

КУРКОВ В.М., КИСЕЛЕВА А.С., ЧИБУНИЧЕВ А.Г.
Кафедра фотограмметрии МИИГАиК,
Г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА, ПОСТРОЕННОЙ ПО МАТЕРИАЛАМ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные по фотограмметрическим измерениям, становятся все более востребованным продуктом в инженерно-геодезических изысканиях, маркшейдерии, топографических съемках, археологии и других областях хозяйственной деятельности человека, проводимой на земле. В настоящем докладе приведены результаты оценки точности ЦМР, построенной фотограмметрическим методом на основе беспилотной аэрофото-съемки различными аэросъемочными системами. В качестве эталонных контрольных измерений использованы 40 маркированных опознаков, координаты которых определены ГНСС-технологией в режиме короткой статик; 80 высотных пикетов, полученных методом тахеометрической съемки на открытых участках населенного пункта (дороги, площадки с твердым покрытием); 650 пикетов на склоне с луговой растительностью; 350 пикетов на участке, покрытом лесом. Схема расположения опорных и контрольных точек показана на рис. 1; схема расположения контрольных высотных пикетов — на рис. 2.

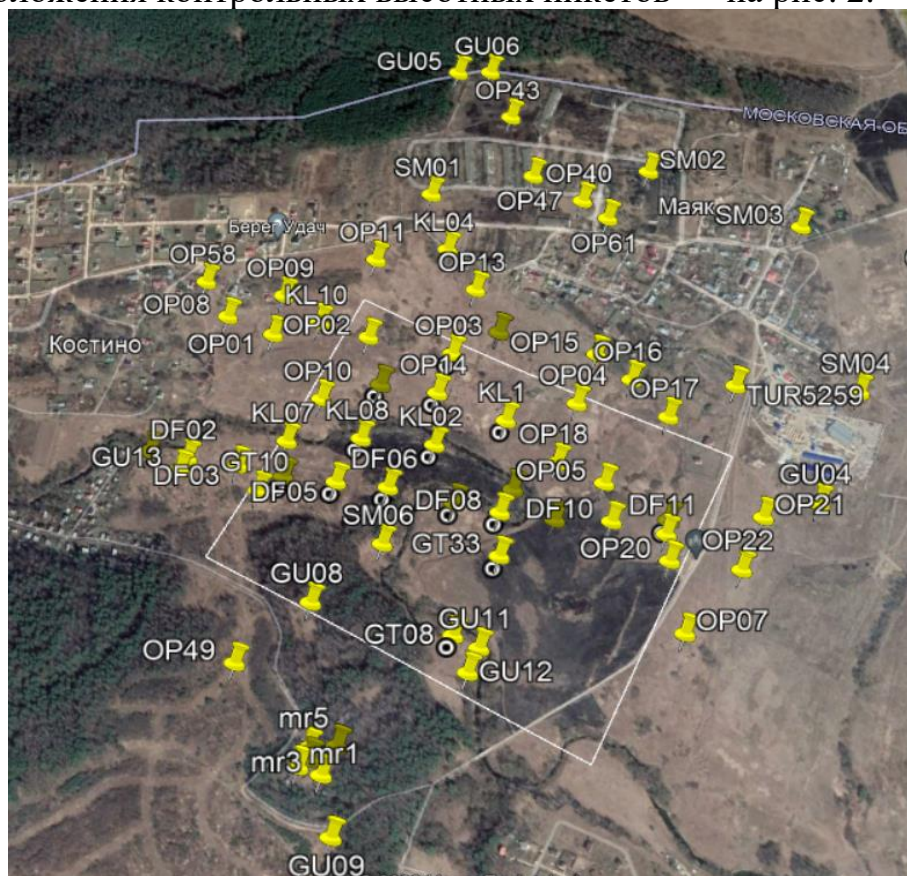


Рисунок 1. Схема расположения маркированных опорных и контрольных точек



Рисунок 2. Схема расположения высотных пикетов

Экспериментальные работы проводились с апреля по октябрь 2019 года, а также в марте 2020 года, кафедрой фотограмметрии МИИГАиК и её партнерами из различных компаний. Работы осуществлялись при выполнении сертификационных испытаний беспилотных программно-аппаратных комплексов. В летно-съёмочных и геодезических работах в период прохождения производственной практики участвовали студенты 3-го курса Геодезического факультета (ФПКиФ) по специальности «Аэрокосмические съёмки и фотограмметрия» (ГиДЗакс). Контрольный участок съёмки составил 1 кв. км. Фотограмметрическая обработка была выполнена в ЦФС PHOTOMOD, Agisoft Metashape и Pix4D Mapper. В качестве геодезического обеспечения использовались маркированные опознаки с точностью определения координат 2 см, а также точные центры проекции (в том случае, если аэросъёмочный комплекс их обеспечивал). Характеристики аэрофотосъёмки показаны в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика АФС

№ п/п	Тип БВС	Камера	ГНСС	Разрешение (GSD), см
1	Геоскан 101	Sony DSC RX-1	OEM Topcon B 111	3,8/7,8
2	Геоскан 201	Sony DSC RX-1	OEM Topcon B 111	4,0/7,9
3	Геоскан 401	Sony DSC RX-1	OEM Topcon B 111	3,8/8,1
4	Геоскан Gemini	Sony UMC-R10C	OEM Topcon B 111	3,7/7,8
5	Supercam S250F	Sony DSC-RX1RM2	Javad TRE- TRE-3N	3,2
6	DJI Phantom 4 Pro RTK	FC6310R (8,8mm)	Приемник	3,4

			GPS+BeiDou	
7	Лунь-20	PhaseOne IXU-RS1000	Javad TRE- TRE-3N	3,5/9

Пространственное разрешение на местности составило от 3 до 9 см. Результаты построения и уравнивания фототриангуляции представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка точности построения фототриангуляции

№ п/п	Тип БВС	Разрешение GSD (см)	Геодезическое обоснование	СКО план ОП/КТ (см)	СКО высота ОП/КТ (см)
1	Геоскан 101	3,8	Центры проекции	7,0 /8,3	/7,5 /9,6
2	Геоскан 201	4,0	Центры проекции	5,5 /7,1	/5,0 /8,8
3	Геоскан 401	3,8	Центры проекции	5,5 /6,1	/8,8 /9,6
4	Геоскан Gemini	3,7	Центры проекции	5,5 /7,9	/5,8 /14,7
5	Supercam S250F	3,2	Центры проекции +ОП	1,1/4,7	0,7/5,4
6	DJI Phantom 4 Pro RTK	3,4	Центры проекции +ОП	3,0/5,0	1,6/3,0
7	Лунь-20	3,5	Центры проекции +ОП	3,0/4,2	3,0/5,0

Методика построения ЦМР в виде матрицы высот в различных ЦФС примерно одинакова. Алгоритм действий таков: 1) строится плотное облако точек; 2) выполняется классификация точек на земле в автоматическом режиме с интерактивным редактированием; 3) строится ЦМР в виде матрицы высот. Оценка точности выполнялась по контрольным пикетам и представлена в табл. 3.

Таблица 3. Оценка точности матрицы высот

№ п/п	Тип БВС	Разрешение (GSD) см	СКП по пикетам (см)
1	Геоскан 101	3,8	7,0
2	Геоскан 201	4,0	9,8
3	Геоскан 401	3,8	9,8
4	Геоскан Gemini	3,7	11,5
5	Supercam S250F	3,2	9,5
6	DJI Phantom 4 Pro RTK	3,4	9,9
7	Лунь-20	3,5	8,0

В случае, если пространственное разрешение на местности принимать за единицу, то общий вывод по всем экспериментам выглядит следующим образом: 1) точность фототриангуляции обеспечивается на уровне 1-1.5 пикселя в плане и 1.5-2 пикселя по высоте; 2) точность ЦМР колеблется в пределах 1.5-2.5 пикселя. Результаты фототриангуляции и оценка точности ЦМР, приведённые к размеру пикселя на земле, показаны в табл. 4.

Таблица 4. Оценка точности относительно размера пикселя на земле

№ п/п	Тип БВС	GSD, см	Фототриангуляция		ЦМР СКО/GSD
			СКО _{xy} / GSD	СКО _z /GSD	
1	Геоскан 101	3,8	1,8	1,1	1,8
2	Геоскан 201	4,0	1,4	1,2	2,4
3	Геоскан 401	3,8	1,5	2,3	2,6
4	Геоскан Gemini	3,7	1,5	1,6	3,1
5	Supercam S250F	3,2	1,5	1,7	2,9
6	DJI Phantom 4 Pro RTK	3,4	1,5	1,9	2,9
7	Луны-20	3,5	0,8	0,8	2,3

Полученные результаты статистически достоверны и подтверждают теоретические ожидания.

С лета 2020 года до поздней осени 2021 на Заокском полигоне МИИГАиК проводились тестовые испытательные полеты совместно с компаниями Геоскан и АГМ Системы. В работе был использован комплекс Геоскан 401 Лидар. Цель исследований — определение оптимальных параметров выполнения АФС и ВЛС, выбор программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования, оценка точности полученной ЦМР.

В настоящей статье рассматривается комплекс беспилотной АФС и ВЛС, в состав которого входит БВС Геоскан 401 со съемочной камерой Sony Alpha 6000 ($F = 20,0$ мм, матрица — 24,3 Мп) и воздушным лазерным сканером (лидаром) АГМ-МС1 с инерциальной системой АГМ-ПС.М 33 и ГНСС платой U-blox f9p. Общий вид комплекса представлен на рис. 3.



Рисунок 3. Комплекс «Геоскан 401 Лидар»

Программная часть комплекса состоит из следующих программ:

- **GeoScan Planner** – программный продукт, предназначенный для проектирования и выполнения АФС и ВЛС, а также для проверки проведенных полетов.
- **AGM Posworks Web** – веб-приложение для расчета траекторий сканеров AGM. Поддерживает различные системы GNSS, системы инерциальной навигации (IMU) АГМ-ПС, а также полностью интегрировано с лазерными сканерами серии АГМ-МС.
- **AGM ScanWorks** – программный продукт для обработки данных систем мобильного и воздушного лазерного сканирования. Функционал программного обеспечения позволяет рассчитать траекторию движения транспортного средства, произвести вывод точек лазерных отражений и геопривязку аэрофотоснимков.
- **Кредо 3D Скан** – программный продукт для автоматической и интерактивной работы с облаками точек, полученных в ходе аэрофотосъемки, а также воздушного, мобильного, наземного лазерного сканирования.
- **TerraScan** - базовый модуль семейства программных продуктов Terrasolid. Предназначен для визуализации и обработки облаков трехмерных лазерных отражений — как в автоматическом, так и в ручном режиме.
- **Lidar 360** – программный продукт для обработки облака точек. Включает различные наборы инструментов для визуализации, управления, анализа и экспорта геопространственных данных, предназначенных для прикладных задач. При этом используются специализированные модули Terrain, Forestry и LiPowerline.

Для контроля полученных документов о местности были использованы планово-высотные опознаки (рис. 1) и контрольные пикеты на трёх площадках с разной подстилающей поверхностью (рис. 2).

Испытания показали, что оптимальными параметрами АФС и ВЛС для данного комплекса оказались следующие: высота $H_{\phi} = 140$ м, что обеспечивает продольное перекрытие $P_x = 80\%$ и поперечное $P_y = 40\%$. Ширина кадра при этом составляет 168 м, а ширина коридора сканирования — 300 метров. Данные

параметры АФС и ВЛС обеспечивают получение аэрофотоснимков с разрешением на местности 3 см и точностью определения расстояний лазерным дальномером 2-3 см. Данные параметры в первую очередь и определяют потенциальные метрологические характеристики документов о местности по данным АФС и ВЛС. Таким образом, точность измерения объектов местности и по снимкам, и по точкам отражения соизмерима.

Постобработка данных ВЛС и АФС заключается прежде всего в определении точных центров фотографирования для аэрофотоснимков по результатам обработки ГНСС измерений на базовой станции и бортового приемника, установленного на лидаре. Для обработки центров фотографирования использовалось специализированное программное обеспечение Magnet Tools. Обработка траекторий для воздушного сканирования выполнена в приложении AGM Posworks Web. Точность уравнивания центров проекции составила 2-3 см. Траектории ВЛС обработаны с точностью 2 см.

В программе AGM ScanWorks Base был осуществлён вывод облаков точек лазерных отражений. На рис. 4 показан вид сверху облака точек после исключения избыточных отражений.

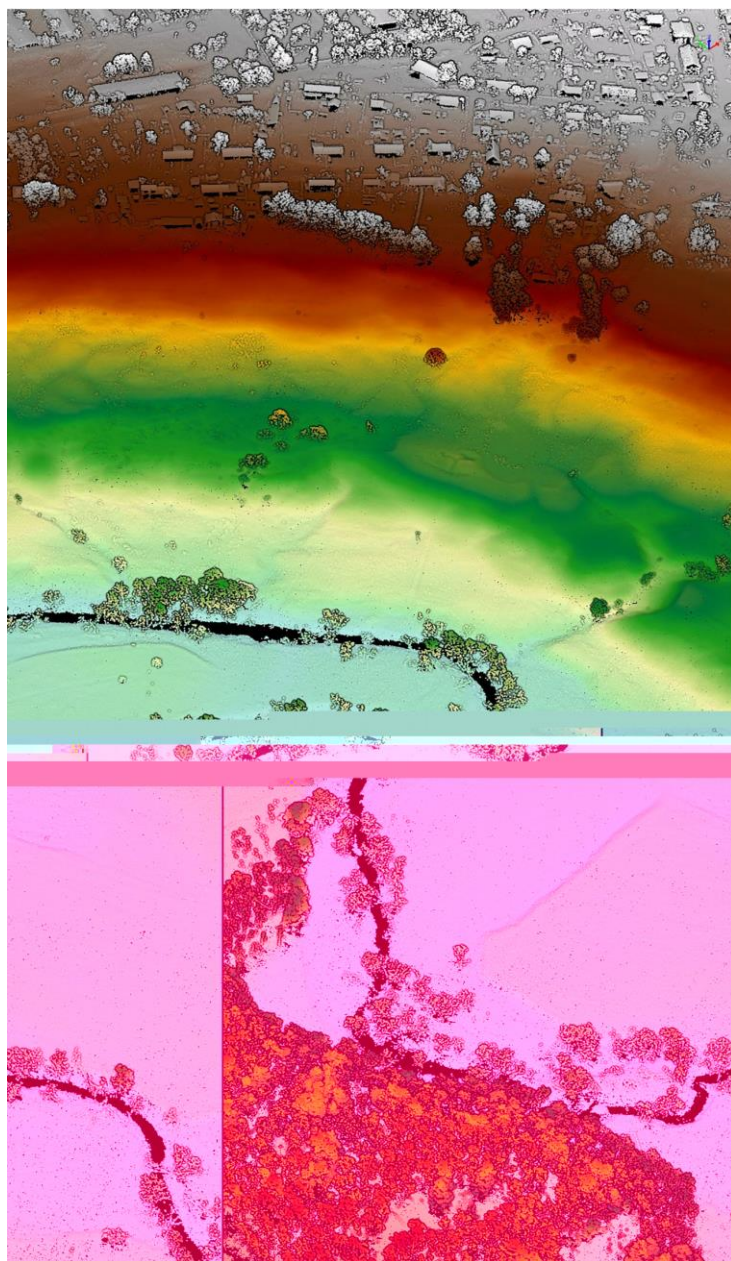


Рисунок 4. Вид сверху ТЛО

Следующий этап обработки ТЛО может быть выполнен в программах Кредо 3D Скан, Terrasolid, Lidar 360 или в иных программах, предназначенных для работы с облаками точек. Этим этапом в технологической цепочке является обработка точек лазерного отражения. Её процесс заключается в обрезке ТЛО в перекрывающихся сканах маршрутов, исключении лишних точек на поворотах БВС и избыточных ТЛО в перекрытии, устранении шумов, а также классификации точек отражения относительно объектов отражения. В нашем случае была поставлена задача выделения точек отражения от земной поверхности для построения ЦМР, что было необходимо для ортофототрансформирования и создания горизонталей как продуктов итоговой обработки.

Методика классификации в различных программных продуктах примерно одинакова и состоит из следующих действий:

- 1) в автоматическом режиме шумы устраняются и переводятся в отдельный слой;

- 2) на сравнительно небольших характерных участках блока подбираются параметры классификации (в зависимости от характера местности);
- 3) выполняется автоматическая классификация всего массива ТЛО;
- 4) завершающую фазу классификации выполняет оператор в интерактивном режиме, используя при этом различные способы отображения, поперечные профили и другие инструменты, предлагаемые программным продуктом.

В нашем случае задача построения ЦМР решалась на различных по типу местности участках с оценкой точности по наземным измерениям, выполненным методом тахеометрической съемки.

Условно район полигона был разделен на три участка: 1) населенный пункт (поселок), где определены 80 высотных пикетов на открытых от растительности участках земной поверхности; 2) склон, где измерено 650 пикетов и 3) лесной массив (лес), где измерено 350 точек.

Результаты проведенных исследований показаны на рис. 5 и в табл. 5.

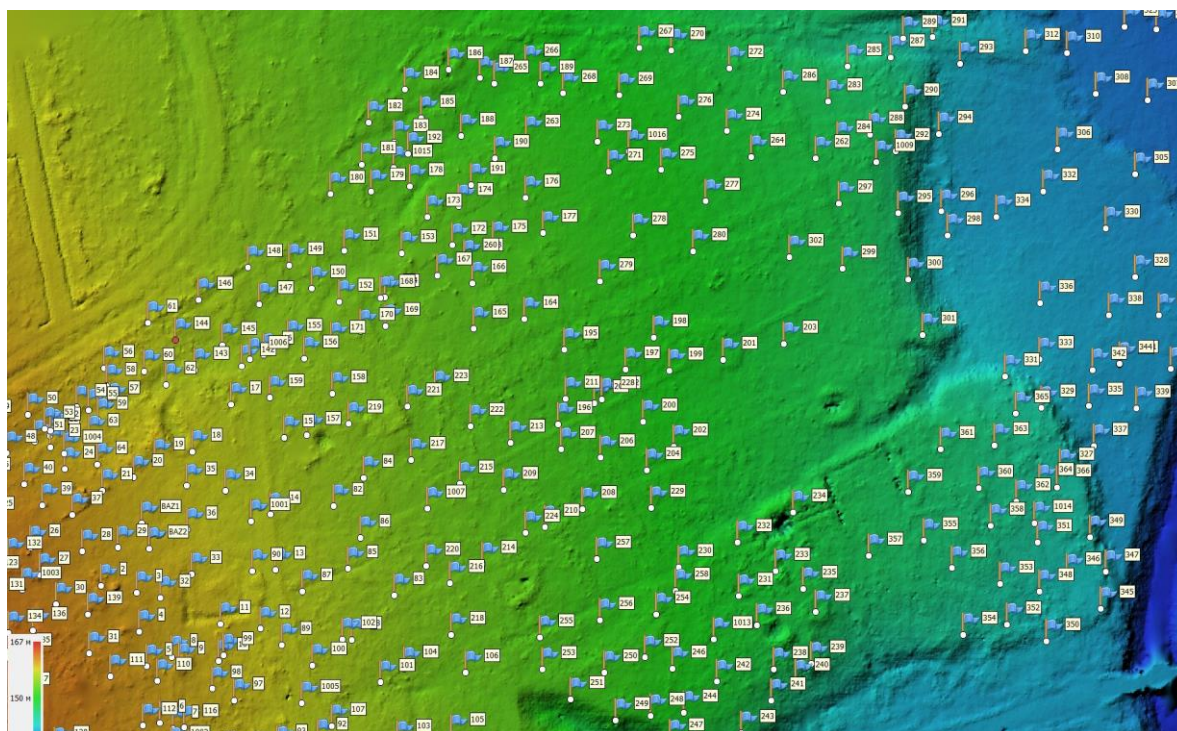


Рисунок 5. Матрица высот в лесном массиве с контрольными пикетами

Таблица 5. Оценка точности ЦМР по контрольным пикетам

№ п/п	Название	Плотность ТЛО на 1м ²	Число контрольных пикетов	Средняя погрешность по высоте (м)
1	Поселок	168	80	0,094
2	Склон	155	650	0,123
3	Лес	143	350	0,099

Полученные значения статистически достоверны и подтверждают ожидаемые оценки точности аппроксимации рельефа, построенного по результатам лазерного сканирования.

Параллельно с обработкой ТЛО была выполнена фотограмметрическая обработка АФС нескольких блоков в ЦФС «Agisoft Metashape Professional» с привязкой только по точным центрам фотографирования. В качестве контрольных точек использованы 48 маркированных опознаков. Полученные средние погрешности составляли в плане 3-4 см, а по высоте — 4-6 см, что также соответствует ожиданиям по метрологическим характеристикам данного материала.

Так как метрологические характеристики материалов АФС и ВЛС сопоставимы по точности и существует возможность импортировать данные сканирования в фотограмметрическую модель ЦФС «Agisoft Metashape Professional», то появляется возможность комбинированного использования полученных данных для создания документов о местности в различных областях (картографировании, кадастре, инженерно-геодезических изысканиях, маркшейдерии и др.).

Подведём итог. Обе технологии могут дать одинаковую точность построения ЦМР при соответствующем выборе параметров съемки. При выборе технологии построения ЦМР следует учитывать следующие обстоятельства:

- Стоимость оборудования для лазерного сканирования значительно выше по сравнению со стоимостью оборудования для аэрофотосъемки;
- Время, затраченное на лазерное сканирование, значительно больше по сравнению с аэрофотосъемкой (примерно в 3-5 раз). При этом время, затраченное на камеральные работы по обработке результатов съемок, примерно одинаково;
- Лазерное сканирование, как известно, имеет существенное преимущество перед аэрофотосъемкой в случае наличия на участке съемки растительности, линий электропередач и т.п.;
- Рекомендуется использовать сочетание обеих технологий в зависимости от условий местности и того продукта, который требуется получить в результате съемки.