisoft PhotoScan*

При наличии координат положения камер возможно задание координатной системы. Это осуществляется с помощью импорта файла с их положением (форматы *.txt; *.csv). Также ПП поддерживает и импорт файла изображения со стандартом *EXIF* (*Exchangeable Image File Format*).

Далее выполняется «выравнивание фотографий» (первый этап блочной фототриангуляции). Под этим этапом понимается определение положения и ориентации камер (ЭВО), а также построение на их основе разреженного облака точек. Пожалуй, главным параметром, задаваемым в ПП, является точность. Значение «высокая» означает использование изображения исходного размера, тогда как при средней точности изображение уменьшается в 4 раза (в 2 раза по каждой стороне кадра). Для низкой точности размер исходных изображений уменьшится еще в 4 раза. При значении точности «очень высокая» программа использует в расчетах изображения, увеличенные в 4 раза. Это необходимо в некоторых случаях для точной локализации связующих точек и рекомендовано только для очень резких изображений и в основном для исследовательских целей [75]. Однако, данный подход, в котором используются увеличенные изображения, кажется достаточно сомнительным: мало того, что он требует большего времени, так еще и является по сути простой аппроксимацией значений координат, не повышающей их точности определения [129].

Следующим этапом является расстановка маркеров на точках съемочного обоснования. Опорные точки применяются для оптимизации результатов расчета положений камер (ЭВО) и параметров их внутренней ориентации (ЭВНО), а контрольные – для расчета СКП при построении плотного облака точек. При использовании кодовых марок, созданных в *Agisoft PhotoScan*, расстановка происходит точно и автоматически. Расстановка точек вручную – достаточно длительный и трудоемкий процесс, поэтому автоматизированный способ является более предпочтительным. Далее задаются значения координат точек съемочного обоснования с помощью импорта CSV-файла, и происходит

оптимизация выравнивания камер (уточнение ЭВО). На данном этапе также происходит уточнение ЭВнО.

Далее производится калибровка камеры. При выполнении съемки с БЛА используются недорогие неметрические (не фотограмметрические) камеры, которые обладают большими значениями дисторсий, углом скоса (отклонением оптической оси от перпендикулярного положения к ПЗС-матрице), а также элементами внутреннего ориентирования (ЭВнО), определение которых производится с помощью калибровочной матрицы камеры K , используемой в компьютерном зрении:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

где K – калибровочная матрица, f_x и f_y – фокусное расстояние, выраженное в пикселах, где x и y – ширина и высота пиксела, s – угол скоса, c_x и c_y – координата главной точки изображения, в которой оптическая ось пересекает плоскость изображения [66, 90].

В процессе выполнения калибровки происходит также уточнение коэффициентов тангенциальной и радиальной дисторсий:

$$\begin{aligned} x' &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где x, y, x', y' – положение пикселя по двум осям до и после устранения дисторсий соответственно, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии, p_1 и p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии, а значение r определяется по формуле [103]

$$r^2 = x^2 + y^2. \quad (3.3)$$

Часто можно принять, что $f_x = f_y$, а $s = 0$, тогда формула 3.1 принимает более простой вид [39, 90]

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Калибровку камеры можно выполнять как до, так и в процессе летно-съемочных работ. В первом случае для ее выполнения применяются специальные ПП, например, *Agisoft Lens* [103]. Такая калибровка подходит только для трансфокаторных камер и выполняется с использованием плоского калибровочного объекта в виде шахматной доски (обычно распечатывается на листе бумаги или отображается на дисплее монитора – рисунок 3.3) [139]. В таком случае в процессе создания плотного облака точек заданная калибровка фиксируется и не выполняется.



Рисунок 3.3 – Калибровочный объект в виде шахматной доски

В случае неоткалиброванной камеры иногда возможно вычислить параметры калибровки по особым точкам изображения. Такой подход реализован в ПП *Agisoft PhotoScan*. Для ее выполнения не требуется использования специальных калибровочных объектов. В ней уточняются те же элементы, что представлены в формулах 3.1–3.4. Есть много алгоритмов, различающихся допущениями параметров калибровочной матрицы камеры и типами имеющихся изображений. При определении позиций восстановленных точек положения камер и вычислении их матриц по найденной оценке фундаментальной матрицы неизбежны ошибки. При большом числе видов (изображений) ошибки накапливаются. Поэтому на последнем этапе многовидовой реконструкции часто пытаются минимизировать ошибки обратного проецирования с помощью оптимизации позиций 3D-точек и

параметров камеры. Этот процесс называется блочным уравниванием (*bundle adjustment*). [75, 90, 116, 138].

Затем задается область, в которой будет выполняться построение плотного облака точек. При этом параметр «качество» выполняет такую же роль, что и на этапе выравнивания фотографий.

Полученное плотное облако точек необходимо классифицировать для отделения земной поверхности от поверхности, образуемой объектами местности. *Agisoft PhotoScan* для решения данной задачи имеет автоматизированный инструмент фильтрации точек класса «земля» [33, 55].

На основе плотного облака точек в рассматриваемом ПП возможно построение полигональной модели, текстуры, карты высот и ортофотоплана (рисунок 3.4). Для создания топографического плана необходимы только последние две. В большинстве случаев для тематического картографирования наиболее удобным является представление карты высот в виде градиентной заливки, цвет которой отражает высотное положение точек местности [6, 68].



Рисунок 3.4 – Порядок создания полигональной модели, текстуры, карты высот и ортофотоплана на основе плотного облака точек. Зеленым выделены объекты, необходимые для создания топографического плана

Как видно из рисунка 3.4 построение ортофотоплана выполняется на основе карты высот. Более того, оба эти объекта необходимы для создания топографического плана. Строится как карта высот местности, так и рельефа. Это будет необходимо в дальнейшем для выполнения классификации объектов

на данной территории. Процесс создания карты высот полностью автоматизирован, необходимо лишь задать параметры, одним из которых является разрешение (м/пикс). На основе полученной карты высот рельефа в автоматическом режиме строятся горизонтали через заданный интервал и, далее, создается ортофотоплан, при котором ПП рассчитывает эффективное разрешение. При необходимости размер пикселя можно изменить.

Полученные данные необходимо экспортировать для последующей обработки – классификации объектов местности, их векторизации и приведения полученных объектов в соответствие с условными знаками. Наиболее удобным форматом для экспорта ортофотоплана и карт высот может служить *GeoTIFF*, который содержит не только само изображение, но и географическую привязку.

3.2 Автоматизированная классификация объектов местности

Компьютерная (цифровая) классификация снимков заключается в том, чтобы на основе спектральной информации из различных диапазонов длин волн проанализировать каждый пиксель и отнести его к тому или иному классу [8, 40, 122]. Эту классификацию иногда называют распознаванием спектральных образов. Ее целью является распределение пикселей снимка по определенным классам, а результирующее изображение объектов является топографической или тематической картой [8, 40].

Процесс дешифрирования включает распознавание изображений топографических объектов, классификацию и векторизацию объектов (оконтуривание). Временные затраты на выполнение дешифрирования по традиционной неавтоматизированной технологии создания и обновления карт составляют от 20 до 40 % общих затрат. Это вызвано тем, что наиболее сложные и трудоемкие этапы дешифрирования в современном фотограмметрическом производстве выполняются визуальным или визуально-машинным способами. В связи с успешной автоматизацией других процессов, входящих в технологическую схему составления и обновления карт, процент

временных затрат на дешифрирование снимков от общего объема работ вырос и достиг 60–70 % [13]. Таким образом, классификация объектов местности и их векторизация являются самыми трудоемкими процессами в создании топографического плана и, например, в ГК «Геоскан» может занимать несколько недель³. Поэтому создание автоматизированной методики выполнения основных этапов дешифрирования, а именно классификации и векторизации объектов, является крайне необходимым и актуальным.

Классификация цифрового снимка заключается в группировке пикселей в соответствии с принятым правилом. При этом возможны два подхода в зависимости от вида обучения алгоритма:

- контролируемая классификация (*supervised classification*, классификация с учителем) (рисунок 3.5, а);
- неконтролируемая классификация (*unsupervised classification*, классификация без учителя) или кластеризация (*cluster*) (рисунок 3.5, б) [8, 40, 102].

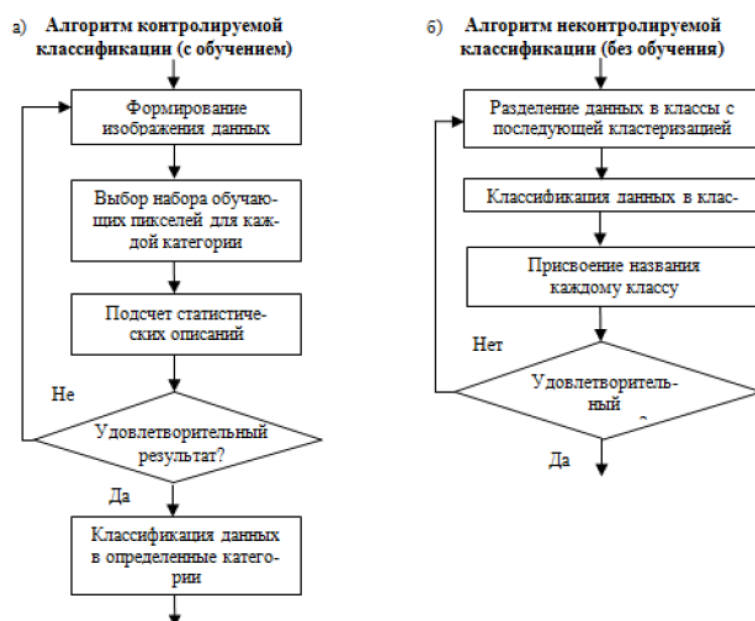


Рисунок 3.5 - Схема классификации с обучением (а) и без обучения (б) [8]

³ Данная информация получена при личной беседе с Ф. В. Солощенко – руководителем отдела полевых работ ГК «Геоскан»

Идея метода неконтролируемой классификации заключается в группировке пикселей со сходными уровнями яркости в съемочных зонах без предварительного знания числа и характеристик классов объектов на местности. Смысл неконтролируемой классификации заключается в разделении всех пикселей изображения на группы (кластеры), название, спектральные характеристики и даже само существование которых предварительно неизвестно [8, 40, 100].

Пожалуй, главным достоинством данного метода является то, что от оператора практически не требуется вводить каких-либо входных данных. Все операции выполняются автоматически, при этом программа анализирует пространство спектральных параметров и на основании определенных критериев разделяет пиксели на классы, рассчитывая для каждого из них средние значения признаков и ковариационные матрицы. После того как все данные распределены по спектральным классам, оператор старается сопоставить их с известными информационными классами пространственных объектов. Однако тут же возникает главный недостаток такого метода: некоторые спектральные классы (кластеры) могут не соответствовать каким-либо классам пространственных объектов или соответствовать сразу нескольким из них, причем эта неоднозначность может быть устранена только оператором [98].

Контролируемая классификация основана на признаках объектов, принадлежность которых к определенному классу на местности известна (признаки на эталонных участках) [8, 40].

Важнейшими этапами контролируемой классификации данных являются:

- 1) выбор подходящего классификатора;
- 2) выбор определенных областей в качестве эталонных;
- 3) вычисление статистических показателей для обучающей выборки;

4) проверка возможности разделения обучающей выборки для определения оптимальной комбинации спектральных каналов, которые будут использоваться для классификации;

5) выбор подходящего алгоритма классификации;

6) распределение пикселей по классам;

7) оценка точности классификации.

Успех контролируемой классификации во многом, как можно заметить из названия, зависит от обучающей выборки. Поэтому при выборе эталонных областей необходимо учитывать следующие характеристики:

- количество эталонных областей;
- положение области на снимке;
- размер области;
- количество пикселей области;
- форма области;
- местоположение;
- однородность [98].

Для распределения пикселей снимка по классам можно использовать разные методы, причем выбор того или иного классифицирующего правила зависит от типа исходных данных и решаемой задачи. Среди большого количества различных алгоритмов классификации чаще всего используют алгоритм минимального расстояния (*minimum distance classification*), алгоритм поэтапной линейно классификации (*stepwise linear classification*) и алгоритм максимального правдоподобия (*maximum likelihood classification*) [8, 40, 98, 102].

Алгоритм минимального расстояния является одним из самых простых и наиболее часто используемых. При этом точность классификации этим методом сравнима с той точностью, которую обеспечивают более сложные вычислительные алгоритмы, в частности алгоритм максимального правдоподобия [98].

В поэтапной линейной классификации изображения применяется анализ линейного дискриминанта. По этой статистической методике происходит обработка набора полученных переменных (функций дискриминанта), которые являются линейными комбинациями диапазонов исходного набора растров. Метод поэтапной классификации включает процесс автоматической редукции размеров. Диапазоны, которые незначительно влияют на распределение классов, исключаются. Этот способ используется при большом количестве исходных растров. [8, 40].

Классификация по методу максимального правдоподобия используется для классификации по теории вероятности. Из обучающей выборки классов метод определяет центры классов и разнообразие растровых значений каждого исходного диапазона для каждого класса, что позволяет определить вероятность принадлежности ячейки исходного раstra к тренировочному классу [8, 40].

Критерий принадлежности пиксела к определенному классу формулируется следующим образом. Пиксел x принадлежит классу c в том и только в том случае, если

$$p_c > p_i, i = 1, 2 \dots m, \quad (3.5)$$

где m – число классов, p_i обозначает вероятность того, что данный класс существует, а вероятность p_c определяется формулой

$$p_c = [-0,5 \log\{\det(V_c)\}] - 0,5[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c)], \quad (3.6)$$

где V_c – ковариационная матрица класса c , M_c – средний вектор для класса c .

Если нет дополнительных сведений о пространственных объектах, вероятность p для всех классов будет одинаковой. Если же известно, что вероятность существования одних классов больше, чем других, оператор может задать набор априорных значений вероятности для соответствующих спектральных признаков. Критерий принадлежности пиксела к определенному

классу при этом будет формулироваться следующим образом: пиксел x принадлежит классу c в том и только в том случае, если

$$p_c(a_c) > p_i(a_c), i=1, 2, \dots, m, \quad (3.7)$$

где

$$p_c(a_c) = \log(a_c) - [-0,5 \log\{\det(V_c)\}] - 0,5[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c)]. \quad (3.8)$$

Использование априорных вероятностей позволяет учитывать особенности рельефа и другие характеристики территории. В то же время, к недостаткам алгоритма максимального правдоподобия следует отнести то, что для расчетов этим методом требуется большой объем памяти и значительное время, при этом результаты классификации часто оказываются не самыми лучшими [98].

В алгоритмах минимального расстояния, параллелепипеда и поэтапной линейно классификации не учитываются возможные вариации спектральных признаков и проблемы, возникающие из-за пересечения классов. Последние часто возникают в тех случаях, когда требуется классифицировать пиксели, близкие по своим спектральным характеристикам [98]. Таким образом, алгоритм максимального правдоподобия обладает некоторым преимуществом по сравнению с представленными выше и используется в современных мощных геоинформационных системах (ГИС), например, в *ArcGIS*, *TNTmips* и *QGIS* [8, 40].

При создании обучающей выборки однородность является одной из ключевых характеристик обучающей выборки для любого информационного класса. Обучающая выборка должна содержать только однородную информацию. Если гистограмма соответствующего выборке спектрального класса имеет только один пик, это может служить критерием того, что обучающая выборка сформирована правильно. Наличие нескольких пиков на гистограмме означает, что обучающая выборка содержит разнородную информацию и, следовательно, ее нельзя использовать для классификации объектов [98, 100]. Это является серьезным недостатком существующих

методов классификации с учителем и не позволяет с высокой вероятностью определять, в качестве примера, поля, часть которых затемнена.

С начала 2000-х появляется и быстро развивается алгоритм *OBIA* (*Object Based Image Analysis*, а иногда *GEOBIA*). Благодаря алгоритму *OBIA* возможно достичь отличных результатов, практически сопоставимых с теми, что получаются при дешифрировании вручную. Это достигается в том числе за счет того, что в нем возможно использование разнородных фрагментов одного класса, так как он основан на методах машинного обучения [4, 109]. Обычно данный алгоритм используется для классификации изображений дистанционного зондирования Земли, однако в последнее время он также находит применение в аэрофотосъемке, выполненной с помощью БЛА [127].

В общем алгоритм *OBIA* реализуется в две стадии:

1. Выполнение сегментации изображения;
2. Классификация сегментов (суперпикселей) вместо пикселей [6, 136].

В выполнении сегментации и заключено принципиальное отличие алгоритма *OBIA* от вышеперечисленных, так как для обучения используются не каждый пиксел по отдельности, а так называемые суперпиксели, которые получаются в результате сегментации изображения. Существует множество различных алгоритмов сегментации, в результате реализации которых возможно получение сегментов различной формы и размера, что влияет на точность всей классификации изображения [4, 109, 136].

Далее на основе подготовленной выборки объектов местности происходит обучение алгоритма с помощью машинного обучения. Отличные результаты показывает группа техник машинного обучения – ансамбли (*ensemble*). Их главным достоинством является то, что для принятия решения о том, к какому классу относится тот или иной сегмент, используется не отдельный классификатор, который дает малый процент верных решений, а сразу несколько независимых, при этом за счет их большого количества достигается отличный результат [112]. Примерами такой техники являются

алгоритмы «случайный лес» (*Random Forest*) и «бэггинг» (*Bootstrap Aggregating* или *Bagging*), предложенные Лео Брейманом в 2001 и 1994 годах соответственно [4, 105, 110].

Важно заметить, что согласно рисунку 3.4 для выполнения классификации можно использовать не только орфотоплан, но также и карты высот рельефа и местности, так как при вычитании первой из второй с помощью растрового калькулятора (например, такая функция есть в *ArcMap*) можно получить карту высот объектов, расположенных на местности (КВО). При создании обучающей выборки для классификатора можно использовать помимо трехканального изображения ортофотоплана (красный, зеленый и синий канал – *RGB*) и четвертый – растр КВО. Благодаря тому, что полет БЛА происходит обычно на достаточно низкой высоте, повышается распознавание даже невысоких объектов местности [4].

Вне зависимости от того, какой алгоритм был использован, классификацию объектов местности нельзя считать завершенной, пока не получена оценка ее точности. Оператор должен определить, насколько точно классы объектов на снимке соответствуют классам объектов на земной поверхности. Обычно проверка точности классификации основана на сравнении двух карт – той, которая получена в результате работы классификатора, и контрольной карты, которая создана, например, оператором вручную и принимается за абсолютную истину. Самый простой и быстрый способ оценки точности – это использование общей точности классификации (p'). Это отношение количества совпадающих по классам пикселей к их общему количеству, выраженное в процентах [98].

В предположении биномиального распределения для общей точности классификации можно сформулировать односторонний критерий значимости с помощью следующей формулы:

$$p = p' - \left[1,645 \sqrt{\frac{p'(100 - p')}{n} + \frac{50}{n}} \right], \quad (3.9)$$

где p – общая точность классификации, соответствующая доверительному уровню 95 %, p' – общая точность классификации, а n – размер выборки. Обычно в качестве удовлетворительного берется пороговое значение равное 85 % [98].

При использовании метода контролируемой классификации наиболее простой способ оценки ее точности состоит в сравнении классифицированных данных с обучающей выборкой. Однако этот способ завышает точность. Строго говоря, если предположить, что обучающие выборки были сформированы безошибочно, то результирующая точность должна составлять 100 %. По этой причине гораздо более надежный способ оценки точности классификации заключается в том, чтобы выбрать данные, относящиеся к известному объекту, разделить эти данные на две части, а затем использовать одну из них в качестве обучающей выборки, а вторую – для оценки точности классификации [98].

Стандартной формой представления оценки точности классификации для определенного местоположения является матрица ошибок, которая характеризует не только погрешность классификации для каждого класса, но и ошибки, связанные с неверной классификацией. Ее строки – это истинные классы, представленные на контрольной карте, а столбцы – классы, выделенные на анализируемой карте. В таблице недиагональные элементы матрицы содержат информацию о ложной классификации и пропусках классификации.

Важно также проверить критерий значимости классификации для каждого отдельного класса. В предположении нормального распределения двусторонний критерий значимости, соответствующий доверительному уровню 95 % для каждого класса, можно сформулировать с помощью формулы, определяющей границы доверительного интервала

$$p_i = p'_i \pm \left[1,96 \sqrt{\frac{p'(100 - p')}{n} + \frac{50}{n}} \right], \quad (3.10)$$

где p – общая точность классификации отдельного класса, соответствующая доверительному уровню 95 %, p' – общая точность

классификации отдельного класса. Как и для критерия, рассчитанного по формуле 3.9, пороговое значение составляет 85 %. Благодаря этому критерию становится возможным выделить те классы, которые не содержали в себе достаточно информации для правильного распределения пикселей по этим классам [98].

Для того чтобы учесть возможность случайных совпадений и оценить истинную согласованность между снимком и картой, используют коэффициент κ , который рассчитывается по следующей формуле:

$$\kappa = \frac{p - p_c}{1 - p_c}, \quad (3.11)$$

где p_c – оценка согласованности между снимком и картой при случайном распределении пикселей по классам. Значение коэффициента каппа показывает, насколько точность классификации превышает ту, которая была бы при случайном распределении пикселей по классам [98].

3.3 Автоматизированная векторизация объектов местности

В результате выполнения классификации объектов местности получается тематическая карта. Она является растровым изображением, и поэтому для того, чтобы создать топографическую карту, необходимо выполнить векторизацию (оконтуривание) объектов местности [6, 54]. Это достаточно продолжительный и трудоемкий процесс, поэтому создание автоматизированной методики позволило бы значительно сократить время и трудозатраты.

Перед выполнением векторизации необходимо подготовить тематическую карту к обработке. Для этого исходный растр следует разделить на несколько растров в количестве, которое соответствует количеству классов тематической карты. На каждом полученном изображении, таким образом, присутствует только один класс, остальная часть представлена, например, черным цветом. Далее производится его автоматическое преобразование на полигональные объекты. Это связано с особенностью аэрофотосъемки на

низкой высоте, при которой немасштабные точечный и линейный объекты обычно отображаются на ортофотоплане как площадные. Данную задачу возможно реализовать с помощью встроенного инструмента *Raster to Polygon* (из группы *From Raster* набора *Conversion Tools*) *ArcMap*. Полученные объекты в дальнейшем используются для выполнения преобразований. В итоге из них необходимо удалить те, которые соответствуют черному фону используемого растра.

В связи с большим разнообразием топографических объектов для каждого из них необходимо создать свой алгоритм векторизации. Однако в общем можно рассмотреть следующие типы топографических объектов: точечный, площадной, линейный, а также полосной.

Создание точечных объектов выполняется всего в один шаг. Для этого в большинстве случаев необходимо найти его характерную точку, которая является центром этого объекта (инструмент *Mean Center* из группы *Measuring Geographic Distributions* набора *Spatial Statistics Tools*).

Создание линейных и полосных объектов возможно при помощи инструмента *Polygon To Line* из группы *Features* набора *Data Management Tools*.

Важно отметить то, что использование инструмента *Raster to Polyline* (из набора *Conversion Tools*) приводит к неправильному результату (рисунок 3.6).

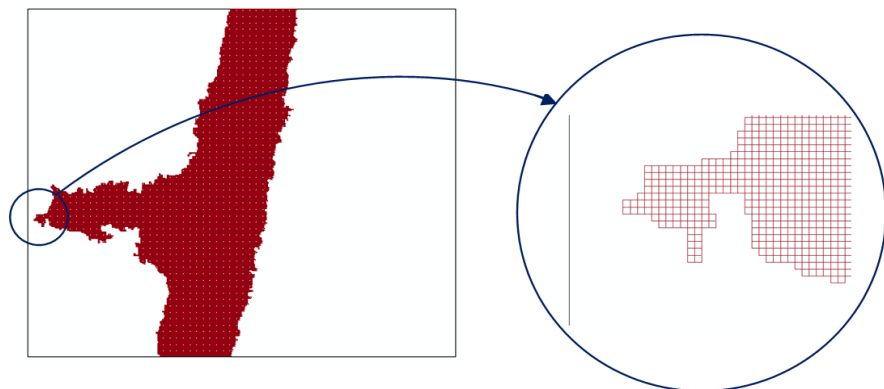


Рисунок 3.6 – Результат работы инструмента *Raster to Polyline* программы *ArcMap*

Полученные полилинии сглаживаются (*Cartography Tools – Generalization – Smooth Polyline*) для устранения излишней извилистости объекта. Для этого используется метод *РАЕК* (Полиномиальная аппроксимация с использованием экспоненциального ядра) или интерполяция Безье (рисунок 3.7) [92]. Для достижения лучшего результата возможно повторение этой процедуры или изменение допуска сглаживания.

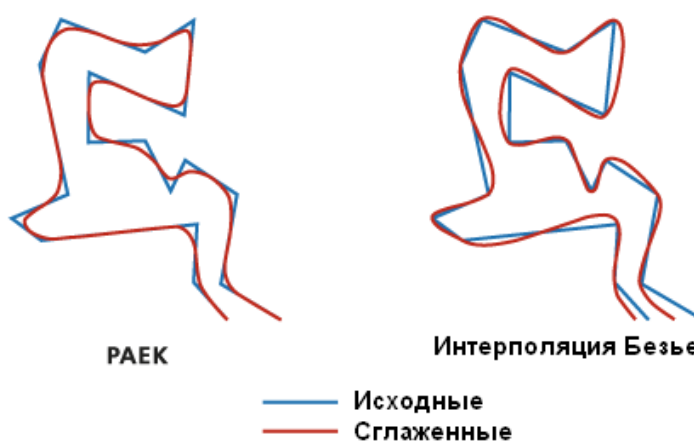


Рисунок 3.7 – Методы сглаживания извилистости

Далее производится построение средней полилинии (*Cartography Tools – Generalization – Collapse Dual Lines To Centerline*). За счет того, что из двух объектов строится один новый, происходит дополнительное сглаживание (рисунок 3.8).

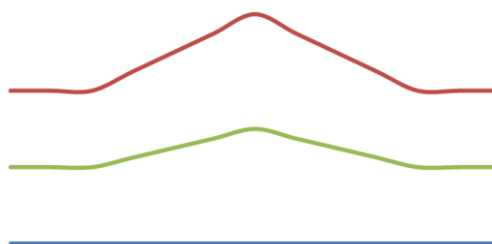


Рисунок 3.8 – Сглаживание средней полилинии за счет усреднения боковых

Полученная полилиния и является линейным топографическим объектом, а в случае, если необходимо создать полосной, то производится параллельный ее перенос на заданный интервал в обе стороны от нее. При необходимости полученные объекты могут быть дополнительно сглажены. В конце также возможно проведение редактирования частей объектов, где линейные или полосные объекты пересекаются, например, при помощи создания кривой сопряжения между двумя линиями (*Editor Toolbar – Advanced Editing – Fillet Tool*).

Частным случаем линейных объектов являются горизонтали, которые автоматически строятся на основе карты высот рельефа. В работах [33, 44] представлена иррегулярная фильтрация и классификация (определения точек класса Земля) облака точек, по которым также производится построение горизонталей. В результате работы предложенных алгоритмов получается меньшее количество точек, а, следовательно, и более удачное отображение горизонталей. Однако, фильтрация является достаточно трудоемким процессом (обычно обрабатываются миллионы точек) и, поскольку данный этап является промежуточным, нет возможности наглядно определить, насколько сильно изменятся горизонтали. Более того, такой подход может привести к ошибочному построению горизонталей, однако в работе [33] приведен алгоритм его устранения. В целом значительно проще выполнить сглаживание и удалить ненужные незначительные по размеру горизонтали, количество которых значительно меньше точек облака. Поэтому от такого подхода решено было отказаться.

Сглаживание горизонталей выполняется точно так же, как и для других линейных объектов. Удаление незначительных горизонталей производится с помощью таблицы свойств объектов, производя их сортировку по размеру. Здесь необходимо определить предельное значение размера, предпрещающего удаление объектов, которые меньше его. Для его определения исходят из масштаба будущего топографического плана, а также толщины горизонталей

(рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Пример удаления горизонталей небольшого размера

В результате создания точечных, линейных и полостных объектов оставшаяся часть не отвекторизованной карты содержит только площадные объекты. Таким образом, необходимо только отредактировать их контуры, сопрягая их с соседними (рисунок 3.10, *Cut Polygons* на панели инструментов Редактор).

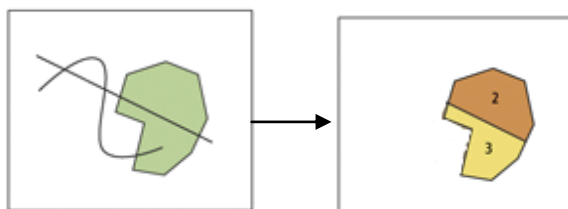


Рисунок 3.10 – Коррекция контуров

Удаляя ненужные промежуточные объекты, полученные в процессе выполнения вышеизложенных действий, необходимо привести оставшиеся объекты в соответствие с условными знаками [18].

Установку условных знаков для горизонталей можно выполнить с помощью таблицы свойств. Для этого необходимо выбрать необходимые по

атрибутам строки, для каждой из которых через заданный интервал основного сечения присваивается условный знак, отличный от оставшихся.

Представленный алгоритм показывает высокую робастность по отношению к неверно проведенной локально классификации объектов.

3.4 Выводы по третьей главе

Камеральные работы выполняются в соответствии с порядком, представленным на рисунке 3.1. Создание плотного облака точек, ортофотоплана, а также карты высот с горизонталями производятся автоматизировано в существующих ПП. Важным этапом для аэрофотосъемки с помощью БЛА является калибровка камеры, так как обычно используются бытовые и неметрические.

В связи с высокой автоматизацией процессов создания ортофотоплана и карты высот дешифрирование занимает самое продолжительное время в камеральных работах, поэтому были предложены автоматизированные алгоритмы выполнения классификации объектов местности и их векторизации.

Одним из наиболее успешных и современных методов классификации является алгоритм *OBIA*, основанный на том, что классификация выполняется не для каждого пиксела изображения, а для их группы – суперпикселей, получаемых в результате сегментации. Обучение производится с помощью техник машинного обучения и обеспечивает высокую точность распознавания, критерием которой является коэффициент k .

Алгоритм векторизации объектов выбирается в первую очередь в зависимости от типа топографического объекта – точечного, площадного, линейного или полосного. Основные приемы: поиск центра, удаление ненужных объектов, сглаживание объектов. Отдельно описан алгоритм векторизации изолиний, получаемых на основе созданных автоматически при помощи карты высот. В конце камеральных работ векторные объекты устанавливаются в соответствии с условными знаками, а также производится

зарамочное оформление.

Таким образом, благодаря предложенным и разработанным автоматизированным алгоритмам представленная методика позволяет повысить эффективность проведения камеральных работ, в результате которых получается электронный топографический план высокой точности.

ГЛАВА 4 ПРОВЕДЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для утверждения какой-либо информации одной теории недостаточно, необходимо также проверить ее согласованность с практическими результатами. Апробация демонстрирует актуальность и рациональность предложенных положений. Поэтому теоретические заявления, сделанные в главах 2 и 3, были проверены на практике.

4.1 Подготовительные работы

Для выполнения подготовительных и полевых работ был выбран карьер под названием «Прег» (*Pronat Steinbruch Preg GmbH*), который расположен недалеко от города Леобен, Австрия. Это известный в стране карьер, на котором компания «Шварцль» (*Schwarzl gruppe*) раньше добывала твердые полезные ископаемые – магнезит и перидотиты (рисунок 4.1). В данный момент карьер не используется. Его размеры в плане – 160 на 180 м, и перепад высот составляет около 120 м [57, 129]. Поверхность карьера не имеет растительности, построек на этой территории также нет. Это является отличным достоинством для выполнения полевых работ в качестве эксперимента.



Рисунок 4.1 - Карьер Прег. Слева – снимок, полученный со спутника *Google Maps*,
справа – фотография, сделанная на карьере.

После выполнения рекогносцировки местности полевые работы были

назначены на 10 часов утра, чтобы после установки опорных точек начать фотографирование местности с БЛА в полдень, когда тени минимальны [17]. Прогноз погоды показал переменную облачность без осадков.

Было решено установить точки съемочного обоснования равномерно по всей снимаемой территории (рисунок 4.2). Их общее количество составило 30 штук. Такое довольно большое значение при 5 опорных точках позволяет выполнять оценку точности с высокой вероятностью.

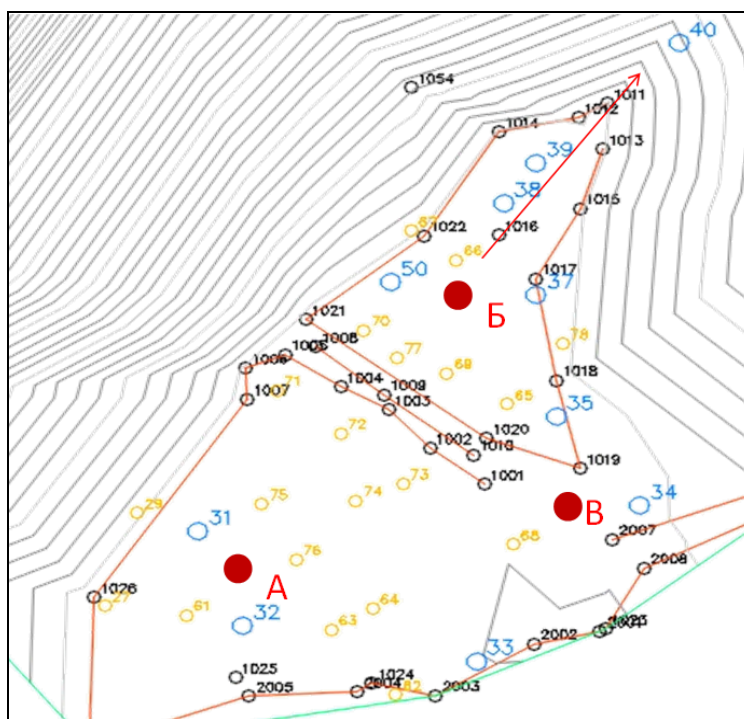


Рисунок 4.2 – Схема расположения точек съемочного обоснования экспериментального полигона (обозначены желтым и синим) и основного рабочего обоснования (красным). Стрелкой указана точка, высотное положение которой определено наименее точно

В качестве БЛА был выбран гексакоптер, который собран на базе Горного университета г. Леобен (рисунок 4.3). Он обладает схожими с описанными в разделе 2.3 характеристиками (таблица 4.1) [117]. Основным отличием представленной модели является непродолжительное время полета в связи с использованием аккумуляторов общей емкостью 8000 мА·ч.



Рисунок 4.3 – Гексакоптер, собранный на базе Горного университета г. Леобен

Таблица 4.1 Технические данные гексакоптера

Параметр	Значение
Тип	Гексакоптер
Размер	Диагональ 680 мм без пропеллеров
Двигатели	6 электрических, бесщеточных, максимальная мощность – 340 Вт
Размер пропеллеров	13"
Вес пропеллера	15 г
Аккумулятор	4000 мА·ч 4S 2P
Масса гексакоптера с аккумуляторами	3500 г
Масса гексакоптера с аккумуляторами и камерой	3860 г
Скорость подъема	4 м/с
Скорость спуска	4 м/с
Скорость полета	до 15 м/с (ручной режим)
Время полета с камерой	7 минут (при 20°C и остаточном заряде 30 %)
Рекомендованная дальность полета	250 м
Техническое ограничение дальности полета	900 м
Используемая на борту камера	<i>Sony A6000, 24 MPixel</i>
Масса камеры	344 г

На местности с учетом погодных условий и выбранного *GSD*, которое составило 1 см, были установлены оптимальные параметры для камеры, а именно: фокусное расстояние, равное 16 мм, выдержка – 1/640 с и *ISO* – 200

[75]. В связи со сложностью расчета параметров аэрофотосъемки в случае использования произвольных положений оптической оси камеры во время фотографирования, предлагается условно принять формулы для плановой аэрофотосъемки. Таким образом, расчет проводится по аналогии с представленным в таблице 2.5 (таблица 4.2). Однако в таком случае значения большинства параметров будут занижены.

Таблица 4.2 – Расчет параметров аэрофотосъемки

№	Параметр	Значение
1	Высота фотографирования, м ($f = 4086 \text{ pix}$, $GSD=1 \text{ см}$)	40,9
2	Время подъема и спуска, мин. (скорость подъема и спуска соответственно – $V_{\text{П}} = V_{\text{С}}=2 \text{ м/с}$)	0,68
3	Расчетное (предварительное) продольное перекрытие аэрофотоснимков, %	80
4	Расчетное (предварительное) поперечное перекрытие аэрофотоснимков, %	60
5	Расстояние между маршрутами на местности, м	24
6	Количество маршрутов на участке местности	8
7	Базис фотографирования, м	8
8	Количество снимков в маршруте	25
9	Общее количество снимков	200
10	Общая протяженность всех маршрутов, км	1,6
11	Продолжительность съемки участка, мин. ($V=3 \text{ м/с}$)	8,89
12	Продолжительность одного полета, мин.	6,32
13	Число полетов	2
14	Интервал между экспозициями, с	2,7
15	Предельно допустимая выдержка при фотографировании, с^{-1}	1 / 600
16	Общее требуемое количество флеш-памяти, Мб	1856

Согласно таблице 4.2 выбранная на местности выдержка не превышает допустимую. Количество полетов равно двум, однако это значение в ходе выполнения полевых работ может увеличиваться. Это связано с тем, что гексакоптер будет пролетать дополнительное неучтенное расстояние от места взлета и посадки до положения, на котором приостанавливалась аэрофотосъемка. Его скорость невысока: управление выполняется без использования автопилота, и на борту нет оборудования, которое защищает

аппарат от аварий (эхолот, датчик определения препятствий и другие).

4.2 Полевые и летно-съёмочные работы

Полевые работы начались с установки опорных точек, координаты которых заранее определены при помощи спутниковой аппаратуры в режиме статики и линейно-угловых измерений, а также тригонометрического нивелирования. Такой подход позволил добиться определения их пространственного положения с точностью менее 1 см, что в несколько раз выше, чем при выполнении спутниковых измерений в *RTK*-режиме.

В качестве основного рабочего обоснования выступали три точки, координаты которых определены с помощью спутниковых измерений в режиме «статика». Для этой задачи использовался двухчастотный приемник *Trimble R6*. Благодаря высокой точности определения координат СКП составила в плане ± 3 мм + 0,1 мм/км и по высоте $\pm 3,5$ мм + 0,4 мм/км. Это позволило довольно точно определить координаты: 3,9 и 5,1 мм соответственно. Таким образом, общее пространственное положение – 6,4 мм.

Далее производилась расстановка и определение точек съёмочного обоснования. Для этого использовался тахеометр *Leica TS15 G*, СКП определения зенитного (m_s) и наклонного (m_z) расстояний которого до призмы соответственно составляет 1 мм + 1,5 мм/км и 2''. Исходя из формулы 2.8, для повышения точности определения вертикального положения точки необходимо добиваться того, чтобы визирный луч был минимально отклонен от горизонта. При определении координаты точки 73 (рисунок 4.2) из пункта Б вертикальный угол имел наибольшее значение и составил всего 3°01' 02.8''. Точность такого превышения по формуле 2.8 составляет 0,30 мм. Однако, с учетом того, что превышение, полученное тригонометрическим нивелированием, было определено и с других точек основного рабочего обоснования (точки А и Б), результирующая точность определения высоты составила всего 0,17 мм.

Наименее точное определение высотного положения было выполнено для

точки № 40. Она находится на краю карьера и поэтому ее положение было определено только с точки Б. СКП определения высотной координаты составила 0,55 мм, а плановой – 0,54 мм относительно основного рабочего обоснования. Таким образом, СКП определения пространственного положения координаты самой проблемной точки не превысила 1 см.

Далее на точки съемочного обоснования устанавливались марки для их распознавания ПП. Они обладали черной, контрастирующей границей (рисунок 4.4). Однако в связи с тем, что множество ПП не способны распознать их в автоматическом режиме, было необходимо впоследствии при выполнении камеральных работ вручную выполнять расстановку маркеров на фото. Выход из сложившейся ситуации возможен с помощью использования макросов, созданных программистами и позволяющих считывать заданную кодировку. Так, например, для подобных целей ПП Agisoft PhotoScan обладает интерфейсом прикладного программирования (API) на языке *Python* [7, 57, 75, 104, 106].



Рисунок 4.4 – Точка съемочного обоснования, расположенной на карьере Прег

Далее был произведен запуск гексакоптера и выполнена съемка. Фотографирование производилось каждые 3 секунды. Всего произведено 4 полета продолжительностью 7 минут каждый. Такое расхождение количества полетов с рассчитанным значением прежде всего связано с большим перепадом высот, а также с необходимостью осуществлять замену аккумулятора в одном и том же месте. При съемке наклонной части карьера камера была повернута относительно горизонта так, чтобы положение ее матрицы было параллельным поверхности снимаемой территории.

Время съемки, включая подготовительные работы, заняло 4 часа, после чего полученные 306 фотографий экспортировались на компьютер для последующей камеральной обработки с целью построения плотного облака точек, которое в результате состояло из 27,8 млн. точек. С учетом того, что СКП положения облака точек, рассчитанная по 25 контрольным точкам, равна 5,62 см, ошибка ошибки, рассчитанная по формуле 2.5, составляет в таком случае всего 0,8 мм.

На наклонную часть карьера не было установлено ни одной точки съемочного обоснования в связи с ограничениями техники безопасности. Таким образом, при помощи ПП *CloudCompare* было произведено сравнение двух облаков точек: построенного по результатам текущей аэрофотосъемки и аналогичного, выполненным примерно с интервалом в один год. Результаты представлены на рисунке 4.5 [130], согласно которому видно, что на тех участках местности, где отсутствовали опорные точки, разница между облаками точек достигает 50 см, а на дне карьера, где располагались все точки, точность в 4 раза выше. Это практически подтверждает необходимость равномерного распределения точек по всей снимаемой местности в горизонтальном и вертикальном положениях. Данная часть карьера была также подвержена меньшим деформациям и наиболее стабильна. Таким образом, для выполнения экспериментов, описанных в главе 2, использовалась только нижняя, наиболее благоприятная для съемки часть карьера размером 120x120 м,

где перепад высот составляет 2,5 м.

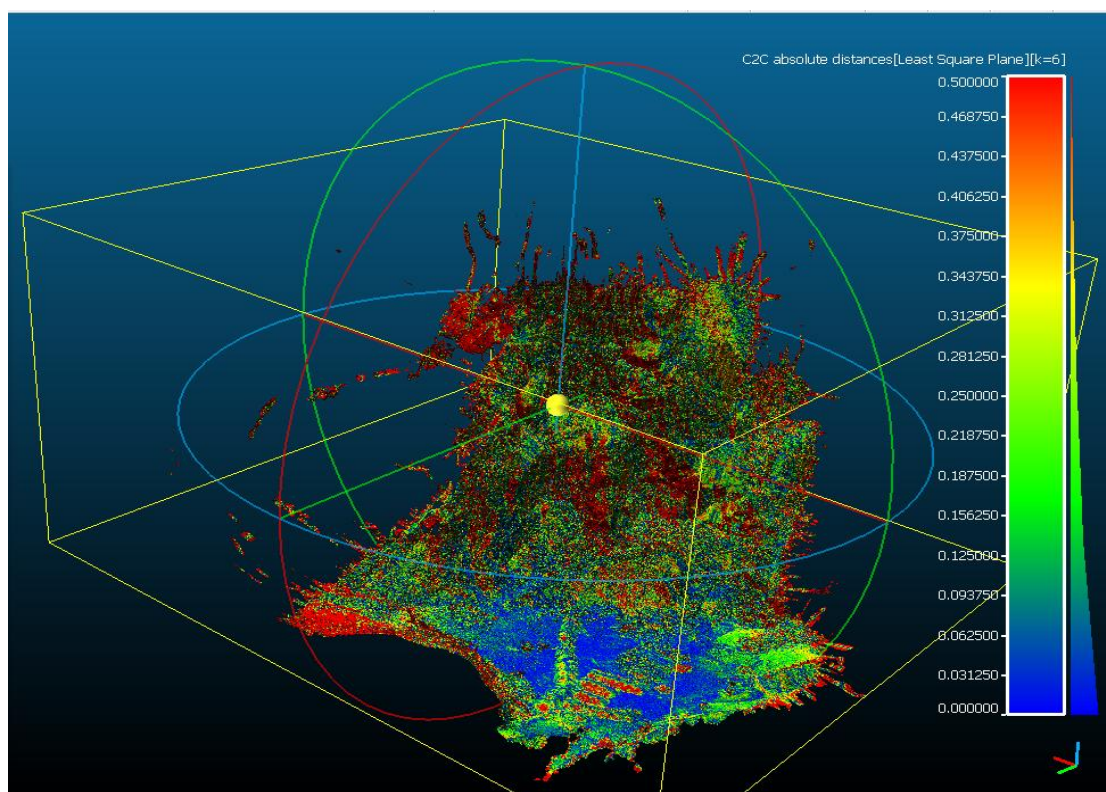


Рисунок 4.5 – Сравнение двух облаков точек, полученных по результатам аэрофотосъемок, выполненных с интервалом примерно в один год

4.3 Камеральные работы

Для проведения камеральных работ по созданию топографического плана масштаба 1:1000 территория карьера не подходит в первую очередь из-за отсутствия на ней объектов. С этой целью было решено использовать аэрофотосъемку, которая была выполнена компанией *Mavinci GmbH* [124] в парке Агриколы (*Parc Agricole*), расположенном на окраине Ганновера (Германия). На местности находится небольшое количество наземных сооружений, преобладают поля, одиночные деревья и их полосы, а также полевые дороги. Площадь парка составляет 50 га (рис. 4.6) [6, 119].



Рисунок 4.6 – Парк Агриколы

В результате при средней высоте полета 164,6 м и съемочной площади 0,4 км² получено 357 изображений со значением $GSD = 3$ см/пиксел (рисунок 4.7).

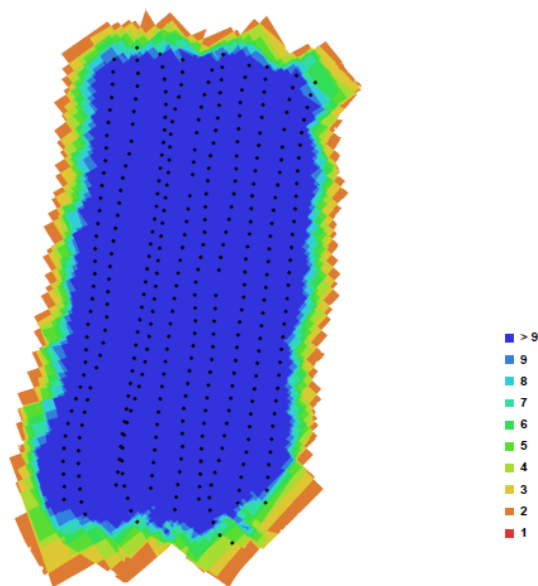


Рисунок 4.7 – Схема расположения точек фиксации (камер) на территории съемки.

Количество перекрытий изображений показано градацией цвета.

Первым этапом камеральных работ стало создание плотного облака точек при помощи многовидовой реконструкции на основе полученных снимков, координат точек фотографирования (координат камер) и опорных точек. Эту операцию также часто называют определением структуры по движению,

поскольку представление о трехмерной структуре дает движение камеры (или нескольких камер) [90]. Далее в автоматизированном режиме в ПП *Agisoft Photoscan* создавалась карта высот местности (рисунок 4.8, а) [6, 57].

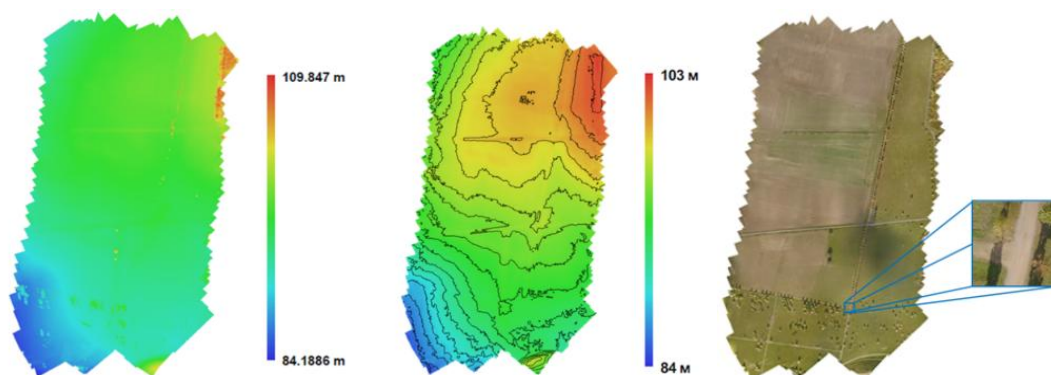


Рисунок 4.8 – Карта высот местности (а) и карта высот рельефа с горизонталями (б) в виде градиентной заливки, цвет которой отображает высотное положение точки местности и ортофотоплан территории (в)

Построение горизонталей было выполнено на основе карты высот рельефа местности, которая образуется в результате определения программой точек класса «земля» как элементов плотного облака точек (рисунок 4.8, б) [6].

Процесс создания ортофотоплана (рисунок 4.8, в) также автоматизирован в данном ПП. При его построении используют исходные снимки и реконструированную модель, что позволяет получить результирующее изображение высокого разрешения [6].

Указанных карт высот местности и рельефа, а также ортофотоплана достаточно для выполнения камерального дешифрирования местности. В связи с тем, что аэрофотосъемка с БЛА производится на низкой высоте, территория мало застроена и не покрыта сплошной высокой растительностью, а разрешение изображений высокое, необходимость в полевом дешифрировании отпадает.

Камеральное дешифрирование объектов местности было выполнено в два этапа: классификация объектов местности и векторизация полученной в

результате тематической карты.

С целью определения метода, позволяющего с высокой точностью классифицировать объекты, был выбран фрагмент ортофотоплана (рисунок 4.9), представленного на рисунке 4.8. На нем изображены основные, часто встречаемые объекты местности: луг, две полосы деревьев (информация получена из рисунка 4.8), а также две полевые дороги и их перекресток. Аэрофотосъемка данного участка местности выполнена в момент времени, когда размер теней имеет большое значение. Описанные факторы усложняют как процесс классификации, так и векторизации.



Рисунок 4.9 – Фрагмент ортофотоплана, используемый для автоматизированного создания топографического плана

Были рассмотрены следующие методы автоматизированной классификации ортофотопланов: статистические методы с учителем (алгоритм максимального правдоподобия) и без учителя и алгоритм *OBIA*, использующий сегментацию изображения и методы машинного обучения.

В качестве обучающей выборки для работы классификаторов использовались другие части этого ортофотоплана. Чтобы рассчитать процентное соотношение правильно распознанных пикселей (общая точность классификации), автором диссертационной работы была написана программа на языке *Python* (приложение 2), которая путем сравнения с эталонной картой,

созданной вручную, определяет совпадающие пиксели и графически отображает результат и долю в процентах от общего числа пикселей (рисунок 4.10).

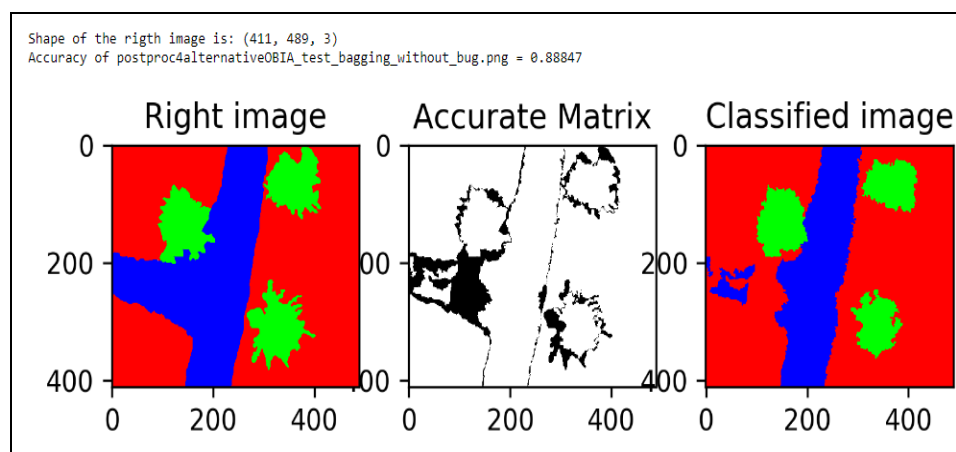


Рисунок 4.10 – Результат работы программы по определению общей классифицированных пикселей

Классификация объектов с учителем и без учителя была проведена в ПП *ArcMap* (рисунок 4.11). На этом рисунке синим цветом отображены полевые дороги, красным – луг, а зеленым – высокая растительность.

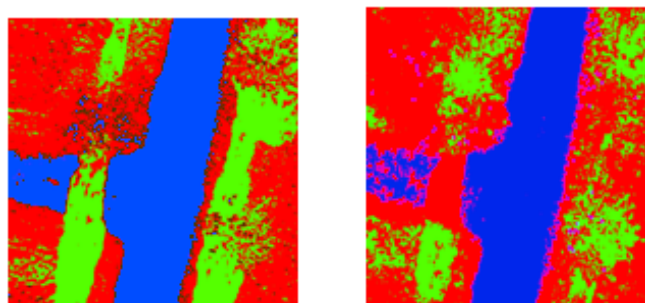


Рисунок 4.11 – Результат автоматизированной классификации фрагмента ортофотоснимка классификатором без учителя – слева, с учителем – справа.

Видно, что в процессе классификации довольно большое число пикселей было определено неверно. Данный вывод соотносится с рассчитанной общей точностью, полученной благодаря написанной программе. Так было

установлено, что общую точность неконтролируемого и контролируемого классификаторов, которая составляет соответственно 71,5 и 78,4 %, нельзя признать удовлетворительной (менее 85 %).

В связи с отсутствием в ПП *ArcMap* и для выбора оптимальной конфигурации алгоритма *OBIA* было решено выполнить его реализацию при помощи программирования. В качестве исходного материала использовался код компании *Machinalis* [135], который в дальнейшем был модернизирован автором диссертации в связи с тем, что алгоритм используется для классификации ортофотоплана мелкого масштаба и не имеет возможности использовать КВО в качестве входных данных [109, 135, 136]. Программа написана на языке *Python* с применением интерактивной среды *Jupyter Notebook* и оболочки *IPython*. Алгоритм данной программы представлен на рисунке 4.12.

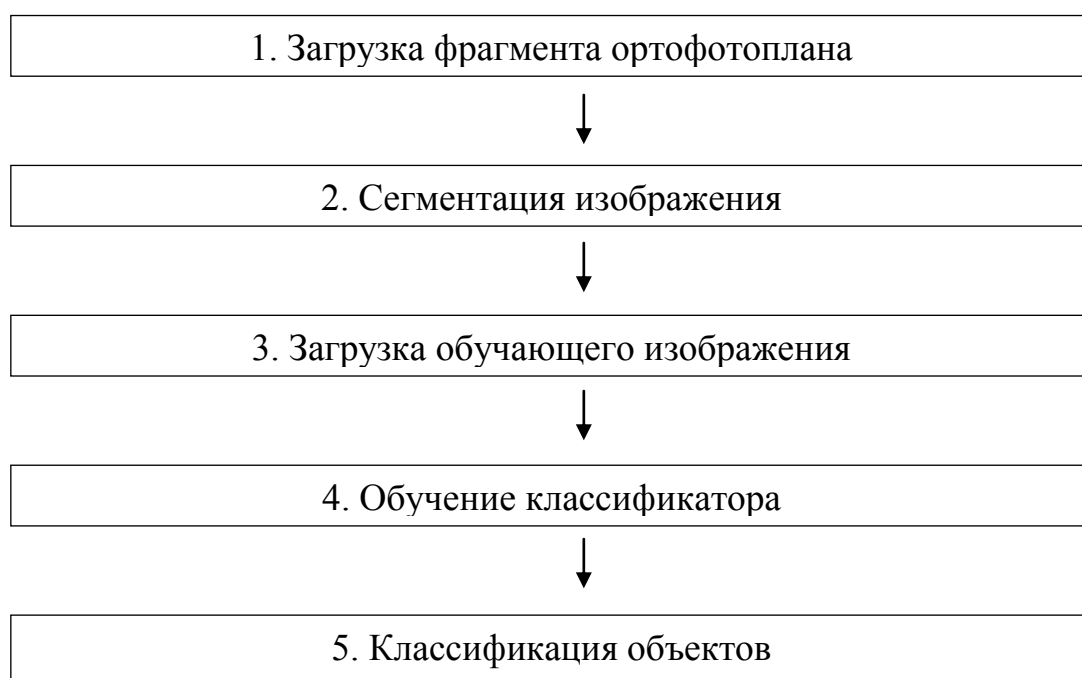


Рисунок 4.12 – Классификатор на основе алгоритма *OBIA*

В качестве начальных параметров использовались *Quickshift*-сегментация (рисунок 4.13) и метод машинного обучения «Случайный лес». Общая точность

такой классификации для представленного выше фрагмента ортофотоплана составила 81,1 % (рисунок 4.14, а), что выше, чем при выполнении контролируемой классификации, но не достигает порогового значения 85 %. Одним из основных источников ошибки является использование суперпикселей большого размера, а, значит, если внутри такого суперпикселя проходила граница какого-либо объекта, распознавание выполнялось неверно. Поэтому было решено использовать *Felszenszwalb*-сегментацию (рисунок 4.13), образующей сегменты меньшего размера. Такой подход подтвердил связь размеров сегментов с точностью распознавания и показал более высокий результат – 86,60 % верно классифицированных объектов [4, 6].

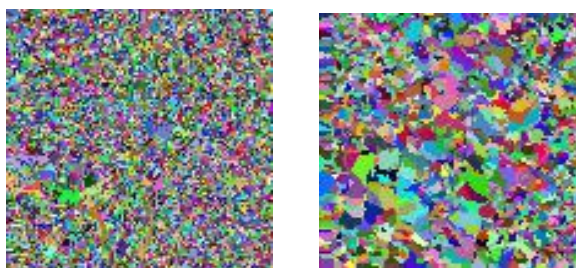


Рисунок 4.13 – Результат сегментации фрагмента ортофотоплана, слева – по алгоритму *Felszenszwalb* (168 100 сегментов), справа – по алгоритму *Quickshift* (3 192 сегмента).

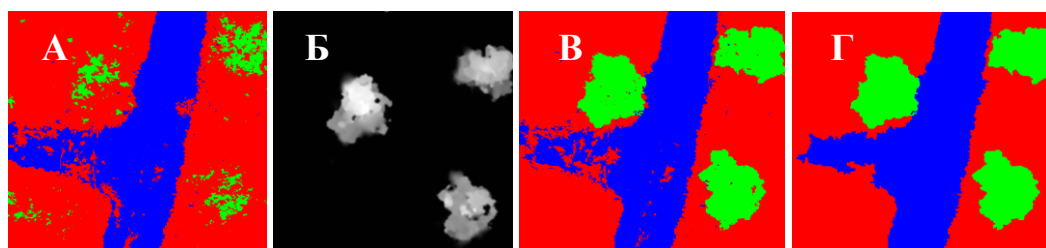


Рисунок 4.14 – Результат классификации ортофотоснимка алгоритмом *OBIA* (А), КВО (Б), классификация с учетом КВО (В), классификация с учетом КВО и постобработкой (Г)

Помимо метода машинного обучения «Случайный лес» проверке подлежал и алгоритм «Бэггинг» (*Bagging*). При его совместном использовании с *Felszenwalb*-сегментацией точность классификации достигла 86,58 %, что

всего на 0,02 % меньше, чем в предыдущем методе.

Далее было решено в качестве входных данных использовать не только фрагмент ортофотоплана, но и карту высот объектов местности (рис. 4.14, б), которая является разностью карт высот местности и рельефа [6, 137]. Таким образом, алгоритм *OBIA* обрабатывал четырехканальное изображение и одноканальное, содержащее обучающую выборку. В результате дешифрирования такого набора данных количество правильно классифицированных пикселей достиг значения 91,45 % (рисунок 4.14, в). Такой подход позволил получить более точное распознавание высоких объектов местности – деревьев [6].

Очевидно, что, например, на топографической карте внутри таких объектов, как дерево и дорога не может располагаться луг. Однако небольшие подобные сегменты наблюдаются на тематической карте (рисунок 4.14, в). Даже если на ортофотоплане находятся такие объекты небольшого размера, то они не подлежат векторизации при создании топографического плана.

Для решения этой проблемы было решено выполнить постобработку и удалить подобные сегменты по следующему алгоритму:

1. Удаление сегментов размером до 200 пикселей;
2. Удаление сегментов размером до 75 пикселей. Один пиксел такого сегмента может уголком касаться другого сегмента своего класса;
3. Удаление сегментов размером до 30 пикселей. Один или два пиксела такого сегмента могут касаться другого сегмента своего класса как уголком, так и боковой стороной.

Результат работы такого алгоритма постобработки представлен на рисунке 4.15. Общая точность классификации в ходе его выполнения представлена в таблице 4.3, а конечная составила 92,30 %. Для этого наиболее достоверного изображения была выполнена полная оценка точности [6].

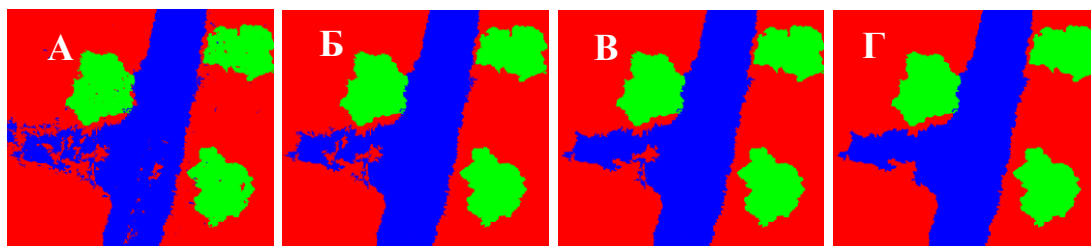


Рисунок 4.15 – Результат работы алгоритма, выполняющего постобработку автоматизированной классификации объектов местности: а) фрагмент, который подается для выполнения алгоритма, б-г) результаты выполнения 1-3 шагов соответственно

Таблица 4.3 – Точность классификации на разных этапах постобработки

Этап постобработки	Общая точность классификации, %
Исходное изображение	91,45
Результат после первого этапа	91,72
Результат после второго этапа	91,86
Результат после третьего этапа	92,30

Общая точность классификации, соответствующая доверительному уровню 85 % (p), рассчитанная по формуле 3.9 составила 92,19 %. Поскольку в данном примере это значение выше пороговых 85 %, то результаты классификации следует признать удовлетворительными.

Результат расчета матрицы ошибок классификации представлен в таблице 4.4, а ошибки, связанные с ложной классификацией и пропусками классификации – в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Матрица ошибок классификации

Фактический класс	Расчетный класс			
	Луг	Дерево	Дорога	Всего
Луг	87504	3448	1511	92463
Дерево	850	21673	17	22540
Дорога	7116	58	46744	53918
Всего	95470	25179	48272	168921

Таблица 4.5 – Значения ошибок пропусков классификации и ложной классификации во всех классах

Класс	Пропуск			Ложная классификация		
	Пропущенные пиксели	Общее количество пикселей	Процент ошибок	Ложная классификация	Общее количество пикселей	Процент ошибок
Луг	4959	92463	5,36	7966	95470	8,34
Дерево	867	22540	3,85	3506	25179	13,92
Дорога	7174	53918	13,31	1528	48272	3,17

Согласно данным таблицам в классе «Луг» оказалось самое большое количество лишних пикселей – 7966, из которых 7116 пикселей в действительности принадлежат классу «Дорога».

Доверительные интервалы для пропусков и ложной классификации в рассматриваемом примере представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Доверительные интервалы для пропусков и ложной классификации

Класс	Правильная классификация	Пропуски			Ложная классификация		
		п	% попаданий	95 % доверительный интервал	П	% попаданий	95 % доверительный интервал
Луг	87504	92463	94,6	94,5-94,8	95470	91,7	91,5-91,8
Дерево	21673	22540	96,2	95,9-96,4	25179	86,1	85,6-86,5
Дорога	46744	53918	86,7	86,4-87,0	48272	96,8	96,7-97,0

Используя значение 85 % в качестве порогового и сравнивая его с минимальным из таблицы 6.9 (нижнее значение интервала для класса «Дерево» – 85,6 %), получаем, что все представленные классы удовлетворяют сформулированному критерию, поскольку граничные значения доверительного интервала составляют более 85 %.

Оценка согласованности между снимком и картой при случайном распределении пикселей по классам (p_c) определяется отношением суммы диагональных элементов таблицы 4.7 к сумме всех элементов. В данном случае

он составил 0,420. Таким образом, коэффициент k , вычисленный по формуле 3.11, составил 0,8653. Это означает, что полученная ранее точность классификации на 86,53 % превышает ту, которая была бы при случайном распределении пикселов по классам [98] и, согласно [120], попадает под самый высокий интервал коэффициента k : $0,81 \leq k \leq 1$ – почти идеальное соответствие [6].

Таблица 4.7 – Матрица для расчета коэффициента k

Класс	Луг	Дерево	Дорога	Всего
Луг	8827442610	2328125877	4463373936	92463
Дерево	2151893800	567534660	1088050880	22540
Дорога	5147551460	1357601322	2602729696	53918
Всего	95470	25179	48272	168921

После того, как была выполнена автоматизированная классификация, рассчитана ее точность, которая удовлетворяет поставленным требованиям, производится этап перевода классифицированного растрового изображения в векторный электронный топографический план [48] при помощи ГИС *ArcMap*. Несмотря на то, что точность классификации оказалась выше порогового значения, она все равно не идеальна. Однако применение векторизации полученной тематической карты может позволить избавиться от остаточной ошибки и получить топографический план без искаженных объектов.

Для этого сначала выполняется разделение изображения на части, каждая из которых имеет сегменты одного класса (рисунок 4.16), и их конвертирование в векторный вид.

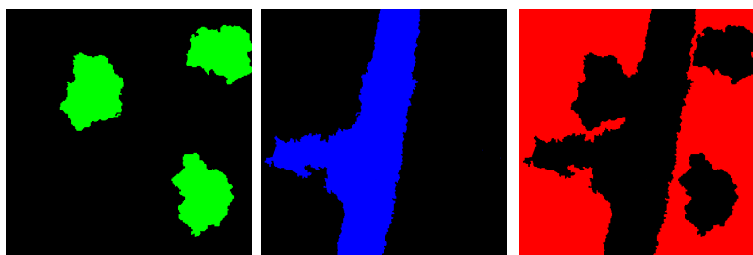


Рисунок 4.16 – Разложение тематической карты на изображения по классам

Далее производится их автоматический перевод в векторный вид (рисунок 4.17) и удаляются те объекты, которые соответствовали черному цвету на растровой тематической карте. Для повторения одинаковых действий возможно создание скриптов, которые поддерживаются в *ArcMap*.

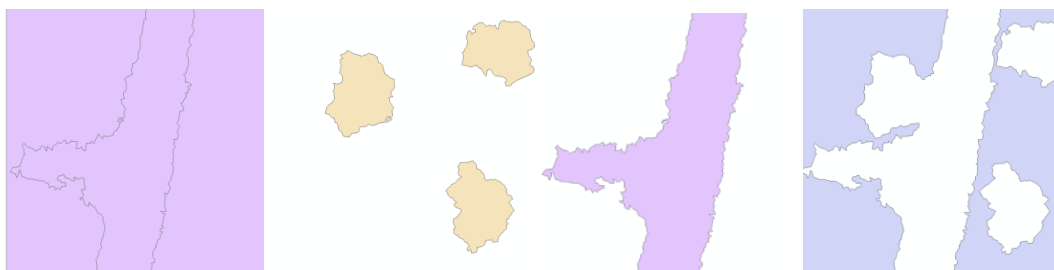


Рисунок 4.17 – Результат перевода фрагмента растровой карты в векторный вид:

а) дороги до удаления фона, б-г) после удаления фона для деревьев, дорог и луга соответственно

Все последующие действия при выполнении векторизации выполняются для каждого типа объектов по отдельности. На данном участке выделяется полоса деревьев. Для создания векторного объекта полосы деревьев необходимо сначала найти центры каждого дерева (рисунок 4.18, а). Далее через них проводится линия (рисунок 4.18, б) и выполняется параллельный перенос класса пикселей на заданное расстояние (рисунок 4.18, в).

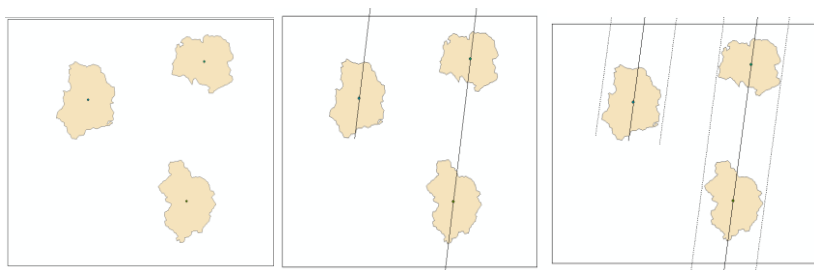
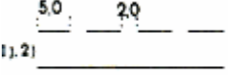
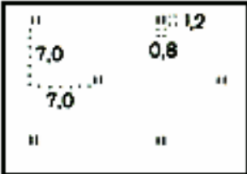
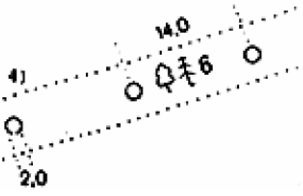


Рисунок 4.18 – а) Автоматизированный поиск центров деревьев, б) проведение прямых через центры деревьев, в) параллельный перенос полосы деревьев

В соответствии с условным знаком № 386.4 (полоса деревьев шириной 2 – 10 мм и высотой более 4 м) инструкции (таблица 4.8) [31] необходимо

определить ширину и высоту полосы древесных насаждений, а также расстояние между ними. Данные параметры легко установить с помощью измерений расстояний на ортофотоплане и по данным карты высот объектов местности (ширина 2,7 м, высота 8 м, расстояние между деревьями 4 м).

Таблица 4.8 Используемые условные знаки, соответствующие объектам фрагмента местности при создании топографического плана

Объект местности	Номер топографического объекта в [31], его название и характеристика	Визуальное представление условного знака
-	329.1 Горизонтالي утолщенные 329.2 Горизонтали основные	
Полевые дороги	193.1 Полевые и лесные дороги	
Луг	401. Растительность травяная, луговая (разнотравье)	
Полоса древесных насаждений	386.4. Полосы древесных насаждений шириной от 2 до 10 мм в масштабе плана, высотой 4 м и более (цифра – средняя высота деревьев)	

В случае векторизации отдельно стоящего дерева, найденный его центр уже указывает на местоположение условного знака. Для создания контуров растительности, необходимо создать выпуклую оболочку, определенную на основе центров деревьев (*Data Management Tools – Features – Minimum Bounding Geometry*).

Для векторизации контура полевых дорог выполнялась следующая методика. Сначала создавались полилинии, соответствующие границам

полигонов. Полученные объекты достаточно извилисты, поэтому далее выполнялось их сглаживание по алгоритму *РАЕК* (допуск сглаживания 10 м) (рисунок 4.19, *а*). Затем было определено отклонение от исходной полилинии, не превысившего допустимого значения, равного 30 см. Данное значение установлено в пункте 2.13.1 инструкции [30] для построения топографического плана масштаба 1:1000 и равно 0,5 мм, что соответствует 50 см на местности. Однако это значение было намеренно уменьшено в связи с учетом ошибки построения ортофотоплана и обеспечением дополнительной гарантии точности.

При визуальной оценке полученных после выполнения сглаживания полилиний было решено повторить операцию, но с меньшим допуском – 5 м (рисунок 4.19, *б*). В дальнейшем была оценена ошибка сглаживания, которая оказалась незначительно превышена по сравнению с допустимой из-за влияния тени (выделена на рисунке 4.19, *в*). Однако при проведении средней линии (рисунок 4.20, *а*) ошибка сглаживания уменьшается примерно в два раза.

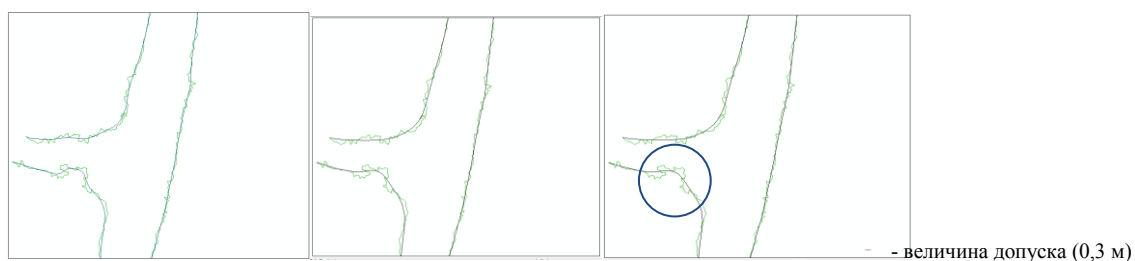


Рисунок 4.19 – Результат сглаживания полилиний, обозначающих границы полевых дорог: *а*) с помощью алгоритма *РАЕК* с допуском 10 м, *б*) после повторного выполнения алгоритма *РАЕК* с допуском 5 м, *в*) проверка ошибки, полученной по результатам сглаживания

Далее выполнялся параллельный перенос средней линии на расстояние 1,25 м, которое равно половине ширины дороги (рисунок 4.20, *б*), было сделано скругление полученных полилиний на перекрестках и удаление средней линии. Полученные векторные объекты границ полевых дорог при необходимости редактировались (рисунок 4.20, *в*).



Рисунок 4.20 – Векторизация полевой дороги: а) автоматизированное создание средней линии дорог, б) параллельный перенос средней линии на расстояние половины ширины дороги, в) скругление и редактирование контура дорог

Создание площадных векторных объектов – лугов – заключалось в усечении их полигонов вдоль границ объектов других классов. В случае незначительной нестыковки их границ никаких действий по устранению проводить не требуется (выделено на рисунке 4.21, а), так как на топографическом плане это никак не отразится. В конце выполнения векторизации растровой тематической карты производится удаление лишних промежуточных объектов (рисунок 4.21, б).

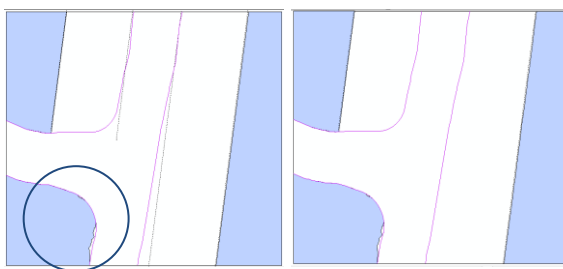


Рисунок 4.21 – а) обрезка векторных объектов класса «Луг» вдоль границ объектов других классов, б) результат после удаления промежуточных объектов

Построение горизонталей для топографического плана производится автоматически на основе карты высот. Для этого задается наименьшее и наибольшее значение высот, через которые строятся горизонтали, а также высота сечения рельефа. Далее производится сглаживание горизонталей. Согласно пункту 5.1.1.18 инструкции [30] при углах наклона местности до 2° , средние погрешности съемки рельефа и его изображения на инженерно-

топографических планах относительно ближайших точек съемочного обоснования не должны превышать $1/4$ от принятой высоты сечения рельефа (0.5 м). Величина средней погрешности для изучаемой территории составило $50 \text{ см} / 4 = 12,5 \text{ см}$. После выполнения сглаживания (алгоритм *РАЕК*, точность 10 м) данное значение не превысило допустимое значение на исследуемом фрагменте местности (рисунок 4.22). Для повышения визуального восприятия горизонталей было выполнено повторное сглаживание, но с точностью 5 м.

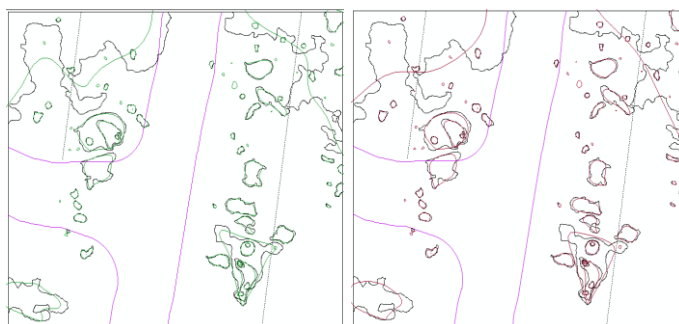


Рисунок 4.22 – Результаты создания горизонталей. Черным цветом обозначены исходные горизонталей, зеленым – горизонталей после сглаживания алгоритмом *РАЕК* с точностью 10 м, красным – горизонталей после повторного сглаживания алгоритмом *РАЕК* с точностью 5 м.

Затем производилось удаление небольших, не имеющих значения горизонталей, размеры длин которых не превышали 6,3 мм на карте (рисунок 4.23). Данное значение примерно соответствует длине окружности радиусом 1 м.



Рисунок 4.23 – Результат удаления небольших горизонталей

В соответствии с принятыми условными знаками для топографического плана масштаба 1:1000 необходимо подписать их высоты, а также выделить большей толщиной полилинии каждую четвертую горизонталь с высотой сечения рельефа 0,5 м. Благодаря возможности вводить формулу для поиска горизонталей по атрибутам в таблице свойств, можно выделить каждую четвертую горизонталь:

$$\text{Mod} ("Горизонтали"*2,4)=0, \quad (4.1)$$

где *Mod* – функция, находящая остаток от деления, а «Горизонтали» – одноименный объект.

Для разделения горизонталей на два слоя, каждому из которых будет присваиваться свой условный знак, необходимо в свойствах слоев объекта «Горизонтали» ввести процедуру, например, на языке *Visual Basic*:

```
Function FindLabel ( [Contour] )
If ( [Contour] *2 Mod 4 = 0) Then
    FindLabel = [Contour]
End If
End Function
```

После этого полученным слоям нужно присвоить свои условные знаки (рисунок 4.24).



Рисунок 4.24 – Результат автоматизированного построения горизонталей и их форматирования в соответствии с условными знаками

В конце камеральных работ производилась установка условных знаков (таблица 4.8) для всех объектов в соответствии с принятым кодификатором и

удаление подписей с большинства горизонталей (рисунок 4.25) [6, 18].

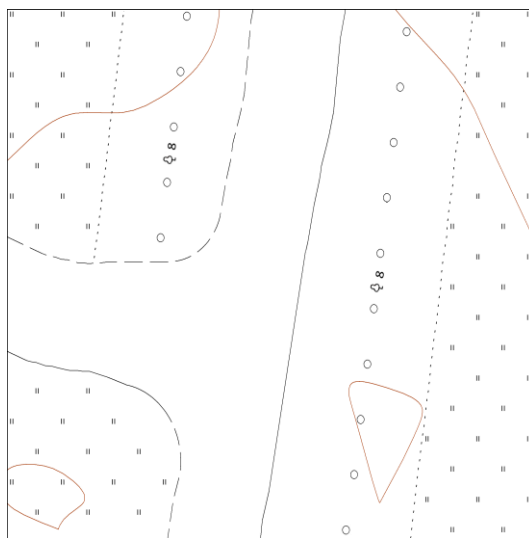


Рисунок 4.25 – Электронный топографический план фрагмента в масштабе 1:1000, созданный с помощью предложенной автоматизированной методики

4.4 Выводы по четвертой главе

Выполненное в данной главе практическое исследование показало полную согласованность его с теоретическим описанием. Выполнение подготовительных расчетов сыграло важную роль в успешном выполнении полевых работ, в частности, рассчитанные параметры аэрофотосъемки практически полностью совпали с данными, полученными во время полета БЛА, показав высокую эффективность проведения полевых работ.

Совместное использование спутниковых и линейно-угловых измерений позволило достичь высокой точности определения точек съемочного обоснования и достоверно произвести оценку точности облака точек.

Модель гексакоптера Горного университета г. Леобен, обладающего схожими с предложенными во 2 главе характеристиками, показала возможность его успешного использования для аэрофотосъемки. Данный вид съемки показал высокую эффективность.

Практически было установлена необходимость использования по

меньшей мере пяти опорных точек, а также их равномерного расположения по всей территории съемки как в плановом, так и высотном положении.

Для выполнения дешифрирования использовался небольшой фрагмент ортофотоплана. Это связано с тем, что основной задачей при его создании было проработать его каждый этап, определить наиболее выгодные параметры. Поэтому для повышения сложности было решено использовать фрагмент с большим количеством теней, а также довольно частые объекты, такие как перекрестки дорог и полосы древесных насаждений.

Для получения наиболее точной автоматизированной классификации объектов использовались различные методики (таблица 4.9). Наиболее высокий результат показал алгоритм *OBIA* на основе *Felzenszwalb*-сегментации и техники машинного обучения «случайный лес» с последующей постобработкой, заключающейся в удалении небольших ошибочных сегментов. Такой подход позволил получить общую точность классификации предложенного фрагмента ортофотоплана 92,30 %, а коэффициент k , вычисленный по формуле 3.11, составил 0,8653 и попал в наиболее достоверный интервал $0,81 \leq k \leq 1$ – «почти идеальное соответствие».

Таблица 4.9 – Количество правильно распознанных пикселей фрагмента

Алгоритм классификации	Общая точность классификации (p'), %
Неконтролируемый	71,5
Контролируемый (Метод максимального правдоподобия)	78,4
Алгоритм <i>OBIA</i> (<i>Felzenszwalb</i> -сегментация и алгоритм «случайный лес»)	81,1
Алгоритм <i>OBIA</i> (<i>Felzenszwalb</i> -сегментация и алгоритм «случайный лес») с использованием КВО	91,45
Алгоритм <i>OBIA</i> (<i>Felzenszwalb</i> -сегментация и алгоритм «случайный лес») с использованием КВО и постобработкой	92,30

Предложенная методика векторизации полученной растровой тематической карты позволила привести вид объектов в соответствие с требованиями [18], а также исправить остаточную ошибку классификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработана методика топографической съемки с применением БЛА и автоматизированного дешифрирования объектов местности. Основные научные и практические выводы по диссертационному исследованию:

1. Разработана методика топографической съемки местности масштаба 1 : 1 000 и площадью до 200 Га с применением БЛА, которая повышает оперативность и качество проектирования при изысканиях в строительстве.

2. Обосновано на основе моделирования плотного облака точек, что пять опорных точек, равномерно расположенных по всей снимаемой территории, обеспечивает геодезическую основу для создания топографических планов нелинейных объектов местности масштаба 1 : 1 000 и площадью до 200 Га, а также показывает высокую устойчивость по отношению к грубым ошибкам. Показано, что при съемке холмистой и горной местности следует обеспечивать положение оптической оси объектива квазинормальным к снимаемой поверхности Земли.

3. Доказано, что летно-съемочные работы целесообразно выполнять с использованием гексакоптера, при этом высотное положение точек съемочного обоснования определяется с помощью тригонометрического нивелирования электронным тахеометром, которое соответствует по точности техническому геометрическому нивелированию.

4. Обоснована модификация автоматизированной классификации объектов местности по алгоритму OBIA путем использования карты их высот обеспечивающая достаточную точность для построения топографических планов масштаба 1 : 1 000.

5. Разработанная методика полевых и летно-съемочных работ реализована в условиях горной местности, где было определено большое количество точек съемочного обоснования, что характерно при изысканиях для строительства зданий и сооружений.

6. Апробация предложенной методики камеральных работ реализована на основе аэрофотосъемки территории парка Агриколы, на котором находится небольшое количество наземных сооружений и отсутствует густая растительность. Это позволило выполнить камеральные работы по созданию топографического плана масштаба 1:1000. Наиболее высокая общая точность классификации была достигнута (92,30 %) на основе *Felszenwalb*-сегментации и метода машинного обучения «Случайный лес» с последующей постобработкой тематической карты. При этом в качестве входных данных использовался не только ортофотоплан, но и карта высот объектов местности. Фрагмент топографического плана, построенный по результатам такого дешифрирования полностью соответствует действующим нормам точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев, П. И. Полетные контроллеры для беспилотных летательных аппаратов / П. И. Авдеев, М. С. Пантелеев // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2016. — № 6-1. — С. 5—6.
2. Асташенков, Г. Г. Влияние количества базовых станций на точность ГНСС-измерений / Г. Г. Асташенков, Б. Т. Мазуров, Ф. Х. Зарзура // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2013. — № S4. — С. 62—63.
3. Береговой, Д. В. Исследование и разработка методики тригонометрического нивелирования повышенной точности / Д. В. Береговой // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 12 (54). — Ч. 1. — С. 77—79.
4. Береговой, Д. В. Автоматизированное дешифрирование и векторизация материалов аэрофотосъемки при создании топографического плана / Д. В. Береговой // EurasiaScience. Сборник статей XV международной научно-практической конференции. — М.: «Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», 2018. — С. 220—222.
5. Береговой, Д. В. Исследование и разработка методики тригонометрического нивелирования повышенной точности : диплом. работа / Д. В. Береговой. — СПб., 2015. — 50 с.
6. Береговой, Д. В. Методика автоматизированного создания топографического плана на основе съёмки с беспилотного летательного аппарата / Д. В. Береговой, М.Г. Мустафин // Геодезия и картография. — 2018. — Т. 79. — № 9. — С. 30—36.
7. Береговой, Д. В. Несовершенство метода построения цифровых трехмерных моделей местности на основе цифровых изображений / Д. В. Береговой // XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». Секция: Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре. Сборник научных

трудов. — СПб. : Санкт-Петербургский горный ун-т, 2016. — С. 38–39.

8. Боголюбова, А. А. Аэрокосмические съемки. Летно-съёмочный процесс : методические указания по курсовому проектированию / А. А. Боголюбова, Ю. Н. Корнилов. — СПб. : Санкт-Петербургский горный ун-т, 2016. — 61 с.

9. Брынь, М. Я. Разработка методов повышения точности геодезического обеспечения городского кадастра : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.32 / Брынь Михаил Ярославович. — СПб., 2015. — 39 с.

10. Верещака, Т. В. Применение приемников спутникового позиционирования при создании и обновлении топографических карт / Т. В. Верещака, А. С. Вахтанов // Геодезия и аэрофотосъемка. — 2003. — № 6. — С. 67—83.

11. Виноградов, А. В. Автоматизация топографических съемок: методические указания к лабораторным работам [Электронный ресурс] / А. В. Виноградов. — Омск : СибАДИ, 2016. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27225331> (дата обращения 15.05.2018).

12. Воздушный кодекс РФ от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. - 24 марта 1997 г. - №12. - Ст. 32.

13. Волков, А. В. Разработка методики автоматизированного дешифрирования изображений топографических объектов с использованием нейросетевых методов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.34 / Волков Алексей Васильевич. — СПб., 2006. — 159 с.

14. Вольпе, Р. И., Топографическое дешифрирование аэроснимков при создании карт масштабов 1:10000 и 1:25000 / Р. И. Вольпе, Н. С. Подобедов. — Рига : Геодезиздат, 1961. — 41 с.

15. Воробьев, В. Г. Автоматическое управление полетом самолетов / В. Г. Воробьев, С. В. Кузнецов. — М. : Транспорт, 1995. — 448 с.

16. Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Картгеоцентр, 2004. — 355 с.

17. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР . Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:10000 и 1:25000. (Полевые работы). — М. : Недра, 1978. — 80 с.

18. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. — М. : Недра, 1973. — 144 с.

19. ГОСТ 22268-76. Государственный стандарт Союза ССР. Геодезия. Термины и определения. — М. : Издательство стандартов, 1981. — 39 с.

20. Гудков, В. М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений : учебник для вузов / В. М. Гудков, А. В. Хлебников. — М. : Недра, 1990. — С. 19-20.

21. Гура, Д. А. Особенности воздушного лазерного сканирования в теории и на практике на примере линейных объектов / Д. А. Гура, Г. Г. Шевченко, А. М. Карслян, Д. В. Петренков // Научные труды КубГТУ. — 2016. — № 8. — С. 109—116.

22. Гусев, В. Н. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки : учебное пособие / В. Н. Гусев, А. И. Науменко, Е. М. Волохов, В. А. Голованов. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный горный университет, 2011. — 80 с.

23. Дедова, Т. В. Создание топографических карт на основе аэрофотосъемки для мониторинга экологических проблем по магистральному газопроводу / Т. В. Дедова, А. Б. Исаханова // Гидрометеорология и экология. — 2011. — № 4. — С.53—64.

24. Ермаченков, Д. И. Плата управления квадрокоптера для удаленного мониторинга объектов / Д. И. Ермаченков, Т.К. Фазли // Инженерный вестник. — 2016. — № 8. — С. 12-27.

25. Зинченко, О. Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко // АО «Ракурс» .— 2011. — Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681> (дата обращения: 14.05.2018).

26. Зотов, Р. В. Эффективность двухмаршрутной аэрофотосъемки линейных объектов северных территорий / Р. В. Зотов, Ю. В. Столбов // Омский научный вестник. — 2012. — № 2 (114). — С. 235—239.

27. Инженерная геодезия [Электронный ресурс] : учебник / М. Г. Мустафин и [др.] — СПб. : Санкт-Петербургский горный ун-т, 2016. — 337 с. — Режим доступа: http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=108&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=26%2E1%2F%D0%98%2062%2D363245520<.> (дата обращения 08.08.2018)

28. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП(ГНТА)-03-010-02. — М. : ЦНИИГАиК, 2003. — 226 с.

29. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых система ГЛОНАСС и GPS ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. — М. : ЦНИИГАиК, 2002. — 51 с.

30. Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:10000 и 1:25000. Полевые работы. — М. : Недра, 1978. — 80 с.

31. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500 ГКИНП-02-033-82. — М. : Недра, 1982. — 156 с.

32. История геодезии и земельных отношений: учебное пособие / Е.С. Богомолова, М. Я. Брынть, П. А. Веселкин, И. С. Пандул. — СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. — С. 5—7.

33. Кавешников, М. Б. Методика нанесения горизонталей на топографические карты по материалам воздушного лазерного сканирования / М. Б. Кавешников, А. А. Маскалов, Н. В. Герасимова // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2009. — № 1. — С. 28—33.

34. Камнев, И.С. Исследование точности современных методов измерения / И. С. Камнев, В. А. Середович // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — № 2, Т. 1. — С. 135—140.

35. Кан, Д. Некоторые тенденции и перспективы развития строительной

отрасли в России [Электронный ресурс] / Д. Кан // Международный студенческий научный вестник. — 2017. — № 2. Режим доступа: — <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=17144> (дата обращения: 16.07.2018).

36. Каримов, Д. А. Дистанционное зондирование Земли: преимущества и недостатки / Д. А. Каримов, А. С. Кильсенбаев, А. Н. Кутлияров // Актуальные проблемы природообустройства, кадастра и землепользования. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. — Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. — С. 113—117.

37. Ковач, Н. С. Картографирование линейных инженерных объектов по данным лазерного сканирования / Н. С. Ковач // Вестник Московского ун-та. — 2013. — № 1. — С. 47—54.

38. Комиссаров, А. В. Технология топографической съемки промышленных объектов с применением наземного лазерного сканирования / А. В. Комиссаров, А. В. Середович, О. А. Дементьева // Гео-Сибирь. — 2005. — № 1. — Т. 1. — С. 225—227.

39. Конушин, А. Геометрические свойства нескольких изображений [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2012/iii/chigarev/library/article2.htm> (дата обращения: 09.08.2018).

40. Корнилов, Ю. Н. Аэрокосмические съемки. Классификация цифровых изображений: методические указания к лабораторным работам / Ю. Н. Корнилов, А. А. Боголюбова. — СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2016. — 50 с.

41. Корнилов, Ю. Н. Геодезия. Топографические съемки : учебное пособие / Ю. Н. Корнилов. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2008. — 145 с.

42. Корнилов, Ю. Н. Фотограмметрия: Лабораторный практикум /

Ю. Н. Корнилов. — СПб : Санкт-Петербургский горный институт, 2002. — С. 3—7.

43. Косоногов, П. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для решения картографических задач в г. Самара / П. В. Косоногов, А. В. Филатова // Вестник научных конференций — 2017. — № 10-4 (26). — С. 47—49.

44. Кочнева, А. А. Методика построения цифровых моделей рельефа по данным воздушного лазерного сканирования / А. А. Кочнева // Вестник СГУГиТ. — 2017. — № 2 (22). — С. 44—54.

45. Крыжановский, С. В. Мобильное лазерное сканирование как шестой метод определения координат характерных точек / С. В. Крыжановский, А. В. Волков // Сборник материалов II международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургская ассоциация геодезии и картографии. — СПб. : Политехника, 2017. — С. 123—127.

46. Кузин, А. А. Технология оценки точности и достоверности цифровых моделей рельефа оползнеопасных склонов по данным воздушного лазерного сканирования / А. А. Кузин, С. В. Ковшов, Ф. А. Орлов // Научные исследования. — 2017. — № 1 (12). — С. 10—13.

47. Кузнецов, А. О. Опыт применения спутниковой геодезической аппаратуры при проведении инженерно-геодезических изысканий на участке федеральной автомобильной дороги / А. О. Кузнецов // Инновационная наука. — 2017. — № 10. — С. 101—105.

48. Курков, В. М. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАиК / В. М. Курков, А. В. Смирнов, Д. П. Иноземцев // Геопрофи. — 2014. — № 4. — С. 55—61.

49. Лабутина, И. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков / И. А. Лабутина : учебное пособие для студентов вузов. — М.: Аспект Пресс, 2004. — 184 с.

50. Лесюта, О. С. Применение кинематики реального времени /

О. С. Лесюта, В. А. Миронов // Молодежный вестник ИрГТУ. — 2016. — № 2. — С. 19.

51. Леушин, В. В. Воздушное лазерное сканирование с помощью БПЛА / В. В. Леушин // Альманах мировой науки. — 2016. — № 6—1 (9). — С. 59—60.

52. Логинов, Д. В. Применение метода кинематических измерений в реальном времени для создания планово-высотного обоснования топографических работ / Д. В. Логинов // XLIV Огарёвские чтения : материалы науч. конф. Часть 2 — Саранск : Мордов. гос. ун-т, 2016. — Часть 2. — С 487—491.

53. Мазуров, Б. Т. Оперативный мониторинг лесных земель северных регионов на основе использования оптических и радарных космических снимков / Б. Т. Мазуров, Е. И. Аврунев, В. А. Хамедов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли и космоса. — 2017. — Т. 14 — № 4. — С. 103—111.

54. Мазуров, Б. Т. Совершенствование информационной базы региональных ГИС для инвентаризации и картографирования природных ресурсов / Б. Т. Мазуров, О. Н. Николаева, Л. А. Ромашова // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2012. — № 2—1. — С. 130—133.

55. Медведев, Е. М. В поисках «Истинной Земли» / Е. М. Медведев // Гео-профи. — 2004. — № 4. — С. 19—21.

56. Михеева, А. А. Анализ требований к выполнению работ по аэрофотосъемке / А. А. Михеева, М. А. Наприенкова // Вестник Полоцкого государственного ун-та. Серия F: Строительство. Прикладные науки. — 2008. — № 6. — С. 201—206.

57. Мустафин, М. Г. Построение модели карьера на основе съемки с беспилотного летательного аппарата / М. Г. Мустафин, Д. В. Береговой // Маркшейдерский вестник. — 2016. — № 6 (115). — С. 25—29.

58. Мюллер, М. Калькулятор для мультикоптеров, Версия: X7.111

[Электронный ресурс] / М. Мюллер. — 2018. — Режим доступа: <http://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php> (дата обращения 02.06.2018)

59. Назаров, Д. Г. Опыт применения мобильных навигационно-сканерных систем на объектах железнодорожного транспорта / Д. Г. Назаров // Автоматика на транспорте — 2016. — № 4. — Т. 2. — С. 530—539.

60. Никитин, В. Н. Опыт построения ортофотоплана по данным крупномасштабной аэрофотосъемки, выполненной с использованием неметрической цифровой камеры / В. Н. Никитин, А. В. Семенцов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — № 1. — Т. 4. — С. 12—16.

61. Никонов, А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами в зимних условиях / А. В. Никонов, А. А. Скворцов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — №1. — С. 70—76.

62. Никонов, А. В. Исследование точности измерения превышений электронным тахеометром высокой точности в полевых условиях / А. В. Никонов, М. Е. Рахымбердина // Вестник СГГА. — 2013. — № 1 (21). — С. 16—26.

63. Никонов, А. В. Совершенствование методики тригонометрического нивелирования короткими лучами : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.32 / Никонов Антон Викторович. — Новосибирск, 2015. — 261 с.

64. Олейник, С. В. Цифровые камеры для аэрофотосъемки / С. В. Олейник, В. Б. Гайда // Геопрофи. — 2006. — № 4. — С. 45—51.

65. Основные положения по аэрофотосъемке, выполняемой для создания и обновления топографических карт и планов. ГКИНП-09-32-80. / Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Министерство гражданской авиации. — М. : Недра, 1982. — 16 с.

66. Павлов, В. И. Фотограмметрия. Теория одиночного снимка и стереоскопической пары снимков: Учеб. пособие / В. И. Павлов. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Санкт-Петербургский горный ин-т (технический

ун-т), 2006. — С. 39.

67. Пандул, И. С. Исторические и философские аспекты геодезии и маркшейдерии / И. С. Пандул, В. В. Зверевич. — СПб. : Политехника, 2012. — С. 10.

68. Панжин, А. А. Визуализация характеристик деформационных полей по данным геодезических наблюдений / А. А. Панжин, Б. Т. Мазуров, А. А. Силаева // Проблемы недропользования. — 2015. — № 3(6). — С. 13—18.

69. Поздышева, О. Н. Анализ современных средств и методов электронной тахеометрии / О. Н. Поздышева // Архивариус — 2016. — № 10 (2). — С. 86—89

70. Поклад, Г. Г. Геодезия : учебное пособие для вузов. / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. — М. : Академический Проект, 2007. — 592 с.

71. Попов, В. М. Гиростабилизация платформы беспилотного летательного аппарата для аэрофотосъемки и видеонаблюдения / В. М. Попов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. — 2017. — № 2 (13). — С. 134—149.

72. Постановление правительства РФ № 1236 от 16.11.2015. Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд [Электронный ресурс]. — М. — 2015.

— Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/ac872y0wqioFnRUEtnpGjEavWCfgEAo.pdf> (дата обращения: 20.04.2018).

73. Пошаговое руководство (Уровень: Начинающие). Построение ортофотоплана и карты высот в программе Agisoft PhotoScan Pro 1.2 (с Опорными точками) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.2-Tutorial \(BL\) - Orthophoto, DEM \(with GCP\) \(Russian\).pdf](http://www.agisoft.com/pdf/PS_1.2-Tutorial(BL)-Orthophoto,DEM(withGCP)(Russian).pdf) (дата обращения: 05.06.2018).

74. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan Professional Edition,

версия 1.4 [Электронный ресурс]. — СПб. : ООО Агисофт, 2018. — Режим доступа: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf (дата обращения 08.06.2018)

75. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.2 [Электронный ресурс]. — 2016. — Режим доступа: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf (дата обращения: 25.08.2018).

76. Рыльский, И. А. Сравнение пригодности данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для обеспечения проектных работ / И. А. Рыльский, И. В. Калинин // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». — 2017. — Т. 23. — Ч. 3. — С. 31—46.

77. Савокин, А. С. Опыт применения комбинированных технологий при создании планово-высотного обоснования / А. С. Савокин, И. О. Сучков // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2012. — Т. 4. — С. 148—153.

78. Самсонова, Н. В. Сущность аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов / Н. В. Самсонова, А. Б. Борический // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике. — 2016. — № 1 (7). — С. 226—227.

79. Свердлов, С. З. Продолжительность полёта электрического беспилотного вертолёт / С. З. Свердлов // Вестник вологодского государственного университета. 2015. — № 1 (5). — С. 11—16.

80. Селиханович, В. Г. Геодезия : учебник для вузов / В. Г. Селиханович. — Часть II. — М. : Недра, 1981. — 544 с.

81. Середович, А. В. Построение цифровых топографических планов объектов нефтедобычи с применением наземного лазерного сканирования / А. В. Середович // Гео-Сибирь. — 2006. — № 2. — Т. 1. — С. 145—149.

82. Середович, В. А. Исследование существующих методов полевого кодирования / В. А. Середович, Д. А. Ферулев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2005. — № 1. — Т. 1. — С. 56—59.

83. Середович, В. А. Наземное лазерное сканирование : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. — Новосибирск : СГГА, 2009. — 176 с.

84. Середович, В. А. Некоторые проблемы автоматизации обработки результатов геодезических измерений / В. А. Середович, Д. А. Ферулев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2006. — № 1 Т. 1. — С. 137—140.

85. Середович, В. А. Обоснование возможности использования лазерного сканирования в инженерных изысканиях линейных сооружений / В. А. Середович, И. С. Камнев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — № 2. — Т. 1. — С. 153—156.

86. Середович, В. А. Перспективные средства сбора геодезической информации / В. А. Середович, Д. А. Ферулев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2006. — № 1. — Т. 1. — С. 140—143.

87. Середович, В. А. Применение данных мобильного лазерного сканирования для создания топографических планов / В. А. Середович, М. А. Алтынцев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — № 3. — Т. 1. — С. 96—100.

88. Сеть постоянно действующих дифференциальных станций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://topnet.gsi.ru> (дата обращения: 31.07.2018)

89. Сечин, А. Ю. Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин // АО «Ракурс». — Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=448> (дата обращения: 15.07.2018).

90. Солем, Я. Э. Программирование компьютерного зрения на Python / Я. Э. Солем. — М. : ДМК Пресс, 2016. — 312 с.

91. СП 47.13330.2012 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. — М. : Минрегион России, 2013. — 80 с.

92. Справочник по инструментам. Сгладить полигоны [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/cartography/smooth-polygon.htm> (дата обращения: 22.08.2018).

93. Строительство в России [Электронный ресурс]. — М. : Росстат. — 2016. — С. 13. — Режим доступа: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2016/stroit_2016.pdf (дата обращения: 04.08.2018)

94. Тимофеев, М. В. RTK-режим системы глобального позиционирования при топографической съемке линейных объектов / М. В. Тимофеев // Огарев-Online. — 2015. — № 24 (65). — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28423200> (дата обращения: 25.07.2018).

95. Убаева, А. С. Создание топографических планов масштаба 1:1000 по данным аэрофотосъемки на территории месторождения / А. С. Убаева // Наука и образование сегодня. — 2017. — № 5 (16). — С. 111—114.

96. Хромченко, А. В. Использование аэрофотосъемки для решения задач землеустройства и кадастра в Приморском крае / А. В. Хромченко, В. Ф. Булавицкий // Научные чтения памяти профессора М. П. Даниловского. — 2015. — № 1. — С. 241—245.

97. Хромченко, А. В. Производство топографических съемочных работ в условной системе координат и высот / А. В. Хромченко, Д. А. Агапова // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения Международный сборник научных трудов. — Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. — С. 45—49.

98. Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. — М. : Техносфера, 2008. — 312 с.

99. Черноглазов, Ю. Б. Аэрофотосъемка района российской станции Прогресс в Восточной Антарктиде в 2004-2005 гг. / Ю. Б. Черноглазов, С. В. Попов, В. Л. Мартынов // Материалы гляциологических исследований. — 2005. — Вып. 100. — С. 160—164.

100. Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. — М. : Техносфера, 2010. — 560 с.
101. Ыстыкул, К. А. Картографирования лавиноопасных зон в высокогорной рекреационной зоне Иле Алатау по данным лазерного сканирования / К. А. Ыстыкул, В. А. Середович, Ж. Д. Байгурин // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — № 2. — Т. 1. — С. 101—107.
102. Ярмоленко, А. С. Технология, точность и экономическая эффективность автоматизированного дешифрирования сельскохозяйственных земель / А. С. Ярмоленко, О. А. Куцаева // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2013. — № 3. — С. 64—71.
103. Agisoft lens user manual. Version 0.4.0 [Электронный ресурс]. — 2011. — Режим доступа: <http://downloads.agisoft.ru/lens/doc/en/lens.pdf> (дата обращения: 01.07.2018).
104. Agisoft Python API Reference. Release 1.4.0 [Электронный ресурс]. — Agisoft LLC, 2017. — Режим доступа: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_python_api_1_4_0.pdf (дата обращения: 01.07.2018).
105. Bagging predictors : Technical report № 421 / Breiman L. — Berkeley : University of California, 1994. — 19 p.
106. Beregovoi, D. Creation of a quarry terrain model photos obtained from unmanned aerial vehicle / D. Beregovoi, R. Gubaydullina // TU Bergakademie Scientific Reports on Resource Issues. Geotechnics, surveying. — 2017. — № 1. — pp. 45—50.
107. Beregovoi, D. V. Monitoring of Quarry Slope Deformations with the Use of Satellite Positioning Technology and Unmanned Aerial Vehicles / D. V. Beregovoi, J. A. Younes, M. G. Mustafin // Procedia Engineering. — 2017. — № 189. — pp. 737—743.
108. Beregovoi, D. V. Monitoring of quarry slope deformations with the use of satellite positioning technology and unmanned aerial vehicless / D. V. Beregovoi, J.

A. Younes, M. G. Mustafin // Transportation geotechnics and geoecology (TGG-2017). Abstracts of international scientific conference. — St. Petersburg, 2017. — p.106.

109. Blaschke, T. Object based image analysis for remote sensing / T. Blaschke // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. — 2010. — № 1 (65). — pp. 2—16.

110. Breiman, L. Random Forests. / L. Breiman // Machine Learning. — 2001. — № 1 (45). — pp. 5—32.

111. Carvajal, F. Surveying a landslide in a road embankment using unmanned aerial vehicle photogrammetry / F. Carvajal, F. Agüera, M. Pérez // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2011. — № XXXVIII-1/C22. — pp. 201—206.

112. Chollet, F. Deep learning with python / F. Chollet. — New York : Manning Publications Co., 2017. — 384 p.

113. Credo Dat 3.0. Система камеральной обработки инженерно-геодезических работ : справочное руководство. — Минск. : Научно-производственная компания «Кредо-диалог»., 2001. — Т. 13. — С. 10—11.

114. Francesco, N. UAV for 3D mapping applications / N. Francesco, F. Remondino // Applied Geomatics. — 2014. — № 6 (1) — С. 1—15.

115. Ghilani, C. D. Elementary surveying: an introduction to geomatics / Charles D. Ghilani, Paul R. Wold. — 13th ed. — Prentice hall, 2012. — 984 p

116. Hartley, R. I. Multiple view geometry in computer vision [Электронный ресурс] / R. I. Hartley, A. Zisserman. — Cambridge : Cambridge university press, 2004. — pp. 409-502.

117. Hexakopter BBK : report / Tscharf A., Manhart K. — Leoben : Montanuniversität Leoben department of mineral resources engineering, 2015. — pp. 3—5.

118. Kelm, K. UAVs revolutionise land administration / K. Kelm // GIM international. — 2015. — № 29, UAS edition. — pp 19—23.

119. Kümmel, E. Parc Agricole – Landschaftsraum Kronsberg am Stadtrand von Hannover / E. Kümmel // Zeitschrift für Landschaftsarchitektur. — 2000. — № 4 (39). — pp. 56–59.

120. Landis, J. R. The measurement of observer agreement for categorical data / J. R. Landis, G. G. Koch // Biometrics. — 1977. — № 1 (33). — pp. 159–174.

121. Lautenschlager, R. UAVs in the mining industry / R. Lautenschlager, N. Friederike // GIM international. — 2015. — № 29, UAS edition. — pp 29–31.

122. Lillesand, T. M. Remote Sensing and Image Interpretation / T. M. Lillesand, R. W. Kiefer, J. W. Chipman. — 5th ed. — New York : John Wiley and Sons, 2004. — pp. 550-610.

123. Luhmann, T. Close range photogrammetry / T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, I. Harley — Dunbeath : Whittles publishing, 2006 — 528 p.

124. Mavinci GmbH. Файловый сервер. — Режим доступа: <ftp://mavinci.de> (дата обращения: 19.11.2017).

125. Naumann, M. Accuracy comparison of digital surface models created by unmanned aerial systems imagery and terrestrial laser scanner / M. Naumann, M. Geist, R. Bill, F. Niemeyer, G. Grenzdörffer //

126. Nex, F. UAV for 3D mapping applicatios : a review / F. Nex, F. Remondino // Applied geomatics. — 2014. — № 1 (6). — pp. 1–15.

127. Peña, J. M. Quantifying efficacy and limits of unmanned aerial vehicle (UAV) technology for weed seedling detection as affected by sensor resolution / J. M. Peña, J. Torres-Sánchez, A. Serrano-Pérez, A. I. de Castro, F. López-Granados // Sensors. — 2015. — № 3 (15). — pp. 5609-5626.

128. Peterman, V. Landslide activity monitoring with help of unmanned aerial vehicle / V. Peterman // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. — 2015. — Volume XL-1/W4. — pp. 215–218.

129. Potential analysis of image based methods for deformation monitoring, with special regard on the comparison of different image processing software : report

/ Beregovoi D. — Leoben : Montanuniversität Leoben department of mineral resources engineering, 2015. — 32 p.

130. Potential analysis of image based methods for deformation monitoring, with special regard on the comparison of terrestrial UAV-based applications : report / Gubaydullina R. — Leoben : Montanuniversität Leoben department of mineral resources engineering, 2015. — 26 p.

131. Reach M+. RTK GNSS module for precise navigation and UAV mapping [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://emlid.com/reach/> (дата обращения: 28.07.2018).

132. Sony α6000. Instruction manual [Электронный ресурс]. — Тайланд : Sony Corporation, 2014. — Режим доступа: <https://www.sony.co.uk/electronics/support/res/manuals/4532/45320554M.pdf>

133. Tahar, K. H. Multi rotor uav at different altitudes for slope mapping studies / K. H. Tahar // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. — 2015. — Volume XL-1/W4. — pp. 9—16.

134. The state of the art in the detection of geometric, safety-related parameters of slopes and fracture zones to minimize the risk of a slope failure, of rock fall and spalling / Gubaydullina R. Beregovoi D. — Leoben : Montanuniversität Leoben department of mineral resources engineering, 2015. — 21 p.

135. Torre C. OBIA in Python / C. de la Torre. — 2016. — Режим доступа: https://github.com/machinalis/sating/blob/master/object_based_image_analysis.ipynb (дата обращения: 20.01.2018).

136. Torre, C. Python for Object Based Image Analysis (OBIA) [Электронный ресурс] / C. De La Torre. — 2016. — Режим доступа: <http://www.machinalis.com/blog/obia/> (дата обращения: 15.08.2017).

137. Tymków, P. Application of photogrammetric and remote sensing methods for identification of resistance coefficients of high water flow in river valleys : monografie LXXXVIII / P. Tymków. — Wrocław : Wydawnictwo uniwersytetu

przyrodniczego we Wrocławiu, 2009. 101 p.

138. Visual 3d modeling from images-tutorial notes : technical report / Pollefeys, M. — Chapel Hill : University of North Carolina. — pp. 55-65. — Режим доступа: <http://www.cs.unc.edu/~marc/tutorial.pdf> (дата обращения: 25.06.2018).

139. Zhang, Z. A. flexible new technique for camera calibration / Z. A. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. — 2000. — Vol.22, No.11. — pp. 1330—1334.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы, производящей усредняющую фильтрацию трехмерного облака точек

Язык программирования *Python 3*, написан автором диссертации.

Файл “*main.py*”:

```

1  import averaging_filtration as af
2
3  print('Open txt file of XYH')
4  x,y,h = af.open_XYH_file('test2.txt')
5
6  print('Create edges')
7  edges = af.delaunay_edges(x, y)
8
9  print('Finding neighbours points')
10 points = af.edges_of_points(edges)
11
12 print('Calculate distances')
13 distances = af.calculate_distances(x, y, points)
14
15 print('Filtration')
16 h_filtered = af.average_filtration(h, points, distances)
17
18 print('Calculate PVV')
19 pvv, sum_pvv = af.vv(h, h_filtered)
20
21 print('Plotting')
22 af.plotting(x, y, h, h_filtered, pvv, sum_pvv)

```

Файл “*averaging_filtration.py*”:

```

1  import matplotlib.pyplot as plt
2  import numpy as np
3
4  import matplotlib.tri as tri
5  import matplotlib
6
7  def delaunay_edges(x, y):
8      # Create Delaunay triangulation and return all edges
9
10     triang = tri.Triangulation(x, y)
11     edges = triang.edges
12     return edges
13
14  def edges_of_points(edges):
15     # Find all neighbors points for points

```

```

16
17     n_edges = edges.shape[0]
18     n_points = np.max(edges)
19     pointS_edges = []
20     print('Number of points: ', n_points)
21
22     for i in range(n_points + 1):
23         point_edges = []
24
25         for k in range(n_edges):
26             if edges[k,0] == i:
27                 point_edges.append(edges[k,1])
28
29         for k in range(n_edges):
30             if edges[k,1] == i:
31                 point_edges.append(edges[k, 0])
32
33         pointS_edges.append(np.array(point_edges))
34         show_percent = i % (n_points//10) == 0
35         if show_percent:
36             print('Calculate -', str(i * 100 // n_points + 1), '%')
37
38     return np.array(pointS_edges)
39
40 def calculate_distances(x, y, edges_of_points):
41     # Calculate distances for all neighbours points
42
43     n_points = edges_of_points.size
44     distances = []
45     for i in range(n_points):
46         neighbours = edges_of_points[i]
47         point_distances = []
48         for k in neighbours:
49             dx = x[i] - x[k]
50             dy = y[i] - y[k]
51             r = (dx ** 2 + dy ** 2) ** .5
52             point_distances.append(r)
53         distances.append(np.array(point_distances))
54     return np.array(distances)
55
56 def average_filtration(h, edges_of_points, distances):
57     # Average filtration for 3D cloud points
58
59     n_points = h.size
60     h_average = []
61     weights = 1 / distances
62     error_points = 0
63
64     for i in range(n_points):
65         try:
66             i_heights = h[edges_of_points[i]]
67             i_weights = weights[i]
68             kernel = i_heights * i_weights
69             h_filtered = kernel.sum()

```

```

70         h_filtered = h_filtered / i_weights.sum()
71         h_average.append(h_filtered)
72     except BaseException:
73         error_points += 1
74         h_average.append(h[i])
75         print("----- Warning! Can't calculate height of point №", i,
76               '-----')
77     print('Number of no colculated heights of points is :', error_points)
78
79     return h_average
80
81 def vv(h, h_average):
82     vv = (h - h_average) ** 2
83     print('Number of points is ', str(h.size))
84     return vv, vv.sum()/h.size
85
86 def open_XYH_file(file):
87     # Open txt file and convert from string to float
88
89     text_file = open(file, 'r', encoding='utf-8')
90     xyh = text_file.read()
91
92     x_yh = np.array(xyh.split('\n'))
93
94     x_y_h_string = []
95     for i in range(x_yh.size):
96         x_y_h_string.append(x_yh[i].split(' '))
97     x_y_h = []
98
99     for i in range(x_yh.size):
100         x_y_h_1point = []
101         for k in range(3):
102             x_y_h_1point.append(float(x_y_h_string[i][k]))
103         x_y_h.append(x_y_h_1point)
104
105     text_file.close()
106
107     x_y_h = np.array(x_y_h)
108     x = x_y_h[:, 0]
109     y = x_y_h[:, 1]
110     h = x_y_h[:, 2]
111     return x, y, h
112
113 def plotting(x, y, h, h_filtered, pvv, sum_pvv):
114     plt.figure()
115
116     plt.subplot(311)
117     cmap = plt.cm.rainbow
118     rounding = 1000
119     step = (h.max() - h.min()) / 10
120     step = round(step * rounding) / rounding
121     min_round = round(h.min() * rounding) / rounding

```

```

122     max_round = round(h.max() * rounding) / rounding
123     points_size = 10
124
125     norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(np.arange(min_round, max_round,
step), cmap.N)
126     plt.scatter(x, y, c=h, cmap=cmap, norm=norm, s=points_size,
edgecolor='none')
127     plt.colorbar(ticks=np.linspace(h.min(), h.max(), 10))
128     plt.title('Original 3D Cloud')
129
130     plt.subplot(312)
131     plt.scatter(x, y, c=h_filtered, cmap=cmap, norm=norm, s=points_size,
edgecolor='none', )
132     plt.colorbar(ticks=np.linspace(h.min(), h.max(), 10))
133     plt.title('Filtered 3D Cloud')
134
135     plt.subplot(313)
136     cmap = plt.cm.rainbow
137     norm = matplotlib.colors.BoundaryNorm(np.arange(pvv.min(), pvv.max(),
(pvv.max() - pvv.min()) / 10), cmap.N)
138     plt.scatter(x, y, c=pvv, cmap=cmap, norm=norm, s=points_size,
edgecolor='none') # 50 - is a scaling for good viewing
139     plt.colorbar(ticks=np.linspace(pvv.min(), pvv.max(), 10))
140     title = '[PVV]=' + str(sum_pvv)
141     plt.title(title)
142     plt.show()
143
144 if __name__ == '__main__':
145     print('You run this module but the module is for importing.')
146     input('\n\nPush Enter for exit')

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы, выполняющей расчет точности классификации объектов местности

Представлен в блокноте *Jupyter notebook* (язык программирования *Python 3*, интерактивная оболочка *IPython*), написан автором диссертации.

Файл “*Classification_accuracy.ipynb*”:

Classification accuracy

Manual classification is used like the true classification. It is accuracy calculation of automated classification.

In [1]:

```
from PIL import Image
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
```

In [2]:

```
name_of_classified_image = 'OBIA_classification_with_DM.png'
im_classif = Image.open(name_of_classified_image)
im_classif = np.array(im_classif)
im_classif = im_classif[:, :, :3] # PNG has the 4d band
"Transparency", I delete it.

im_right = Image.open('Manual_classification.png')
im_right = np.array(im_right)
im_right = im_right[:, :, :3]

print 'Shape of classified image is: ', im_classif.shape
print 'Shape of right image is: ', im_right.shape
'Shape of classified image is: (411, 411, 3)
'Shape of right image is: (411, 411, 3)
```

In [3]:

```
accurate_matrix = np.equal(np.argmax(im_classif.reshape((-1, 3)), 1), np.argmax(im_right.reshape((-1, 3)), 1))

plt.figure(dpi=300)
plt.subplot(132)
plt.title('Accurate Matrix')
plt.axis('off')
plt.imshow(accurate_matrix.reshape((im_classif.shape[0], im_classif
.shape[1])))
plt.gray()

plt.subplot(133)
plt.title('Classified image')
plt.axis('off')
plt.imshow(im_classif)

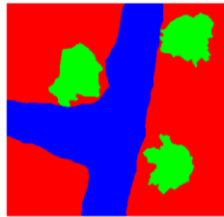
plt.subplot(131)
plt.title('Right image')
plt.axis('off')
plt.imshow(im_right)

accuracy = accurate_matrix.mean()
```

```
print('Accuracy of ' + name_of_classified_image + ' = ' +
      str(round(accuracy,5)))
```

Accuracy of OBIA_classification_with_DM.png = 0.91452

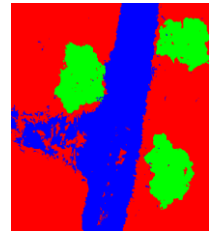
Right image



Accurate Matrix



Classified image



In [4]:

```
from sklearn import metrics

true_label = im_right[:, :, 0] / 255 + im_right[:, :, 1] / 255 * 2 +
im_right[:, :, 2] / 255 * 3
pred_label = im_classif[:, :, 0] / 255 + im_classif[:, :, 1] / 255 *
2 + im_classif[:, :, 2] / 255 * 3

cm = metrics.confusion_matrix(true_label.flatten(),
pred_label.flatten(), labels=[0, 1, 2, 3])
print('Matrix of classification errors:')
print(cm)
print('')

print('Shape of the image:', pred_label.shape)
print('Location of the no-calculated pixels:')
print(np.where(pred_label == 0))
```

Matrix of classification errors:

```
[[ 0  0  0  0]
 [ 0 87504 3448 1511]
 [ 0  850 21673 17]
 [ 0  7116 58 46744]]
```

Shape of the image: (411, 411)

Location of the no-calculated pixels:

```
(array([], dtype=int64), array([], dtype=int64))
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Листинг программы, выполняющей алгоритм *OBIA*, на основе ортофотоплана и КВО

Представлен в блокноте *Jupyter notebook* (язык программирования *Python 3*, интерактивная оболочка *IPython*), написан С. de la Torres [135, 136] для классификации ортофотоснимков мелкого масштаба. Программный код модернизирован автором диссертации, с целью применения алгоритма для классификации объектов местности, изображенных как на ортофотоснимках, так и КВО высокого разрешения.

Файл “*OBIA classification with DM.ipynb*”:

OBIA classification

The input data is aerial photo and digital model. The code was taken from [Machinalis blog](#) and edited for using digital model additionally. In the version of the code 'gdal' is not used and raster data is used instead of vector data. The aerial images from UAV is taken from FTP server of Mavinci GmbH and edited by me. "#DB" is meaning that I changed or add code in the text.

In [1]:

```
%matplotlib notebook

import numpy as np
import os
import scipy

from matplotlib import pyplot as plt
from matplotlib import colors
#from osgeo import gdal - is not used
from skimage import exposure
from skimage.segmentation import quickshift, felzenszwalb
from sklearn import metrics
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from PIL import Image #DB

#RASTER_DATA_FILE =
"data/image/2298119ene2016recorteTT.tif"
#TRAIN_DATA_PATH = "data/train/"
#TEST_DATA_PATH = "data/test/"
```

In [2]:

```
# The module 2 is not used
```

In [3]:

```
# Add raster aerial image and convert
raster_dataset = Image.open('ortho.png') #DB
raster_dataset_DM = Image.open('dm.png') #DB
raster_dataset_DM = np.array(raster_dataset_DM) #DB
```



```
# 4 = [RGB=3] + [DM=1]
n_bands = 4 #DB

bands_data=np.array(raster_dataset)
bands_data_DM=(np.array(raster_dataset_DM)[:,:,:0]).reshape(raster_dataset_DM.shape[0],raster_dataset_DM.shape[1],1)
print bands_data.shape, bands_data_DM.shape
(1538, 1428, 3) (1538, 1428, 1)
```

In [4]:

```
# Create images

img = np.c_[bands_data, bands_data_DM] / 255. #DB

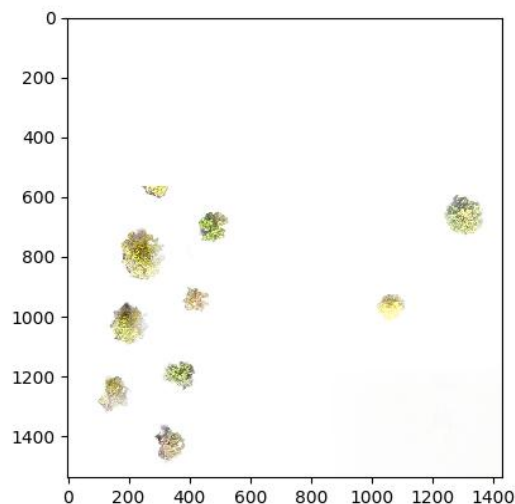
# For changing channels, here it is not used
#rgb_img = np.dstack([img[:, :, 3], img[:, :, 2], img[:, :, 1]])
rgb_img=img #DB

print rgb_img.shape #DB
(1538, 1428, 4)
```

In [5]:

```
# Plotting

plt.figure()
plt.imshow(rgb_img)
<IPython.core.display.Javascript object>
```



Out [5]:

```
<matplotlib.image.AxesImage at 0x7fe0bbc44090>
```

In [6]:

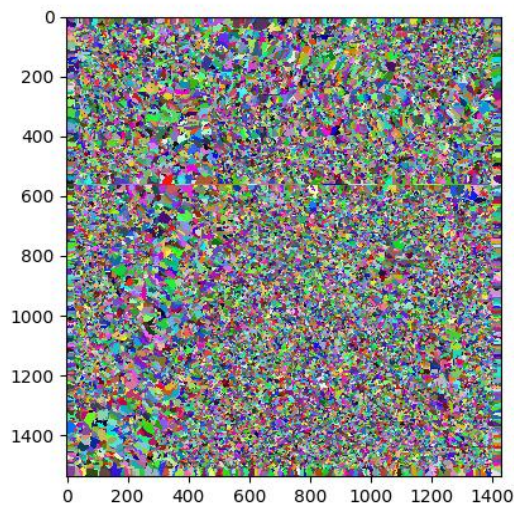
```
# Quickshift segmentation

segments_quick = quickshift(rgb_img, kernel_size=7,
max_dist=3, ratio=0.35, convert2lab=False)
n_segments = len(np.unique(segments_quick))
print(n_segments)
```

In [7]:

```
# Plotting Quickshift segmentation
```

```
cmap = colors.ListedColormap(np.random.rand(n_segments, 3))
plt.figure()
plt.imshow(segments_quick, interpolation='none', cmap=cmap)
<IPython.core.display.Javascript object>
```



Out [7]: <matplotlib.image.AxesImage at 0x7eff8c21add0>

skimage.segmentation.felzenszwalb is not prepared to work with multi-band data. So, based on their own implementation for RGB images, segmentation is applied in each band and then combine the results. See: <http://github.com/scikit-image/scikit-image/blob/v0.12.3/skimage/segmentation/felzenszwalb.py#L69>

In [8]:

```
# Felzenszwalb segmentation

band_segmentation = []
for i in range(n_bands):
    band_segmentation.append(felzenszwalb(rgb_img[:, :, i],
    scale=85, sigma=0.25, min_size=9))
```

Put pixels in same segment only if in the same segment in all bands. We do this by combining the band segmentation to one number.

In [9]:

```
const = [b.max() + 1 for b in band_segmentation]
segmentation = band_segmentation[0]
for i, s in enumerate(band_segmentation[1:]):
    segmentation += s * np.prod(const[:i+1])

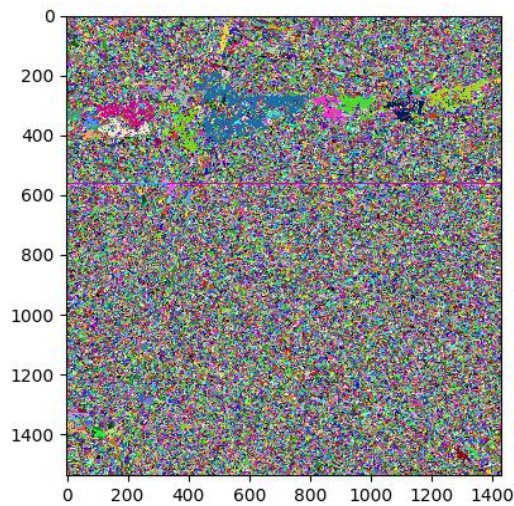
_, labels = np.unique(segmentation, return_inverse=True)
segments_felz = labels.reshape(rgb_img.shape[:2])
```

In [10]:

```
# Plotting Felzenszwalb segmentation

cmap =
colors.ListedColormap(np.random.rand(len(np.unique(segments_felz)),
, 3))
plt.figure()

plt.imshow(segments_felz, interpolation='none', cmap=cmap)
<IPython.core.display.Javascript object>
```



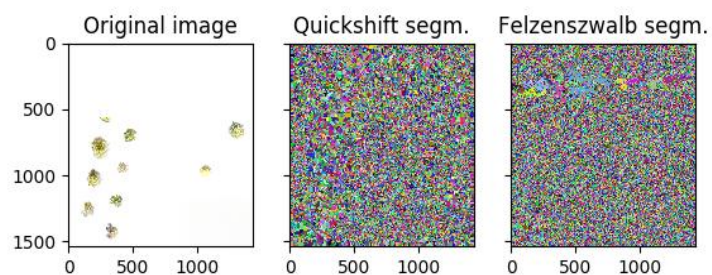
Out [10]: <matplotlib.image.AxesImage at 0x7eff8c21add0>

In [11]:

```
# Plotting two segmentations and original image

n_segments = max(len(np.unique(s)) for s in [segments_quick,
segments_felz])
cmap = colors.ListedColormap(np.random.rand(n_segments, 3))

f, (ax1, ax2, ax3) = plt.subplots(1, 3, sharey=True)
ax1.imshow(rgb_img, interpolation='none')
ax1.set_title('Original image')
ax2.imshow(segments_quick, interpolation='none', cmap=cmap)
ax2.set_title('Quickshift segm.')
ax3.imshow(segments_felz, interpolation='none', cmap=cmap)
ax3.set_title('Felzenszwalb segm.')
plt.show()
<IPython.core.display.Javascript object>
```



In [12]:

```
# Machinalis chose the felz segmentation
# I chose too because it is more segments and it is smaller
# that is why I can get better accuracy of classification

segments = segments_felz
segment_ids = np.unique(segments)
print("Felzenszwalb segmentation. %i segments." %
len(segment_ids))
Felzenszwalb segmentation. 230586 segments.
```

In [13]:

```
rows, cols, n_bands = rgb_img.shape #DB
```

```

print rows, cols, n_bands #DB
print 'Number of pixels is', rows*cols #DB
print 'Felzenszwakb / Pix = ',
round(float(len(segment_ids))/rows/cols, 3) #DB
print 'Quickshift / Pix = ',
round(float(len(np.unique(segments_quick)))/rows/cols, 3) #DB

classes_labels = ['A', 'B', 'C'] #DB
1538 1428 4
Number of pixels is 2196264
Felzenszwakb / Pix = 0.105
Quickshift / Pix = 0.019

```

In [14]:

```

# I use raster data for training. Add it and plot

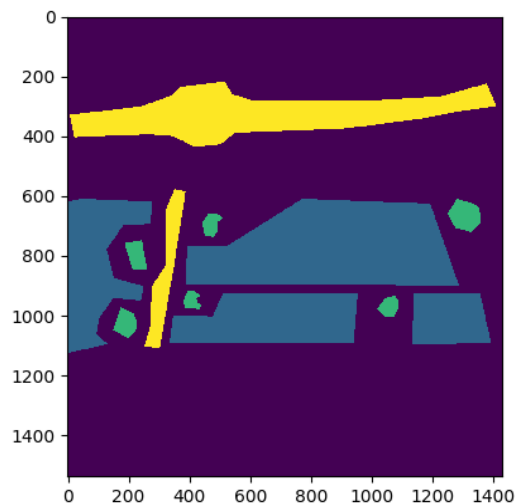
ground_truth = Image.open('labels_with_shadows.png') #DB

#""""
ground_truth = np.array(ground_truth)/255. #DB
ground_truth =
np.array(ground_truth[:, :, 0]+ground_truth[:, :, 1]*2+ground_truth[:,
:, 2]*3) #DB
#""""

ground_truth = np.array(ground_truth) #DB
print np.array(ground_truth).shape #DB
plt.figure()
plt.imshow(ground_truth)
plt.show()

(1538, 1428)
<IPython.core.display.Javascript object>

```



In [15]:

```

#classes = np.unique(ground_truth)[1:] # 0 doesn't count
classes=[1,2,3] #DB
len(classes)

```

Out [15]:

3

In [16]:

```

segments_per_class = {}
print segments.shape
print ground_truth.shape
for class in classes:

```

```

segments_of_klass = segments[ground_truth==klass]
segments_per_klass[klass] = set(segments_of_klass)
print len(segments_of_klass)
print("Training segments for class %i: %i" % (klass,
len(segments_per_klass[klass])))
#print segments_of_klass[0] #DB
(1538, 1428)
(1538, 1428)
412303
Training segments for class 1: 45233
28235
Training segments for class 2: 4697
167877
Training segments for class 3: 10233

```

Disambiguation

Check if there are segments which contain training pixels of different classes.

In [17]:

```

accum = set()
intersection = set()
i= 0
for class_segments in segments_per_klass.values():
    intersection |= accum.intersection(class_segments)
    accum |= class_segments
assert len(intersection) == 0

```

¡No need to disambiguate!

Next, we will *paint in black* all segments that are not for training. The training segments will be painted of a color depending on the class.

To do that we'll set as threshold the max segment id (max segments image pixel value). Then, to the training segments we'll assign values higher than the threshold. Finally, we assign 0 (zero) to pixels with values equal or below the threshold.

In [18]:

```

train_img = np.copy(segments)
threshold = train_img.max() + 1
for klass in classes:
    klass_label = threshold + klass
    for segment_id in segments_per_klass[klass]:
        train_img[train_img == segment_id] = klass_label
train_img[train_img <= threshold] = 0
train_img[train_img > threshold] -= threshold

```

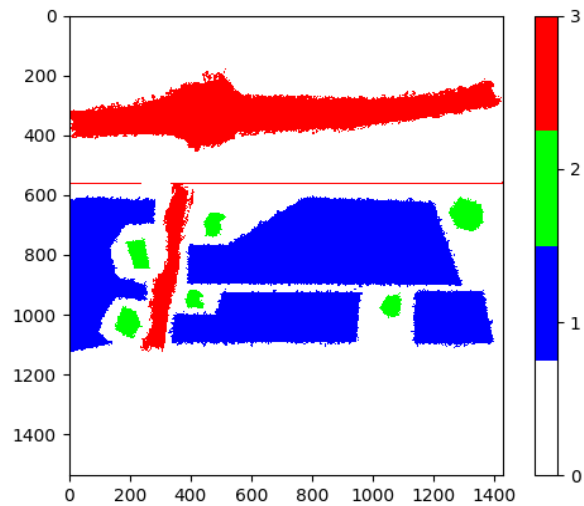
Lets see the training segments

In [19]:

```

plt.figure()
cm = np.array([[1,1,1], [0,0,1], [0,1,0], [1,0,0]])
cmap = colors.ListedColormap(cm)
plt.imshow(train_img, cmap=cmap)
plt.colorbar(ticks=[0,1,2,3])
<IPython.core.display.Javascript object>

```



Out [19]: <matplotlib.colorbar.Colorbar at 0x7eff817fecd0>

Training data

So now, we transform each training segment into a *segment model* and thus creating the training dataset.

In [20]:

```
def segment_features(segment_pixels):
    """For each band, compute: min, max, mean, variance,
    skewness, kurtosis"""
    features = []
    n_pixels, n_bands = segment_pixels.shape
    for b in range(n_bands):
        stats = scipy.stats.describe(segment_pixels[:,b])
        band_stats = list(stats.minmax) + list(stats)[2:]
        if n_pixels == 1:
            # scipy.stats.describe raises a Warning and sets
            # variance to nan
            band_stats[3] = 0.0 # Replace nan with something
            (zero)
        features += band_stats
    return features
```

Create all the objects:

compute the features' vector for each segment (and append the segment ID as reference)

In [21]:

```
# Creating segments
# This is the most heavy part of the process. It could take about
# half an hour to finish in a not-so-fast CPU

import warnings

with warnings.catch_warnings():
    warnings.simplefilter("ignore")

    objects = []
    objects_ids = []
    for segment_label in segment_ids:
        segment_pixels = img[segments==segment_label]
        segment_model = segment_features(segment_pixels)
        objects.append(segment_model)
        # Keep a reference to the segment label
```

```
objects_ids.append(segment_label)

print("Created %i objects" % len(objects))
```

Created 230586 objects

Subset the training data

In [22]:

```
training_objects = []
for klass in classes:
    class_train_objects = [v for i, v in enumerate(objects) if
objects_ids[i] in segments_per_klass[klass]]
    training_labels += [klass] * len(class_train_objects)
    print("Training samples for class %i: %i" % (klass,
len(class_train_objects)))
    training_objects += class_train_objects
```

Training samples for class 1: 45233

Training samples for class 2: 4697

Training samples for class 3: 10233

Train a classifier

In [23]:

```
classifier = RandomForestClassifier(n_jobs=-1)
#from sklearn.ensemble import BaggingClassifier
#classifier = BaggingClassifier(n_jobs=-1)
```

In [24]:

```
classifier.fit(training_objects, training_labels)
```

Out [24]:

```
BaggingClassifier(base_estimator=None, bootstrap=True,
bootstrap_features=False, max_features=1.0, max_samples=1.0,
n_estimators=10, n_jobs=-1, oob_score=False,
random_state=None, verbose=0, warm_start=False)
```

Classify all segments

Now we have to transform all segments into a *segment models* in order to classify them

In [25]:

```
predicted = classifier.predict(objects)
```

Propagate the classification

Now that each segment has been classified, we need to propagate that classification to the pixel level. That is, given the class **k** for the segment with label **S**, generate a classification from the segmented image where all pixels in segment **S** are assigned the class **k**.

In [26]:

```
clf = np.copy(segments)
```

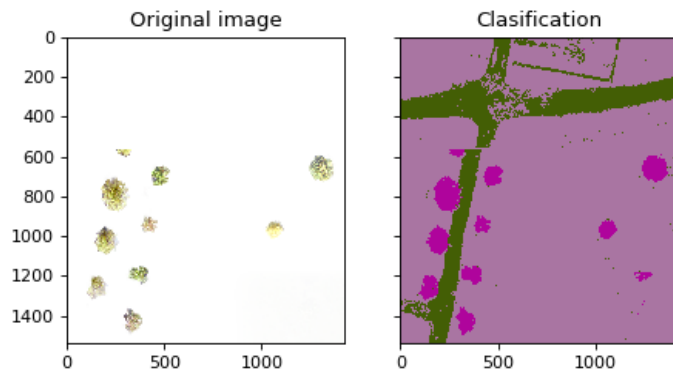
In [27]:

```
for segment_id, klass in zip(objects_ids, predicted):
    clf[clf==segment_id] = klass
```

In [28]:

```
f, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, sharey=True)
ax1.imshow(rgb_img, interpolation='none')
ax1.set_title('Original image')
ax2.imshow(clf, interpolation='none',
cmap=colors.ListedColormap(np.random.rand(len(classes_labels),
3)))
ax2.set_title('Clasification')
```

<IPython.core.display.Javascript object>



Out [28]: Text(0.5,1,'Clasification')

In [29]:

```
# Edit and save the result

print clf.shape[0], clf.max(), clf.min()
obia=np.zeros((1538,1428,3))
for i in range(clf.shape[0]):
    for j in range(clf.shape[1]):
        if clf[i,j] == 3:
            obia[i,j,2] = 255
        if clf[i,j] == 2:
            obia[i,j,1] = 255
        if clf[i,j] == 1:
            obia[i,j,0] = 255
pil_obia = Image.fromarray(np.uint8(obia))
pil_obia.save('OBIA2DM.png')
box = (0,1538-411, 489, 1538)
# old size - 974, 1428
# new size - 411, 489
pil_obia.crop(box).save('OBIA2DM_test.png')
```

1538 3 1