

**АЭРОФОТОСЪЁМКА И ВОЗДУШНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ  
ТЕРРИТОРИИ КОЛМОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
Рыльский И.А.<sup>1</sup>, Парамонов Д.А.<sup>2</sup>, Груздев Р.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Рыльский Илья Аркадьевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник,  
Географический факультет

Региональный центр Мировой системы данных, МГУ им. М.В. Ломоносова,

<sup>2</sup>Парамонов Дмитрий Андреевич – кандидат географических наук, заместитель генерального директора,  
ООО «Проектстрой»,  
г. Москва

<sup>3</sup>Груздев Роман Викторович - кандидат геолого-минералогических наук,  
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,  
г. Чита

**Аннотация:** выполнение работ методом воздушного лазерного сканирования в труднодоступных районах Крайнего Севера является весьма сложной и актуальной задачей, имеющей большое хозяйственное значение. Съёмка значительных по площади территорий (десятки тысяч гектар и более) является типичной при освоении среднего по размерам месторождения. В то же время, требования в части детальности и точности данных, предъявляемые к материалам авиационного полёта, очень высоки. Типичным требованием является создание топографических и/или ГИС материалов масштаба 1:2000 с пространственной точностью 1 м или лучше. При этом работы ведутся в условиях короткого съёмочного сезона, что дополнительно усложняет задачу. За последние 25 лет лазерное сканирование из экспериментального метода превратилось в полностью автономное семейство методов дистанционного зондирования Земли. Сейчас эта группа методов обеспечивает получение наиболее точных и подробных наборов пространственных данных, при этом стоимость данных непрерывно падает, количество средств измерения (лазерных сканеров) непрерывно растёт.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, большие данные, аэрофотосъёмка, точки лазерных отражений, ГИС, дистанционное зондирование.

**AERIAL PHOTOGRAPHY AND AIRBORNE LASER SCANNING OF THE  
KOLMOZERSKOYE AREA  
Rylskiy I.A.<sup>1</sup>, Paramonov D.A.<sup>2</sup>, Gruzdev R.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Rylskiy Ilya Arkadievitch – PhD in Geography, senior researcher, World Data System,  
GEOGRAPHICAL FACULTY,  
MOSCOW STATE UNIVERSITY,

<sup>2</sup>Paramonov Dmitriy Andreevitch – PhD in Geography, deputy general director,  
OOO PROJECTSTROY,  
MOSCOW

<sup>3</sup>Gruzdev Roman Viktorovitch – PhD in Geology,  
INSTITUTE OF NATURAL RESOURCES, ECOLOGY AND CRYOLOGY SO RAN,  
CHITA

**Abstract:** carrying out work by the airborne laser scanning method in hard-to-reach areas of the Far North is a very complex and urgent task of great economic importance. Surveying of large areas (tens of thousands of hectares or more) is typical when developing a medium-sized deposit. At the same time, the requirements for the detail and accuracy of the data imposed on the materials of the air flight are very high. A typical requirement is the creation of topographic and/or GIS materials at a scale of 1:2000 with a spatial accuracy of 1 m or better. At the same time, the work is carried out in conditions of a short survey season, which further complicates the task. Over the past 25 years, laser scanning has evolved from an experimental method into a completely autonomous family of Earth remote sensing methods. Now this group of methods provides the most accurate and detailed sets of spatial data, while the cost of data is continuously falling, the number of measuring instruments (laser scanners) is continuously growing.

**Keywords:** laser scanning, big data, aerial photography, laser reflection points, GIS, remote sensing.

УДК 1.6.21.528.88

**Введение.** Выполнение работ методом воздушного лазерного сканирования в труднодоступных районах Крайнего Севера является весьма сложной и актуальной задачей, имеющей большое хозяйственное значение. Съёмка значительных по площади территорий (десятки тысяч гектар и более) является типичной при освоении среднего по размерам месторождения. В то же время, требования в

части детальность и точности данных, предъявляемые к материалам авиационного залета, очень высоки. Типичным требованием является создание топографических и/или ГИС материалов масштаба 1:2000 с пространственной точностью 1 м или лучше. При этом работы ведутся в условиях короткого съемочного сезона, что дополнительно усложняет задачу. Как правило, на территории также присутствует в больших количествах кустарниковая, реже – древесная растительность, что не позволяет вести картографирование рельефа с указанной выше точностью с использованием данных только лишь аэрофотосъемки. В таких условиях единственным возможным вариантом работы становится применение метода воздушного лазерного сканирования совместно (одновременно) с выполнением цифровой аэрофотосъемки в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне.

**Актуальность.** Метод воздушного лазерного сканирования, появившийся в конце 1990-х годов и широко распространившийся в мировой практике высокоточных работ в 2000-2010 годах, является наиболее совершенным, точным и производительным методом выполнения авиационных съемочных работ с целью топографического картографирования. Уточнение и улучшение методики выполнения данных работ является насущной задачей, решаемой с целью минимизации затрат и повышения полноты и точности данных. В настоящее время данный метод применяется при реализации большинства проектов картографирования на площади более 1000 га, и имеет тенденцию к расширению сферы применения.

**Объектом исследования** выступают пространственные данные лазерного сканирования, территория выполнения работ. Предметом исследования выступают изучение организации структуры и хранения данных лазерного сканирования и методика выполнения работ.

**Целью данного исследования** является разработка наиболее оптимальной технологии получения высокоточных пространственных данных с использованием метода воздушного лазерного сканирования.

**Методология данного исследования** основана на теоретических и практических методах. В исследовании использованы результаты практического применения данных методов на крупных проектах съемок на территории РФ в период с 2004 по 2024 годы.

Исследования на фактических данных, безусловно, добавляют актуальность проделанной работе и вносят определенный вклад в развитие и массовое внедрение использования и анализа данных лазерного сканирования.

#### **Физико-географические условия района работ**

В административном отношении участок изысканий расположен в Российской Федерации, на территории Мурманской области на Кольском полуострове. Участок расположен на северо-востоке от города Апатиты, на горах Большой и Малый Потчемварак в районе озера Колмозеро.

Рельеф в районе преобладает среднегорный, Хибины имеют среднюю абсолютную высоту в 1000—1100 м, с отдельными вершинами, достигающими высоты около 1200 м и более.

Горы Хибины расположены за полярным кругом, поэтому среднегодовая температура тут составляет минус 0,1 °С. Полярная ночь начинается 10 декабря и заканчивается 3 января. Полярный день длится с 31 мая по 13 июля. Лето и весна здесь прохладные и довольно поздние. Снег начинает таять в конце апреля, когда температура поднимается выше 0 °С. Безморозный период в горах продолжается не дольше 60-80 дней. Средняя летняя температура равняется +12 °С. В самые жаркие дни она может подниматься до +30 °С и выше. Обычно такая погода сопровождается грозами. Однако вслед за солнцем могут прийти резкое похолодание до минус 1-4 градусов и мокрый снег.

Характер почв Хибин определяется их положением у северной границы таёжно-лесной зоны, свойствами материнских горных пород (изверженных, щелочного химического состава) и продуктов их выветривания. Принадлежность к таёжно-лесной зоне с её достаточным, а местами – избыточным увлажнением и грубый механический состав рыхлых отложений обеспечивают формирование подзолистых альфегумусовых почв, т.е. почв с промывным типом водного режима и ярким, контрастным (дифференцированным) профилем.

#### **Выполнение аэросъемочных работ**

Съёмочные работы проводились 11, 12, 13 и 14 июня 2023 г. согласно следующим требованиям:

1. Минимальный угол Солнца над горизонтом – не ниже 15 градусов.
2. Продольное перекрытие аэрофотоснимков – 60 %;
3. Поперечное перекрытие аэрофотоснимков – 30 %;
4. Пространственное разрешение аэрофотоснимков на местности не хуже 0.10 м/пикс.;
5. Плотность облака лазерных отражений не менее 3 т/м<sup>2</sup>.

Производство работ соответствовало требованиям изготовителя для достижения требуемой точности: работа в благоприятной GPS обстановке (PDOP<4), количество одновременно наблюдаемых спутников GPS не менее 6, соблюдение необходимых угловых параметров (крен, тангаж не более 7°), расстояние от воздушного судна до базовых приемников не более 30 км, высота спутников над горизонтом более 10°, высота воздушного судна во время аэрофотосъемки в районе 600 м. Данные базовых приемников и бортового приемника, регистрировались с периодичностью 1 Гц (одно измерение в секунду). При этом

GPS-приемники регистрировали сигналы двух спутниковых систем: NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС. В процессе обработки вычислялись векторы между базовым GPS-приемником и бортовым GPS-приемником летательного аппарата для фиксированных моментов времени. Координаты траекторий получаются относительно пунктов опорной геодезической сети. В ходе выполнения съемки работа лазерного сканера и фотокамеры была синхронизирована с бортовым GPS-ГЛОНАСС приемником (геодезического класса) и инерциальной навигационной системой (IMU). Указанные устройства (далее – GPS-IMU) предназначены для высокоточного определения координат центров съемки каждого кадра и углов разворота камеры. Координаты центров фотографирования определяются как по данным совместных (бортовых и наземных) спутниковых наблюдений (частота 1 герц, точность в целом постоянна), так и инерциальной системы (частота 240 герц, точность ухудшается при отсутствии GPS-контроля, при его наличии стабильна). Угловые элементы внешнего ориентирования определяются по данным IMU. Точность получаемых материалов соответствует точности топографических планов 1:500-1:5000 и сечению рельефа 0,5-1 м (согласно требованиям к топопланам СНИП 11-02-96). Высотная точность получаемых материалов не хуже 15 см, плановая не должна превышать 35 см. Обобщенное траекторное решение создается по данным и инерциальной системы, и спутникового позиционирования с использованием фильтра Калмана, учитывающего специфику датчиков и типа движения носителя.

#### **Экспресс-обработка данных**

Массив точек лазерных отражений (ТЛО) создавался непосредственно в процессе проведения аэросъемки с использованием бортового комплекса в результате объединения данных лазерного сканера, IMU и GPS. После выполнения аэросъемочных работ производилась экспресс-обработка данных воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, включающая в себя следующие основные этапы:

- извлечение полученных данных в ходе аэросъемочных работ с бортовых накопителей информации;
- расчет и уравнивание траектории движения воздушного судна в специализированном программном обеспечении, по методу PPP;
- вывод ТЛО и расчет координат центров фотографирования с целью определения полноты покрытия съемочного участка;
- визуальный и графический контроль качества и полноты данных.

Результатом аэросъемочных работ являлись:

- Неклассифицированные точки лазерных отражений в системе координат WGS-84 в формате LAS;
- Цифровые аэрофотоснимки в формате 3fr с элементами внешнего ориентирования и координатами центров фотографирования в системе координат WGS-84;
- Траектории движения аэрофотоаппарата в системе координат WGS-84 с углами поворота камеры в системе Head/Roll/Pitch;
- Паспорт аэрофотосъемки (Приложение Ж).

Полнота и качество результатов аэросъемочных работ были проверены, получены следующие результаты контроля:

- Плотность ТЛО – не менее 3 на 1 кв. м;
- Разрешение аэроснимков не менее 10 см;
- На аэроснимках отсутствуют закрытые облаками участки;
- На аэроснимках присутствуют тени, не мешающие дешифрированию объектов;
- На аэроснимках отсутствует снежный покров.

Материалы аэрофотосъемки были направлены на контрольный просмотр в штаб Восточного военного округа.

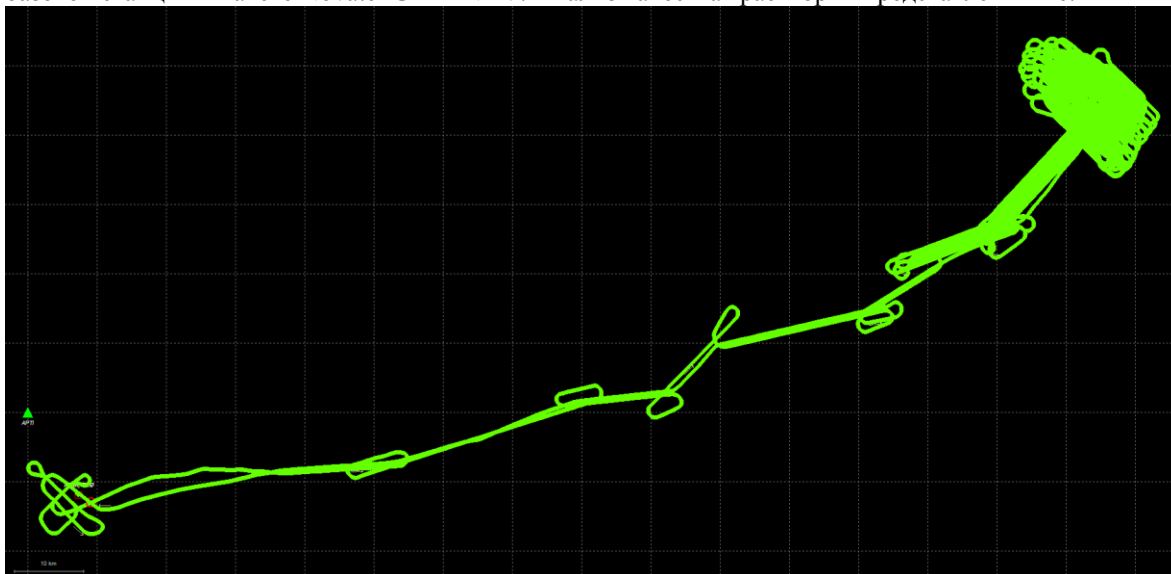
#### **Камеральная обработка данных воздушного лазерного сканирования**

Камеральные работы по обработке точек воздушного лазерного сканирования включали в себя выполнение следующих этапов:

- расчет и уравнивание траекторий движения носителя в специализированном программном обеспечении, производимый от базовых станций;
- импорт точек лазерного отражения в формат LAS;
- перевод данных в систему координат проекта;
- классификация ТЛО и создание цифровой модели рельефа;
- создание ортофотопланов местности;
- создание цифровой модели рельефа с сечением высоты 1 м в виде автоматически построенных горизонталей в формате ArcGIS.

Все работы проводились в специализированном программном обеспечении: Grafnav, AeroOffice, TerraSolid, OrtoVista. Расчет траектории производился в программных пакетах IGI AeroOffice и Novatel GRAFNAV. Траектория считалась от базовой станции Апатиты, координаты которой в системе

координат WGS84 (UTM зона 51). Расчет GPS-решения производился в дифференциальном режиме от базовой станции в пакете Novatel GRAFNAV. Анализ качества траектории представлен ниже.



Рис/ 1. Схема полетных маршрутов.

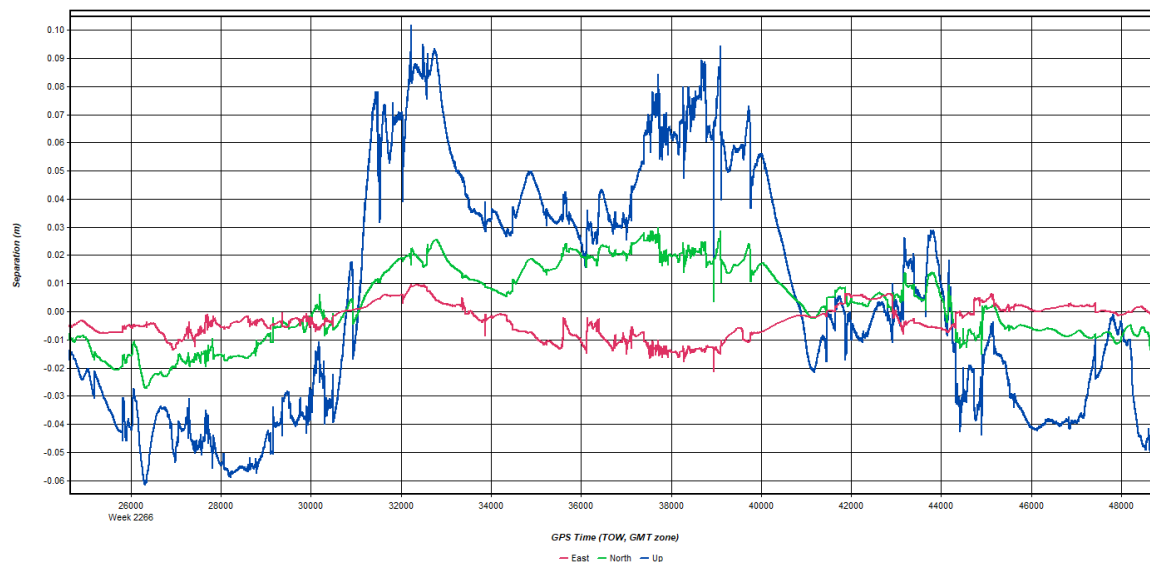


Рис. 2. График Forward/Reverse or Combined Separation для траектории.

Подавляющее число измерений по высоте имеет точность в районе 5 см, в плане – 3 см. Совмещение GPS-решения с данными инерциальной системы производилось в пакете IGI Aerooffice. Точность совмещения GPS-решения с данными инерциальной системы, составила 4 см

#### **Вывод точек лазерных отражений**

Вывод осуществлялся с использованием программного обеспечения RiProcess. При выводе используются данные навигационных решений, полученные в ПО AeroOffice – траектория в формате \*.POF.

Общая схема работы:

1. Создание проекта в RiProcess – задание системы координат, габаритов объекта, параметров расчета квадродрова
2. Ввод параметров калибровки лазерного сканера, полученных в ходе калибровочных работ – матрица SOCS-IMU
3. Ввод поправок за атмосферную коррекция – давление, температура, влажность, абсолютная высота полета в момент выполнения каждого трека
4. Ввод параметров лазерной сканирующей системы для обработки полной формы сигнала и экстракции точек лазерных отражений

5. Экстрагирование данных из исходных (сырых, без обработки формы сигнала) файлов SDF в формате SDC (данные в системе координат лазерного сканера в формате «Дальность»-«Угол отклонения»-«Время»).

6. Назначение отдельным файлам исходных данных (SDC) траекторных решений (POF) и геопозиционирование ТЛО в общеземной системе координат (геоцентрическая система координат на базе WGS84) по данным матрицы SOCS-IMU и меткам времени.

7. Создание квадродрова для визуализации данных лазерного сканирования в виде растровых файлов с динамическим разрешением (в 2Д) и в трехмерной форме в виде точек (3Д).

8. Визуальный анализ и вывод данных на экран, просмотр, профилирование, визуальная оценка качества.

9. Запуск процесса поиска обсерваций (идентичных плоских наклонных участков на областях сканирования, покрытых съемкой 2 и более раз) на всей территории работ. Анализ статистики распределения отклонений по обсервациям («двоение» облаков точек).

10. Вывод ТЛО в формате LAS в геоцентрическую систему координат WGS84, эллипсоидальные высоты для дальнейшей обработки в другом ПО.

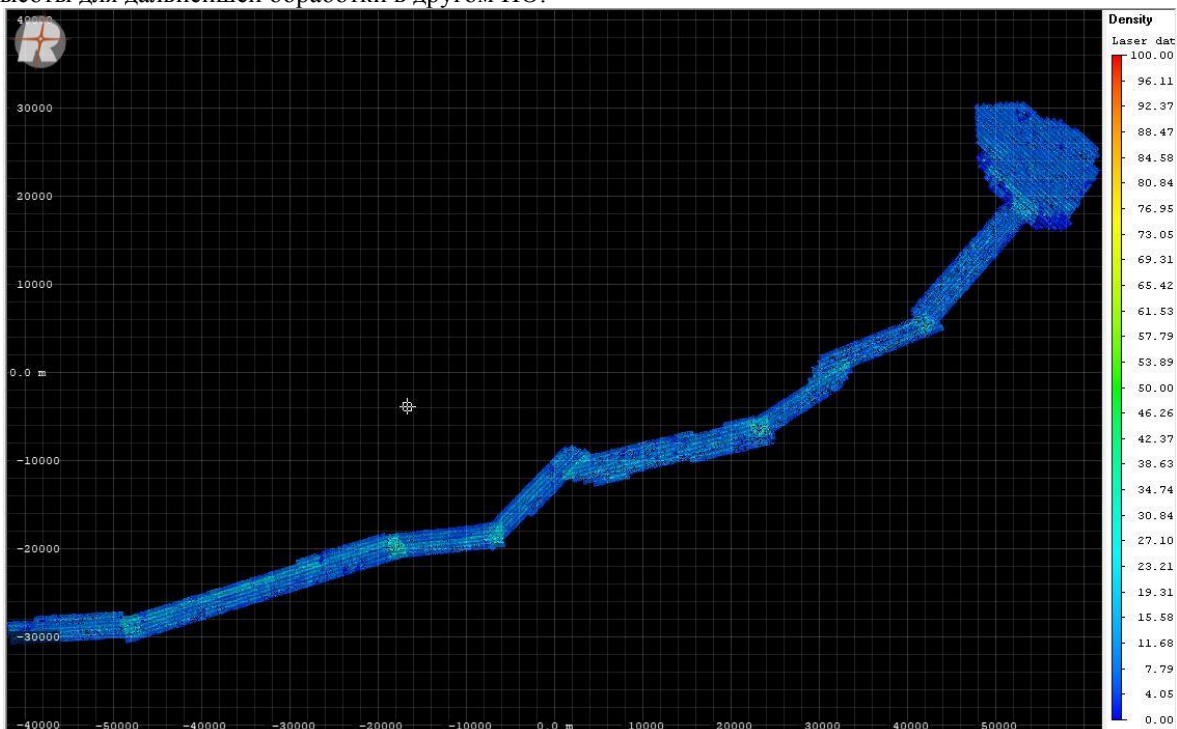


Рис. 3. Общий вид проекта на участок в Riprocess.

### Уравнивание точек лазерных отражений и импорт в формат LAS

Уравнивание точек лазерного отражения и их импорт в формат LAS осуществлялось в ПО Riegl RiProcess. Уравнивание ТЛО производилось по твердым поверхностям, таким как крыши домов, асфальтированные площадки, плотный грунт. В автоматическом режиме находились соответствующие плоскости на разных пролетах и на основании полученных невязок вычислялись поправки ориентации сканирующей системы. Расчет угловых параметров лазерной сканирующей системы производится по методу наименьших отклонений между наклонными плоскостями. Так, на каждом из сканов выбираются плоские наклонные участки, после чего производится их сличение и выбор общих наклонных участков для двух и более сканов. По методу наименьших квадратов производится подбор оптимальных угловых поправок, при которых СКО отклонений между идентичными плоскостями (по нормали) минимально. Результаты, выходящие за пределы 3х сигм не учитываются. В результате уравнивания, стандартное отклонение на твердых поверхностях между соседними пролетами составило 33 мм. Использовано 73064 обсервации.

### Калибровка камеры

Целью калибровочных процедур является уточнение позиционной точности снимков на основании совпадения ортофото с точками воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и уменьшение стыков между отдельными снимками. При этом контроль совпадения ортофото с точками производится по столбам, домам, заборами и другим характерным объектам, а контроль стыков производится по наземным объектам, таким как дороги и реки. Результатом калибровки камеры является: уточнение элементов внутреннего ориентирования (координаты главной точки, радиальная и тангенциальная дисторсии,

фокусное расстояние) и ориентации камеры относительно координатных осей инерциальной системы и ее центра (3 угловых и 3 линейных параметра). Работа со снимками начинается с их экспорта и цветовой коррекции. Экспорт отдельных фотоснимков из формата **3F RAW Image** в формат jpg осуществлялся в ПО Hasselblad Phocus 3.5.1. Так же в данном ПО производилась коррекция отдельных снимков, а именно:

- нормализация яркости изображения по полю кадра,
- повышение резкости и контрастности изображения,
- растяжка гистограммы изображения с целью повышения качества идентификации объектов;

После коррекции отдельных фотоснимков осуществлялось уточнение исходной калибровки камеры. Работа велась на калибровочном залете, состоящем из 36 снимков, располагающихся над населенной территорией. Всего было произведено два залета с курсовыми углами, близкими к перпендикуляру в направлениях: с северо-запада на юго-восток и с юго-запада на северо-восток. Уравнивание производилось в программном комплексе Bentley Microstation V8i с помощью программной надстройки TerraPhoto 013.016. На каждом снимке были определены опорные точки, равномерно распределенных по всей площади. При этом опорные точки располагались на легко опознаваемых статических наземных объектах. После расстановки всех точек уточнялись калибровочные параметры камеры (углы разворота камеры относительно инерциальной системы IMU), в результате чего был сформирован отчет.

#### **Создание цифровой модели рельефа (ЦМР)**

Создание цифровых моделей рельефа на территорию проведения работ по воздушному лазерному сканированию производилось путем автоматизированной и интерактивной обработки исходного облака точек лазерных отражений, включающей:

- автоматизированную классификацию точек отражений от объектов на классы «земля» и «не-земля» с использованием средств TerraSolid;
- интерактивную коррекцию результатов автоматизированной классификации, производившуюся операторами с использованием встроенного в программный комплекс TerraSolid инструментария;
- создание ЦМР (в том числе под кронами деревьев) в виде бесструктурной нерегулярной пространственной сети (TIN) на основе выделения ключевых точек рельефа;
- создание ЦМР в матричном виде в формате ArcINFO Grid.

#### **Создание ортофотопланов**

После построения ЦМР выполнялось ортотрансформирование фотоснимков с целью устранения искажений съемки, вызванных наличием в поле снимка участков с различной высотой, а также искажений, связанных с отклонением оси съемки от вертикали.

Исправление искажений на снимках производилось в автоматическом режиме посредством попиксельной трансформации изображения с устранением всех видов искажений за:

- рельеф;
- крен-тангаж-разворот носителя;
- дисторсию;
- смещение главной точки снимка.

Для выполнения ортофототрансформирования необходимо наличие данных об элементах внутреннего и внешнего ориентирования снимков и рельефе, полученном по результатам воздушного лазерного сканирования.

Ортотрансформирование изображений производилось в пакетном режиме с использованием программных средств TerraSolid и INPHO OrthoVista. В среде TerraSolid осуществлялась ортотрансформация исходных снимков. В среде OrthoVista – объединение их в единую геопривязанную мозаику.

Ортотрансформация производится на основании данных элементов внутреннего ориентирования камеры и её выставочных параметров (калибровка съёмочной камеры), элементов внешнего ориентирования снимков, полученных в результате позиционирования центров фотографирования относительно траектории (файл IML), и модели рельефа, представленной в виде точек воздушного лазерного сканирования. Построение ортофотопланов производится по квадратам площадью 1000×1000 м.

Проверка планового положения снимков проводилась по контрольным точкам. Средняя точность планового положения по жестким контурам, дешифрируемым на ортофотопланах, составила около 2.4 пиксела, или 24 см.

#### **Заключение**

Выполненные инженерно-геодезические изыскания с использованием технологий воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки соответствуют техническому заданию и требованиям действующих нормативных технических документов.

В результате проделанных работ были созданы:

- точки лазерных отражений в формате LAS в системе координат МСК51 зона 2;
- цветные цифровые ортофотопланы в формате ECW с разрешением 0,10 м в системе координат МСК51 зона 2;

- цифровая модель рельефа в виде нерегулярной пространственной сети (TIN) в системе координат МСК51 зона 2;
  - векторные горизонталы в формате AutoCAD (DWG), с сечением рельефа 0,5 м;
  - цифровая модель рельефа в матричной форме (ArcINFO Grid) в системе координат МСК51 зона 2.
- Точность полученных материалов удовлетворяет требованиям СНиП 11-02-96 для топографических планов 1:500-1:5000 с сечением рельефа 0,5-1 м.

#### *Список литературы/References*

1. *Груздев Р.В., Рыльский И.А.*, Применение воздушных лидаров в высокоточной гравиметрии (на примере Восточного Забайкалья). Вестник Забайкальского Государственного Университета. Чита, 2022. №2, Т.28, 6-18
2. *Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С.* Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. С. 480.
3. *Рыльский И.А., Парамонов Д.А., Кожухарь А.Ю.1, Терская А.И.* Создание виртуальной модели района Большой Сочи – Красная Поляна – плато Лаго-наки. Интеркарто, 2023. №29, С. 589-606.
4. *Giuliani, G., Chatenoux B., De Bona A.*: Building an Earth Observation Data Cube: lessons learned from the Swiss Data Cube (SDC) on generating Analysis Ready Data (ARD). Big Earth Data 1-2 (1), 100–117 (2017).
5. *Huang L. et al.* Octsqueeze: Octree-structured entropy model for lidar compression //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2020. – С. 1313-1323.
6. *Janowski A., Szulwic J., Tysiac P.* Airborne and mobile laser scanning in measurements of sea cliffs on the southern Baltic. 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2015. 114-124
7. *Octree homepage*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Octree> Last accessed 16 Jan 2020.
8. *Rieger P.* Range ambiguity resolution technique applying pulse-position modulation in time-of-flight scanning lidar applications. Optical engineering, 2014. 53(6), 061614-061614.
9. RIEGL 1560ii homepage, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/68/>. Last accessed 13 Jul 2020.
10. RIEGL VMX RAIL homepage, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scanner/67/> Last accessed 19 May 2020.
11. RIEGL VZ6000 homepage, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/33/> Last accessed 10 Jul 2020.
12. *Su Y.T., Bethel J., Hu S.* Octree-based segmentation for terrestrial LiDAR point cloud data in industrial applications //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Т. 113. – С. 59-74.
13. *Truong-Hong L., Laefer D.F.* Octree-based, automatic building facade generation from LiDAR data //Computer-Aided Design. – 2014. – Т. 53. – С. 46-61.
14. *Vo A.V. et al.* Octree-based region growing for point cloud segmentation //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Т. 104. – С. 88-100.
15. *Wang M., Tseng Y.* Incremental segmentation of lidar point clouds with an octree-structured voxel space. The Photogrammetric record 26 (133), 32–57 (2011).
16. *Yang M.Z.X.L. et al.* Improved octree filtering algorithm of airborne LiDAR data in forest environment //Journal of Beijing Forestry University. – 2018. – Т. 40. – №. 11. – С. 102-111.