

УДК: 912.4

DOI: 10.35595/2414-9179-2024-1-30-617-631

И. А. Рыльский¹, Д. А. Парамонов², М. В. Грибок³, Р. В. Груздев⁴

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАЛЕТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИЯХ С ГОРНЫМ РЕЛЬЕФОМ

АННОТАЦИЯ

Выполнение лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки нуждается в тщательном планировании для обеспечения выполнения требований проекта, недопущения пропусков в данных и минимизации летного времени. Любая ошибка такого рода выливается в дополнительные затраты, измеряемые десятками процентов от возможной себестоимости проекта. Тем не менее, современные программные средства планирования залета показывают недостаточный уровень качества планирования по причине невозможности адекватно оценить расстояние от сенсоров на маршрутах до фактической поверхности рельефа. Максимально данный эффект проявляется в горных районах с сильно расчлененным рельефом. При использовании современных лазерных сканеров, работающих в режиме одновременного нахождения нескольких лазерных импульсов в воздухе, подобная недоработка может приводить и приводит к появлению пропусков в съемке, не покрытых данными. Вручную данная задача не может быть решена эффективно, что требует создания методик автоматизированного вычисления качества покрытия данными для всех возможных вариантов конфигураций лазерного сканирующего оборудования (зависит от фактической дальности прибора при выбранной частоте съемки). В данной работе описывается методика решения данной проблемы с использованием нового программного решения на базе ArcView, осуществляющего проверку подготовленного полетного плана на соответствие техническим условиям выполнения работ и полноту покрытия. Приведен пример фактически выполненного проекта на территории с высокогорным рельефом, даны примеры неприемлемых вариантов выполнения работ, обнаруженных описываемым методом. Приведенная методика может быть использована с любым видом существующих лазерных сканирующих систем и/или авиационных камер при условии предварительного ввода их возможных режимов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэрофотосъемка, 3Д-точки, лазерное сканирование, горный рельеф, цифровая модель рельефа

-
- ¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: rilskiy@mail.ru
- ² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: paramonovwork@mail.ru
- ³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: gribok.marina@gmail.com
- ⁴ Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения РАН, ул. Недорезова, д. 16а, Чита, Россия, 672002, *e-mail*: rogruzdev@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Dmitriy A. Paramonov², Marina V. Gribok³, Roman V. Gruzdev⁴

METHODOLOGY FOR PLANNING A FLIGHT WHEN CARRYING OUT AIR LASER SCANNING IN TERRITORIES WITH MOUNTAINOUS RELIEF

ABSTRACT

Laser scanning and digital aerial photography require careful planning to ensure project requirements are met, data gaps are avoided and flight time is minimized. Any error of this kind results in additional costs, measured in tens of percent of the possible cost of the project. However, modern flight planning software shows an insufficient level of planning quality due to the inability to adequately estimate the distance from the sensors on the routes to the actual terrain surface. This effect is most pronounced in mountainous areas with highly dissected terrain. When using modern laser scanners operating in the mode of simultaneous presence of several laser pulses in the air, such a defect can and does lead to the appearance of gaps in the survey that are not covered by data. This task cannot be solved effectively manually, which requires the creation of methods for automated calculation of the quality of data coverage for all possible configurations of laser scanning equipment (depending on the actual range of the device at the selected shooting frequency). This paper describes a method for solving this problem using a new software solution based on ArcView, which checks the prepared flight plan for compliance with the technical conditions of the work and completeness of coverage. An example of an actually completed project in a territory with high mountainous terrain is given, as well as the examples of unacceptable options for performing work discovered by the described method. The presented technique can be used with any type of existing laser scanning systems and/or aircraft cameras, provided that their possible modes are first entered.

KEYWORDS: aerial photography, 3D points, laser scanning, mountainous terrain, digital elevation model

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы планирования залетов на территориях с сильно расчлененным рельефом

Воздушное лазерное сканирование — наиболее точный и совершенный метод дистанционного зондирования, применяемый на сегодняшний день для широкого круга задач. Появившись в конце 1990-х гг., метод прочно занял нишу наиболее детальных съемок под м-б 1: 2 000–1: 500 и является практически незаменимым при работах на территориях, полностью или частично покрытых растительностью. Метод основан на определении координат точки отражения лазерного луча по дальности (определяется по времени прохождения сигнала от лазерного излучателя до объекта и обратно, умноженному на скорость света в воздухе) и элементам внешнего ориентирования, которые определяются аппаратным способом с использованием приемников ГНСС и беспилотных инерциальных систем высокой точности (точность определения угловых элементов — до 0,003° и лучше).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* rilskiy@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* paramonovwork@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, *e-mail:* gribok.marina@gmail.com

⁴ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 16a, Nedorezova str., Chita, 672002, Russia, *e-mail:* rogruzdev@mail.ru

Вышеописанные аппаратные средства лазерного сканирования и современные программные решения для ортотрансформирования фотоснимков и позиционирования точек лазерных отражений позволяют работать в сколь угодно сложных условиях рельефа даже без применения гиостабилизированных платформ. В настоящее время подавляющая часть аэросъемочных работ ведется методом воздушного лазерного сканирования, при этом одновременно со сканированием выполняется цифровая аэрофотосъемка в видимом и/или ближнем инфракрасном диапазонах. Требования технических заданий обычно строятся по критериям «число точек лазерных отражений на 1 м²» и «размер пиксела на поверхности рельефа».

Лазерные сканеры за прошедшие 25 лет увеличили скорость работы в 800 раз — от 5 тыс. точек в секунду в 2000 г. до 4 млн точек в секунду в 2024 г., разрешение матриц цифровых камер возросло с 6 до почти 420 мегапикселей. Это позволяет получать превосходные результаты с высокой подробностью, производительностью и точностью. Однако средства планирования аэросъемочного залета, которые применялись в конце 1990-х гг., практически не претерпели изменений. Повышение качества результатов съемки и надежности планирования залета требует изменения методики построения полетных съемочных планов.

Существующие подходы и их недостатки

Существующее программное обеспечение для планирования аэросъемочных залетов пилотируемой авиации (когда работа ведется с высот от 300 до 5 000 м) позволяет оценить фактическую полосу охвата съемки с использованием подгружаемых цифровых моделей рельефа. В качестве таковых обычно используются ЦМР открытого пользования — SRTM, AsterDEM, AW3D30 (иногда называемый ALOS DEM). Данные модели хорошо подходят для выполнения залетов с большой высоты, но не слишком пригодны для планирования полетов беспилотных летательных аппаратов (БВС). Общей чертой недостатков планирования полетов является то, что все известные программы для планирования при расчете элементов изображения оперируют высотой оси съемки над рельефом, описанным данной ЦМР, из которой строится оценка высоты полета для фотокамеры (в момент открытия затвора) и оценка полосы охвата (по ширине) как фотоснимков, так и лазерного сканирования. Важнейшим недостатком подобного подхода является отсутствие сведений об удаленности участков местности до сенсоров в момент съемки.

При полете по равнинной местности различия в дистанции до поверхности присутствуют, но не являются существенными. Так, при работе с сенсорами (неважно, фотографическими или лазерными) с углом охвата в 60° (типичное значение для крупноформатных универсальных устройств) и поперечном перекрытии в 30 % [Руководство..., 1986, 1989] различия в удаленности точек на краю полосы съемки и непосредственно невелики, и обычно не превышают 7–12 %. Напротив, при полете в горах высота по нормали от сенсора до поверхности может очень сильно отличаться от минимальных и максимальных значений удаления точек поверхности от сенсора. Рассмотрим на примере, приведенном на рис. 1.

В условиях равнинного рельефа (рис. 1А) при высоте полета над рельефом в 1 000 м производится съемка с двух параллельных треков (треки 1 и 2, мы видим их как бы «с торца»). В работе используется камера с углом охвата 60° и фокусным расстоянием 1 000 пикселей, что дает нам размер одного пиксела в 10 см при съемке в надири. Нетрудно видеть, что максимальная дистанция между сенсором и рельефом в пределах одного трека колеблется от 1 000 м (в надири) до 1 150 м (на краю полосы съемки). Это означает, что и детальность съемки на краю будет уже не 10, а 11,5 см, что на 15 % хуже ожидаемого результата. С учетом 30 % перекрытия между соседними проходами, реальная макси-

мальная дальность будет меньше — 1 077 м, т. е. 10,8 см, или 7,7 %. В целом, хотя отличия и есть, они не носят характер кардинальных.

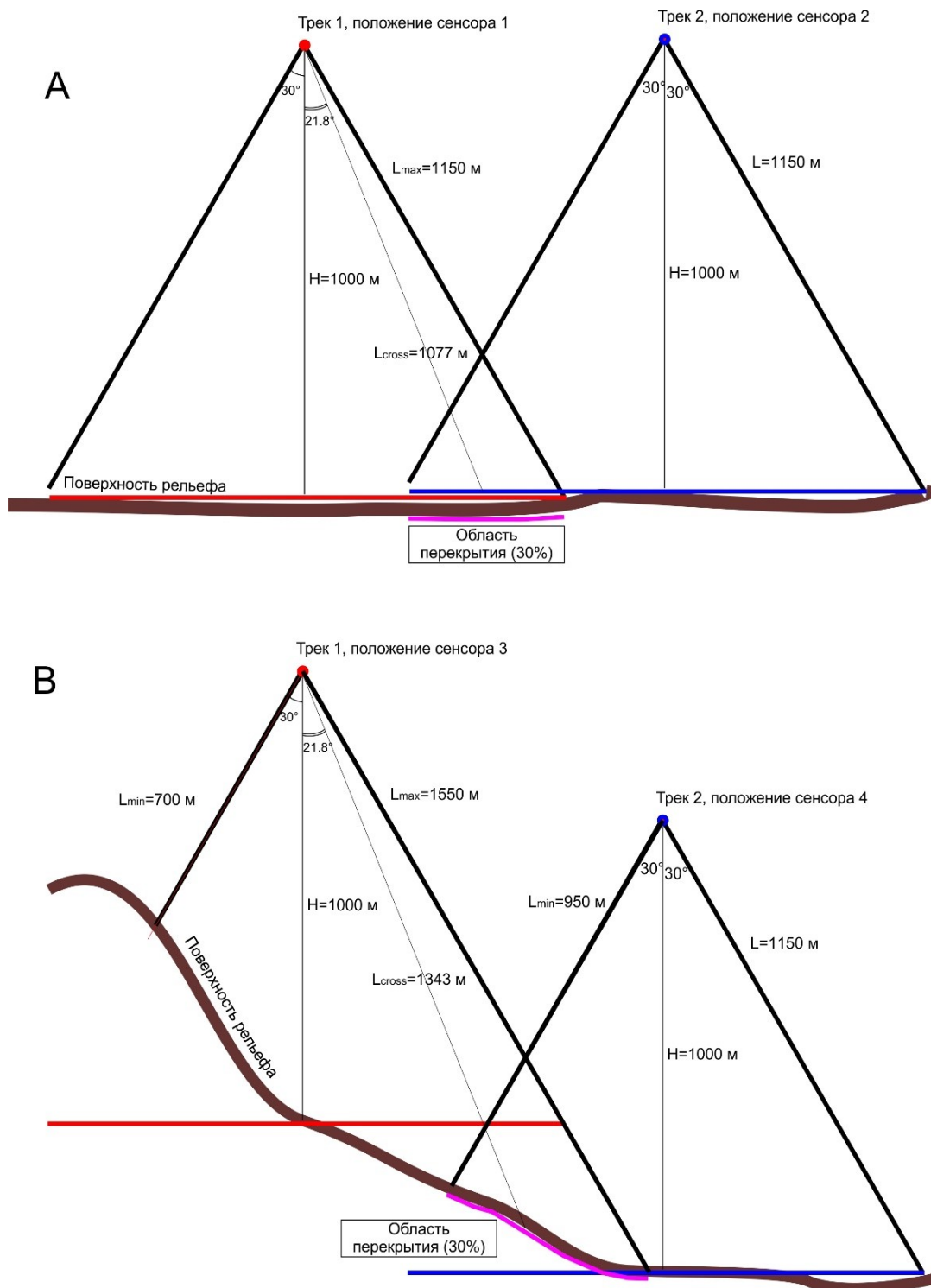


Рис. 1. Изменения минимальной и максимальной дистанции от сенсоров до поверхности в условиях равнинной (A) и горной (B) местности
Fig. 1. Changes in the minimum and maximum distance from sensors to the surface in flat (A) and mountainous (B) terrain

Все меняется в условиях горной местности, особенно в тех случаях, когда перепад высот на съемочном маршруте начинает составлять более чем 20 % от номинальной высоты над рельефом [Lague et al., 2013]. Сохраняя (номинально) ту же высоту над рельефом в надирной точке и обеспечивая то же поперечное перекрытие на местности (30 %), мы видим, что в условиях пологих склонов (около 20°, рис. 1В, положение сенсора 4) диапазон дальностей меняется от 950 до 1 150 м, т. е. на 20 %. В условиях съемки на уклонах 30° и более (рис. 1В, положение сенсора 3) диапазон значений колеблется от 700 до 1 550 м, т. е. на 850 м. Нетрудно видеть, что и размер пиксела в этом случае колеблется от 7 до 15,5 см, что, скорее всего, будет неприемлемо. Разброс значений в диапазоне, равном 85 % от номинала, не только ухудшает общее качество работ, но и крайне затрудняет оценку полетного плана на этапе его разработки.

Интерфейс современных планировщиков полетов (например, IGI PLAN) позволяет увидеть эффекты изменения ширины полосы охвата, полосы зоны перекрытия и пр., однако не позволяет оценить масштаб вышеописанных «скачков» качества снимаемых материалов.

Идентичные эффекты наблюдаются и в части лазерного сканирования с той разницей, что меняется не размер пиксела, а плотность сканирования, измеряемая числом отражений на 1 м² [Рыльский, Груздев, 2022]. В приведенном примере отличия этой плотности (в процентах) будут обратно пропорциональны дистанции, и составят от 64 до 141 %, что также неприемлемо.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район работ и планирование стандартным способом

Для решения вышеописанной проблемы неоднозначности результатов планирования аэрофотосъемочных залетов в части качества и подробности материалов было принято решение разработать систему проверки создаваемых летных планов на соответствие исходным предъявляемым требованиям. Создание системы проверки происходило с использованием ГИС на базе ArcView. В качестве исходного программного продукта использовался планировщик полетов IGI PLAN, поставляемый в составе программно-аппаратных комплексов воздушного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки RIEGL серий 560, 680, 780.

В качестве одного из проектов съемки был выбран участок, расположенный на территории горно-туристического кластера Архыз (рис. 2). Выполнение работ производилось в начале июня 2023 г. Полеты выполнялись с использованием воздушного судна типа Ан-2. Съемка велась с использованием воздушного лазерного сканера RIEGL LMS Q680i, оснащенного среднеформатной авиационной камерой IGI DIGICAM H60 (60 мегапикселей), с фокусным расстоянием 50 мм (размер матрицы 52,4 x 41,2 мм). Угловой охват лазерной сканирующей системы — 60°, камеры с данным объективом — 57,8°. Гиростабилизирующая платформа не применялась.

Район работ имеет площадь в 4 100 га, перепад высот от 1 640 до 3 134 м. Территория работ расположена на территории Республики Карачаево-Черкесии, характеризуется крайне расчлененным рельефом альпийского типа, а также наличием разнонаправленных склонов и отрогов, что исключает возможность планомерного набора высоты при съемке. Основная целевая высота съемки была определена как 800 м над поверхностью рельефа. Посмотрев на гипсометрическую карту (рис. 3) района, нетрудно видеть, что проложение осевых линий полетных маршрутов невозможно без наличия крайне больших перепадов высот как вдоль оси каждого из треков, так и поперек [Тикунов, Рыльский, 2020]. Результат стандартного моделирования представлен на рис. 4, где хорошо видно, что полоса охвата падает при уменьшении относительной высоты над рельефом, однако численно оценить эти значения не представляется возможным.

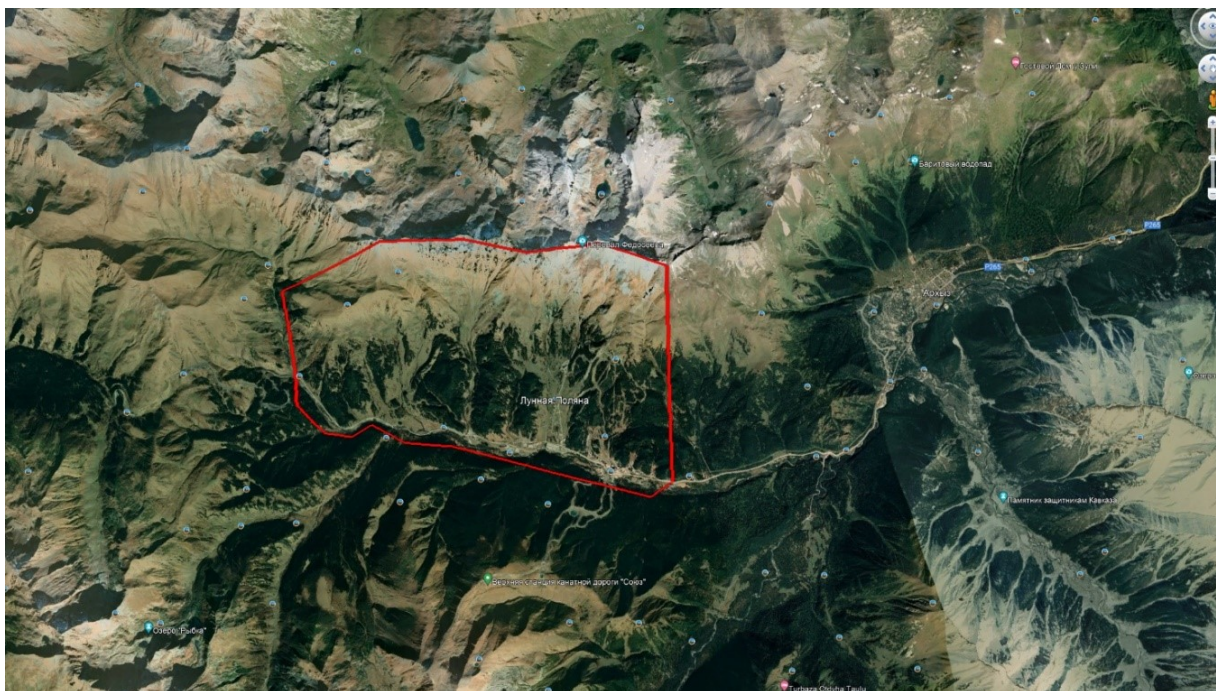


Рис. 2. Район работ для отработки методики проверки летного плана
Fig. 2. Work area for testing the flight plan verification methodology

Проблема МТА-зон

Частота испускания лазерных импульсов лазерных сканером имеет определенные ограничения, причем не только технические. Если лазерный сканер работает в режиме «1 импульс в воздухе» (пока не принят предыдущий импульс, следующий не будет выпущен), то частота импульсов ограничена скоростью света. Допустим, съемка ведется с высоты в 1 000 м. Пробег импульса туда и обратно — это уже 2 000 м. Скорость света в воздухе при этом округленно может быть приравнена к 300 000 км/с (в действительности несколько меньше). Таким образом, более 150 000 подобных пробега лазера туда и обратно в упомянутом выше режиме «1 импульс в воздухе» сделать не получится. Это количество — 150 000 точек в секунду — будет пределом. Таким образом, получается, что на частоте 150 000 точек в секунду (или 150 кГц) можно работать в диапазоне высот от 0 до 1 000 м. С ростом высоты этот предел падает: при высоте полета 1 500 м максимальная теоретически возможная высота сканирования упадет до 100 000 точек в секунду. Диапазон высот при этом составит от 0 до 1 500 м.

Тем не менее, современные лазерные сканирующие системы имеют существенно большую высоту и частоту работы [Janowski et al., 2015]. Каким путем это достигается? Система переводится в режим «несколько импульсов в воздухе» (когда последующий импульс испускается не дожидаясь прихода предыдущего). Например, при двух импульсах, находящихся одновременно в воздухе, частота сканирования на высоте 1 000 м может быть повышена в 2 раза, достигнув 300 000 точек в секунду. При этом работа в таком режиме (2 импульса в воздухе) возможна в диапазоне от 500 до 1 000 м. Ниже 500 м необходимо вернуться к режиму «1 импульс в воздухе». В диапазоне высот 1 000–1 500 м на такой частоте нужно использовать уже режим «3 импульса в воздухе», и т. д.

Означенный выше диапазон высот для каждого из режимов съемки в англоязычной литературе называется «МТА-zone», или «Multiple turn-around zone» [Rieger, 2014]. В приведенном примере для частоты 300 кГц толщина каждой МТА-зоны равна 500 м.

По мере роста частоты сканирования «толщина» МТА-зоны уменьшается. Так, для 400 кГц ее толщина падает до 375 м. Как видим, на приведенном полетном плане практически невозможно выдержать относительную высоту в пределах одной МТА-зоны даже в пределах оси полета.

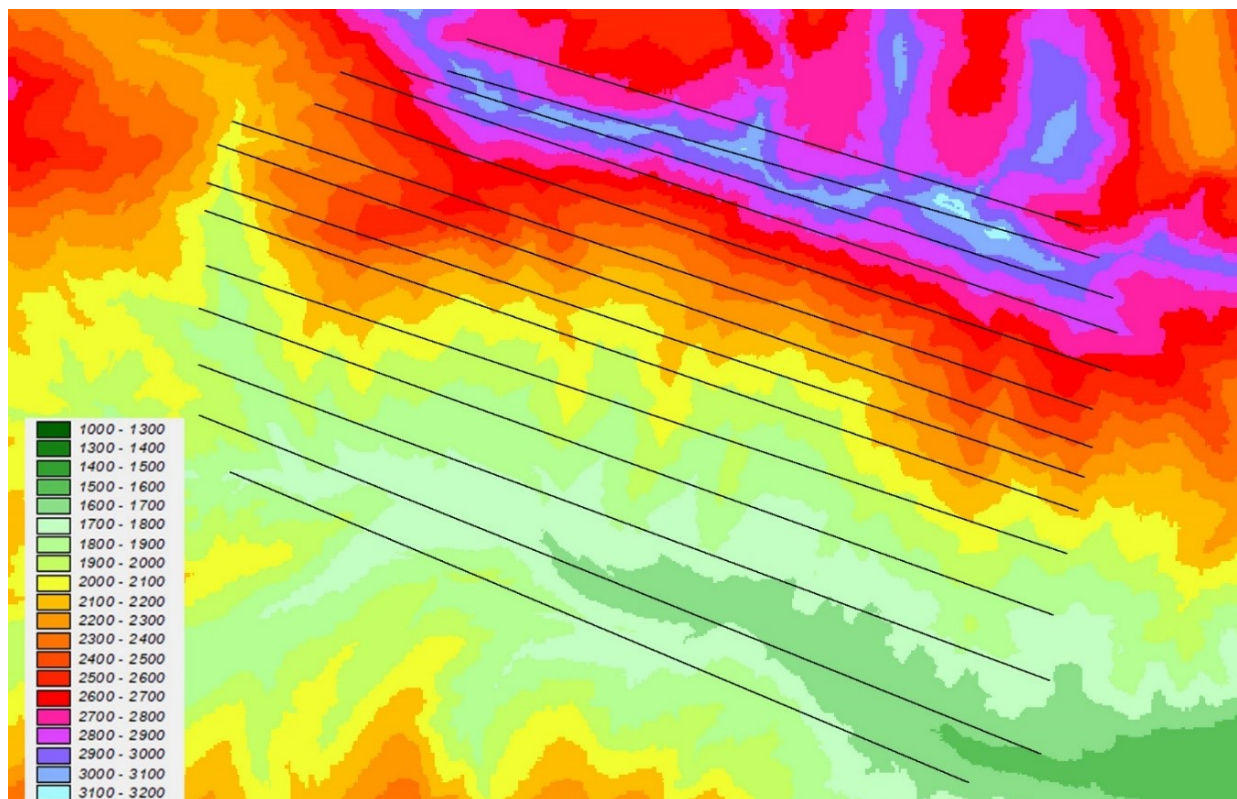


Рис. 3. Гипсометрическая карта района работ и оси планируемых съемочных маршрутов
Fig. 3. Hypsometric map of the work area and the axis of the planned survey routes

Первые лазерные системы, имеющие возможность работы в режиме нескольких МТА-зон, имели жесткое ограничение в виде работы только в одной МТА-зоне в пределах одного маршрута. Современные системы, используя неравномерность временных интервалов между лазерными импульсами и ряд специализированных алгоритмов [Rieger, Ullrich, 2011], позволяют корректно определить для любого лазерного импульса его правильную МТА-зону, распределив точки в пространстве. Однако особенности этих методов состоят в том, что стык между двумя соседними МТА-зонами является «мертвой зоной», в которой не регистрируются никакие отражения. Для приведенного выше примера с частотой 300 кГц это будет выглядеть так:

- 1-я МТА-зона — от 0 до 470 (а не 500) м;
- 2-я МТА-зона — от 530 (не от 500) до 970 (а не 1000) м.

Диапазон дальностей от 470 до 530 м не будет при этом регистрироваться никак.

Обратим внимание, что все вышесказанной относится к высоте в надире, т. е. к дальности. Как следует из рис. 1, дальность на краях будет иной, и вполне возможна ситуация, когда участки под сенсором оказываются в одной МТА-зоне, а края — уже в другой, при этом где-то между ними располагается «мертвая зона», в которой данных лазерного сканирования просто нет.

Отметим, что ни один из пакетов для планирования летных работ с использованием лазерных сканеров не только не предупреждает о возможности возникновения подобных

ситуаций в подготовленном летном плане, но и не дает сведений о реальных дистанциях от сенсоров до поверхности (рис. 4).

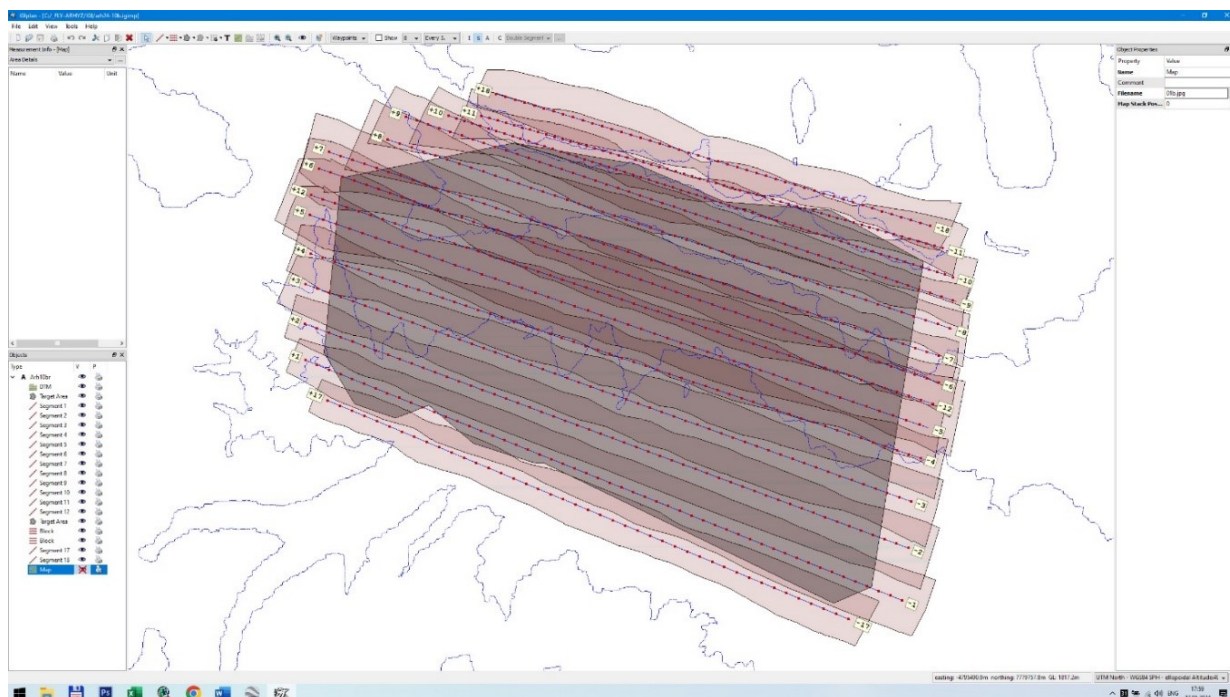


Рис. 4. Результат моделирования в IGI PLAN полос охвата съемкой с использованием ЦМР и положения осей полета. Сведения о реальной дистанции до поверхности отсутствуют
Fig. 4. The result of modeling in IGI PLAN survey coverage bands using DEM and the position of the flight axes. There is no information about the actual distance to the surface

Подобная особенность присуща значительной доле сканеров, находящихся в данный момент в эксплуатации на территории РФ. В условиях горного рельефа данная особенность приводит либо к появлению огромного количества довольно крупных «дыр» в покрытии данными (размер «дыр» при этом составляет десятки или даже сотни метров), либо к очень большому дополнительному налету для их перекрытия. И то, и другое крайне неэффективно, ведет к росту себестоимости и затягиванию сроков работ.

Возможный путь решения проблемы

Принимая во внимание вышеописанные сложности, а также тот факт, что отсутствие решения упомянутых проблем приведет к немедленным и ощутимым убыткам при реализации проектов, было принято решение о создании собственного программного обеспечения, реализующего следующие функции:

- на входе программное обеспечение должно использовать готовый полетный план в формате IGI PLAN (оси маршрутов съемки с сохранением их атрибутов и высот полета);
- должна использоваться та же цифровая модель рельефа, что и при создании полетного плана, при этом размер одной ячейки модели желательно должен быть не более 30 м (этому требованию удовлетворяют все открытые модели ЦМР, кроме SRTM (в варианте детальности 3 угловых секунды));

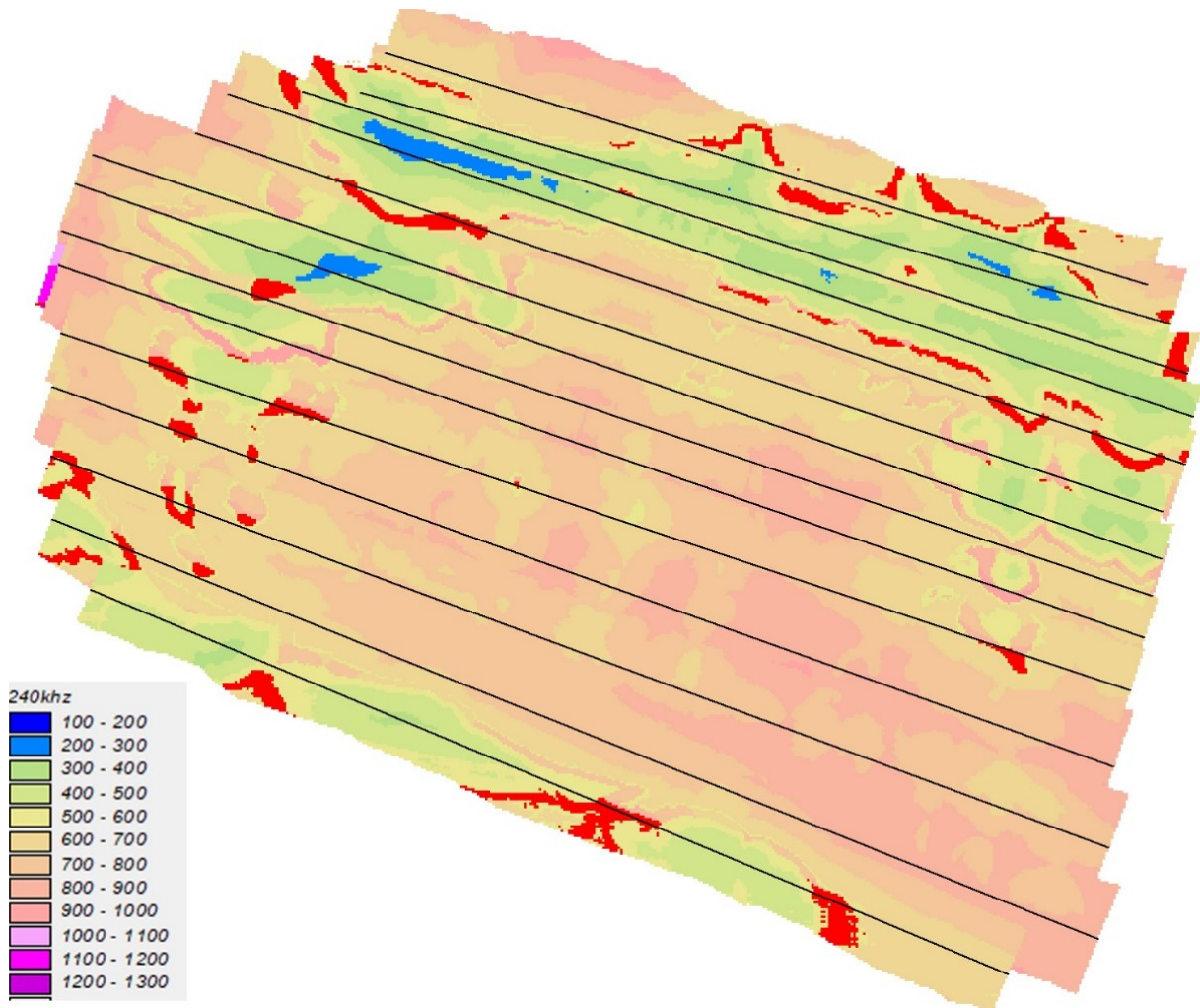
- пользователь выбирает необходимый сценарий съемки (частота и угол лазерного сканирования) и параметры фотокамеры (фокусное расстояние в пикселах);
- на выходе программная среда должна предлагать в наглядной форме результат расчетов, включающий итоговое распределение дистанций от сенсоров до поверхности, плотности сканирования (в точках на 1 м²) и размера пиксела на поверхности рельефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описанная выше задача является достаточно характерной по своему типу для задач геоинформатики, т. к. использует работу с большим количеством пространственных данных [Капралов и др., 2004]. Разработка программного средства для оценки дистанции от сенсоров до поверхности и получения прочих производных вариантов производилась на базе ГИС пакета ArcView, с использованием встроенного языка программирования Avenue. Выходные данные из IGI PLAN могут быть представлены в виде линейного файла формата ArcView Shape (*.shp). Алгоритмически программа строится следующим образом:

1. В качестве констант введены границы МТА-зон и предельная дальность измерений для каждого из режимов сканирования в диапазоне от 80 до 400 кГц с шагом в 10 кГц, всего 33 варианта. Источник информации — официальный производитель оборудования.
2. В качестве константы можно ввести угол сканирования (по умолчанию — 60° (по 30° отклонения от надира)), а также фокусное расстояние камеры в пикселах (предполагается, что охват лазерного сканера и фотокамеры идентичен, но вообще говоря, это необязательно).
3. В качестве вводной информации вводятся линии маршрутов из IGI PLAN и использованная при планировании ЦМР.
4. В процессе расчетов для каждого режима сканирования определяется максимальная дальность действия сканера (см. п. 1), определяется максимальная ширина полосы сканирования при максимальном угле охвата; в пределах этой полосы строится грид дистанций до осевой линии (горизонтальное проложение), из которого для каждой точки грида вычисляется угол отклонения луча и фактическая дистанция от текущего пиксела ЦМР до сенсора (на линии маршрута). Таким образом, для каждого маршрута строится грид дистанций от поверхности до сенсора.
5. Для каждого из маршрутов процедура повторяется. В конце массив гридов дистанций сливается в единую мозаику гридов. Если при этом на один и тот же участок попадает два и более гридов дистанции, то выбор делается в пользу грида с минимальной дистанцией (т. е. варианта съемки, дающего максимально плотное и качественное облако точек, либо максимально детальные снимки).
6. Итоговый грид дистанций используется для перевычисления размера пиксела на поверхности рельефа (GSD) и для расчета плотности точек лазерного сканирования. Результатом расчетов являются 3 грида — грид дистанций, грид плотности точек лазерных отражений и грид размеров пиксела.
7. Описанные процедуры производятся для каждого из выбранных режимов сканирования.

В качестве примера приведем результаты применения данного программного решения на территории Архыза. Был произведен расчет результатов покрытия данными для двух режимов работы — 240 кГц (рис. 5) и 140 кГц (рис. 6).



*Рис. 5. Результат расчета дистанций для режима сканирования 240 кГц.
Красным цветом отмечены «мертвые зоны» между МТА-зонами
в выбранном режиме. На данных участках данные сняты не будут.
Режим работы для разработанного полетного плана непригоден
Fig. 5. The result of calculating distances for the 240 kHz scanning mode.
“Dead zones” between MTA zones in the selected mode are marked in red.
No data will be collected in these areas. The operating mode
is unsuitable for the developed flight plan*

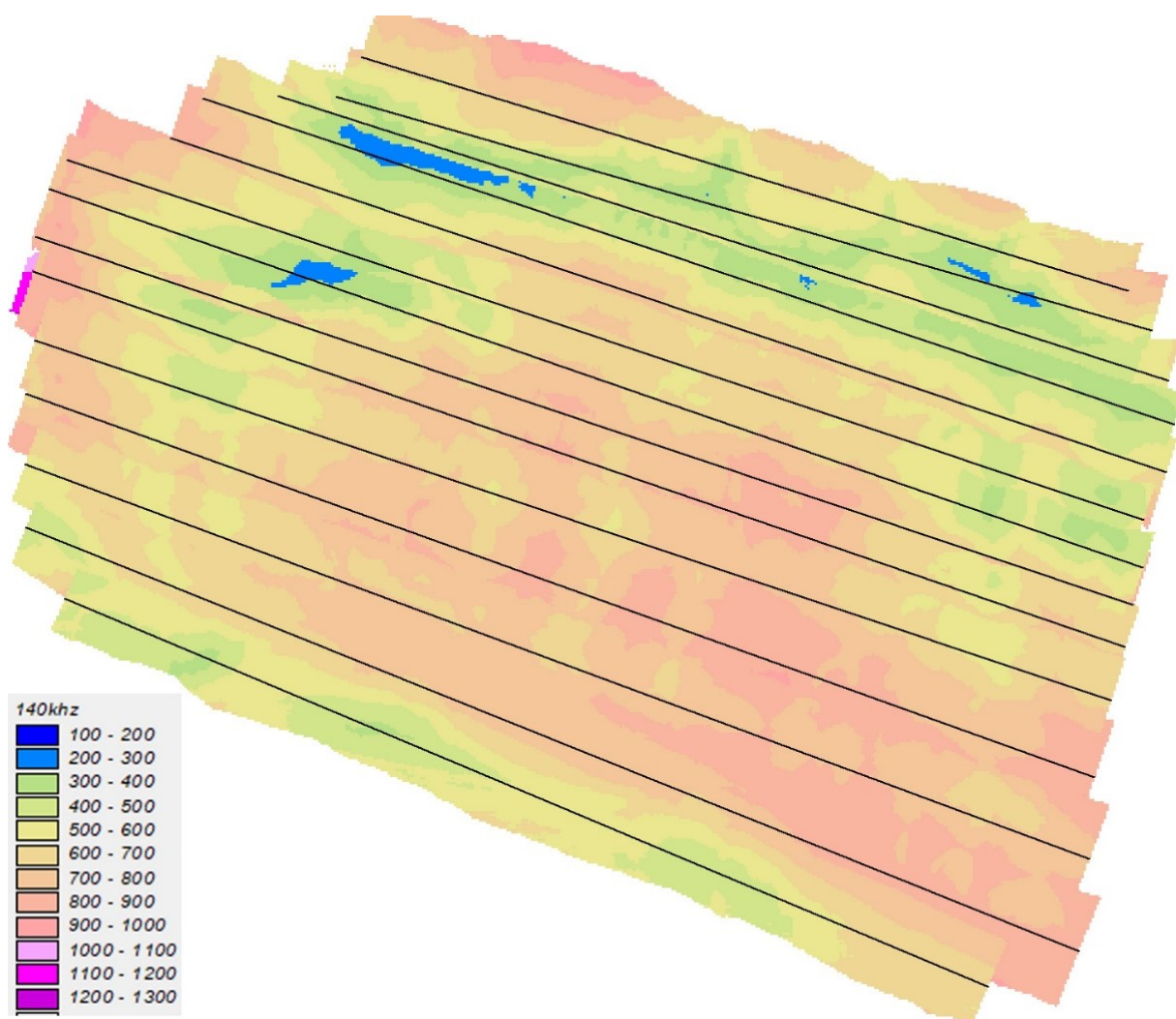


Рис. 6. Результат расчета дистанций для режима сканирования 140 кГц. Красным цветом отмечены «мертвые зоны» между МТА-зонами в выбранном режиме, таковых участков нет. Режим работы для разработанного полетного плана полностью пригоден

Fig. 6. The result of calculating distances for the 140 kHz scanning mode. "Dead zones" between MTA zones in the selected mode are marked in red; there are no such areas. The operating mode for the developed flight plan is completely suitable

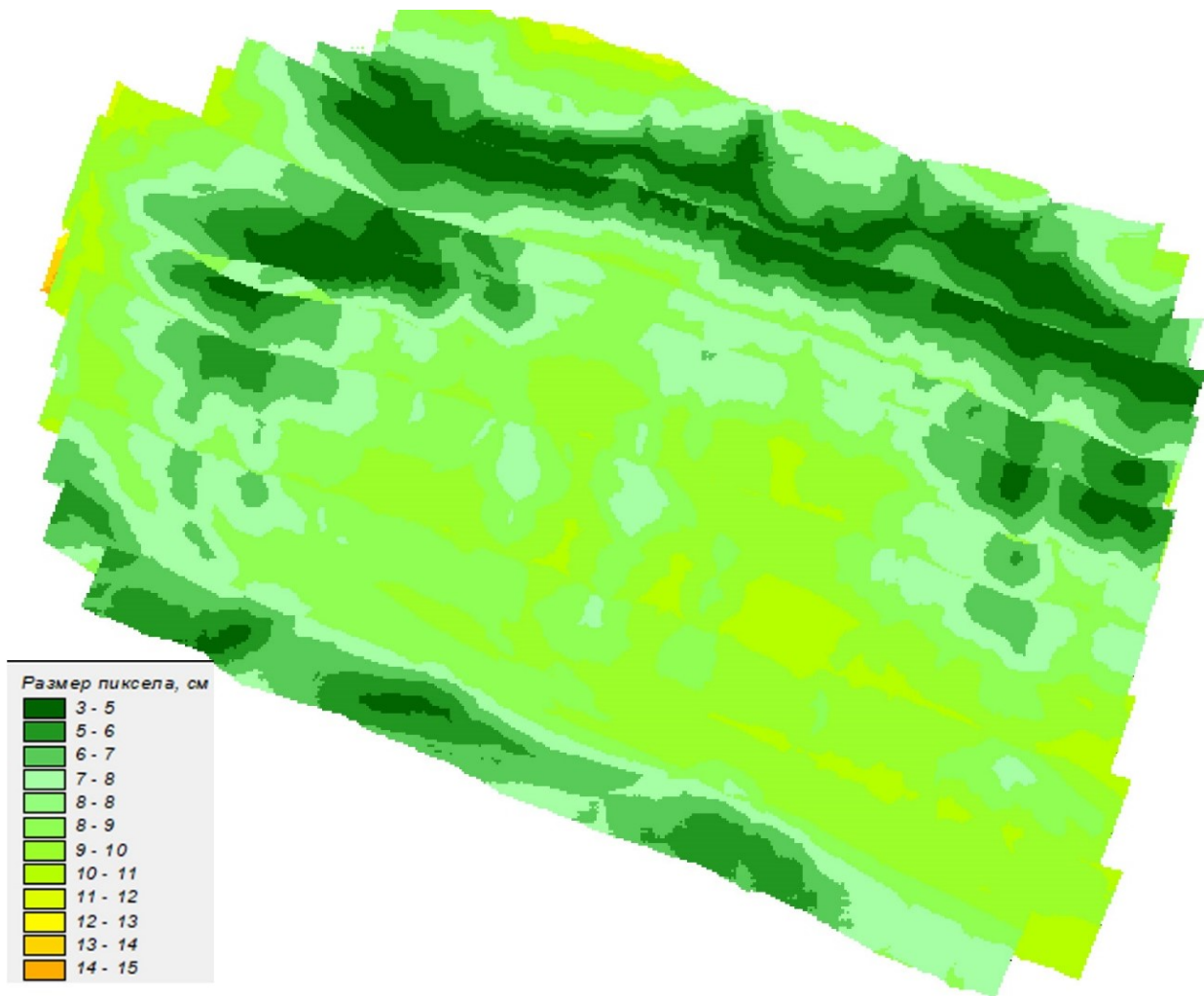


Рис. 7. Результат расчета GSD (размер пиксела на поверхности земли) для разработанного полетного плана. Все участки территории покрыты снимками с разрешением не хуже 14 см. План работы пригоден
Fig. 7. The result of the GSD (ground pixel size) calculation for the developed flight plan. All areas of the territory are covered with images with a resolution of at least 14 cm. The work plan is suitable

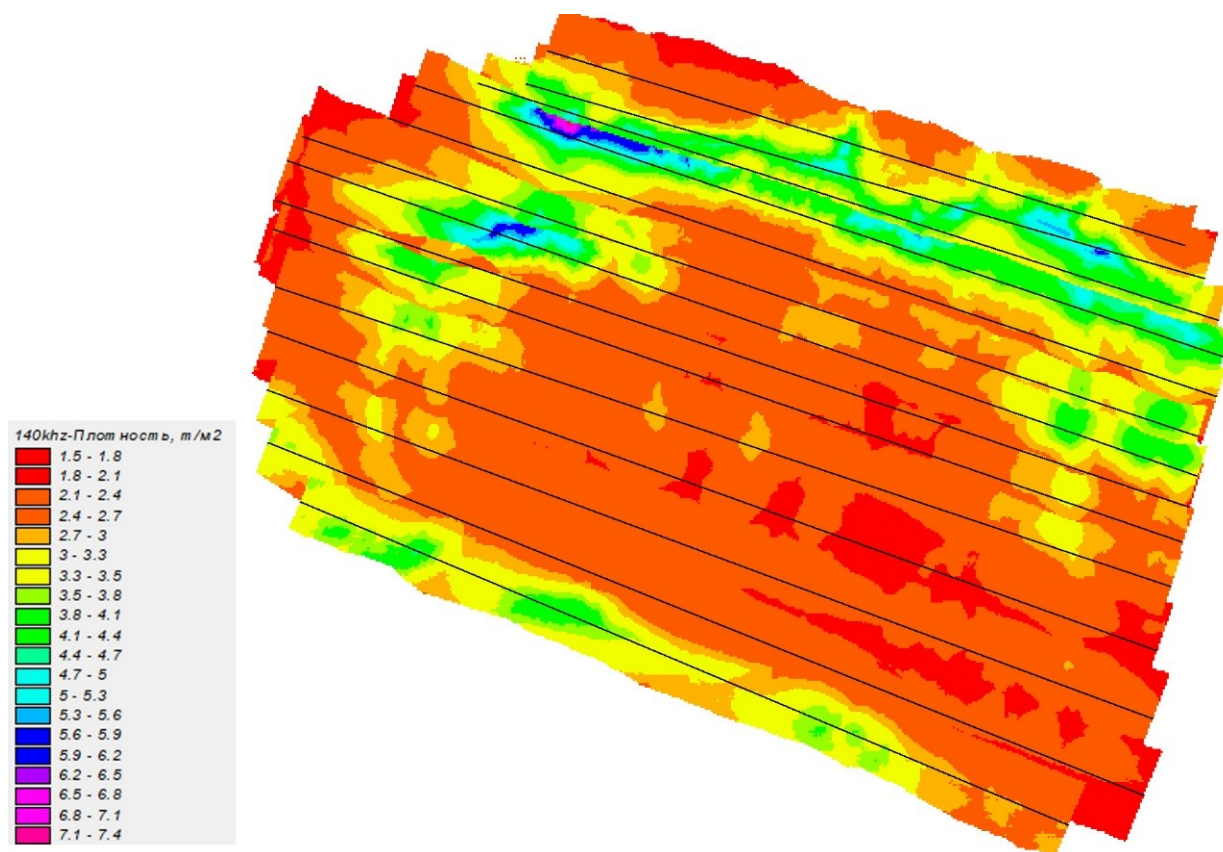


Рис. 8. Результат расчета плотности точек отражений для режима сканирования 140 кГц. Минимальная плотность облака составляет 1.5 точек на 1 м², что полностью удовлетворяет условиям технического задания. Режим работы для разработанного полетного плана полностью пригоден

Fig. 8. The result of calculating the density of reflection points for the 140 kHz scanning mode. The minimum cloud density is 1.5 points per 1 m², which fully satisfies the terms of the technical specifications. The operating mode for the developed flight plan is completely suitable

Как наглядно следует из приведенных рисунков, режим 240 кГц не подходит для работы по созданному летному плану из-за обилия пропущенных участков, попадающих в «мертвые зоны». Решений тут может быть два — либо сделать другой полетный план, либо попробовать использовать другой частотный режим сканирования. Если техническое задание позволяет изменить частоту, то оказывается, что наиболее приемлемым результатом является работа на частоте 140 кГц. Действительно, в этом режиме положение «мертвых зон» оказывается вне поверхности рельефа, и результаты полностью пригодны для работы. Проверим данный полетный план на соответствие требованиям такие параметры, как размер пиксела на поверхности рельефа (рис. 7) и плотность точек отражений (рис. 8). Как мы видим, оба этих параметра также имеют удовлетворительные значения по всей территории работ.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранный частотный режим в сочетании с разработанным полетным планом является полностью пригодным для решения всех задач, стоящих перед организаторами съемок.

В случае несоответствия каких-либо из параметров требуемым возможны следующие решения:

- изменение исходного полетного плана (изменение высоты съемочных маршрутов, измерение положения съемочных маршрутов в плане, дополнительные проходы, двойное прохождение по одним и тем же маршрутам);
- попытка подобрать иную частоту сканирования.

Ожидаемая точность приведенных на рисунках результатов моделирования, конечно же, зависит от детальности и высотной точности ЦМР. Как уже было упомянуто, рекомендованный размер ячейки ЦМР составляет 30 м или лучше, при этом высотная точность различных моделей может колебаться от 3–4 до 10–12 м (2 сигма). Уменьшение размера ячейки ЦМР улучшает детальность результатов, однако не имеет существенного практического смысла по определенной причине. Приобретение коммерческих моделей ЦМР, созданных по спутниковым данным и имеющих универсальное назначение, не представляется целесообразным [Dare, 2005].

Как бы точно ни был запроектирован план полета, он не может быть точно соблюден на практике. Точность пилотирования самолета (как в плане, так и по высоте) составляет 20–30 м, что сопоставимо с размером ячейки ЦМР. Таким образом, нет смысла утяжелять модель расчетов излишне детальными моделями рельефа, зная, что результаты подобного планирования все равно будут нереализуемы.

ВЫВОДЫ

Результатом данной работы явилось создание и практическая апробация методики проверки аэросъемочного залета при проведении воздушного лазерного сканирования на территориях с горным рельефом с использованием. Методика включает в себя проверку подготовленного полетного плана на соответствие критериям:

- полнота покрытия территории данными лазерного сканирования при использовании выбранного режима работы сканера (с учетом рельефа, МГА-зон и максимальной регистрируемой дальности лазерных измерений в выбранном режиме);
- плотность точек лазерных отражений (точек на 1 м²);
- размер пиксела фотокамеры (см. на пиксел).

Получен результат в виде автоматизированного программного комплекса, выполняющего пакетную обработку расчетов сразу для группы в несколько десятков вариантов режимов.

Приведенная методика в течение 2023–2024 гг. использована на 5 проектах воздушного лазерного сканирования в таких регионах, как Карачаево-Черкесия, Якутия, Амурская область, Забайкальский край, Краснодарский край. Все полеты, где данная методика была использована, прошли без пропусков в данных и позволили сэкономить до 30 % летного времени. Подход рекомендуется при работе с использованием как лазерных сканеров, так и фотокамер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капралов Е. Г., Кошкарев А. В., Тикунов В. С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 480 с.

Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях. Военно-топографическое управление Генерального Штаба. М.: Редакционно-издательский отдел, 1989. 105 с.

Руководство по аэрофотосъемочным работам. Министерство гражданской авиации. М., 1986. 176 с.

Рыльский И. А., Груздев Р. В. Применение воздушных лидаров в высокоточной гравиметрии (на примере Восточного Забайкалья). Вестник Забайкальского государственного университета, 2022. Т. 28. № 2. С. 6–18.

Тикунов В. С., Рыльский И. А. Подходы к определению толщины снежного покрова с использованием лазерного сканирования. Геодезия и картография, 2020. № 8. С. 28–41.

Dare M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. P. 169–177 (in Russian). DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.

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. P. 114–124.

Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. No. 82. P. 10–26.

Rieger P. Range ambiguity resolution technique applying pulse-position modulation in time-of-flight scanning lidar applications. Optical Engineering, 2014. No. 53(6). 061614.

Rieger P., Ullrich A. Resolving range ambiguities in high-repetition rate airborne lidar applications. Proceedings of SPIE 8186. Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications, 2011. P. 562–574.

REFERENCES

Aerial photography guide. Moscow: Ministry of Civil Aviation, 1986. 176 p. (in Russian).

Dare M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas. Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 2005. P. 169–177 (in Russian). DOI: 10.14358/PERS.71.2.169.

Guidance aerial photography for cartographic purposes. Military topographic administration of High Command. Moscow: Publishing Department, 1989. 105 p. (in Russian).

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. P. 114–124.

Kapralov E. G., Koshkarev A. V., Tikunov V. S. Fundamentals of geoinformatics. Moscow: Publishing House “Academy”, 2004. 480 p. (in Russian).

Lague D., Brodu N., Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. No. 82. P. 10–26.

Rieger P. Range ambiguity resolution technique applying pulse-position modulation in time-of-flight scanning lidar applications. Optical Engineering, 2014. No. 53(6). 061614.

Rieger P., Ullrich A. Resolving range ambiguities in high-repetition rate airborne lidar applications. Proceedings of SPIE 8186. Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications, 2011. P. 562–574.

Rylskiy I. A., Gruzdev R. V. Application of aerial lidar in high-precision gravity prospecting (based on the example of Zabaikalie Region). Transbaikalian State University Journal, 2022. V. 28. No. 2. P. 6–18 (in Russian).

Tikunov V. S., Rylskiy I. A. Approaches to determination of snow coverage thickness using LIDAR. Geodesy and Cartography, 2020. No. 8. P. 36–45 (in Russian).