

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

А. В. Комиссаров, А. Ю. Чермошенцев

НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

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

Новосибирск
СГУГиТ
2022

УДК 528.7

К63

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент СГУГиТ *М. А. Алтынцев*

кандидат технических наук, младший научный сотрудник
СЦ ФГБУ «НИЦ «Планета» *Е. Ю. Сахарова*

Комиссаров, А. В.

К63 Наземная фотограмметрия : учебно-методическое пособие / А. В. Комиссаров, А. Ю. Чермошенцев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 64 с. – Текст : непосредственный.
ISBN 978-5-907513-25-9

Учебно-методическое пособие подготовлено доцентом, доктором технических наук А. В. Комиссаровым и доцентом, кандидатом технических наук А. Ю. Чермошенцевым на кафедре фотограмметрии и дистанционного зондирования СГУГиТ.

В пособии рассмотрены особенности получения и обработки наземных снимков, области применения наземной фотограмметрии, описаны типы камер, применяемые при наземной съемке, и их особенности. Также изложены подробные методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Наземная фотограмметрия».

Пособие по дисциплине «Наземная фотограмметрия» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование (уровень бакалавриата).

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

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 528.7

ISBN 978-5-907513-25-9

© СГУГиТ, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Теоретические и методические основы наземной фотограмметрии.....	5
1.1. Наземная фотограмметрия и ее связь с другими дисциплинами. Общие сведения о наземной фотограмметрии	5
1.2. Наземная стереофотограмметрическая съемка, ее особенности, отличия от аэрофотосъемки. Области применения наземной фотограмметрии	6
1.3. Камеры, используемые в наземной фотограмметрии	11
1.4. Основные особенности обработки материалов наземной съемки для мониторинга деформаций, съемки фасадов, карьеров	16
1.5. Области использования материалов наземной съемки при решении научно-технических и прикладных задач, требования к точности.....	21
1.6. Общие основы теории фотограмметрической обработки снимков для гидрологии.....	23
1.7. Методы калибровки фотоаппаратов по опорным данным. Способы учета дисторсии фотоаппаратов.....	29
2. Лабораторные работы	38
2.1. Лабораторная работа № 1. Наземная фотограмметрическая съемка для целей архитектуры	38
2.2. Лабораторная работа № 2. Создание трехмерной модели объекта	56
2.3. Лабораторная работа № 3. Определение объемов фотограмметрическим методом.....	58
2.4. Лабораторная работа № 4. Применение наземной фотограмметрической съемки для анализа деформаций сооружений	59
Библиографический список.....	63

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие методов сбора и обработки материалов дистанционного зондирования позволяет решать большой круг прикладных задач в различных отраслях экономики страны, а также при разнообразных научных исследованиях.

В последние годы значительное развитие получили микропроцессорная техника и методы цифровой обработки сигналов. В связи с этим наблюдается заметный прогресс съемочных камер и методов обработки снимков. В настоящее время наземная фотограмметрия получает второй виток в развитии и находит новые области применения. В основе применения наземной фотограмметрии лежат традиционные продукты: топографические или тематические планы и карты и трехмерные цифровые модели местности или объекта, которые применяются для решения различных задач в баллистике, взрывном деле, авиастроении, криминалистике, машиностроении, гидрологии, при мониторинге деформаций зданий и сооружений, паспортизации объектов историко-культурного наследия и т. д.

Данное учебно-методическое пособие будет востребовано при изучении дисциплин «Фотограмметрия и дистанционное зондирование», «Наземная фотограмметрия» и т. д., преподаваемых для бакалавров по направлению «Геодезия и дистанционное зондирование».

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАЗЕМНОЙ ФОТОГРАММЕТРИИ

1.1. Наземная фотограмметрия и ее связь с другими дисциплинами. Общие сведения о наземной фотограмметрии

Наземная фотограмметрия – раздел фотограмметрии, который изучает методы получения и фотограмметрической обработки изображений, получаемых съёмочными камерами с точек земного пространства.

В наземной фотограмметрии, как и в классической фотограмметрии, решение задач по определению количественных характеристик объекта строится на основе уравнений коллинеарности и компланарности, т. е. тесно связано с разделом математики – векторной алгеброй. Поскольку решение практически всех количественных задач выполняется по избыточным измерениям с использованием различных методов разложения нелинейных функций в ряды, то наземная фотограмметрия использует знания, полученные при изучении теории вероятности и математической статистики, теории рядов и дифференциальных исчислениях. В основе построения изображения лежит теория распространения электромагнитного излучения, следовательно, наземная фотограмметрия связана с такими разделами физики, как оптика, теория сред, квантовая физика и т. д.

Помимо перечисленных дисциплин, наземная фотограмметрия тесно связана со следующими:

- картография;
- геодезия;
- высшая геодезия;
- цифровая обработка изображений;
- фотограмметрия;
- инженерная геодезия;
- цифровая фотограмметрия и др.

1.2. Наземная стереофотограмметрическая съемка, ее особенности, отличия от аэрофотосъемки. Области применения наземной фотограмметрии

При наземной съемке используют как фотограмметрическую, так и стереосъемку, выбор съемки зависит от поставленной задачи. При съемке земной поверхности с целью ее картографирования наибольшее применение находит стереофотограмметрическая съемка. При решении некоторых инженерных задач вполне достаточно использовать отдельные снимки, что позволяет говорить о специальной фотограмметрической съемке. Понятие «фотограмметрическая или стереофотограмметрическая съемка» включает весь комплекс работ, связанный как с получением самих снимков, так и с производством измерений по ним.

Особенности наземной стереосъемки (НСС) и отличия ее от аэрофотосъемки заключаются в следующем:

- 1) снимки НСС получают с точек земной поверхности, т. е. с неподвижного базиса, а аэрофотоснимки – с точек воздушного пространства, т. е. с подвижного базиса;
- 2) в идеальном случае оптическая ось при аэрофотосъемке, т. е. главный луч камеры, будет отвесна, а при НСС – горизонтальна.

При наземной стереофотограмметрической съемке выделяют следующие основные случаи:

- нормальный;
- равноотклоненный;
- равнонаклоненный;
- конвергентный.

Рассмотрим каждый случай более подробно.

Нормальный случай съемки является наиболее часто применяемым на практике. В данном случае оси координат OX , OY и OZ системы координат снимка примерно параллельны базисной системе координат $OXYZ$, как показано на рис. 1.

При таком расположении осей угловые элементы внешнего ориентирования снимка имеют следующие значения: $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \kappa_1 \approx \kappa_2 \approx 0^\circ$, $\omega_1 \approx \omega_2 \approx 90^\circ$.

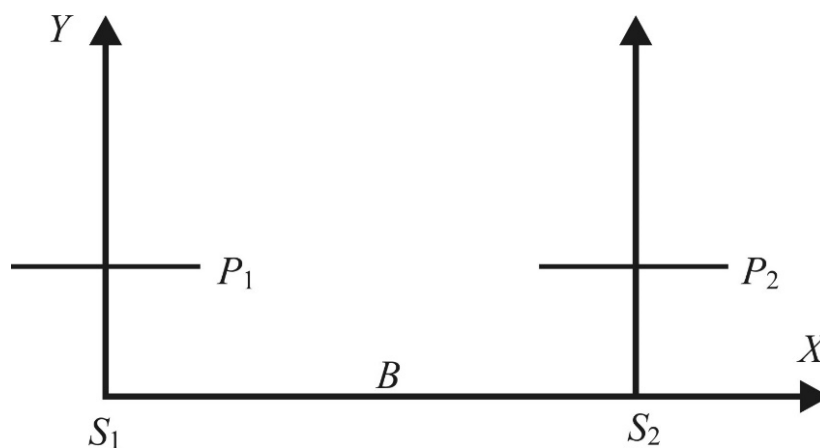


Рис. 1. Нормальный случай
наземной стереофотограмметрической съемки

Практический опыт выполнения работ показал, что при нормальном случае съемки угловые элементы внешнего ориентирования следует устанавливать с точностью не грубее 7° . Данный случай съемки следует применять, когда базис фотографирования возможно расположить примерно параллельно объекту съемки и объект полностью отображается на одном снимке по высоте.

Равноотклоненный случай съемки отличается от нормального тем, что оптические оси камер при получении снимков стереопары примерно параллельны друг другу и отклонены от оси OY базисной системы координат на угол α , как показано на рис. 2.

При таком расположении осей угловые элементы внешнего ориентирования снимка имеют следующие значения: $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha$, $\omega_1 \approx \omega_2 \approx 90^\circ$, $\kappa_1 \approx \kappa_2 \approx 0^\circ$.

Равноотклоненный случай съемки является дополнением к нормальному. При этом с одного базиса с начала получают стереопары при нормальном случае, а затем одну или две стереопары – при равноотклоненном случае. Также данный случай съемки целесообразно использовать, когда базис фотографирования не параллелен объекту.

Равнонаклоненный случай съемки отличается от нормального тем, что оптические оси камер при получении снимков стереопары примерно параллельны друг другу и отклонены от оси OY базисной системы координат на угол ω , как показано на рис. 3.

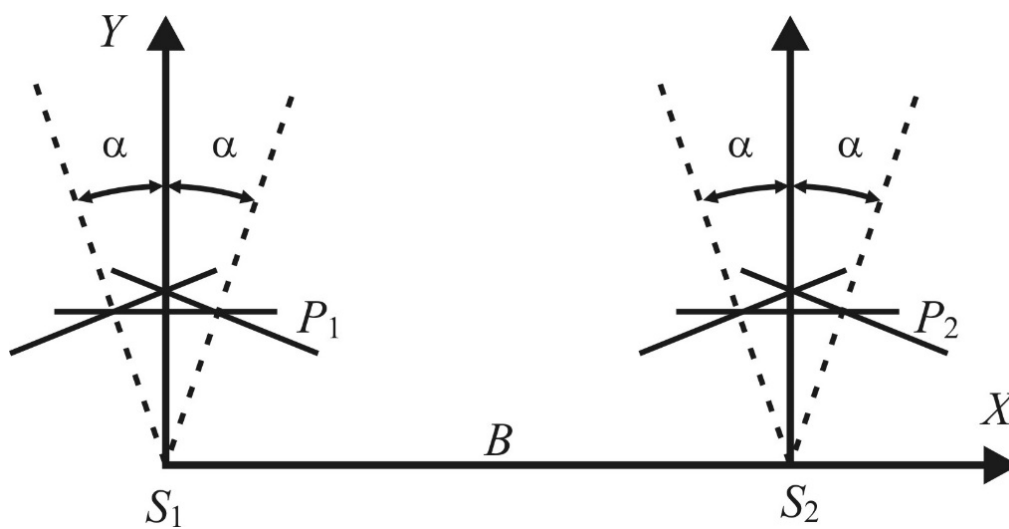


Рис. 2. Равноотклоненный случай съемки

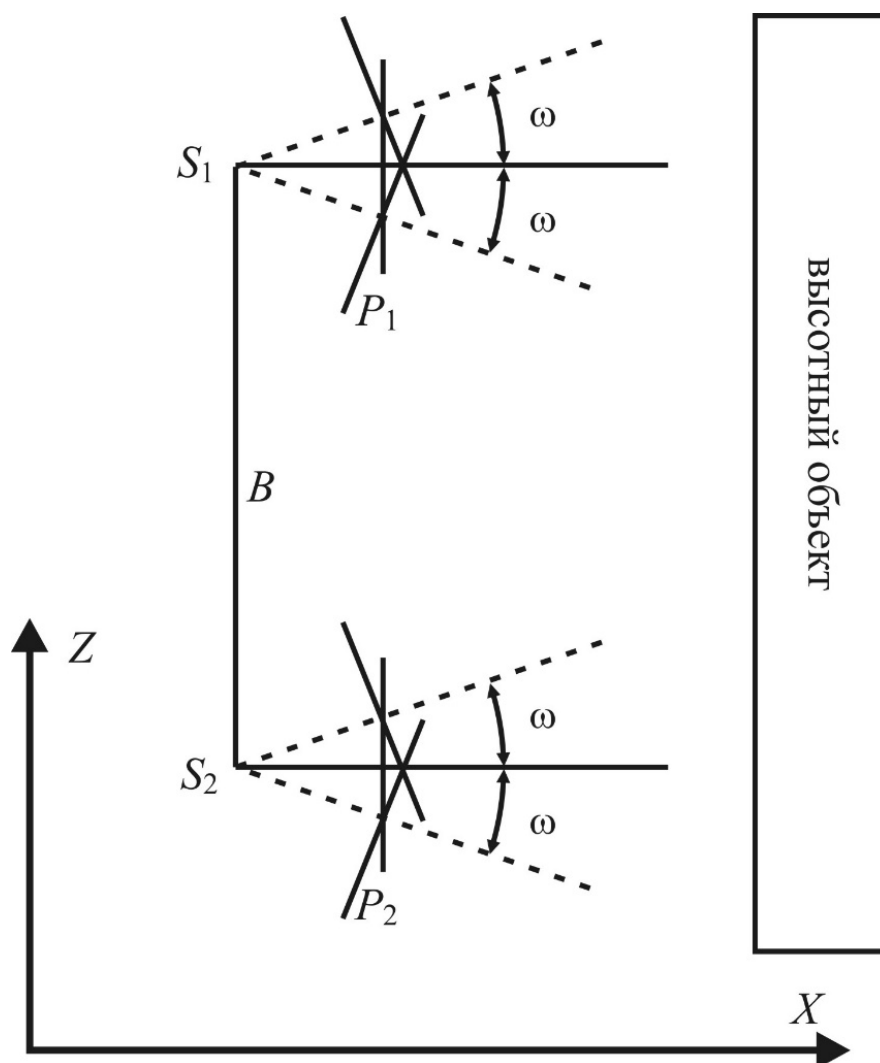


Рис. 3. Равнонаклоненный случай съемки

При таком расположении осей угловые элементы внешнего ориентирования снимка имеют следующие значения: $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \kappa_1 \approx \kappa_2 \approx \alpha$, $\omega_1 \approx \omega_2 \approx \omega$. При таком расположении оптических осей можно добиться оптимального расположения объекта на снимке по высоте. Данный случай съемки используется для высотных объектов.

Конвергентный случай съемки. При данном случае съемки оптические оси камер при получении снимков стереопары отклоняются на заданный угол γ , называемый углом конвергенции, как показано на рис. 4.

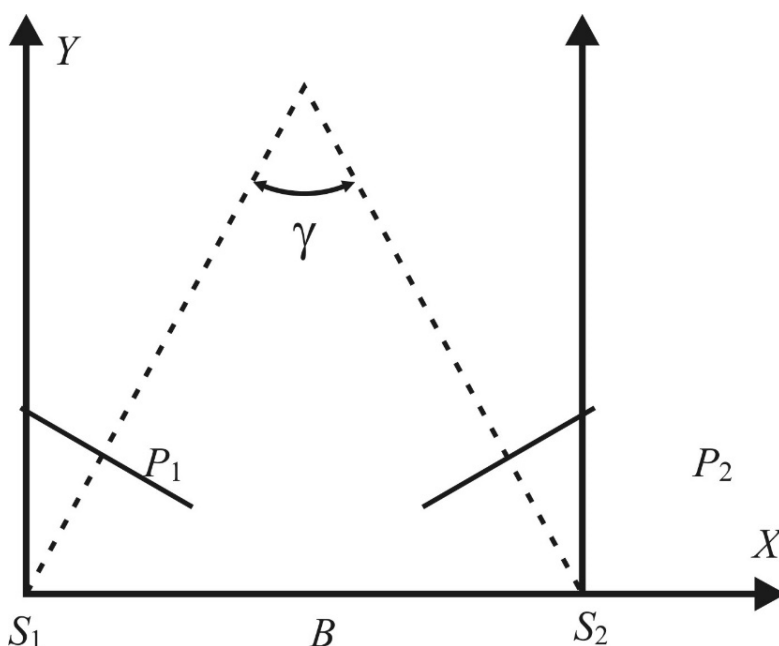


Рис. 4. Конвергентный случай съемки

При больших значениях угла конвергенции будет невозможно наблюдать стереоскопический эффект, вследствие чего данный случай съемки используют для объектов с четкими контурами или для замаркированных точек, чтобы можно было производить измерения в монокулярном режиме. Стереоскопическая обработка снимков возможна при предварительном трансформировании снимков стереопары конвергентного случая в стереопару снимков нормального случая съемки.

Данный случай съемки применяется для увеличения базиса фотографирования, а следовательно и точности получаемых по снимкам измерений.

Практический опыт специалистов при съемке высотных зданий [8] показывает, что съемку можно производить при нормальном, равноотклоненном и равнонаклонном случаях съемки с вертикального базиса.

Многомаршрутная и блочная съемка применяются при съемке протяженных или высотных объектов. При такой съемке маршруты формируются из стереопар, полученных при нормальном или равноотклоненном случаях съемки. Продольное перекрытие между снимками должно составлять примерно 60 %, чтобы обеспечивать зону тройного перекрытия. При блочной съемке перекрытие между маршрутами должно составлять 20–30 %.

Методы наземной фотограмметрии используются для решения задач в следующих областях:

- топография (создание топографических планов масштаба 1 : 500 – 1 : 5 000);
 - архитектура (создание трехмерных моделей городов, создание объемных чертежей зданий, создание детальных трехмерных моделей фасадов зданий и памятников архитектуры и других объектов культурного наследия);
 - строительство (контроль качества строительства, исполнительная съемка различных этапов строительства);
 - горное дело (создание трехмерных моделей карьеров, определение объема добытых полезных ископаемых за определенный период, создание маркшейдерских планов карьеров, контроль вскрышных работ);
 - машиностроение (определение геометрических параметров отдельных элементов конструкций, выверка деталей перед их соединением, контроль качества изготовления штучных деталей или сложной геометрической формы);
 - криминалистика (документирование мест происшествий);
 - медицина (создание трехмерных моделей человека или отдельных его частей с целью изготовления протезов или ортопедической коррекции);
 - судостроение;
 - баллистика;
- и других областях науки и производства.

1.3. Камеры, используемые в наземной фотограмметрии

Под метрическими цифровыми фотоаппаратами понимают цифровые камеры, предназначенные для получения изображений с целью создания измерительных документов и информации. Это могут быть топографические карты и планы, цифровая картографическая информация, цифровые модели, кадастровые планы и т. п. Примерами таких камер могут служить цифровые аэрофотосъемочные камеры:

- электронно-сканирующие: ADS40, ADS80 («Leica Geosystems»);
- мультикадровые: UltraCAM («Microsoft Vexcel Imaging GmbH»), DMC («Intergraph»);
- кадровые (+оптико-электронное сканирование): A3 («VisionMap»).

Неметрические цифровые фотоаппараты позволяют получать изображения, которые не являются напрямую источником измерительной информации. Такие камеры используются для получения иллюстраций, в художественной фотографии, для публикаций в средствах массовой информации, в том числе и в Интернете, для бытовых целей и во многих других областях.

Неметрические цифровые фотоаппараты очень разнообразны по своим характеристикам и возможностям. Все модели можно условно разделить на несколько групп: по техническим характеристикам, цене, потребительским качествам.

В соответствии с техническими характеристиками неметрические малоформатные цифровые камеры можно разделить на три основных типа: компактные, зеркальные и беззеркальные.

Компактные камеры отличаются небольшими габаритами и весом, отсутствием оптического видоискателя и возможности менять объективы. Сенсор имеет малые габариты (кроп-фактор в диапазоне 3-8), что позволяет сохранить размеры фотоаппарата небольшими.

Преимущества компактных камер:

- малые габариты и вес;
- невысокая цена по сравнению с другими камерами;
- большая глубина резкости даже при полностью открытой диафрагме, что обусловлено маленьким сенсором, и, как следствие, весьма короткофокусным объективом.

Недостатки компактных камер:

- низкое качество цветопередачи снимков, несмотря на высокую разрешающую способность из-за микроскопических габаритов элементов матрицы камеры меньше физического размера отдельных фотодиодов, а значит, тем меньшее число фотонов каждый из них в состоянии воспринять. Небольшая разница между порогом его насыщения и порогом чувствительности фотодиода означает низкий динамический диапазон сенсора. Слабый электрический сигнал приходится в несколько раз усиливать, увеличивая вместе с полезным сигналом и уровень цифрового шума. Вследствие этого невозможно снимать с высокими значениями ISO, даже если они номинально и поддерживаются камерой;

- низкое качество оптики усиливает влияние малых размеров матрицы на цветопередачу. Это касается в первую очередь камер с многократным увеличением. Объектив не может быть одновременно универсальным, компактным, дешевым и качественным;

- ограниченное количество настроек;

- слабая пропускная способность световых лучей экраном видоискателя;

- высокое энергопотребление. Постоянно включенный при компоновке кадра экран существенно увеличивает энергопотребление. Вследствие этого общее количество снимков на одном аккумуляторе до его зарядки, как правило, не превышает пары сотен снимков.

В последнее время появляется все больше дорогих компактных камер с относительно большими сенсорами и качественной, хотя и несменной, оптикой. Эти фотоаппараты лишены традиционных проблем с качеством снимка при достаточно скромных размерах самой съемочной камеры.

Зеркальные камеры. Цифровой однообъективный зеркальный фотоаппарат (он же DSLR – Digital Single-Lens Reflex) остается лучшим решением для съемки подвижных объектов. Цифровые зеркальные камеры, являются наследницами пленочных зеркальных камер, которые включают не только фотоаппарат, но и многочисленные объективы.

Основной отличительной чертой особенностью зеркальной съемочных камер, помимо большого сенсора и сменной оптики, является наличие у нее зеркального оптического видоискателя. В зеркале видно отражение мато-

вого стекла, расположенного над ним, а за зеркалом находится сенсор камеры, закрытый шторным затвором. Зеркало отражает свет на матовое стекло, которое просматривается через пентапризму и окуляр, komponуя кадр. Непосредственно перед открытием затвора поворотное зеркало поднимается, делая видоискатель черным, но при этом позволяя свету от объектива беспрепятственно падать на матрицу, а после экспонирования возвращается в свое исходное положение.

Преимущества зеркальных камер:

- качество изображения, обеспечиваемое за счет большой матрицы и больших фотодиодов. Это позволяет получить одинаковое разрешение и одинаковое значение ISO по всему полю снимка и при этом меньшее количество шумовых составляющих. Большой динамический диапазон радиометрического разрешения позволяет более качественно выполнять постобработку снимков. Существуют немногочисленные полнокадровые модели зеркальных камер, размер сенсора которых соответствует размеру кадра традиционной 35-миллиметровой пленки;

- скорость работы оптического видоискателя, который выполняет свои функции в режиме реального времени;

- быстрый фазовый автофокус, который позволяет навестись на резкость практически мгновенно. Фокусируемые моторы в объективах зеркальных камер также работают значительно быстрее, чем в компактных;

- возможность вручную управлять выдержкой, диафрагмой, а также осуществлять наведение на резкость;

- экономное энергопотребление. Включенная камера в состоянии покоя практически не потребляет электроэнергию, что позволяет держать ее включенной постоянно;

- большой выбор объективов для любых целей: широкоугольные и телеобъективы, дискретные объективы и трансфокаторы с любой светосилой. Кроме того, многие объективы, выпущенные 20 и более лет назад, частично или полностью совместимы с современными цифровыми зеркальными фотоаппаратами соответствующей системы.

Недостатки зеркальных камер:

- значительные габариты. Из всех типов малоформатных камер зеркальные аппараты отличаются наибольшими размерами и весом. Особенно это касается дорогих профессиональных моделей;

– дорогие и громоздкие объективы. Зеркало не позволяет поместить объектив достаточно близко к сенсору камеры, т. е. расстояние от оправы объектива до плоскости матрицы может оказаться больше, чем фокусное расстояние короткофокусного (широкоугольного) объектива. Это решается созданием сложных *ретрофокусных* объективов, т. е. таких, у которых фокусное расстояние меньше, чем их фактическая длина главной (узловой) точки объектива до фокальной плоскости. Иными словами, воображаемый оптический центр объектива лежит как бы внутри корпуса камеры за самим объективом;

– пыль, попадающая внутрь фотоаппарата при смене объективов, может оседать на матрице и приводить к появлению едва заметных пятен на снимках.

Беззеркальные камеры. Стремление совместить высокое качество изображения, свойственное зеркальным камерам, с малыми габаритами компактных камер привело к появлению смешанного класса фотоаппаратов, которые принято называть беззеркальными. Иногда используется английская аббревиатура EVIL (Electronic Viewfinder with Interchangeable Lens) или MILC (Mirrorless Interchangeable Lens Camera). Иными словами, беззеркальная камера – это камера с достаточно большим сенсором, сменной оптикой и преимущественно электронным видоискателем, не требующим наличия зеркала.

Преимущества беззеркальных камер:

– высокое качество изображения, сопоставимое с зеркальными камерами;

– габариты камеры компактны по сравнению с зеркальной, вследствие отсутствия зеркал и пентапризмы. Объективы также невелики – особенно это характерно для короткофокусных, которые могут быть действительно короткими, не нуждаясь в ретрофокусной конструкции;

– сменная оптика. Выбор объективов не так широк, как в зеркальных системах, но многие объективы, предназначенные изначально для зеркальных камер, можно установить на камеры беззеркальные через специальный переходник;

– бесшумность. Из-за отсутствия хлопающего зеркала и механического затвора камера работает значительно тише;

– беззеркальная камера потенциально может обеспечить лучшую резкость по сравнению с зеркальной, так как отсутствует подъем зеркала, как в зеркальной камере, сопровождающийся легкой вибрацией, которая в отдельных случаях может незначительно ухудшить резкость получаемого изображения.

Недостатки беззеркальных камер:

– видоискатель, за редким исключением, является электронным, что приводит к увеличению энергопотребления, а также небольшой задержке при его работе;

– по эргономике большинство беззеркальных фотоаппаратов ближе к компактным камерам, чем к зеркальным;

– расход электроэнергии из-за больших размеров сенсора и электронного видоискателя значительно больше, чем у компактных камер;

– беззеркальные камеры еще более уязвимы в отношении попадания пыли на сенсор по сравнению с зеркальными, поскольку в момент смены объектива сенсор в них не прикрыт зеркалом.

Все перечисленные виды камер могут быть использованы для наземной съемки. При этом при решении конкретной прикладной задачи следует учитывать их преимущества и недостатки.

Для того, чтобы использовать неметрический цифровой фотоаппарат для решения измерительных задач, необходимо определить его элементы внутреннего ориентирования и коэффициенты дисторсии. Эта задача решается в процессе калибровки фотоаппаратов (см. подраздел 1.5).

Основное назначение неметрических цифровых камер в фотограмметрии – построение трехмерных моделей объектов посредством наземной фотосъемки. Этот метод фотосъемки по сравнению с другими методами, такими как наземное лазерное сканирование, фасадная съемка с помощью электронных тахеометров, является наиболее доступным, поскольку не требует применения дорогостоящего оборудования, и при этом позволяет построить модель объекта с заданной точностью. Для решения всех перечисленных задач используется традиционная технология выполнения съемки и обработки полученных материалов.

1.4. Основные особенности обработки материалов наземной съемки для мониторинга деформаций, съемки фасадов, карьеров

Фотограмметрические методы позволяют более полно определять деформации сооружений, чем геодезические, ввиду того, что производятся не отдельные измерения, которые впоследствии обрабатываются, а выполняется съемка всего объекта, и при камеральных работах можно измерить любое количество точек. При этом полевые и камеральные работы производятся достаточно быстро и имеется возможность надежного контроля результатов измерений.

Фотограмметрические методы, по аналогии с геодезическими, сводятся к определению пространственно-временного положения или геометрических параметров сооружения до и после деформаций. По разности геометрических характеристик или пространственных координат и высот объекта вычисляют величины деформаций и/или смещений отдельных точек или элементов сооружения [9].

При определении деформации сооружения применяются как фотограмметрические, так и стереофотограмметрические способы.

Фотограмметрическим способом пространственные координаты точек объекта вычисляют в плоскости X, Z базисной системы координат по формулам [9]

$$\left. \begin{aligned} X &= Y \frac{x}{f}; & X' &= Y \frac{x'}{f} \\ Z &= Y \frac{z}{f}; & Z' &= Y \frac{z'}{f} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где x, z, x', z' – плоские координаты точек на снимке объекта до и после деформации;

X, Z, X', Z' – пространственные координаты точек объекта до и после деформации;

Y – отстояние точек объекта от камеры.

Вычисление точек объекта при фотограмметрическом способе выполняется по формулам [9]

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X' - X = Y \frac{\Delta x}{f}; \\ \Delta Z &= Z' - Z = Y \frac{\Delta z}{f} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta x, \Delta y$ – разность плоских координат точек снимков объекта до деформации и после.

Плоские координаты точек на снимке x, z, x', z' измеряют на цифровой фотограмметрической станции, у которой реализован функционал обработки наземных снимков. При этом обработка практически полностью идентична, как и при обработке аэроснимков.

При фотограмметрическом методе величина Y является измеряемой, погрешность которой вычисляется по формуле [9]

$$\delta Y = \frac{\delta_{\Delta X} Y}{\Delta X}, \quad (3)$$

где $\delta_{\Delta X}$ – погрешность определения смещения ΔX , обусловленная влиянием ошибок измерения отстояния.

В табл. 1 приведены погрешности определения δY для различных значений Y и ΔX при величине $\delta_{\Delta X} = 100$ мкм.

Таблица 1

Точность измерения отстояний [9]

ΔX , мм	δY , мм			
	$Y = 5$ м	$Y = 10$ м	$Y = 20$ м	$Y = 50$ м
10	50	100	200	500
20	25	50	100	250
30	17	30	70	170
50	10	20	40	100

Приведенную в табл. 1 точность определения отстояния достаточно просто обеспечить.

Аналогичным образом можно установить требования к точности определения f по формуле

$$\delta f = \frac{\delta_{\Delta X} f}{\Delta X}, \quad (4)$$

где δf – погрешность определения фокусного расстояния.

Подставляя в формулу (4) значения из табл. 1, получим, что погрешность определения фокусного расстояния составляет 0,4 мм. Подобная точность с большим запасом достигается при калибровке камер. Таким образом величина ошибки δf практически не влияет на точность определения деформации объекта при фотограмметрическом способе [9].

Влияние отклонения оптической оси $\Delta\varphi$ от перпендикуляра к плоскости сооружения $\Delta\varphi$ на искажение абсцисс вычисляется по формуле [9]

$$\delta x = \frac{(x' + x)(x' - x)}{f} \Delta\varphi \approx \frac{2x\Delta x}{f} \Delta\varphi. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) значения из табл. 1, получим, что величина отклонения $\Delta\varphi$ составляет 40' при выполнении съемки неметрической камерой, которая установлена сверху на электронный тахеометр, позволяющий обеспечить данную точность. Однако следует учитывать, что при определении деформаций фотограмметрическим способом должно обеспечиваться постоянство элементов внешнего ориентирования снимков на различных циклах съемки. Поэтому при производстве работ необходимо, чтобы камера была жестко закреплена на электронном тахеометре и были закреплены опорные точки, местоположение которых остается неизменным со временем. При этом количество замаркированных точек должно быть не менее пяти штук, три из которых являются опорными, две – контрольными [9].

При фотограмметрическом способе средняя квадратическая погрешность определения деформаций производится по формулам [9]

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta X} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta X}{Y}\right)^2 m_Y^2 + \left(\frac{\Delta X}{\Delta x}\right)^2 m_{\Delta x}^2 + \left(\frac{\Delta X}{f}\right)^2 m_f^2} \approx \frac{Y}{f} m_{\Delta x} \\ m_{\Delta Z} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta Z}{Y}\right)^2 m_Y^2 + \left(\frac{\Delta Z}{\Delta z}\right)^2 m_{\Delta z}^2 + \left(\frac{\Delta Z}{f}\right)^2 m_f^2} \approx \frac{Y}{f} m_{\Delta z} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Согласно формулам (6) при $Y = 10$ м, $f = 100$ мм, $m_{\Delta x} = 0,01$ мм погрешность определения деформации составляет 1 мм [9]. Следует учитывать, что в формулах (6) f – эквивалентное фокусное расстояние, а не паспортное.

Для стереофотограмметрического способа отслеживания деформаций средние квадратические погрешности определения разности координат по осям координат X и Z вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta X} &= \sqrt{2 \left(\frac{Y}{f} \right)^2 m_x^2 + 2 \left(\frac{Y^2 x}{Bf} \right)^2 m_p^2} \\ m_{\Delta Z} &= \sqrt{2 \left(\frac{Y}{f} \right)^2 m_z^2 + 2 \left(\frac{Y^2 z}{Bf} \right)^2 m_p^2} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где B – базис фотографирования;

m_p – погрешность определения разности продольных параллаксов.

Координаты точек снимков при стереофотограмметрическом способе определения деформаций можно измерять таким же образом, как при фотограмметрическом. В этом случае сначала выполняют измерения по снимкам, полученным с левого конца базиса до и после деформации, и находят величины x_1 , Δx_1 , z_1 и Δz_1 , а при измерении по снимкам с правого конца базиса получают x_2 , Δx_2 , z_2 и Δz_2 . Пространственное смещение точек объекта вычисляют по формулам [9]

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \frac{B}{x_1 - x_2} \left(\frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{x_1 - x_2} x_1 + \Delta x_1 \right) \\ \Delta Z &= \frac{B}{x_1 - x_2} \left(\frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{x_1 - x_2} z_1 + \Delta z_1 \right) \\ \Delta Y &= Bf \frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{(x_1 - x_2)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Средние квадратические погрешности стереофотограмметрическим способом определения разности координат точек объекта в результате деформаций вычисляются по формулам [9]

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta X} &= \frac{B}{p^2} m_{\Delta x} \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \\ m_{\Delta Z} &= \frac{B}{p^2} m_{\Delta x} \sqrt{2z_1^2 + p^2} \\ m_{\Delta Y} &= Y \frac{m_p}{\Delta p} \sqrt{2} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $x_1 - x_2 = p$, $\Delta x_2 - \Delta x_1 = \Delta p$.

Сопоставляя формулы (7) и (9), видим, что ошибки вычисления деформаций $m_{\Delta X}$ и $m_{\Delta Z}$ по способу смещений меньше, чем при способе координат более, чем в 2 раза, а $m_{\Delta Y}$ одинакова.

Из сравнения формул (6), (7) и (9) следует, что при определении деформаций только по осям X и Z целесообразнее применять фотограмметрический способ. При стереофотограмметрическом способе предпочтительнее измерять смещения точек объекта, а не их координаты. При этом максимальную величину базиса фотографирования рекомендуется задавать в соответствии с формулой

$$B_{\max} = \frac{Y}{4}. \quad (10)$$

В работе [9] установлено, что погрешность определения базиса должна составлять около 10 мм, что можно обеспечить при помощи электронного тахеометра.

Для повышения точности определения деформаций по снимкам следует использовать специальные марки, установленные на объект. Размер и форма марок должны обеспечивать выполнение измерений их координат на снимках с подпиксельной точностью.

Опытные работы, выполненные различными производственными и научными организациями [9], показали, что при $Y = 6$ м, $f = 127$ мм точность определения разности координат точек по снимкам составляет:

- а) для фотограмметрического способа $m_{\Delta X} = 0,35$ мм, $m_{\Delta Z} = 0,30$ мм;
- б) для стереофотограмметрического способа по разностям координат $m_{\Delta X} = 0,43$ мм, $m_{\Delta Z} = 0,77$ мм, $m_{\Delta Y} = 0,82$ мм;

в) для стереофотограмметрического способа по смещениям $m_{\Delta X} = 0,24$ мм, $m_{\Delta Z} = 0,37$ мм, $m_{\Delta Y} = 0,78$ мм.

Таким образом, наиболее точным является стереофотограмметрический способ по смещениям.

1.5. Области использования материалов наземной съемки при решении научно-технических и прикладных задач, требования к точности

Использование данных наземной съемки находит все большее применение в различных областях. Это связано с возможностью изучать быстропротекающие процессы, получать данные целиком об объекте и окружающем его пространстве, выполнять съемку отдельных частей объекта с большей детальностью (разрешением) и т. д.

В результате методы наземной фотограмметрии стали применяться при решении следующих задач:

- определение траектории движения снарядов;
- изучение взрывов;
- изучение волн при модельных испытаниях судов;
- съемка мест происшествий в криминалистике;
- паспортизация объектов культурного наследия;
- паспортизация памятников архитектуры;
- испытания автомобилей на краш-тестах;

Условно перечисленные задачи можно разделить на две группы:

- динамические;
- статические.

Для решения динамических задач необходимо выполнять съемку со скоростью от нескольких десятков до нескольких тысяч кадров в секунду. При этом, если необходимо получить трехмерные координаты при изучении таких процессов, следует выполнять съемку двумя камерами с высокой степенью синхронности, которая определяется формулой

$$\tau = \frac{m_{\text{пр}}}{3\nu}, \quad (11)$$

где τ – синхронность срабатывания затвора;

$m_{\text{пр}}$ – требуемая точность определения пространственных координат при решении динамической задачи;

ν – скорость протекания изучаемого процесса.

При выполнении съемки в стереофотограмметрическом режиме также должно соблюдаться следующее условие:

$$\tau = \frac{1}{3\nu}, \quad (12)$$

где ν – частота выполнения съемки.

В большинстве случаев при решении динамических задач достаточно точности на уровне 2–10 см при определении пространственных координат точек объекта исследования.

При решении статических задач важно изучение различных форм и деталей. Наиболее сложной из перечисленных статических задач является паспортизация памятников архитектуры и объектов культурного наследия. Для этих задач определение пространственных координат точек объекта необходимо выполнять с точностью порядка 1–5 см. При этом съемку следует проводить в стереорежиме.

Для обмера памятников архитектуры и объектов культурного наследия съемку обычно производят с расстояния 20–80 м и с коротких базисов. Размер зависит от условий съемки и может изменяться в диапазоне от 0,2 до 0,1 расстояния от точки съемки до объекта. При съемке зданий базис целесообразно располагать параллельно фасаду, что облегчает дальнейшую обработку. Однако на практике возникают случаи, что базис необходимо размещать под углом из-за стесненных условий.

Точность определения координат точек объекта в большей степени зависит от величины базиса фотографирования, отстояния съемочной станции от объекта и фокусного расстояния камеры.

Некоторое влияние на точность оказывают цветопередача, конфигурация и фон сооружения, точность определения элементов внутреннего и внешнего ориентирования.

1.6. Общие основы теории фотограмметрической обработки снимков для гидрологии

При гидрографических работах топографо-геодезическое обеспечение необходимо в следующих случаях:

- 1) определение абсолютных отметок водомерных постов;
- 2) определение скорости и направления течения водного потока;
- 3) съемка русловой и прибрежной частей водных объектов;
- 4) изучение волнения водоема.

Стерефотограмметрический метод применяется для решения задач 2)–4).

Определение скорости и направления течения водного потока. Определение скорости и направления водного потока заключается в последовательном фотографировании маркирующих предметов, свободно плавающих по поверхности воды. В период ледохода маркирующими предметами могут выступать льдины. Поскольку современные цифровые камеры снабжены счетчиками времени с точностью доли секунды, то время между кадрами можно определить по ним. Для наиболее корректного определения скорости течения водного потока Б. Н. Родинов предложил маркирующие предметы сбрасывать в воду в линию поперек водоема на равных расстояниях друг от друга. Скорость течения определяется по формуле [9]

$$h = \frac{L}{t}, \quad (13)$$

где L – расстояние на плане между соседними положениями одноименных маркирующих предметов;

t – интервал времени между соседними кадрами.

Таким же образом можно изучать динамику ледохода с момента образования закраин до полного очищения реки ото льда.

Съемка русловой и прибрежной частей водных объектов. Для определения глубины водного объекта можно применять следующие фотограмметрические методы [9]:

- двусредной фотограмметрии;
- фотометрический;
- косвенные способы определения глубины водоема по аэроснимкам.

Поскольку в первых двух применяются наземные снимки, рассмотрим их более подробно.

В основе двусредной фотограмметрии лежит принцип изменения угла падения светового луча на границе двух сред, как показано на рис. 5.

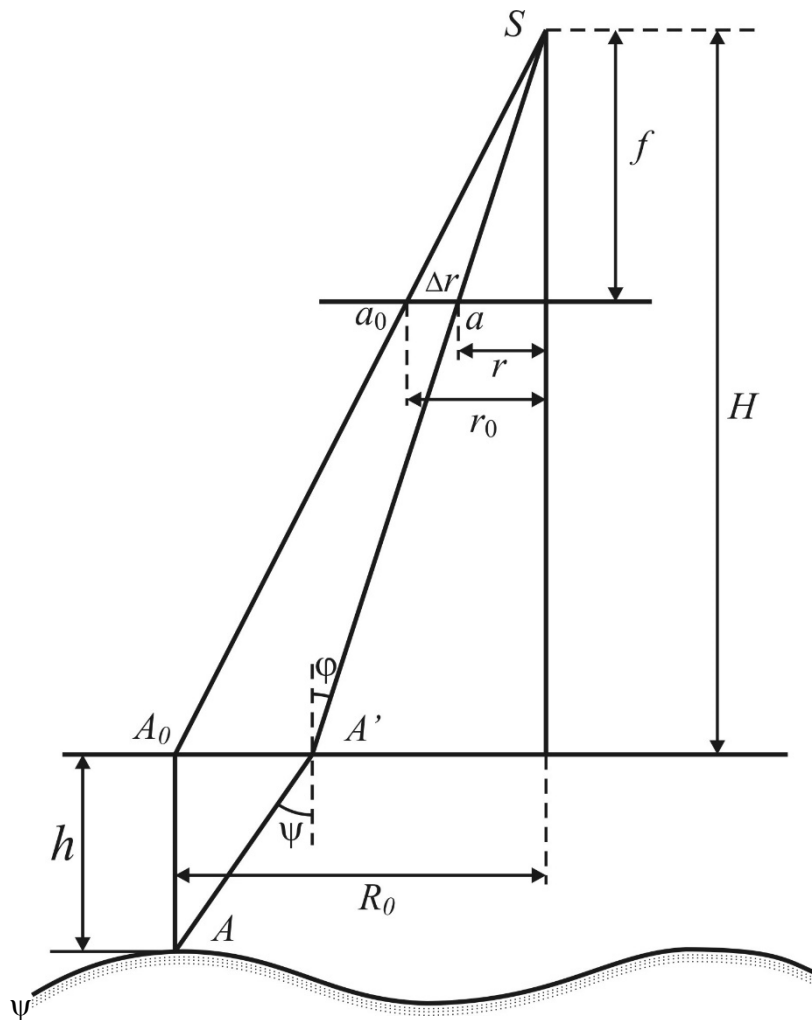


Рис. 5. Смещение точек на снимке, вызванное глубиной водоема

На основе уравнения смещения точек за рельеф и с учетом геометрических условий, показанных на рис. 5, можно записать итоговую формулу смещения, вызванную искажением положения точек из-за преломления точек на границе двух сред

$$h\Delta r_{\text{дв.с}} = \frac{hF}{D} r, \quad (14)$$

где h – превышение рассматриваемой точки местности над начальной горизонтальной плоскостью;

r – расстояние измеряемой точки от центра снимка;

D – отстояние камеры от начальной горизонтальной плоскости;

$$F = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{n^2 - 1}{n^2 f^2} r^2 \right), \quad (15)$$

где f – фокусное расстояние камеры;

n – показатель преломления на границе двух сред $\left(n = \frac{\sin \varphi}{\sin \psi} \right)$;

ψ – угол преломления проектирующего луча.

Преломление проектирующих лучей приводит к тому, что дно водоема на снимках изображается в переменном масштабе, более крупном, чем масштаб суши. При этом радиальный m_r и тангенциальный m_t будут следующие:

$$m_r = \frac{f}{D - hn^2 F^3}; \quad (16)$$

$$m_t = \frac{f}{D - hF}. \quad (17)$$

При этом изображение будет растянутым в радиальном направлении, но при этом коэффициент растяжения (m_r/m_t) будет менее 1,02.

Фотометрический метод определения глубин основан на взаимосвязи оптической плотности изображения водоема на снимке от глубины водоема. Аналитически данная зависимость выражается в виде батометрических формул. Оптическая плотность изображения водоема на снимке зависит от яркости водной поверхности, толщи воды и дна водоема. Если оптическая характеристика воды неизменна и яркость одной поверхности и дна водоема остаются постоянными, то оптическая плотность изображения водоема будет зависеть только его глубины

$$h = f(D). \quad (18)$$

Для определения функциональной зависимости (16) следует рассмотреть компоненты яркости водоема и ее связь с яркостью изображения, характеризующего эффективность взаимодействия излучения определенной длины волны и светочувствительности датчика. В результате можно записать основную батиметрическую формулу

$$B = Z + R e^{-ph}, \quad (19)$$

где $R = B_0 - B_\infty$ – разность яркости изображения водоема на урезе воды (B_0) и на оптической бесконечной глубине (B_∞);

Z – яркости изображения водной поверхности, толщи воды на оптически бесконечной глубине, воздушной дымки и рассеянного света в съемочной камере;

$$p = 2c;$$

c – показатель вертикального ослабления света при прохождении его через толщу воды;

B – яркость изображения водоема на глубине h .

На основании выражения (17) следует

$$h = \frac{1}{p} \ln \frac{R}{B - Z}. \quad (20)$$

Для определения глубины водоема от яркости изображения нужно перейти к соответствующему значению яркости пикселя. Это возможно осуществить двумя путями. Первый – сводится к выводу прямой зависимости (16), а второй – к применению формулы (17) и отысканию яркости изображения по характеристической кривой снимка. В первом варианте пользуются следующей зависимостью:

$$D = \gamma \lg B + k, \quad (21)$$

где k и γ – постоянные, зависящие от свойств светочувствительности датчика и используемых фильтров.

Параметры такой формулы являются сложной функцией многих факторов. Поэтому теоретически вычислить ее с достаточной точностью очень

сложно. На практике ограничиваются измерением оптической плотности в точках с известными глубинами водоема и вычислением параметров по формулам (18) и (19). По этим значениям параметров и измеренным оптическим плотностям в других различных точках водоема определяют глубину h .

Изучение волнения водоема. Для изучения волнения водоемов съемку выполняют двумя камерами, установленными на воздушном судне. При этом погрешность синхронности срабатывания затворов должна составлять 0,03–0,04 с.

При изучении нескольких систем волн на снимках выделяют каждую систему волн для определения их периода колебаний и скорости течения. Скорость движения волн вычисляют по формуле

$$v = \sqrt{\frac{gl}{2\pi}}, \quad (22)$$

где g – ускорение силы тяжести;

l – длина волны.

Для определения длины волны выделяют одноименные волны на снимках, полученных из соседних точек фотографирования. При этом съемка должна производиться с обязательным использованием ГНСС-приемника для фиксации величины базиса фотографирования и тем самым – масштаба фотограмметрической модели.

По зонам блика водоема на снимках можно определить уклоны волн по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{f}, \quad (23)$$

где r – радиус-вектор удаления блика от главной точки снимка.

Для определения зоны блика съемку рекомендуется проводить в ночное время при ясном небе. По известному углу α и длине волны l можно вычислить высоту волны [9].

Наземная фотограмметрия в гидрологических исследованиях. В гидрологии кроме аэрофотосъемки может применяться наземная стереофотограмметрическая съемка в масштабах 1 : 1 000 – 1 : 10 000, на основе кото-

рой можно создавать топографические планы участков пересечения проектируемых инженерных коммуникаций и сооружений гидроузлов и решать ряд прикладных гидрологических задач [9]:

- 1) определение скорости течения воды и направления струй в проектируемых створах сооружений, проране при перекрытии рек и т. д.;
- 2) определение количественных и других характеристик ледохода на створах;
- 3) изучение оползневых явлений;
- 4) планово-высотная привязка геологических выработок;
- 5) фиксация действия различных явлений (движение наносов, определение ударной силы волны и скорости размыва берегов и т. д.).

Для решения задач 1), 2) и 5) необходимо выполнение одновременной съемки двумя камерами.

При определении гидрологических характеристик методика обработки снимков наземной съемки практически такая же, как и методика обработки материалов аэросъемки. Однако здесь существенное значение имеют количество снимков, скорость съемки и синхронность, выполняемые при помощи двух камер, точность наблюдений за движением маркирующих предметов и льдин.

Наземная стереофотограмметрическая съемка с успехом применялась при изучении гидравлики моделей гидротехнических сооружений. В этом случае объектом съемки и последующей обработки снимков является жидкость или водный поток. При испытаниях моделей гидросооружений измеряют основные параметры водного потока: глубину, скорость и траекторию движения струй. Применение стереофотограмметрического метода для этих целей позволяет выполнить съемку всех элементов одномоментно, а затем по снимкам воспроизвести форму водного потока и составить план водной поверхности [9].

При съемке водной поверхности возникает ряд трудностей, связанных с получением стереоскопического эффекта при обработке снимков. Для повышения качества снимков и исключения переотражений позади водной поверхности следует устанавливать черные экраны, а по воде пускать поплавки, которые, двигаясь по поверхности, будут изображаться на снимках и создавать стереоскопический эффект.

При съемке водного потока, как и любого движущегося объекта, большую роль играет выдержка затвора, которая должна быть согласована со скоростью потока и допустимой величиной сдвига изображения. При горизонтальной съемке максимальный сдвиг изображения будет на ближнем к камере плане (при движении потока в направлении, параллельном линии базиса съемки). Поэтому направление оптической оси камеры должно совпадать с направлением бóльших скоростей движения потока [9].

Исследования, проводимые различными авторами, показали, что точность построения стереомодели по снимкам водного потока составляет 0,3–0,5 мм, что с запасом удовлетворяет требованиям гидравлического моделирования. Точность определения скоростей потока по снимкам наземной съемки составляет 0,5 % от скорости потока и превышает точность других способов [9].

При геодезических изысканиях площадок гидроузлов в горных районах очень эффективен метод наземной стереофотограмметрической съемки. Использование этого метода позволяет сократить период полевых работ и перенести основную нагрузку на камеральный этап, что является экономически эффективным. Кроме того, наличие снимков позволяет, в случае необходимости, в любой момент дополнить материалы изысканий недостающими данными, что также положительно сказывается на проектировании.

При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений или инженерных коммуникаций через водные преграды съемке подлежат оба берега, пойменные террасы и острова, находящиеся в русле реки. Поэтому съемку берега, как правило, производят с противоположного края реки. Не рекомендуется применять наземную съемку в речных долинах с широкой равнинной поймой, в очень узких каньонах горных рек с сильно изрезанными бортами, а также на залесенных или закрытых кустарником склонах [9].

1.7. Методы калибровки фотоаппаратов по опорным данным.

Способы учета дисторсии фотоаппаратов

Способы калибровки съемочных систем. Под калибровкой аэрофотографирующей системы понимают определение элементов внутреннего ориентирования f , x_0 и y_0 и интегральных значений поправок v_x , v_y в положение

точек аэрофотоснимка за влияние всех видов систематических ошибок, вызванных фотограмметрической дисторсией, закономерной деформацией фотоматериала, невыравниванием пленки в плоскость, а также изменением физических характеристик аэрофотоаппарата при колебании температуры, изменении атмосферного давления и другими факторами. Аналогичным образом понимается калибровка цифровых камер, за исключением того, что вместо влияния деформации фотоматериала и невыравнивания пленки в плоскость прикладной рамки на положение точек на изображении оказывают воздействие ошибки изготовления ПЗС-матрицы.

Идея всех способов калибровки базируется на восстановлении по снимку пространственного пучка проектирующих лучей и сравнении его с эталонным, математическим пучком, образующимся при центре проектирования на выбранные цели.

Калибровку аэрофотографирующей системы можно разделить на полную и частичную. При полной калибровке определяются все параметры; при этом необходимо располагать или имитировать расположение точек на различных высотах с колебанием превышений до $1/3 H$. Частичная калибровка предполагает определение отдельных параметров системы. Также способы калибровки можно классифицировать на камеральные и полевые.

Камеральные способы калибровки снимков и камер. К камеральным способам калибровки относится калибровка съемочных камер при помощи юстировочной скамьи. Сущность данной калибровки заключается в измерении через объектив камеры направлений на каждое перекрестие контрольной сетки крестов, закрепленной в плоскости прикладной рамки. При обработке полученных результатов измерений определяют такие параметры аэрофотоаппарата, как координаты главной точки, фокусное расстояние и величины дисторсии объектива, то есть выполняется частичная калибровка камеры.

Положение главной точки камеры также можно определить с использованием явления автоколлимации при отражении начального штриха стандартной сетки от плоского зеркала. Способ предполагает применение обычного стереокомпаратора, стандартной сетки, плоского зеркала и заключается в следующем. На снимкодержатель параллактической ка-

решетки стереокомпаратора устанавливают стандартную сетку и на нее – съемочную камеру прикладной рамкой вниз. Наблюдая в объектив съемочной камеры, совмещают штрихи стандартной сетки с центрами координатных меток прикладной рамки. Координатные оси прикладной рамки камеры ориентируют параллельно осям стереокомпаратора и измеряют координаты точки, образуемой пересечением координатных осей прикладной рамки (точка O_1). Затем на оправу объектива (или светофильтр) укладывают плоское зеркало и перемещением источника света добиваются четкого автоколлимационного изображения точки O_1 , то есть получают точку O_2 , координаты которой также измеряют. Положение главной точки получают как среднее между измеренными координатами точек O_1 и O_2 [2].

К лабораторным способам можно отнести калибровку фотографирующих систем, предназначенных для съемки с близких расстояний, с использованием зеркального тест-объекта. Он содержит плоское зеркало A , на котором нанесены точки (марки) с известным взаимным расположением. На некотором расстоянии от зеркала A устанавливается второе плоское зеркало B , зеркальная поверхность которого обращена к зеркальной поверхности A и параллельна ей. Таким образом, в результате многократного отражения точек будут видны изображения узлов тест-объекта, находящихся на разном расстоянии от плоского зеркала, то есть получается пространственный тест-объект в мнимом пространстве.

Зеркальный тест-объект рекомендуется применять для калибровки снимков неподвижных деформирующихся объектов. Сущность ее заключается в том, что неподвижной камерой на один и тот же снимок фотографируется тест-объект, перемещающийся таким образом, чтобы все опорные точки были изображены на одном снимке. Изображения опорных точек на снимке рассматриваются как изображения на отдельных (квазиконвергентных) снимках, полученных из разных центров фотографирования. По квазиконвергентным снимкам можно выполнить калибровку фотографирующих систем на основе уравнений коллинеарности [2, 3].

В работах [2, 4] предлагается использовать зеркальный тест-объект для калибровки съемочных систем с применением только геометрических связей между снимками. В этом случае математическое обоснование и мето-

дика проведения работ будут аналогичны калибровке по снимкам конвергентной съемки, образующим замкнутый триплет [2, 5].

К недостаткам всех лабораторных способов калибровки камер, предназначенных для съемки с борта летательного аппарата, следует отнести то, что в момент выполнения фотографирования условия внешней среды (температура и давление) отличаются от тех, при которых выполнена калибровка. Это вызывает деформацию отдельных блоков и всей фотографирующей системы в целом, что в свою очередь приводит к изменению параметров калибровки. Этого недостатка, частично или полностью, лишены полевые способы калибровки снимков.

Полевые способы калибровки снимков. Для калибровки снимков в полевых условиях используются испытательные фотограмметрические полигоны, которые представляют собой объектное пространство. Калибровка основана на решении пространственной засечки. Полная калибровка с определением элементов внутреннего ориентирования возможна только по снимкам горного эталонного полигона [6].

В качестве твердых опорных данных для калибровки снимков могут быть использованы: координаты опорных точек полигона, высоты опорных точек и расстояния между ними, точки, имеющие равные абсциссы или ординаты, углы, измеренные в пространстве объектов, расстояния между точкой фотографирования и точками полигона (показания лазерного высотомера) [3].

При создании испытательного полигона требуется определение в пределах сравнительно небольшого участка местности координат большого числа точек, капитального их закрепления и регулярного обновления наружных знаков (маркировки), что связано с большими денежными затратами. Поэтому в работах предлагаются способы калибровки без использования опорных данных, идея которых заключается в съемке участка местности с нескольких точек фотографирования или получения с одной точки нескольких перекрывающихся снимков с большими углами наклона. Но в работах приводятся доводы о недееспособности таких способов калибровки [1].

Точность результатов калибровки зависит от характера изменения значений ошибок по полю снимка и возможности аппроксимации их на не-

больших участках. В большинстве случаев по аэроснимкам полигона, имеющего около 150 равномерно расположенных точек, можно достаточно уверенно получить интегральные значения калибровочных поправок [6].

Полное и комплексное исследование съёмочных систем можно выполнить, только осуществив съёмку реальных объектов при заданных условиях так называемых специальных эталонных участков – полигонов. Такой полигон имеет по сравнению с фотограмметрическими существенные особенности. Прежде всего, он должен обеспечить изучение изобразительных свойств снимков, получаемых съёмочными системами различного типа. Поэтому такой полигон должен содержать искусственные и естественные объекты различного типа, а также специальную систему эталонов, обеспечивающую исследование геометрических и фотометрических свойств съёмочной системы.

В результате изучения изобразительных свойств снимков специальных эталонных участков, полученных различными съёмочными системами, должны быть созданы карты объектного состава. Для исследования геометрических свойств съёмочной системы целесообразно иметь на полигоне достаточно густую опорную сеть. Для некоторых видов съёмок иногда чрезвычайно трудно создать опорную сеть путем маркировки точек (например, для радиолокационной и ИК-съёмки). В этом случае целесообразно использовать в качестве опорных точек объекты, изображения которых на снимках можно считать точечными (так называемые объекты-ориентиры).

Основной целью калибровки снимков является определение поправок в измеренные координаты точек снимков за суммарное влияние всех источников систематических ошибок. В силу того, что невозможно определить поправки для каждой точки изображения, применяют два способа учета систематических ошибок: способ зон и полиномиальный способ [7, 10].

Сущность способа зон заключается в том, что все поле изображения (снимка) разбивается на равные зоны, в пределах которых принимается, что систематические ошибки в плоских координатах точек, вызванные различными факторами, имеют одинаковое значение. В результате решения задачи калибровки будут определены значения поправок для каждой зоны.

Сущность полиномиального способа заключается в том, что систематические ошибки по всему полю изображения представляются в виде математической модели (полинома) по осям x и y снимка отдельно. Было предложено большое количество полиномов, но наибольшее распространение и обоснованность применения получили полиномы D. Brown, H. Ebner, J. Juhl, K. Jacobson, В. В. Погорелова, A. Grun и др.

Полиномы D. Brown применяются для калибровки как цифровых, так аналоговых камер, которые включают в себя элементы внутреннего ориентирования, дисторсию (радиальную и тангенциальную), неприжим пленки в плоскость прикладной рамки и систематические деформации фотоматериала. Для аналоговых камер используются 29 членов полинома, а для цифровых – 10.

Общий вид полиномов Брауна можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x = & a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2 + a_7xy^2 + \frac{x}{f}(c_1x^2 + c_2xy + \\ & + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + x(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + \\ & + p_1(y^2 + 3x^2) + 2p_2xy + \delta x_0 + \frac{x}{f}\delta f;\end{aligned}\quad (24a)$$

$$\begin{aligned}\sigma_y = & b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^2 + b_7xy^2 + \frac{y}{f}(c_1x^2 + c_2xy + \\ & + c_3y^2 + c_4x^3 + c_5x^2y + c_6xy^2 + c_7y^3) + y(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + \\ & + 2p_1xy + p_2(y^2 + 3x^2) + 2p_2xy + \delta y_0 + \frac{y}{f}\delta f,\end{aligned}\quad (24б)$$

где δx , δy , δf – поправки в элементы внутреннего ориентирования;

a_i , b_i – коэффициенты полинома, характеризующие деформацию фотоизображения;

c_i , k_i – коэффициенты полинома, характеризующие смещение точек вызванные радиальной дисторсией;

p_1 и p_2 – коэффициенты, описывающие сложные искажения снимков.

Эбнер рекомендует использовать ортогональные полиномы [1]

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= b_1 x + b_2 y - b_3 \left(2x^2 - \frac{4}{3}b^2 \right) + b_4 xy + b_5 \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) + \\ &+ b_7 x \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) + b_9 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) y + b_{11} \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) \\ \Delta y &= -b_1 y + b_2 x + b_3 xy + b_4 \left(2y^2 - \frac{4}{3}b^2 \right) + b_6 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) + \\ &+ b_8 \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) y + b_{10} x \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) + b_{12} \left(x^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) \left(y^2 - \frac{2}{3}b^2 \right) \end{aligned} \right\}, \quad (25)$$

где $b_1, b_2, \dots, b_{12}$ – коэффициенты полинома.

Модель, синтезированная J. Juhl, имеет вид

$$\sigma_x = \left[r^{1,85} (c_1 \cos \alpha + c_2 \sin \alpha + c_3 \cos 2\alpha + c_4 \sin 2\alpha) \right] \frac{1}{\cos \alpha} + \\ + \left\{ c_5 (r^3 + rr_0^2) + c_6 r \left[\sin \left(\frac{r\pi}{r_0} \right) \right]^2 + c_7 \sin \left(\frac{2r\pi}{r_0} \right) \right\} \frac{1}{\cos \alpha}; \quad (26a)$$

$$\sigma_x = - \left[r^{1,85} (c_1 \cos \alpha + c_2 \sin \alpha + c_3 \cos 2\alpha + c_4 \sin 2\alpha) \right] \frac{1}{\cos \alpha} + \\ + \left\{ c_5 (r^3 + rr_0^2) + c_6 r \left[\sin \left(\frac{r\pi}{r_0} \right) \right]^2 + c_7 \sin \left(\frac{2r\pi}{r_0} \right) \right\} \frac{1}{\sin \alpha} + c_8 x + c_9 y, \quad (26b)$$

где r_0 – расстояние до точки, в которой радиальная дисторсия равна нулю;
 c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты, учитывающие тангенциальную дисторсию;

c_5, c_6, c_7 – коэффициенты, учитывающие радиальную дисторсию;

c_8, c_9 – коэффициенты, учитывающие аффинную и сферическую деформацию;

$$\alpha = \arctg(x/y).$$

$$\begin{aligned}\sigma_x = & c_{12}x + c_{21}y + c_{22}xy + c_{31}l - c_{22}\frac{10}{f}k + c_{14}p + c_{23}yk + c_{32}xl + c_{41}yq + \\ & + c_{15}r + c_{24}xyp + c_{33}kl + c_{42}xyq + c_{51}s + c_{25}yr + c_{34}xlp + c_{43}ykq + c_{52}xs + \\ & + c_{35}lr + c_{44}xypq + c_{53}ks + c_{45}yqr + c_{54}xps + c_{55}rs;\end{aligned}\quad (27a)$$

$$\begin{aligned}\sigma_y = & -c_{12}y + c_{21}x - c_{22}\frac{10}{f}l + c'_{13}k + c'_{22}xy + c'_{14}xp + c'_{23}yk + c'_{32}xl + c'_{41}yq + \\ & + c'_{15}r + c'_{24}xyp + c'_{33}kl + c'_{42}xyq + c'_{51}s + c'_{25}yr + c'_{34}xlp + c'_{43}ykq + c'_{52}xs + \\ & + c'_{35}lr + c'_{44}xypq + c'_{53}ks + c'_{45}yqr + c'_{54}xps + c'_{55}rs,\end{aligned}\quad (27б)$$

где $k = x^2 - \frac{b^2}{2}$; $l = y^2 - \frac{b^2}{2}$; $p = x^2 - \frac{17}{20}b^2$; $q = \frac{17}{20}b^2$;
 $r = \left(x^2 - \frac{31}{28}b^2\right) + \frac{9}{70}b^4$; $s = y^2 \left(y^2 - \frac{31}{28}b^2\right) + \frac{9}{70}b^4$.

В качестве функций для описания систематических ошибок σ_x , σ_y предлагается использовать полиномы Цернике, достаточно широко применяемые для калибровки цифровых неметрических камер [11]

$$\left. \begin{aligned}\sigma_x = & k_1 \bar{x}r^2 + k_2 \bar{x}r^4 + k_3 \bar{x}r^6 + k_4 \bar{x}r^8 + P_1 \left(2\bar{x}^2 + r^2\right) + 2P_2 \bar{x}\bar{y} \\ \sigma_y = & k_1 \bar{y}r^2 + k_2 \bar{y}r^4 + k_3 \bar{y}r^6 + k_4 \bar{y}r^8 + P_2 \left(2\bar{y}^2 + r^2\right) + 2P_1 \bar{x}\bar{y}\end{aligned}\right\}, \quad (28)$$

где k_i и P_i – коэффициенты, описывающие влияние радиальной и тангенциальной дисторсии;

r – радиус-вектор, характеризующий положение точки на снимке.

При применении полиномиального способа для описания систематических ошибок в координатах точек снимка вводятся дополнительные неизвестные, что ухудшает обусловленность решения задачи и может приводить к корреляции между дополнительными неизвестными, возникающей либо из-за некорректности формул, либо из-за плохой геометрии расположения точек на снимке. В литературе также указывается на тот факт, что использование полиномов выше 2-й степени приводит к описанию случай-

ных ошибок, которые воспринимаются как систематические, а также к возникновению корреляции между коэффициентами полиномов. При построении фототриангуляционной сети с самокалибровкой для выбора аппроксимирующего полинома необходимо использовать методы регрессионного анализа. Если модель искажений описана не ортогональными полиномами, то для этих целей следует применять прямой и обратный методы шагового регрессионного анализа. Сначала реализуется прямой шаговый регрессионный метод, добавляя новые параметры в исходную модель до тех пор, пока улучшается общая точность решения, затем исследуется математическая модель обратным методом с исключением ее незначимых параметров.

На возникновение плохой обусловленности решения задачи при определении параметров калибровки в процессе уравнивания фототриангуляционной сети указывает большое количество авторов, но никто из них не описывает возможность использования для этих целей методов регуляризованного уравнивания, которые дают устойчивое решение для свободных геодезических и нивелирных сетей.

Выбор конкретного полинома для цели калибровки снимков в основном обусловлен количеством и размещением опорных и определяемых точек. При достаточном наличии исходных данных чаще всего используют полиномы Брауна с 29 коэффициентами, которые применяются в таких программных продуктах, как Erdas Imagine, Фотоком и др.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1. Лабораторная работа № 1.

Наземная фотограмметрическая съемка для целей архитектуры

Цель работы: изучить комплекс работ, включающий выполнение наземной фотограмметрической съемки для целей архитектуры.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение Agisoft Metashape;
- 3) цифровая неметрическая камера.

Задачи работы:

- 1) выполнить техническое проектирование фотограмметрической съемки выбранного объекта;
- 2) произвести калибровку цифровой неметрической камеры;
- 3) выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемки в Agisoft Metashape с целью построения ортофотоплана фасада здания.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Расчет параметров наземной фотограмметрической съемки.

Для обеспечения заданной точности определения координат точек объекта необходимо рассчитать базис фотографирования и максимальное отстояние камеры от объекта. Эти вычисления можно выполнить в следующей последовательности.

Сначала вычисляют базис фотографирования b в масштабе снимка, задавая продольное перекрытие P_x между снимками

$$b_{\text{мм}} = \frac{S_w \cdot (100 \% - P_x)}{100 \%}, \quad (29)$$

где S_w – размер матрицы камеры по длине в мм.

Продольное перекрытие P_x возьмем равным 80 % как наиболее оптимальное с точки зрения числа снимков и обеспечивающее зону тройного перекрытия снимков с целью возможности построения фототриангуляции.

Также вычисляется значение базиса фотографирования в пикселях

$$b_{\text{пикс}} = \frac{l_x \cdot (100 \% - P_x)}{100 \%}, \quad (30)$$

где l_x – формат снимка вдоль оси x в пикселях.

Затем можно вычислить максимальное отстояние Z_{max} , при котором будет обеспечена заданная точность определения координаты Z точек объекта (вдоль оптической оси камеры), используя известную формулу

$$Z_{\text{max}} = \frac{b_{\text{пикс}}}{m_p} \cdot m_z, \quad (31)$$

где m_p – средняя квадратическая ошибка измерения продольных параллакс-ов по снимкам, составляющая 0,5 пикселя.

Соответствующее значение базиса фотографирования на местности можно вычислить по формуле

$$B = \frac{Z}{f} \cdot b_{\text{мм}}, \quad (32)$$

где f – значение фокусного расстояния съемочной камеры в мм.

Если при выполнении съемки придерживаться значений отстояния и базиса фотографирования, вычисленных по формулам (27)–(30), то при фотограмметрической обработке таких снимков точность определения координаты Z не будет ниже заданной m_z . Точность определения координат m_x, m_y точек объекта будет заведомо выше, чем m_z .

Далее определяется количество станций фотографирования. Для этого достаточно разделить длину объекта L на величину базиса фотографирования

$$n_B = \frac{L}{B}. \quad (33)$$

Если число базисов фотографирования получается дробным, то его следует округлить, причем всегда в большую сторону, с тем чтобы обеспечить покрытие съемкой всего объекта.

Расчет захвата кадра на объекте по длинной и короткой стороне снимка выполняется по формулам

$$L_x = \frac{GSD \cdot l_x}{100}; \quad (34)$$

$$L_y = \frac{GSD \cdot l_y}{100}. \quad (35)$$

где l_x – формат снимка вдоль оси x в пикселях;

l_y – формат снимка вдоль оси y в пикселях.

GSD – Ground Sample Distance – размер пикселя в масштабе объекта

$$GSD = \frac{S_w \cdot Z \cdot 100}{f \cdot l_x} \text{ (см/пиксель)}. \quad (36)$$

Вычисленные параметры уточняются для выбранного объекта съемки, учитывая его длину и высоту. Также выполняются контрольные промеры с помощью рулетки для последующего масштабирования модели и оценки точности. Результаты заносятся в паспорт объекта съемки, показанный на рис. 6.

Выполнение наземной фотограмметрической съемки производится с учетом следующих рекомендаций:

- базис фотографирования при съемке устанавливается параллельно основной продольной оси сооружения;

- изображение фасада должно занимать не менее 80 % кадра по высоте, быть резким и контрастным;

- параметры фокусировки должны оставаться такими, какими были при калибровке цифрового фотоаппарата. Если калибровка фотоаппарата будет производиться после фотосъемки, то процесс определения элементов внутреннего ориентирования и параметры дисторсии выполняется с теми же установками, при которых было фотографирование.

При съемке протяженных объектов целесообразно производить маршрутную или блочную съемку объекта. В качестве примера на рис. 7 представлен вариант маршрутной съемки здания.

Паспорт объекта наземной фотограмметрической съемки	А Б Р И С	
Адрес _____		
Тип здания _____		
Этажность _____		
Материал постройки _____		
Параметры наземной фотограмметрической съемки:		
Z_{max} = _____ м		
B = _____ м		
np = _____		
GSD = _____ см/ пиксель		
Lx = _____ м		
Ly = _____ м		
Контрольные замеры:		
1. _____		
2. _____		
3. _____		
4. _____		
5. _____		
6. _____		
7. _____		
8. _____		
9. _____		
10. _____		

Рис. 6. Паспорт объекта наземной фотограмметрической съемки

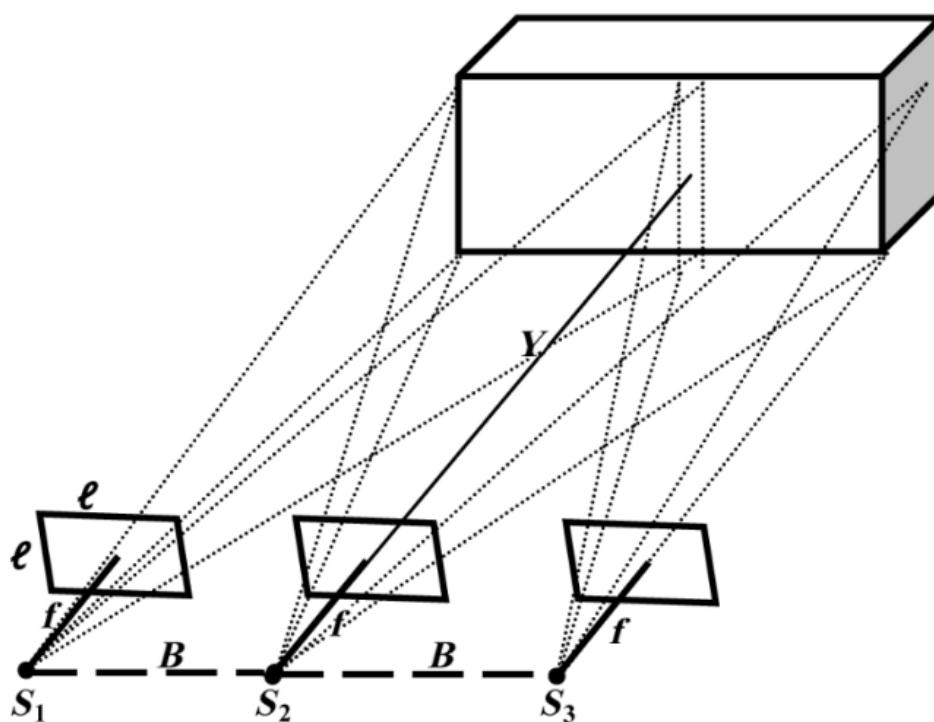


Рис. 7. Маршрутная съемка

В маршрутной съемке из смежных снимков маршрута формируются стереопары снимков нормального или равнонаклонного случаев съемки. При этом съемка выполняется таким образом, чтобы у смежных стереопар имелась область тройного перекрытия. Для этого съемку выполняют так, чтобы соседние снимки перекрывались по направлению маршрута не менее чем на 60 %.

Задание 2. Калибровка цифровой камеры в программе Agisoft Metashape.

Для калибровки цифровой неметрической камеры выполняется съемка пространственного тест-объекта. Съемку необходимо осуществлять со штатива с разных точек пространства таким образом, чтобы поле кадра было максимально заполнено точками, как показано на рис. 8.



Рис. 8. Пример съемки тест-объекта

Обработка материалов съемки выполняется в программном продукте Agisoft Metashape в следующей порядке.

1. Добавить фотографии тест-объекта с помощью команды **Добавить фотографии** из меню **Обработка** (рис. 9).

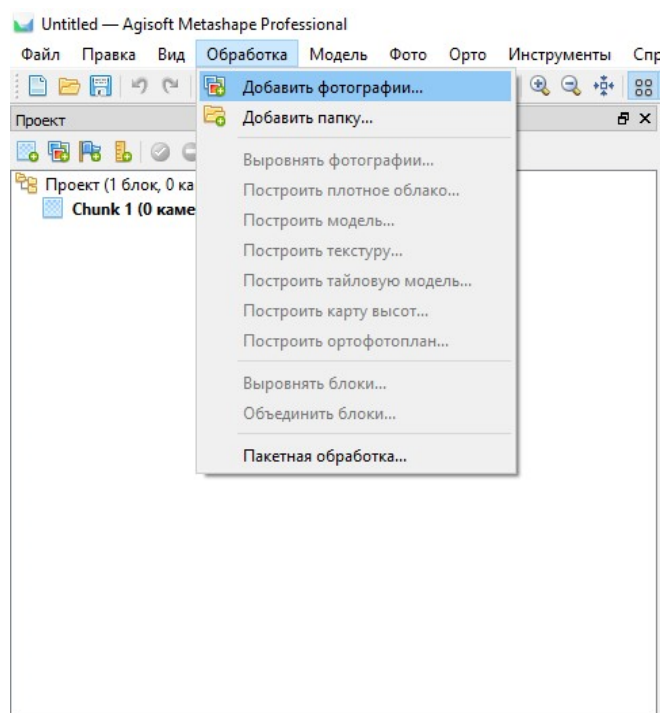


Рис. 9. Загрузка исходных снимков

2. Выполнить взаимное ориентирование снимков с помощью команды **Выровнять фотографии** из меню **Обработка** (рис. 10).

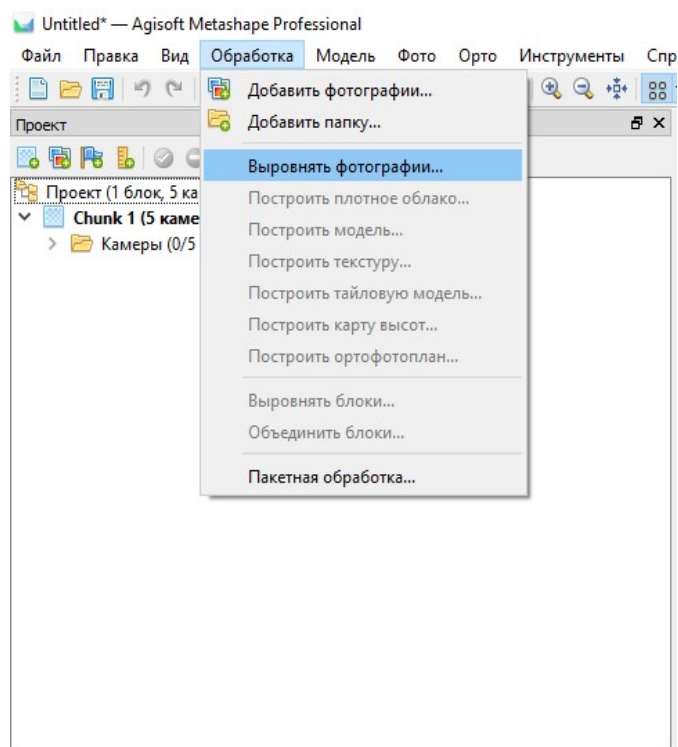


Рис. 10. Взаимное ориентирование снимков

В окне **Выровнять фотографии** установить следующие параметры: **Точность** – средняя, **Общая преселекция** (рис. 11).

Результат выполнения взаимного ориентирования снимков отображается в списке камер проекта (5/5 выровнено) и в окне **Модель** при включенной кнопке **Показать камеры**  (рис. 12).

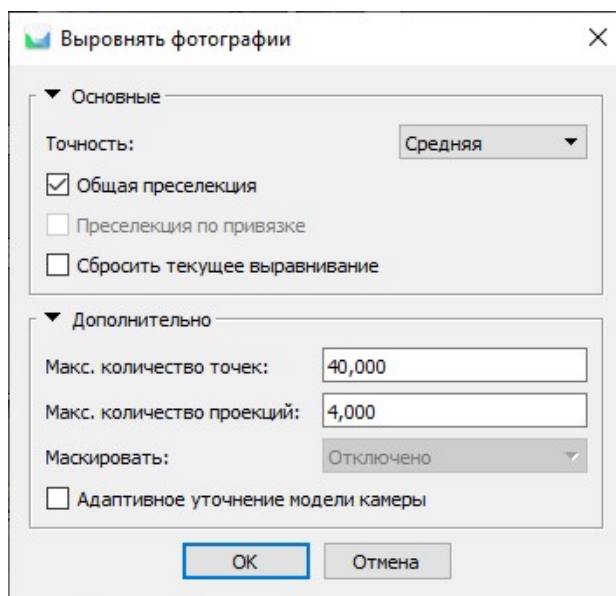


Рис. 11. Параметры поиска соответственных точек

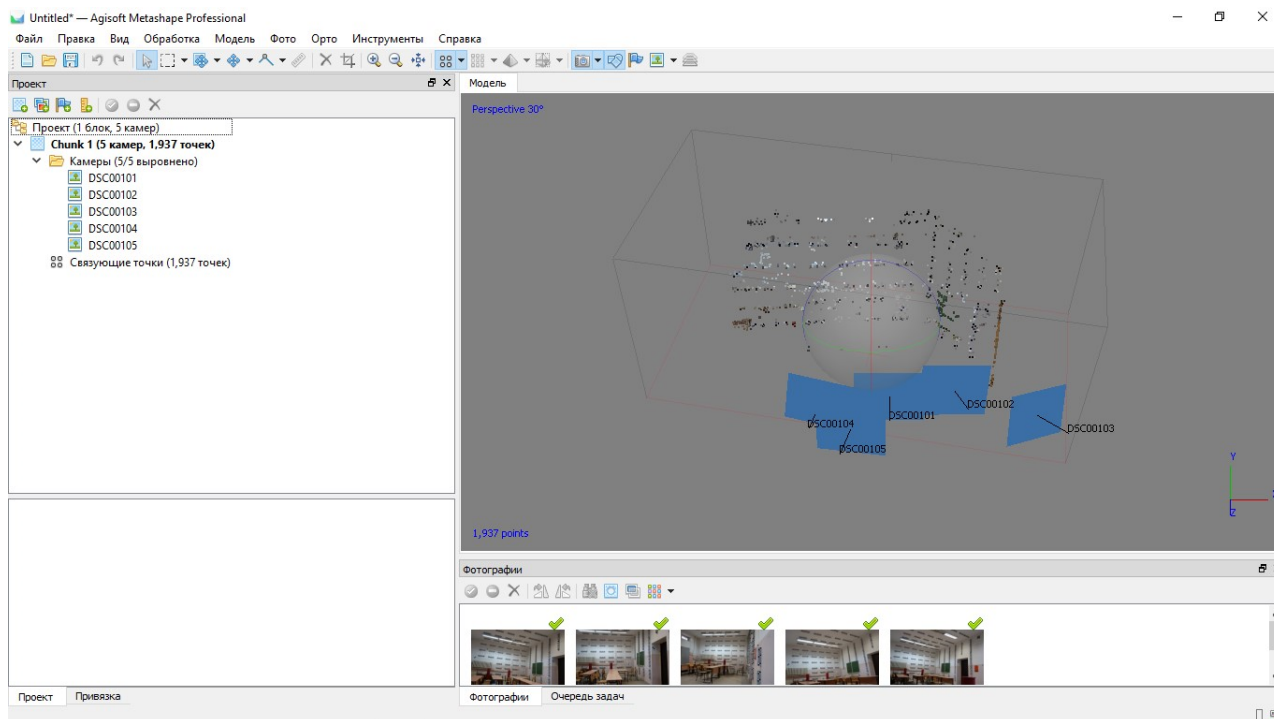


Рис. 12. Результат взаимного ориентирования

3. Выполнить поиск марок тест-объекта с помощью команды **Маркеры** → **Найти маркеры** из меню **Инструменты** (рис. 13).

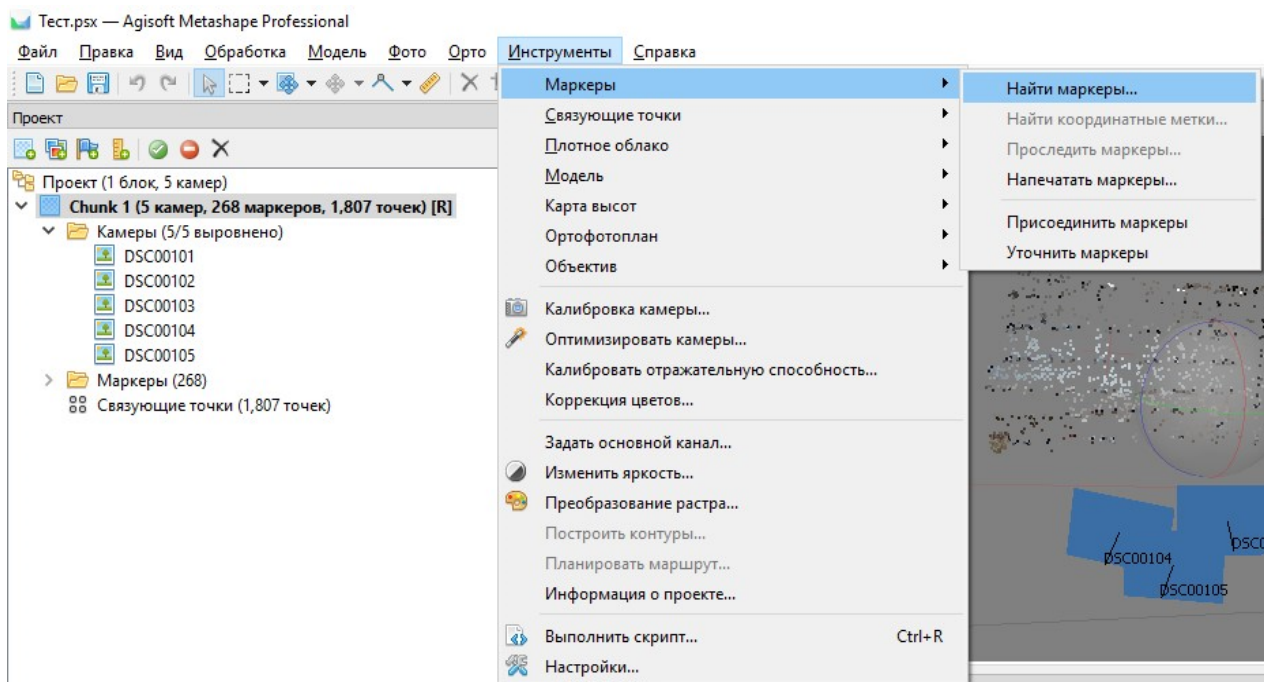


Рис. 13. Запуск автоматического распознавания маркеров

В окне параметров **Найти маркеры** установить **Тип маркеров**: Крестообразный (некодированный), **Максимальная невязка**: 2 пикселя (рис. 14).

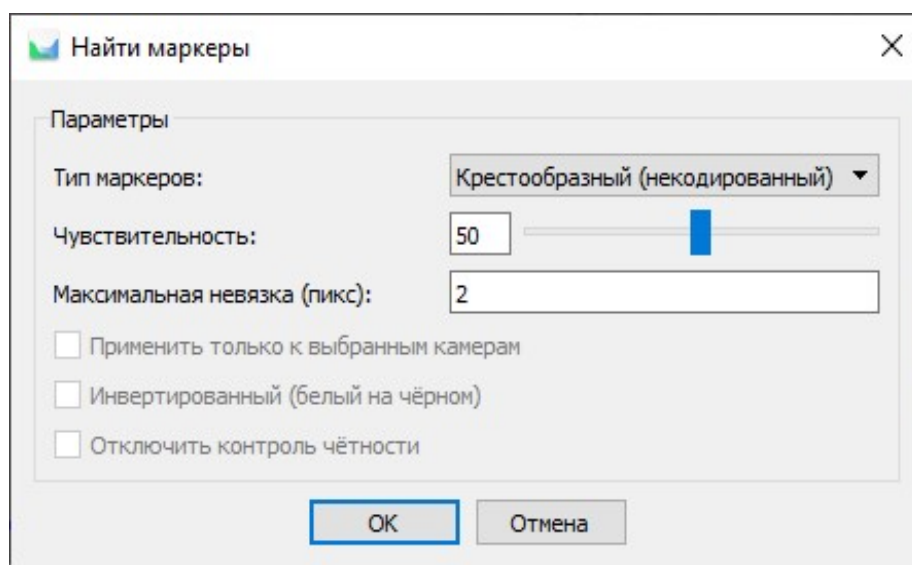


Рис. 14. Параметры поиска маркеров

Результат поиска отображается в списке маркеров на вкладке **Привязка**.

4. Визуализировать фотографию с измеренными на ней точками двойным щелчком мыши и переименовать их в соответствии с номерами из каталога координат (рис. 15).

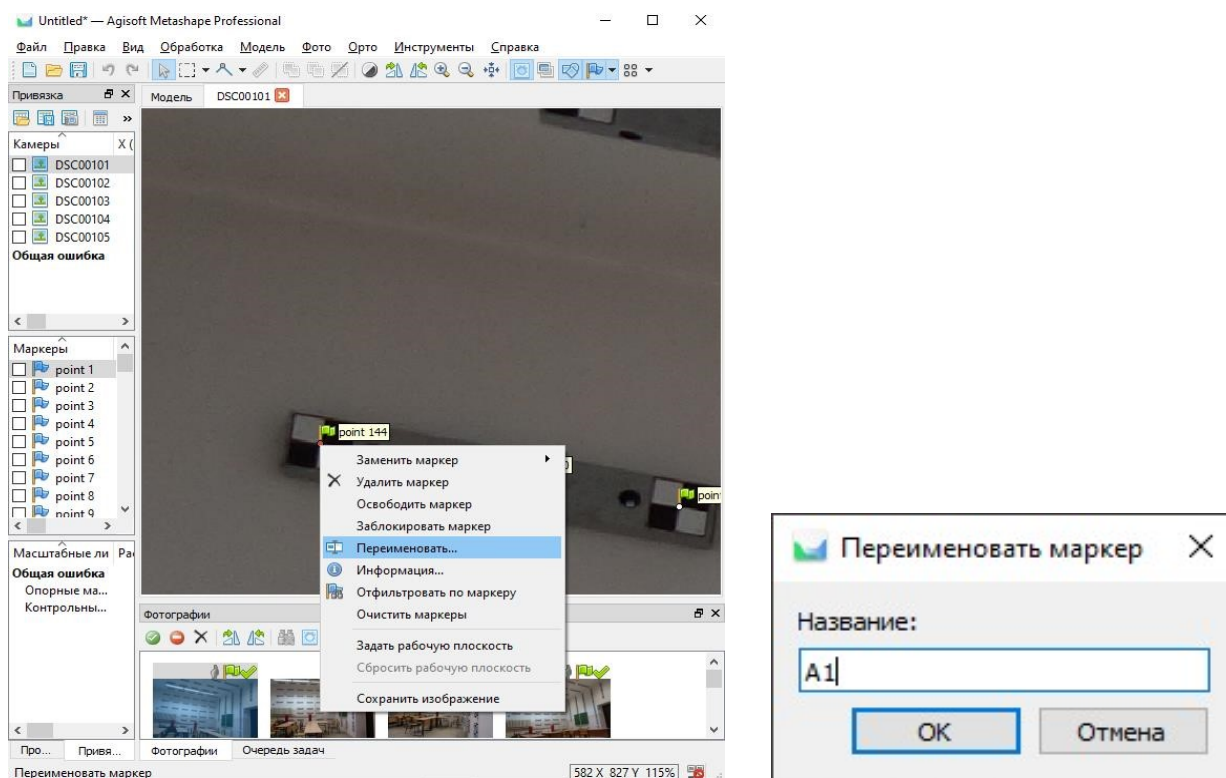


Рис. 15. Изменение названий маркеров

Для соотнесения местоположения маркеров и их номеров запустить второе окно программы Agisoft Metashape, выполнить импорт каталога координат с помощью кнопки  **Импорт** панели инструментов **Привязка** (рис. 16).

В окне **Импорт CSV** установить систему координат: **Local Coordinates (m)**, разделитель: **Пробел**, **Объединять последовательные разделители**.

Результат импорта отобразить в окне **Модель** с помощью кнопки **Показать маркеры**  (рис. 17).

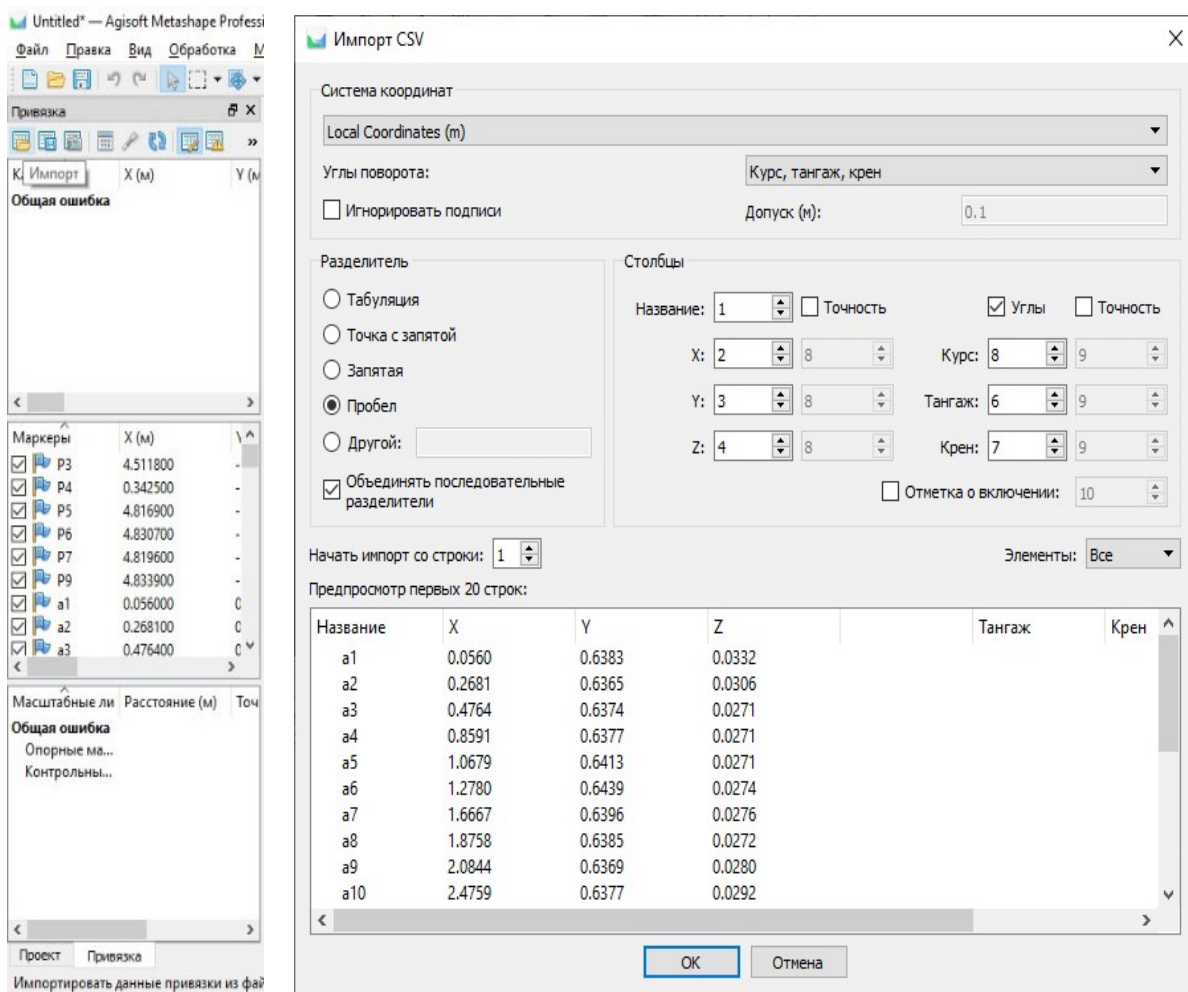


Рис. 16. Импорт координат марок тест-объекта

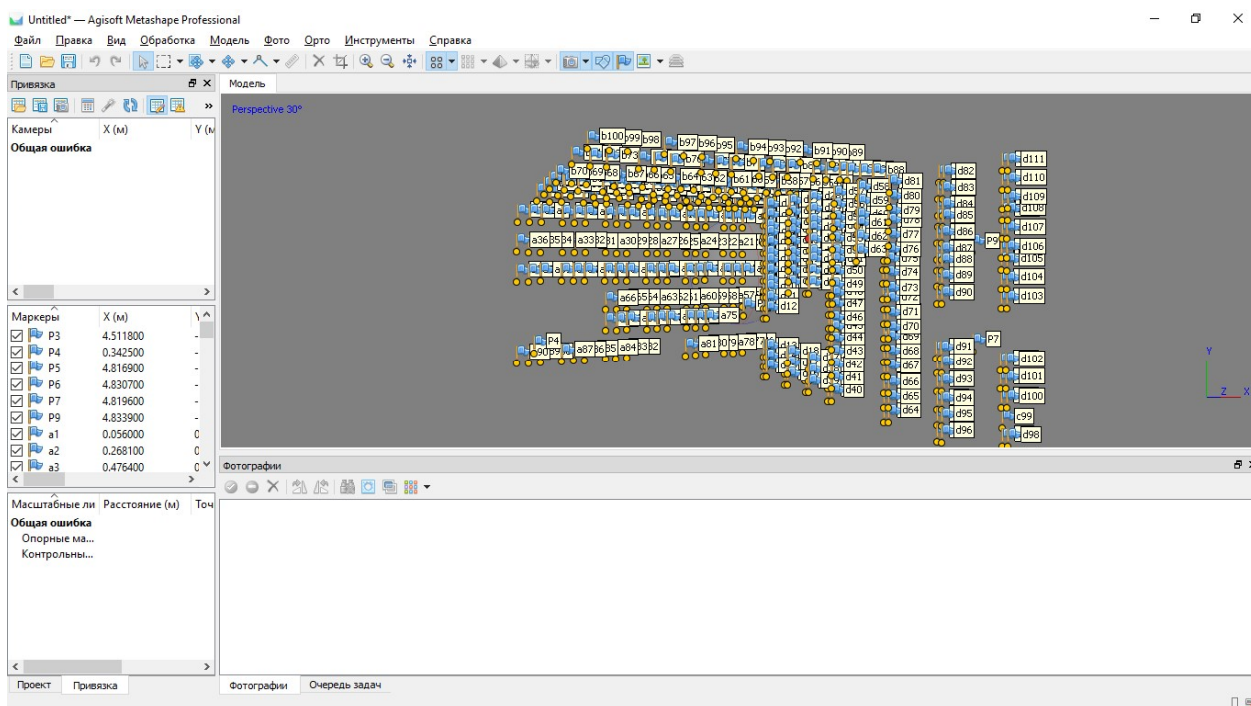


Рис. 17. Результат импорта координат марок тест-объекта

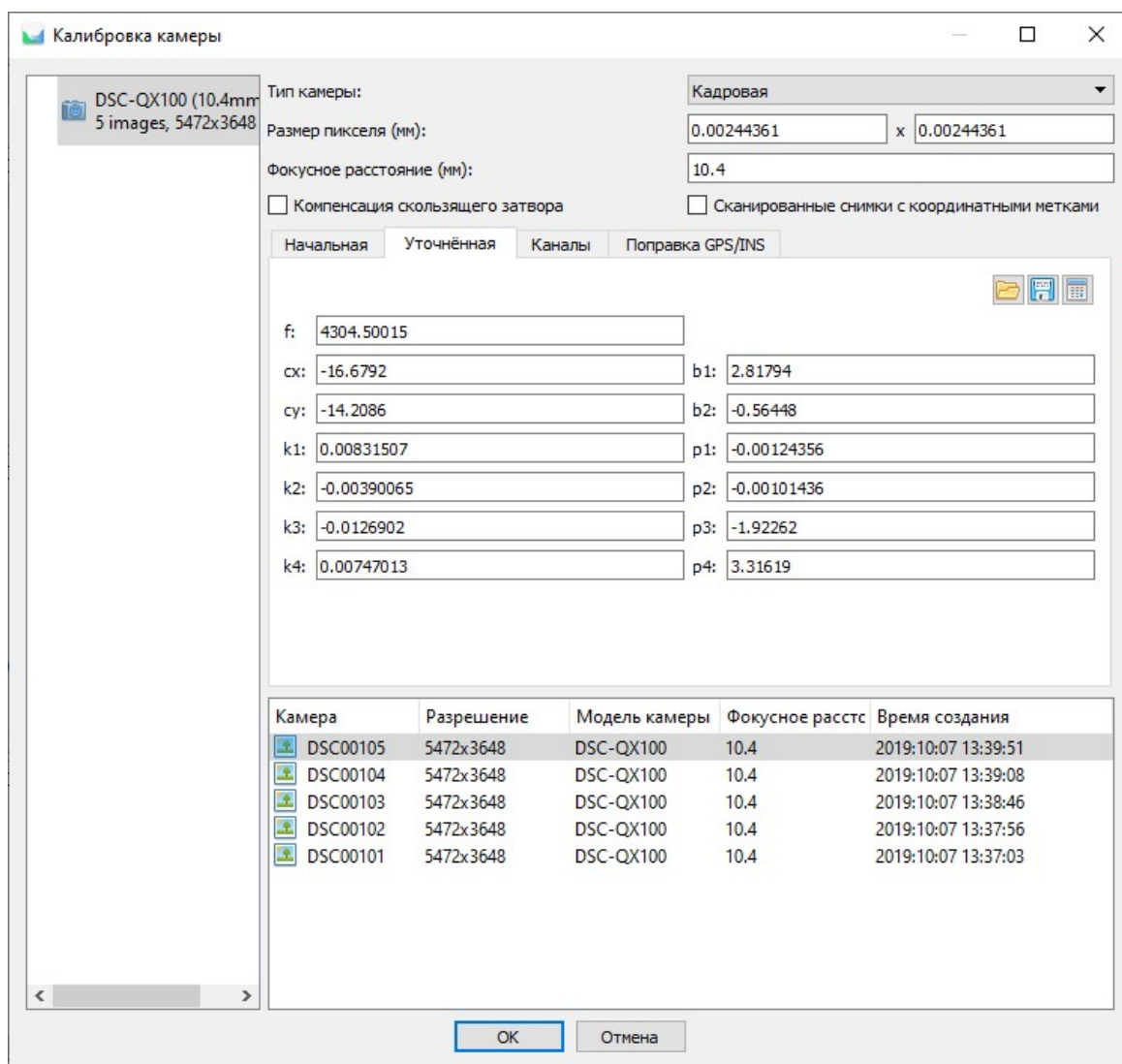
5. После того, как все измеренные точки переименованы, выполнить импорт каталога координат с помощью кнопки **Импорт** панели инструментов **Привязка**.

6. Выполнить внешнее ориентирование снимков с помощью команды **Выровнять фотографии** из меню **Обработка**. Установить параметр **Точность: Высокая**.

Включить просмотр ошибок с помощью кнопки  на панели инструментов **Привязка**. Значение средней ошибки не должно превышать 2 мм.

7. Выполнить расчет параметров калибровки с помощью команды **Оптимизировать камеры** из меню **Инструменты**. В окне параметров установить включить галочки напротив всех элементов.

8. Открыть окно **Калибровка камеры** из меню **Инструменты**, перейти на вкладку **Уточненная** и сохранить результаты калибровки (рис. 18).



Калибровка камеры

Тип камеры: Кадровая

Размер пикселя (мм): 0.00244361 x 0.00244361

Фокусное расстояние (мм): 10.4

☐ Компенсация скользящего затвора ☐ Сканированные снимки с координатными метками

Начальная Уточнённая Каналы Поправка GPS/INS

f: 4304.50015

сх: -16.6792 b1: 2.81794

су: -14.2086 b2: -0.56448

k1: 0.00831507 p1: -0.00124356

k2: -0.00390065 p2: -0.00101436

k3: -0.0126902 p3: -1.92262

k4: 0.00747013 p4: 3.31619

Камера	Разрешение	Модель камеры	Фокусное расстс	Время создания
DSC00105	5472x3648	DSC-QX100	10.4	2019:10:07 13:39:51
DSC00104	5472x3648	DSC-QX100	10.4	2019:10:07 13:39:08
DSC00103	5472x3648	DSC-QX100	10.4	2019:10:07 13:38:46
DSC00102	5472x3648	DSC-QX100	10.4	2019:10:07 13:37:56
DSC00101	5472x3648	DSC-QX100	10.4	2019:10:07 13:37:03

OK Отмена

Рис. 18. Результаты вычисления параметров калибровки камеры

9. Сохранить отчет обработки с помощью команды **Экспорт** → **Создать отчет...** из меню **Файл**.

Задание 3. Создание модели фасада здания в Agisoft Metashape.

1. Добавить фотографии объекта с помощью команды **Добавить фотографии** из меню **Обработка** (рис. 19).

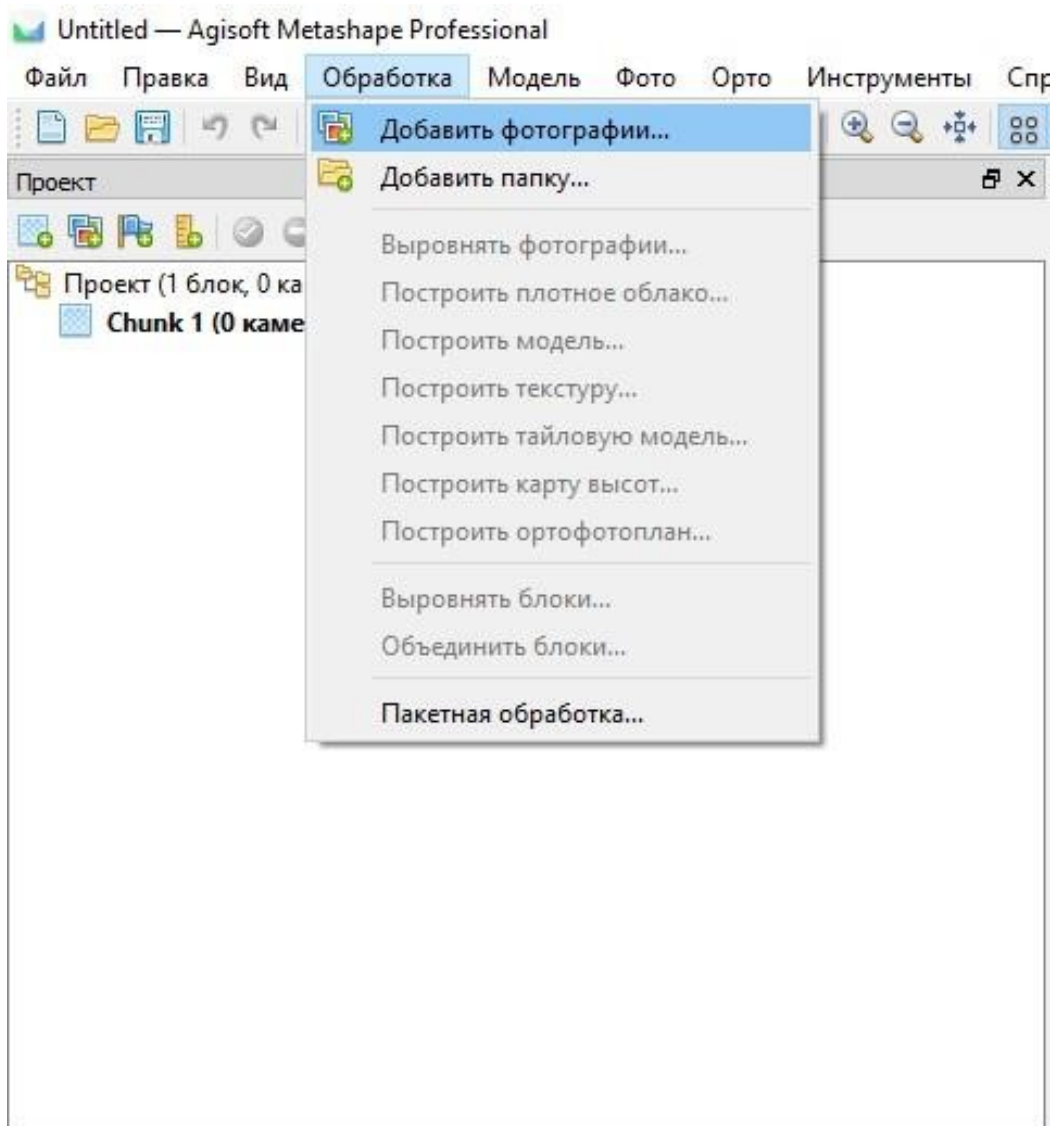


Рис. 19. Загрузка исходных снимков

2. Выполнить наложение масок для достижения наилучших результатов реконструкции (исключить фон, случайный передний план и т. д.).

Переход в режим просмотра фотографии выполняется двойным щелчком по фотографии на панели **Фотографии** или **Проект**. Для создания выделения используются инструменты  (прямоугольное выделение, выделение контура, выделение области), доступные на панели инструментов или в меню **Фото**. Выделение не будет встроено в текущую маску до тех пор, пока не применена команда  **Добавить выделение** или  **Вычесть выделение**.

3. Выполнить взаимное ориентирование снимков с помощью команды **Выровнять фотографии** из меню **Обработка** (рис. 20).

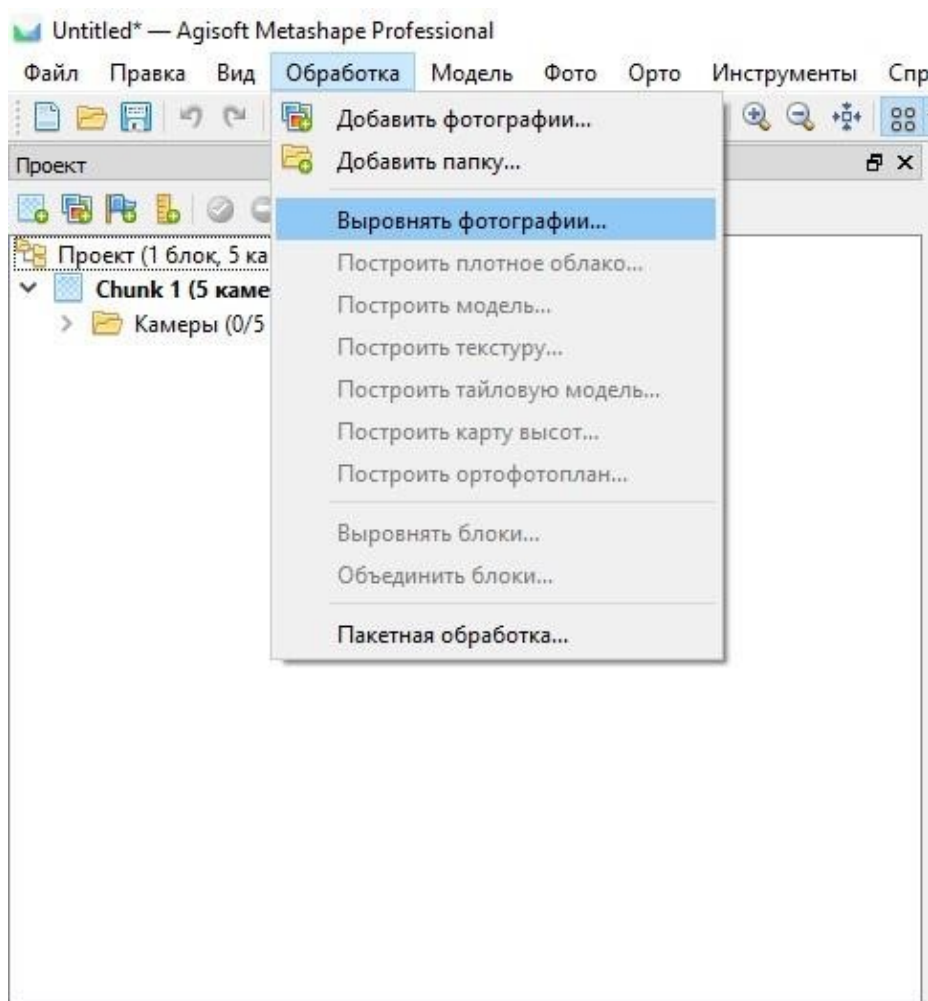


Рис. 20. Взаимное ориентирование снимков

В окне **Выровнять фотографии** установить параметры: **Точность:** высокая, **Общая преселекция** отключена (рис. 21).

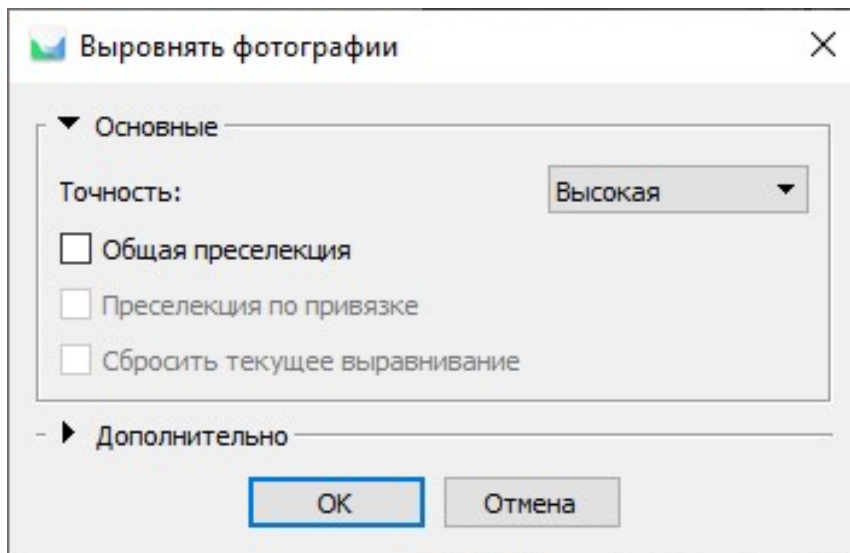


Рис. 21. Параметры ориентирования снимков

4. Загрузить вычисленные параметры калибровки камеры с помощью команды **Калибровка камеры** из меню **Инструменты**. Для этого на вкладке **Уточненная** диалогового окна **Калибровка камеры** нажать кнопку **Загрузить**.

5. Выполнить построение плотного облака точек с помощью команды **Построить плотное облако...** из меню **Обработка** (рис. 22).

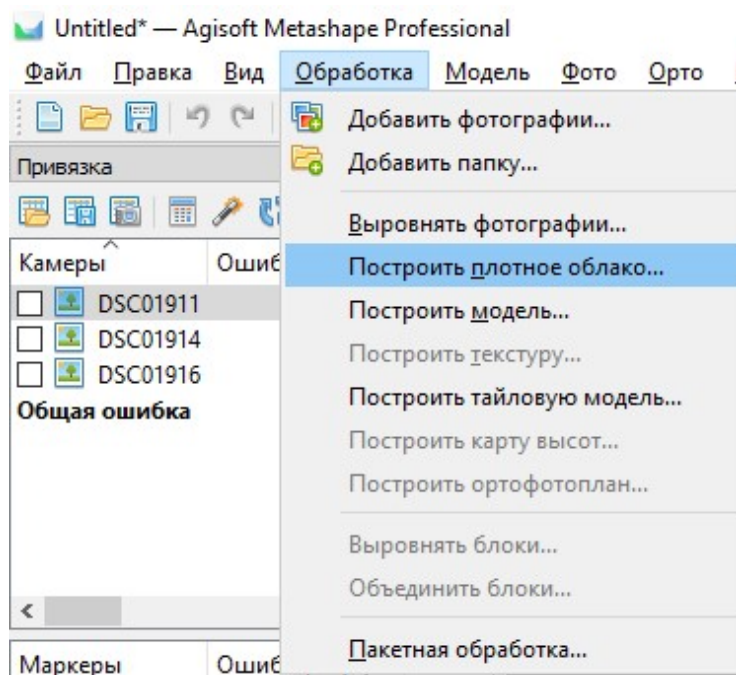


Рис. 22. Построение плотного облака

В диалоговом окне **Построить плотное облако** задать следующие значения параметров: **Качество:** очень высокое, **Фильтрация карт глубины:** агрессивная (рис. 23).

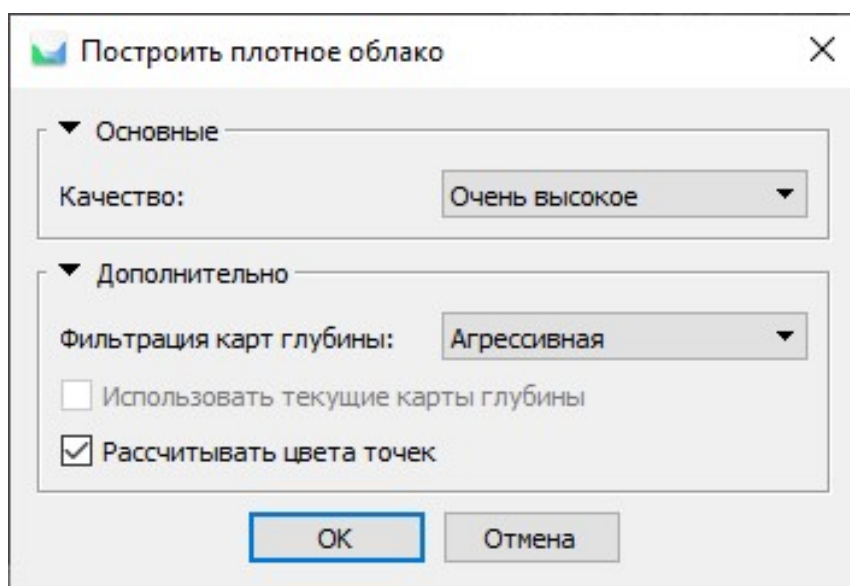


Рис. 23. Параметры построения плотного облака

6. Выполнить измерение опорных точек (маркеров) на точках, между которыми были измерены расстояния на местности с помощью команды **Добавить маркер**, вызываемой правкой кнопкой мыши (рис. 24).

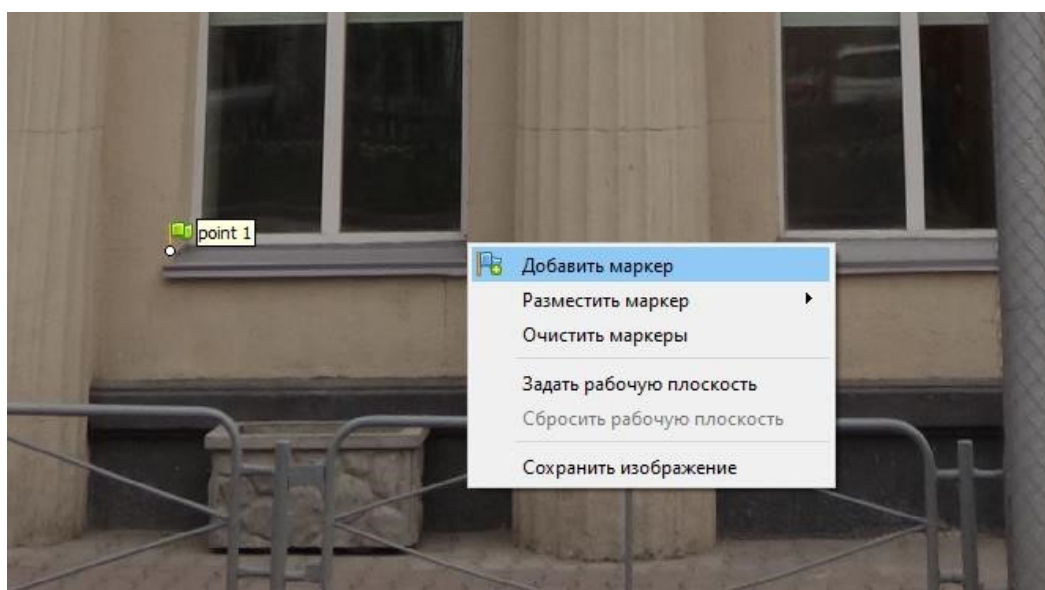


Рис. 24. Расстановка маркеров

7. Создать масштабные линейки для маркеров, между которыми известны расстояния. Порядок создания линеек:

- выделить два маркера на панели **Привязка**, используя клавишу **Ctrl**;
- выбрать команду **Создать масштабную линейку** в контекстном меню. Созданная таким образом масштабная линейка будет добавлена в список **Масштабные линейки** на панели **Привязка**;

- на панели **Привязка** нажать кнопку  **Просмотр исходных значений**; двойным нажатием левой кнопки мыши выбрать поле **Расстояние, м**, расположенное рядом с названием созданной масштабной линейки, и ввести известную длину линейки в метрах.

8. Выполнить масштабирование модели с помощью команды  **Обновить** на панели инструментов **Привязка**.

Для задания правильной ориентации модели в пространстве, использовать инструмент **Повернуть объект** (рис. 25).

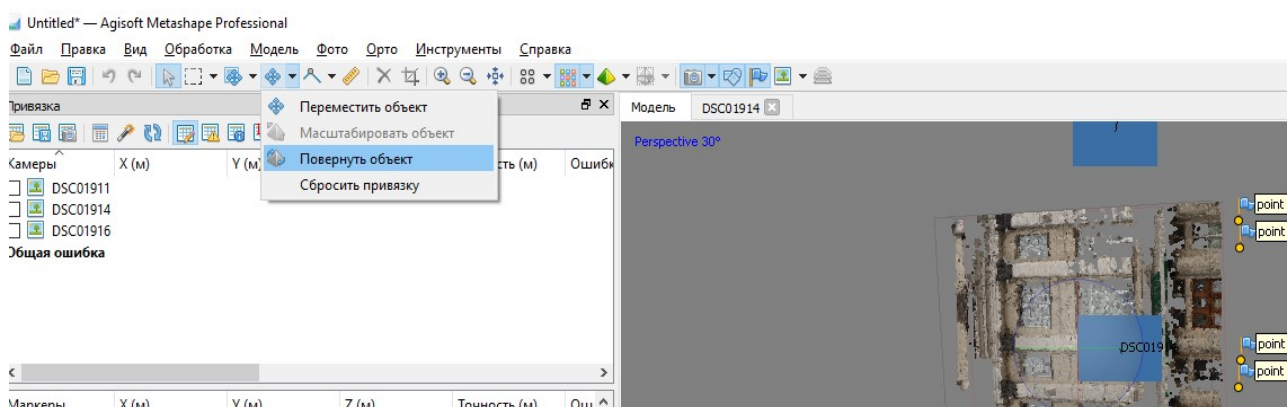


Рис. 25. Поворот модели

9. Произвести оценку точности построения модели, результаты привести в виде таблицы (табл. 2).

10. Построить полигональную модель с помощью команды **Построить модель** из меню **Обработка**.

В диалоговом окне **Построить модель** задать следующие значения параметров: **Исходные данные:** плотное облако, **Тип поверхности:** произвольный, **Количество полигонов:** высокое, **Интерполяция:** Включена (рис. 26).

Оценка точности построения модели

Название маркеров	Расстояние, м	Ошибка, м
Опорные расстояния		
Средняя ошибка		
Контрольные расстояния		
Средняя ошибка		

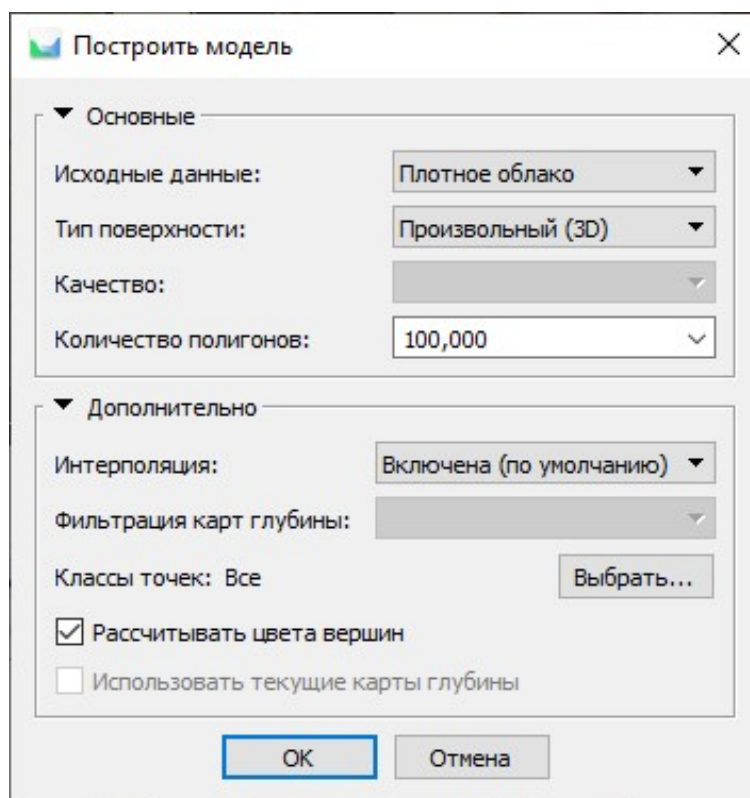


Рис. 26. Параметры построения плотной модели

11. Выполнить построение ортофотоплана с помощью команды **Построить ортофотоплан** из меню **Обработка** (рис. 27).

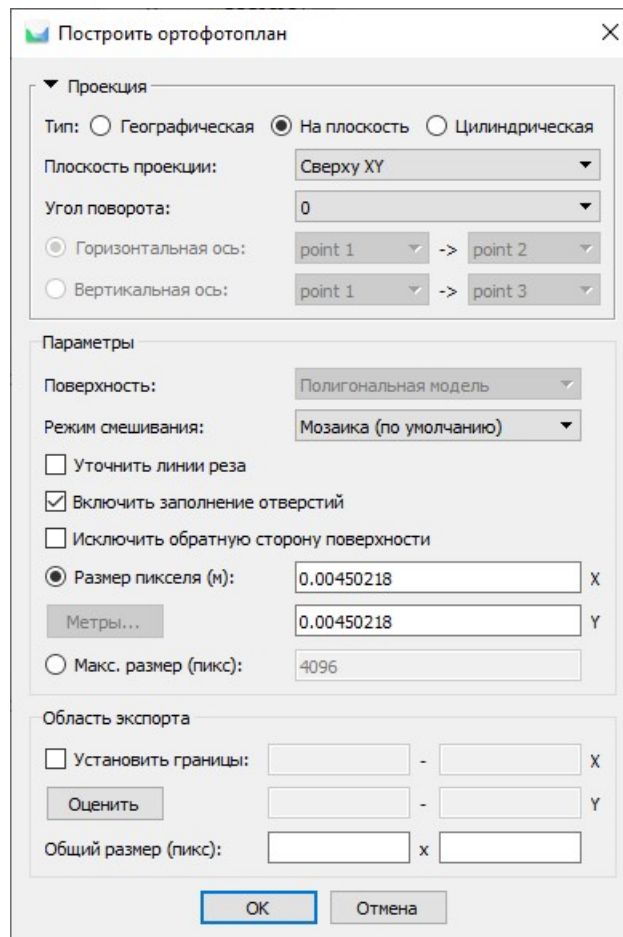


Рис. 27. Построение ортофотоплана

12. Выполнить экспорт ортофотоплана команды **Экспорт** → **Экспорт ортофотоплана...** → **Экспорт JPEG/TIFF/PNG** из меню **Файл**.

13. Сохранить отчет обработки с помощью команды **Экспорт** → **Создать отчет...** из меню **Файл**.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные параметры наземной съемки и порядок их расчета.
2. Какие основные технологические процессы включает выполнение наземной съемки?
3. Порядок обработки материалов наземной съемки в программе Agisoft Metashape.
4. Точность наземной фотограмметрической съемки для построения ортофотоплана.
5. Какие варианты тест-объектов применяются для калибровки камер?

2.2. Лабораторная работа № 2.

Создание трехмерной модели объекта

Цель работы: изучить комплекс работ, включающий выполнение наземной фотограмметрической съемки и обработку ее результатов для создания трехмерной моделей.

Трехмерная модель местности позволяет более наглядно представить объекты на местности, выполнять аналитические расчеты в трехмерном пространстве. Следующим шагом является использование построенной трехмерной модели для целей проектирования.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение Agisoft Metashape;
- 3) цифровая неметрическая камера;
- 4) объект трехмерного моделирования.

Задачи работы:

- 1) изучить особенности выполнения съемки для целей трехмерного моделирования;
- 2) выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемки в Agisoft Metashape с целью построения трехмерной метрической модели выбранного объекта.

Порядок выполнения работы

Съемка объекта для трехмерного моделирования должна удовлетворять следующим требованиям:

- фотографии должны иметь высокое разрешение (5 мегапикселей и более);
- при съемке нужно избегать плоских нетекстурированных, отражающих и прозрачных объектов;
- необходимо избегать попадания в кадр нежелательных объектов на переднем плане;
- не допускается изменения взаимного расположения объектов в процессе съемки;
- съемка блестящих объектов вне помещений должна выполняться в облачную погоду;

- снимки должны быть выполнены с большим перекрытием;
- наиболее важные детали рекомендуется снимать с трех и более ракурсов.

Для ориентирования созданной трехмерной модели в относительной системе координат, необходимо разместить в пределах сцены кодированные маркеры и измерить расстояния между ними для создания масштабных линеек.

Обработка материалов съемки для целей создания трехмерной модели включает следующие основные этапы:

- 1) загрузка снимков;
- 2) взаимное ориентирование снимков;
- 3) автоматическое распознавание кодированных марок;
- 4) измерение опорных расстояний, внешнее ориентирование модели и оценка точности;
- 5) построение плотного облака точек;
- 6) построение полигональной модели;
- 7) создание текстуры поверхности объекта.

Этапы 1)–6) выполняются аналогично действиям, описанным в задании 3 лабораторной работы № 1.

Оценка точности внешнего ориентирования выполняется путем выбора контрольных масштабных линеек, результаты которой показаны в табл. 3.

Таблица 3

Оценка точности внешнего ориентирования модели

Номера марок	Расстояние, м	Ошибка, м
Опорные расстояния		
Средняя ошибка		
Контрольные расстояния		
Средняя ошибка		

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к объекту для трехмерной съемки?
2. Схема фотографирования объекта для создания трехмерной модели.
3. Порядок создания трехмерной модели в программе Agisoft Metashape.
4. Что такое тайловая модель?
5. Точность создания трехмерных моделей.

2.3. Лабораторная работа № 3. Определение объемов фотограмметрическим методом

Цель работы: изучить комплекс работ, включающий выполнение наземной фотограмметрической съемки и обработку ее результатов для определения объемов сыпучих материалов.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение Agisoft Metashape;
- 3) цифровая неметрическая камера;
- 4) сыпучий материал известного объема.

Задачи работы:

- 1) выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемки в Agisoft Metashape для создания моделей;
- 2) выполнить расчет разницы объемов по построенным моделям.

Порядок выполнения работы

Требования к данной съемке и правила ее выполнения идентичны тем, что описаны в лабораторной работе № 2.

Съемка выполняется в два цикла, между которыми преподавателем производится извлечение определенного объема сыпучего материала.

Последовательность обработки включает следующие этапы:

- 1) загрузка снимков;
- 2) взаимное ориентирование снимков;
- 3) автоматическое распознавание кодированных марок;

- 4) измерение опорных расстояний, внешнее ориентирование модели и оценка точности;
- 5) построение плотного облака точек;
- 6) построение полигональной модели. Для расчета объема необходимо удалить в модели лишние полигоны. Для этого инструментом **Выделение** необходимо последовательно выделить и удалить лишние полигоны (клавиша **Del**);
- 7) заполнение отверстий. Объем измерен только замкнутых областей. Для создания замкнутой области используется команда **Заполнить отверстия**, доступная в подменю **Модель** меню **Инструменты**;
- 8) вычисление объема. В подменю **Модель** меню **Инструменты** выбирается команда **Измерить площадь и объем**, результат выводится в диалоговом окне.

Контрольные вопросы

1. Методы определения объемов сыпучих материалов.
2. Особенности выполнения фотограмметрической съемки для определения объемов.
3. Порядок расчета объемов в программе Agisoft Metashape.
4. Необходимая точность определения объемов сыпучих материалов.

2.4. Лабораторная работа № 4.

Применение наземной фотограмметрической съемки для анализа деформаций сооружений

Цель работы: изучить комплекс работ, включающий выполнение наземной фотограмметрической съемки и обработку ее результатов для анализа деформаций сооружений.

Используемое оборудование, материалы и программное обеспечение:

- 1) персональный компьютер;
- 2) программное обеспечение Agisoft Metashape;
- 3) цифровая неметрическая камера;
- 4) комплект деформационных марок.

Задачи работы:

- 1) выполнить наземную фотограмметрическую съемку объекта;
- 2) выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемки в Agisoft Metashape;
- 3) выполнить определение смещений между двумя циклами наблюдений.

Порядок выполнения работы

Экспериментальные работы по определению деформаций фотограмметрическим выполняются с помощью тест-объекта, для которого смоделирована деформация кирпичной кладки.

В качестве опознаваемых точек выступают кодированные марки, создаваемые в программном продукте Agisoft Metashape. Марки сгруппированы в два прямоугольных блока по 12 штук в каждом (рис. 28).

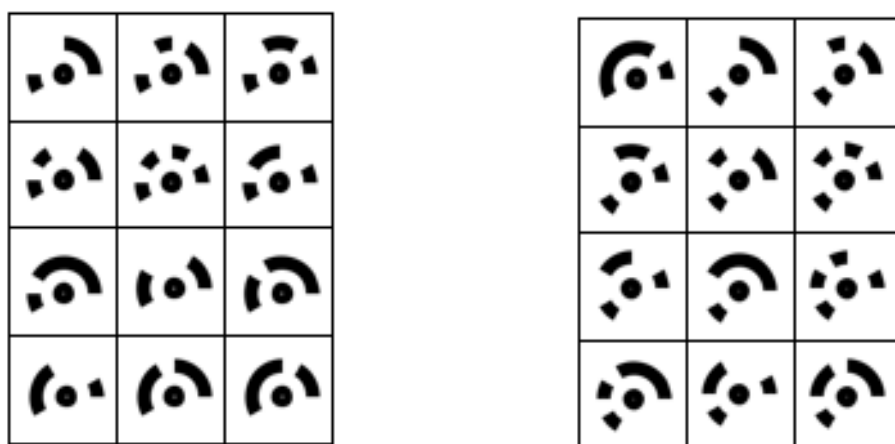


Рис. 28. Комплект марок для определения деформаций

Каждая марка является уникальной (всего их количество может составлять 999), что позволяет программе выполнять автоматическую идентификацию с точностью до десятых долей пикселя. Комплект марок располагается по разные стороны деформационного шва, трещины или места появления деформации.

Для достижения наиболее надежных результатов требуется соблюдение следующих правил:

- установить минимальное значение ISO во избежание дополнительного шума;

– установить минимальный размер диафрагмы для достижения большей глубины резкости;

Необходимо получить две серии снимков (по шесть в каждой серии), между которыми производится сдвиг одного блока относительно другого, имитирующий деформацию.

Последовательность обработки каждой серии снимков включает следующие этапы:

- 1) загрузка снимков;
- 2) взаимное ориентирование снимков;
- 3) автоматическое распознавание кодированных марок;
- 4) калибровка камеры. Калибровка камеры выполняется с целью уточнения элементов внутреннего ориентирования и параметров дисторсии объектива с помощью команды **Оптимизировать камеры**;
- 5) измерение опорных расстояний, внешнее ориентирование модели. Внешнее ориентирование модели выполняется с помощью координат кодированных меток, заданных по результатам измерения расстояний до всех остальных марок от левого нижнего маркера, служащего началом системы координат.

После внешнего ориентирования вычисленные для каждой кодированной марки координаты после первого и второго цикла наблюдений необходимо экспортировать для проведения дальнейшего анализа. Разность координат марок с одинаковыми номерами позволяет сделать вывод о величине и направлении произошедшего смещения по одной из осей координат.

Расхождения координат марок представить в виде таблицы (табл. 4).

Таблица 4

Оценка точности внешнего ориентирования модели

Номер марки	Блок марок 1			Номер марки	Блок марок 2		
	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм		ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм
1				13			
2				14			
3				15			
...				...			
12				24			

Контрольные вопросы

1. Способы наблюдений за деформациями сооружений.
2. Особенности выполнения фотограмметрической съемки для определения деформаций сооружений.
3. Порядок обработки в программе Agisoft Metashape.
4. Допустимая погрешность измерения вертикальных и горизонтальных перемещений.
5. Преимущества фотограмметрических методов при отслеживании деформаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антипов И. Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. – М. : Картцентр-Геодезиздат, 2003. – 296 с.
2. Амромин П. Д. Зеркальный тест-объект для калибровки фотокамер // Геодезия и картография. – 1991. – № 6. – С. 29–34.
3. Амромин П. Д., Широкова Т. А. Калибровка фотокамер с использованием снимков стробоскопической съемки: методические указания. – Новосибирск : НИИГАиК, 1981. – 19 с.
4. Дубиновский В. Б. Калибровка снимков. – М. : Недра, 1982. – 224 с.
5. Гук П. Д. Блочные сети из замкнутых триплетов // Тр. Новосиб. ин-та инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Аэрофототопография. – Новосибирск, НИИГАиК. – 1974. – Т. XXXIII. – С. 3–11.
6. Калибровка аэрофотоаппаратов по снимкам испытательного полигона / Л. Н. Васильев и др. // Геодезия и картография. – 1974. – № 10. – С. 40–49.
7. Лобанов А. Н. Фотограмметрия : учеб. для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 552 с.
8. Михайлов А. П., Чибуничев А. Г. Фотограмметрия: учеб. для вузов / Под общ. ред. Чибуничева А. Г. – М. : МИИГАиК, 2016. – 296 с.
9. Панкратьев Ю. Н., Пузанов Б. С., Сердюков В. М. Инженерная фотограмметрия. – Львов : Львовский университет, 1964. – 287 с.
10. Полигон для исследования систем, формирующих изображение / И. Г. Журкин и др. // Геодезия и картография. – 1994. – № 1. – С. 24–26.
11. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.

Учебное издание

Комиссаров Александр Владимирович

Чермошенцев Александр Юрьевич

НАЗЕМНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ

Редактор *Е. К. Деханова*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 28.01.2022. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 3,72. Тираж 59 экз. Заказ 5.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 8.