

Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов

© 2019 г. Д.П. Бляхарский

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
rash55@yandex.ru

Features of aerial survey to alpine and polar glaciology using the UAV

D.P. Bliakharskii

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
rash55@yandex.ru

Received June 17, 2019

Revised October 31, 2019

Accepted December 2, 2019

Keywords: Antarctica, glacier, mountains, remote sensing, UAV.

Summary. Remote sensing is one of the most effective ways to monitor the glaciers. Recently, unmanned aerial vehicles have been increasingly used to study glaciers. At the moment, there are several review papers considering the use of UAVs to study the problems of environmental, including glaciology. In these articles, the hardware and software components of various UAVs and the problems solved by them are discussed. Almost all the authors describe the problems of aerial survey, which they encountered in carrying out the study. This paper is devoted to the systematization of the main problems of aerial survey on the glaciers of the mountains and the polar region. Highlighted the main directions of the problems of aerial survey using UAVs. These include the technical characteristic of the UAV, the choice of the base camp, UAV design features, the autopilot modes, weather conditions and geodetic survey. For each of the directions, recommendations are provided for the optimal implementation of UAS-based survey.

Citation: Bliakharskii D.P. Features of aerial survey to alpine and polar glaciology using the UAV. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2019, 63 (6): 650–661. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-650-661.

Поступила 17 июня 2019 г.

После доработки 31 октября 2019 г.

Принята к печати 2 декабря 2019 г.

Ключевые слова: Антарктида, горы, дистанционное зондирование, ледник.

Развитие технологий дистанционного зондирования привело к интенсивному использованию беспилотных авиационных систем для решения задач аэрофотосъемки. С учетом этого необходимо совершенствование методических указаний и рекомендаций к аэрофотосъемочным работам, в частности, для горных и приполярных регионов. Данная работа посвящена рассмотрению особенностей проведения съемки горных и покровных ледников для решения задач гляциологических исследований.

Для цитирования: Бляхарский Д.П. Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 6. С. 650–661. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-650-661.

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) — эффективный способ наблюдения за снежным и ледниковым покровом. На данный момент существует несколько различных классификаций данных ДЗЗ: по пространственному разрешению, по спектральному разрешению, площади съемки/полосе захвата, используемому съемочному оборудованию, типу носите-

ля съемочного оборудования и др. Последняя классификация (тип носителя съемочного оборудования) подразумевает деление на три основных класса:

- 1) космические аппараты;
- 2) управляемые воздушные суда (самолеты, вертолеты, воздушные шары и др.);
- 3) беспилотные воздушные суда.

Первый и третий тип друг на друга похожи,

так как относятся к беспилотным. Основное отличие — в высоте съемки и соответственно в площади охвата и масштабе. Каждый из перечисленных типов имеет свои положительные и отрицательные стороны. Так, космические аппараты имеют глобальный охват, а анализ материалов (снимков) уменьшает необходимость частых и длительных экспедиций на ледники. Однако имеются и свои недостатки. Сложно ожидать, что данные будут получены в определенные даты, когда они необходимы. Съемка в видимом диапазоне длин волн требует отсутствия облачности. Улучшение пространственного разрешения на космических аппаратах (например, World View 3) привело к увеличению стоимости снимков, что препятствует крупномасштабному картографированию ледников. Большинство обозначенных ограничений легко преодолеть при использовании беспилотных воздушных судов (БВС), которые могут нести различные типы съемочной аппаратуры, предназначенных для определенных целей. Использование беспилотных платформ обеспечивает гибкость выбора периода наблюдения и типа получаемых данных, будь то мультиспектральные или гиперспектральные данные, в тепловом диапазоне или микроволновом, или результаты лидарного сканирования. Отметим, что получаемые данные могут иметь субсантиметровое пространственное разрешение. Стоимость данных значительно ниже космических снимков и материалов аэрофотосъемки с управляемых воздушных судов.

В последнее время в зарубежной и отечественной литературе наблюдается увеличение количества исследований с использованием беспилотных воздушных судов. Существует несколько обзорных статей с обсуждением аппаратных компонентов БВС, особенно различных коммерческих производителей, и их междисциплинарное применение. К таким работам можно отнести статьи П. Хардина и соавторов 2011 г., И. Коломина и П. Молина 2014 г., Вайтхеда и соавторов 2014 г., А. Вотца и соавторов 2014 г., А.В. Смирнова и соавторов 2018 г. [1–6]. В 2016 г. А. Бхарваджа с соавто-

рами опубликовал первый и пока единственный обзор по применению беспилотных технологий в гляциологических исследованиях, где провел разделение всех исследований на две основные группы: исследования горных и покровных ледников [7].

Во всех этих работах описываются аппаратные компоненты и прикладные возможности применения беспилотных воздушных судов в различных отраслях науки, связанных с окружающей средой. Списки литературы упомянутых выше работ дают возможность провести более детальный анализ использования и применения БВС. Практически каждый автор сталкивается с проблемами проведения аэрофотосъемки, но ни в одном из обзоров не проведена систематизация выявленных особенностей аэрофотосъемочных работ, в том числе в горной местности и условиях Крайнего севера/юга. Следовательно, данный вопрос актуален по нынешний день.

Подобные вопросы могут быть востребованы при подготовке операторов беспилотных воздушных судов (внешних пилотов БВС). Высокий уровень автоматизации беспилотных аппаратов позволяет снизить требования к подготовке внешних пилотов, по сравнению с пилотами гражданской авиации. Это особенно актуально, учитывая факт узкой специализации — исключительно аэрофотосъемочные работы. Существующая производственная практика показывает, что на должность внешнего пилота БВС претендуют специалисты с профильным образованием по картографии, геодезии и фотограмметрии. Создается потребность в универсальном кадровом потенциале, когда один сотрудник может выполнять геодезические работы, аэрофотосъемку и первичную фотограмметрическую обработку. Недостающие компетенции по управлению воздушным судном приобретаются на коротких курсах повышения квалификации, в большинстве случаев, устроенными компаниями-разработчикам БВС.

Данная работа учитывает личный опыт автора, полученный в ходе трех экспедиций на

горный массив Табын-Богды-Ола (Монголия) и во время участия в 62-й Российской Антарктической экспедиции.

Данные и метод

Аэрофотосъемочные работы проводились с использованием беспилотных авиационных систем серии «Геоскан». В дальнейшем будут описаны отличительные характеристики проведения аэрофотосъемочных работ в условиях высокогорья и антарктических приполярных широт с учетом ряда факторов, а именно:

- 1) конструктивных особенностей комплексов;
- 2) реализации автопилота и ряда функций управления полетов;
- 3) программного обеспечения планирования и управления полетов.

Отметим, что данные факторы рассматриваются на примере продуктов конкретной компании, представленной на рынке. К обнаруженным в ходе экспедиционных исследований особенностям даны рекомендации по их учету. Выявленные достоинства и недостатки не могут быть экстраполированы на решения других производителей.

Проектирование аэрофотосъемки начинается с изучения картографических материалов на территорию исследования [8]. При проведении классической аэрофотосъемки используют топографические карты масштабов от 1:25 000 до 1:100 000 [9]. В последнее время для задач аэрофотосъемки все чаще используется беспилотные авиационные системы (БАС). В состав системы включено программное обеспечение планирования полетного задания и управления летательным аппаратом, беспилотное воздушное судно, полезная нагрузка в виде цифровой камеры.

Характеристики БАС. Геоскан 101 беспилотная авиационная система самолетного типа, подтип «летающее крыло». Размах крыльев 130 см, взлетная масса 2,5 кг. Взлет с катапульты, посадка на парашюте. Оснащен электродвигателем, продолжительность полета до 1 ч, скорость полета 72 км/ч. Система может

использоваться в температурном режиме от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$, скорости ветра до 12 м/с при запуске и во время полета соответственно. Максимально заявляемая высота полета — до 4 000 м над уровнем моря.

Геоскан 201 — беспилотная авиационная система самолетного типа, подтип «летающее крыло». Размах крыльев 230 см, взлетная масса 8 кг. Взлет с катапульты, посадка на парашюте. Оснащен электродвигателем, продолжительность полета до 3 ч, скорость полета 78 км/ч. Система может использоваться в температурном режиме от -20 до $+40^{\circ}\text{C}$ при скорости ветра до 12 м/с при запуске и во время полета. Максимально заявляемая высота полета — до 4 000 м над уровнем моря.

Обе системы обеспечены телеметрическими модемами связи на частоте 867,8 МГц и могут управляться с наземной станции управления Geoscan plane. Для точного определения координат центров фотографирования (КЦФ) установлен приемник глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) геодезического класса, поддерживающий системы ГЛОНАСС/GPS на частотах L1/L2.

В качестве съемочной аппаратуры использовались:

- 1) полнокадровая цифровая камера Sony DSC-RX1 с центральным затвором, объектив Carl Zeiss Vario Sonnar T, фокусное расстояние 35 мм. Размер матрицы ПЗС 6 000 на 4 000 пикселей, размер одного пиксела 6 мкм;

- 2) цифровая камера Sony NEX-5N со шторно-щелевым затвором, фокусное расстояние объектива 20 мм. Размер матрицы ПЗС 4 912 на 3 264 пиксела, размер одного пиксела 5 мкм.

Камеры работают в режиме приоритета выдержки с автоматическим определением размера диафрагмы и параметра светочувствительности (ISO). В зависимости от наличия облачности выдержка устанавливалась 1/800 или 1/1000.

Наземная станция управления полетами. Практически все программные продукты составления полетного задания используют технологии ВЭБ-картографии для получения

картографических материалов. По протоколам WMS (web map service) и WMTS (web map title service) программное обеспечение получает цифровые карты, данные ДЗЗ и цифровые модели рельефа. Эти материалы дают возможность выполнить предварительный анализ территории исследования.

Программное обеспечение наземной станции управления (НСУ) Geoscan Planer позволят загружать материалы с четырех картографических серверов.

1. Open street map — подробная и бесплатная географическая карта мира. Картографическая подложка актуальная при выполнении аэрофотосъемочных работа урбанизированной территории. Практически отсутствуют данные на пересеченную местность.

2. Landsat — общеземное покрытие космическими снимками съемочной системы Landsat 5, 7 с пространственным разрешением 30 м/пиксел. Данное покрытие позволяет грубо оценить физико-географическое описание местности.

3. Bing maps — картографический сервис предоставляющий космические снимки на весь земной шар. Пространственное разрешение снимков варьирует в зависимости от территории от среднего (10–15 м/пиксел) до сверхвысокого (50 см/пиксел).

4. Shuttle radar topographic mission (SRTM) — радарная топографическая съемка большей части земного шара. Предоставляет данные о цифровой модели рельефа местности с пространственным разрешением 90 м/пиксел.

Во время планировании полетного задания пользователь выбирает один из первых трех картографических сервисов для изучения территории исследования. При необходимости можно получить материалы от всех картографических сервисов, но в этом нет необходимости. Чаще всего пользуются картографическим сервисом Open Street map или Bing maps. Сервис Landsat практически не используют из-за низкого пространственного разрешения и актуальности данных. Информация о рельефе загружается по умолчанию и не требует выбора.

Составление полетного задания заключается в выделении области аэрофотосъемки и создании маршрута посадки. Выделив область аэрофотосъемки многоугольником, программа НСУ автоматически рассчитывает аэрофотосъемочные маршруты на основании ряда параметров:

1) перекрытие снимков. Минимальное перекрытие составляет: 60% продольное и 30% поперечное. Однако, учитывая факт незначительной массы беспилотных систем, во избежание появления фотограмметрических «дыр» следует устанавливать избыточное перекрытие не менее 70% на 50%;

2) съемочная камера. На основании камеры и установленного на нее объектива происходит расчет основных параметров съемки;

3) параметры съемки. Существует три основных взаимосвязанных параметра съемки: пространственное разрешение снимков, высота полета и расстояние между маршрутами.

В горной местности следует воспользоваться функцией НСУ, позволяющей рассчитать аэрофотосъемочный маршрут с учетом цифровых моделей рельефа. Эта функция обеспечивает постоянство масштаба аэрофотоснимков. Максимальная эффективность данной функции будет обеспечена при условии ориентирования маршрутов перпендикулярно к направлению склона. Маршрут посадки состоит из трех точек: точка захода на глиссаду, промежуточная точка и точка выброса парашюта. Расстояние между крайними точками составляет 600 м. БАС в точке глиссады снижается до 110 м относительно точки старта и затем с плавным снижением до 70 м движется в точку выброса парашюта. Маршрут посадки следует ориентировать против направления ветра.

Выбор стартовой площадки. В классической аэрофотосъемке после определения границ съемочного участка происходят поиск ближайшего аэродрома и оценка возможности его использования. Если применяются БАС, то эта задача видоизменяется. Как правило, ресурс полета беспилотного аппарата ограничен и не-

обходимо выбирать площадку старта/посадки в непосредственной близости к границам съемочного участка или внутри его. Для этого следует оценить транспортную доступность и наличие стартовой площадки. Выбор последнего зависит от типа используемого БВС и его размеров:

1) при аэрофотосъемке с использованием мультироторного или вертолетного типа, необходима площадка размером 10×10 м с луговой растительностью и незначительными уклонами местности ($3-5^\circ$). Это обусловлено вертикальным взлетом и посадкой;

2) при аэрофотосъемке с использованием самолетного типа размер площадки может составить 150×150 м и варьировать до 300 м. При условии, что масса аппарата не превысит 10 кг, а размах крыльев 2,5 м. Площадка должна быть открытой (без древесной и кустарниковой растительности), желательна с луговой растительностью и незначительными уклонами местности.

На основании картографических сервисов можно найти открытые участки местности, по цифровой модели рельефа оценить уклон, измерив горизонтальное проложение и превышение между двумя точками. В большинстве случаев определяющий фактор выбора стартовой площадки — транспортная доступность и удобность подъезда. Беспилотная аэрофотосъемка горной местности характеризуется отсутствием транспортной доступности объекта съемки. В таких случаях в первую очередь следует учитывать орографическую составляющую. При значительных объемах работы следует также рассматривать наличие источника пресной воды, так как стартовая площадка одновременно будет и базовым лагерем (местом временного проживания). В условиях Антарктиды решающее значение при выборе точки старта будет иметь факт наличия дороги. Дело в том, что прибрежное покровное оледенение Антарктиды характеризуется наличием значительного количества ледниковых трещин. Прежде всего, это связано с процессом сползания ледника в Мировой океан. Особенно

опасны трещины, накрытые «снежным мостом», визуально их практически невозможно отличить от эоловых форм ледникового микро-рельефа. По технике безопасности запрещено удаляться от оси дороги.

Итоговое решение по выбору стартовой площадки принимается только после рекогносцировки на местности. В этом случае решающим критерием будет служить направление преобладающих ветров в совокупности с орографией. Взлет и посадка беспилотных систем самолетного типа выполняются строго против ветра либо с небольшим углом к направлению ветра (не более 30°). Использование БАС вертолетного и мультироторного типа возможно с ограничениями по ветровой нагрузке до 10 м/с (практически у всех производителей). По факту, опасно использовать их уже при скорости ветра 7–8 м/с. БАС самолетного типа позволяет выполнять аэрофотосъемочные работы при скорости ветра от 15 до 20 м/с, что не редкость в условиях высокогорья и Антарктиды. Дальнейшее описание будет связано с использованием БАС самолетного типа Геоскан 101 и Геоскан 201.

Конструктивные особенности БАС. Подтип БАС «летающее крыло» не имеет явно выраженного фюзеляжа и образует вместе с крыльями единую плоскость. Преимущество такой аэродинамической схемы — возможность создавать подъемную силу сразу всей площадью воздушного судна, именно поэтому взлет осуществляется строго против ветра. При взлете по ветру возможен обратный эффект, когда действие силы ветра сверху на систему будет больше действия подъемной силы. Во время взлета с перпендикулярным направлением ветра возможно появление аварийной ситуации — опрокидывания.

Для создания первоначального ускорения при взлете систем Геоскан 101 и Геоскан 201 используется резиновая катапульта. Конструкция катапульты достаточно проста и легко эксплуатируется. При выполнении аэрофотосъемочных работ в высокогорной местности (выше 3 000 м над уровнем моря) или в Антарктиде,

когда температура летом легко может быть ниже 0°C , появляются проблемы с эксплуатацией резиновых катапульти. Особенность заключается в том, что при отрицательных температурах воздуха резина теряет свои эластичные свойства и замерзает. Одним из решений данной проблемы может служить быстрая и слаженная работа во время старта. До старта резина удерживается в теплом месте и используется непосредственно перед стартом. Опыт подобной работы свидетельствует, что при температуре воздуха -10°C время использования резины не более 1,5 мин. При этом довольно часто возникают различные ошибки в действиях внешнего пилота БАС, которые в свою очередь приводят к аварийным ситуациям. Другим решением данной проблемы может быть смена конструкции катапульти в сторону морозостойкой конструкции. Пружинная катапульта выступает таким решением. Среди недостатков использования пружинной катапульти по сравнению с резиновой отметим увеличение массы конструкции с 8 до 30 кг. Самое большое достоинство пружинной катапульти заключается в полной независимости от температуры использования. Аналогом пружинной катапульти может служить пневматическая катапульта, но она имеет ограничения по минимальной температуре (для баллона с сжатым воздухом).

Режимы работы автопилота БАС. Автопилот любого беспилотного воздушного судна имеет набор запрограммированных режимов работы, которые в ходе нормального полета сменяют друг друга. В случае возникновения аварийных ситуаций могут быть задействованы аварийные режимы работы, предотвращающие крушение БВС.

После схода с катапульти автопилот БАС включает двигатель и переходит в режим работы взлет. В этом режиме система летит по прямой, элероны находятся в крайнем нижнем положении, электродвигатель работает на максимум. При достижении высоты полета 100 м над точкой старта происходит переход в режим работы автопилота — набор высоты. В этом режиме БАС осуществляет движение по вер-

тикальной спирали. Во время набора высоты электродвигатель работает на 70–80% максимальной мощности, происходит значительное потребление заряда аккумулятора. В горной местности превышение аэрофотосъемочных маршрутов над точкой старта может достигать 1–2 км, соответственно режим набора высоты становится энергетически не эффективным. Кроме того, при работе в таком режиме более трех минут повышается возможность перегрева и дальнейшего перегорания обмотки электродвигателя, что приведет к аварийной ситуации. Решением проблемы заключается в снижении нагрузки на электродвигатель при наборе высоты. Это возможно за счет поэтапного набора высоты. Необходимо чередовать этапы набора высоты с этапами пролета по прямой, при которых снижается нагрузка на двигатель. Такое решение накладывает дополнительные требования к этапу планирования и составления полетного задания [10].

Набрав высоту первого маршрута, происходит смена режима полета автопилота с набора высоты на «автоматический», при этом БАС начинает выполнять полеты по аэрофотосъемочным маршрутам. Движение к первому маршруту происходит по принципу кратчайшего расстояния. При съемке в горной местности следует дополнительно проанализировать цифровую модель рельефа на предмет препятствий между последней точкой набора высоты и первой точкой аэрофотосъемочного маршрута. Обычно при планировании полетного задания стараются эти две точки расположить в непосредственной близости друг к другу. Заход на маршрут практически всегда сопровождается разворотом. Наземная станция управления полетом не всегда учитывает радиус разворота. Необходимо выполнять дополнительный анализ цифровой модели рельефа. Радиус разворота зависит от технических характеристик беспилотной системы — размаха крыльев, массы всей системы, допустимых углов крена. Данные характеристики следует уточнять у предприятия-производителя БАС. В будущем данный анализ цифровой модели

рельефа можно автоматизировать, за счет автоматической функции проверки полетного задания на возможность пересечения с ЦМР. Подобные функции реализованы во многих геоинформационных системах.

Отметим, что при разворотах у аэродинамической схемы «летающее крыло» есть незначительный недостаток, который необходимо учитывать при полетах в горной местности. Разворот осуществляется за счет появления крена, который контролируется автопилотом, с одновременным снижением скорости полета. Следствие подобных действий — образование «просадки» летательного аппарата. Под «просадкой» подразумевается отрицательное изменение заданной высоты полета. Значения изменения высоты незначительные и варьируют в пределах 10–20 м. Данный факт свидетельствует о необходимости дополнительного анализа цифровой модели рельефа. Однако, при одновременном образовании «просадки» и появлении воздушных потоков вертикальной направленности (нисходящих) создается опасная ситуация для полета. Воздушные потоки вертикальной направленности (нисходящие/восходящие) образуются на границах двух сред (лед–земля, земля–вода, вода–лед) и связаны с разной скоростью нагрева подстилающей поверхности. Подобного рода воздушные потоки поднимают или опускают легкие БАС до 100 м за несколько секунд. [3] Во избежание подобных ситуаций при планировании полетного задания следует учитывать положения маршрутов съемки относительно указанных границ (по материалам дистанционного зондирования). Появление таких случаев во время полета требует оперативного вмешательства внешнего пилота. Автопилот воздушного судна будет стараться самостоятельно решить проблему за счет смены запрограммированных режимов полета. Как правило, это ни к чему не приведет, но предоставит некоторое время для принятия решения внешнему пилоту. Единственное решение — изменение траектории полета, оно возможно тремя способами:

1) изменение полетного задания и отправка его по телеметрическому каналу связи. На

составление нового полетного задания может уйти от 5 до 10 мин, это является недостатком данного способа;

2) изменение направления полета. Полетное задание состоит из последовательных точек, которые имеют координаты. Изменив последовательность точек, произойдет смена направления полета. Недостаток данного способа — необходимость дополнительного анализа высоты точек полетного задания, так как изменить последовательность необходимо на точку с более низкой высотой. В противном случае изменение направления не произойдет. Автопилот перейдет в режим работы набор высоты и не сможет выйти из зоны вертикальных воздушных потоков;

3) смена режима полета на ручное управление — самый оперативный способ решения возникшей проблемы.

В режиме работы автопилота «автоматический», полет осуществляется с учетом некоторых параметров: минимальной скорости, высоты полета, направления. Было выявлено, что при абсолютных высотах полета БАС выше 2 500 м над уровнем моря наблюдалось плавное снижение высоты полета при движении по маршруту. Это связано с разреженностью воздуха. В зависимости от массы используемого воздушного судна минимальную скорость нужно увеличить от 1 до 3 м/с или от 3,5 до 10 км/ч. Однако, если высота полета выше 4 000 м, то потребуется дополнительно увеличивать минимальную скорость полета.

После окончания движения БАС по последнему аэрофотосъемочному маршруту происходит перенаправление полета в сторону маршрута посадки, которое происходит по наикратчайшему расстоянию. Достигнув координат первой точки маршрута посадки (точка снижения), автопилот переходит в режим снижения. Во время снижения двигатель БАС полностью отключается или работает на минимальных оборотах. Снижение осуществляется за счет планирования по спирали и действия силы тяжести. Обычно автопилот старается контролировать вертикальную скорость сни-

жения в пределах 5 м/с, манипулируя углом крена БАС. Нередко, при снижении с большой высоты (более 500 м над точкой старта), вертикальная скорость может увеличиваться до 7–8 м/с за счет появления естественного разгона. Такая ситуация может привести к появлению «просадки» в конце снижения до 50 м и аварийному выпуску парашюта. Для безопасной посадки следует разделить этап снижения на участки с чередованием снижения и пролета по прямой. Эмпирически, критерием такого чередования может послужить изменение высоты полета на 300 – 500 м. В горной местности довольно часто при снижении БАС может попадать в вертикальные воздушные потоки. Если беспилотная система во время снижения попадает в нисходящий воздушный поток, то за 2–3 с вертикальная скорость может достигнуть 12–15 м/с. Такие скорости снижения опасны для конструкции БАС, оператор системы не успевает среагировать на подобную ситуацию, дальнейший рост вертикальной скорости и выпуск парашюта приводят к критическим перегрузкам в конструкции системы. Единственным решением может служить программирование автопилота на предмет аварийного снижения, когда система сама принимает решение выбросить парашют при достижении вертикальной скорости 13–15 м/с. Более благоприятная ситуация возникает при восходящих потоках воздуха. С колебанием высоты полета около 30–40 м (вверх–вниз), система может находиться в одной точке до 20 мин. В подобной ситуации только изменение самого воздушного потока позволяет выполнить дальнейшее снижение и посадку.

Ранее сообщалось, что взлет и посадку необходимо осуществлять строго против ветра, но в горной местности, учитывая ограниченное пространство, можно выполнять и по ветру. Такого рода посадка в каждом втором случае приводит к легким повреждениям корпуса беспилотной системы. Следует заранее учитывать наличие большого количества запасных деталей и компонентов.

Погодные условия. Аэрофотосъемка обычно выполняется в ясную солнечную погоду или при наличии незначительной высокой облачности [9]. Развитие беспилотных технологий позволяет вести аэрофотосъемочные работы в совершенно других погодных условиях: при средней и даже низкой сплошной облачности. При этом полет выполняется прямо под нижней кромкой облаков.

Для работы электродвигателя БАС чаще всего используют литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы. Они чувствительны к низким температурам. Расчет основных эксплуатационных характеристик аккумуляторов выполнен для температуры +20°C. При использовании во время старта холодного аккумулятора потери емкости могут достигать 40% [10]. В результате происходит значительное уменьшение времени полета.

Важно, чтобы перед включением двигателя температура аккумулятора была в диапазоне +15 – +20°C. Это можно достичь несколькими методами:

- 1) использование на этапе предварительной подготовки к полету дополнительного аккумулятора, который прямо перед стартом меняется на основной;
- 2) выполнять подогрев аккумулятора на этапе предварительной подготовки к полету электрогрелкой, химической грелкой или водяной грелкой;
- 3) предусмотреть в конструкции аккумулятора элементы нагрева, которые могут использовать собственный заряд для обогрева.

Низкая температура в совокупности с влажностью воздуха может привести к образованию наледи на корпусе БАС. Данная ситуация возникает при переходе температуры воздуха через 0°C и влажности воздуха более 60% или при полете с низкой облачностью. С обледенением чаще всего сталкиваются в горной местности при высоте полета выше 3 000 м над уровнем моря. В Антарктиде из-за низкой влажности (меньше 40%) подобного не происходит.

Нарост льда на корпусе БАС образуется в нескольких местах: передняя кромка кры-

льев, передняя часть фюзеляжа, лопасти винта и на трубке Пито. Последний элемент отвечает за определение воздушной скорости движения и барометрической высоты полета. Равномерное образование наледи приводит к увеличению массы воздушного судна, в результате чего в НСУ можно наблюдать плавное снижение высоты полета и появление отрицательной вертикальной скорости в диапазоне 0–1 м/с. Также образование наледи может происходить неравномерно, на одном из крыльев льда становится больше. В наземной станции управления полетами, можно заметить частые изменения крена воздушного судна в разные стороны (болтанку). Команды набора высоты или увеличения минимальной скорости полета не дают результат. Единственным правильным решением может стать незамедлительная отправка БАС на посадку. Процесс обледенения происходит с течением времени. Действия этого процесса можно замедлить, но не прервать. Противообледенительная обработка основных конструкций беспилотной системы помогает в этом.

Аэрофотосъемка с использованием БАС в горной местности может выполняться в условиях облачности. На поверхности горных ледников достаточно много осыпного материала горных пород, благодаря этому на снимках присутствует своеобразная текстура. Это позволяет выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемка даже при рассеянном освещении и значительном альбедо подстилающей поверхности. В условиях сплошного покровного оледенения Антарктиды имеются ограничения на выполнение аэрофотосъемочных работ при наличии сплошной облачности. Поверхность оледенения Антарктиды имеет золотые микроформы рельефа. В солнечную погоду эти микроформы рельефа хорошо видны на аэрофотоснимках, благодаря чему предоставляется возможность выполнить камеральную фотограмметрическую обработку результатов съемки. Во время сплошной облачности и рассеянного освещения микроформы дневной поверхности ледника нераз-

личимы, как результат — невозможность выполнения камеральной обработки снимков. Аэрофотосъемку в Антарктиде следует выполнять только в ясную солнечную погоду или, когда наблюдается переменная облачность.

У всех типов БАС имеются ограничения по ветровой нагрузке во время старта и полета. Эта информация сообщается в тактико-технических характеристиках беспилотных комплексов. Как правило у БАС самолетного типа эти ограничения выше, поэтому их лучше использовать при аэрофотосъемочных работах в горах и Антарктиде. Однако при посадке на парашюте сильные порывы ветра могут вызвать значительные повреждения конструкции БАС. Желательно иметь функцию автоматического отцепления парашюта при касании земли воздушным судном и большой запас инструментов и принадлежностей (ЗИП). Обычно состав ЗИП ограничивается клеем и скотчем, но значительная удаленность и недоступность территории исследований требует расширенной комплектации (лопасти винта, крылья, композитные материалы, кили, трубка Пито и др.).

Планово-высотную подготовку аэрофотосъемочных работ можно разделить на два основных блока. Первый блок относится к сопровождению аэрофотосъемки и, по сути, описывает технологию определения координат полетных базовых станций и высокоточное определение координат центров проекции снимков [1, 2, 4, 6, 10, 11]. Второй блок рассматривает методы определения координат контрольных точек для оценки точности получаемых данных [8].

Ледники находятся в непрерывном движении. Скорости движения могут быть совершенно разные. В горной местности среднесуточные скорости движения варьируют в пределах первых сантиметров [10]. На покровном леднике в Антарктиде среднесуточные скорости движения участка одного ледника могут изменяться от 1 до 27 см [11]. Такие скорости движения требуют наличия согласованности во времени проведения аэрофотосъемочных и геодезических работ. В свою очередь это приводит к

увеличению объема работ в короткий промежуток времени, а в некоторых случаях требует параллельности в выполнении разных видов работ. В общем случае продолжительность определения координат контрольных точек составляет от нескольких дней до недели. При этом в горной местности стараются выбрать для маркировки неподвижные объекты, расположенные сбоку относительно ледника (характерные камни на боковой морене и выступы скал). Покровное оледенение требует создания специальных конструкций (например, прессованных бочек). В обоих случаях на скорость работ влияют труднодоступность местности и ограничения возможных перемещений по технике безопасности.

На этапе планирования аэрофотосъемочных работ необходимо знать средние скорости движения ледников, к сожалению, это не всегда известно. Значительные скорости движения требуют изменения методики аэрофотосъемочных работ, чтобы уменьшить временную задержку и соответственно повысить точность получаемых материалов. Так, при геодезических работах целесообразно задействовать большее количество людей, а при проведении аэрофотосъемки использовать одновременно несколько беспилотных систем (групповое применение БАС). Однако существуют финансовые сложности подобных решений проблем.

Результаты

Проведены обзор и систематизация особенностей выполнения аэрофотосъемочных работ на горных и покровных ледниках по основным направлениям.

Тактико-технические характеристики беспилотного воздушного судна, служат для грубой оценки возможного использования БВС для картографирования горных и покровных ледников. Практика показывает, что некоторые характеристики искусственно занижены и фактические значения пределов значительно выше. Выбор полезной нагрузки должен соответствовать требованиям экспедиционных исследований и основных нормативных документов.

Программное обеспечение планирования и управления полетами, наземная станция управления. Следует уделить особое внимание набору инструментов планирования полетного задания, используемым картографическим сервисам, возможностям оперативного изменения полетного задания и управления воздушным судном.

Выбор стартовой/посадочной площадки воздушного судна. Данный пункт может быть включен в раздел составление планирования и составление полетного задания, но заслуживает отдельного упоминания.

Конструктивные особенности беспилотной авиационной системы предоставляют возможность более глубокого анализа возможностей применения БВС для целей картографирования. Необходимо обратить внимание на конструктивные решения на самых опасных элементах полета: взлет и посадка. Следует рассмотреть тип конструкции планера и его аэродинамические свойства.

Режимы работы автопилота помогают понять действия запрограммированных команд и оптимизировать полет БВС. При проведении полетов в условиях критических нагрузок требуется оперативное вмешательство внешнего пилота в полет, а в некоторых случаях и в работу автопилота. Как правило подобная информация утаивается или сообщается в ограниченном виде производителями БАС, что ограничивает области применения.

Погодные условия — один из самых критических факторов применения беспилотных технологий для наблюдения за горными и покровными ледниками. Сильный ветер, воздушные потоки вертикальной направленности, низкие температуры и давление создают ряд проблем для использования беспилотных технологий, но не ограничивают их полностью.

Планово-высотная подготовка аэрофотосъемки должна планироваться и выполняться с учетом скорости движения ледников.

Каждое из обозначенных направлений сопровождается описанием возможных путей решения. Это дает возможность совершенствования технических и методических аспектов

проведения аэрофотосъемки с использованием БАС в высокогорье и в районах покровного оледенения в будущем.

Обсуждение результатов

В ходе проделанной работы и полученного опыта экспедиционных исследований удалось обобщить в несколько направлений основные особенности проведения аэрофотосъемочных работ на горных и покровных ледниках. Полученные рекомендации можно использовать на курсах повышения квалификации по направлению подготовки оператора беспилотного воздушного судна для целей аэрофотосъемки. Результаты можно рассматривать в качестве методики оценки потенциального использования беспилотных авиационных систем другого производителя для целей аэрофотосъемки горных и покровных ледников.

Обособлено стоит вопрос валидации результатов. Обзор рекомендаций к основным

особенностям проведения съемки составлен на основании использования коммерческих продуктов одной компании. Вполне возможно ситуация, когда описанные особенности проведения аэрофотосъемки имеют различные подходы и решения у разных производителей БАС. Отметим, что данная работа направлена исключительно на ознакомление читателя с выявленными проблемами и особенностями.

В работе не рассматриваются требования к съемочной аппаратуре беспилотных авиационных систем. Достаточно подробно данный вопрос освещен в нормативных документах [9] и других статьях [6, 10].

Благодарности. Выражаю благодарность двум рецензентам за конструктивные замечания, которые существенно улучшили качество статьи.

Acknowledgments. I thank the two anonymous reviewers for their constructive comments, which significantly improved the quality of the paper

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hardin P.J., & Jensen R.R.* Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities // *GIScience and Remote Sensing*. 2011. V. 48. № 1. p. 99–111. DOI: 10.2747/1548-1603.48.1.99.
2. *Colomina I., Molina P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. V. 92. P. 79–97. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. *Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A.* Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // *Remote Sensing*. 2012. V. 4. № 6. P. 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671.
4. *Whitehead K., Hugenholtz C.H.* Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges // *Journ. of Unmanned Vehicle Systems*. 2014. V. 2. № 3. P. 69–85. DOI: 10.1139/juvs-2014-0006.
5. *Whitehead K., Hugenholtz C.H., Myshak S., Brown O., LeClair A., Tamminga A., Barchyn T.E., Moorman B., Eaton B.* Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2014. V. 2. № 3. P. 86–102. DOI: 10.1139/juvs-2014-0007.
6. *Смирнов А.В., Курков В.М., Воробьев Н.Г.* Создание документов о местности в интересах инженерных изысканий по результатам аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ: материалы докладов*

REFERENCES

1. *Hardin P.J., & Jensen R.R.* Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GIScience and Remote Sensing*. 2011, 48, 1: 99–111. DOI: 10.2747/1548-1603.48.1.99.
2. *Colomina I., Molina P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014, 92: 79–97. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. *Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A.* Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // *Remote Sensing*. 2012, 4 (6): 1671–1692. DOI: 10.3390/rs4061671.
4. *Whitehead K., Hugenholtz C.H.* Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journ. of Unmanned Vehicle Systems*. 2014, 2 (3): 69–85. DOI: 10.1139/juvs-2014-0006.
5. *Whitehead K., Hugenholtz C.H., Myshak S., Brown O., LeClair A., Tamminga A., Barchyn T.E., Moorman B., Eaton B.* Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *Journ. of Unmanned Vehicle Systems*. 2014, 2(3): 86–102. DOI: 10.1139/juvs-2014-0007.
6. *Smirnov A.V., Kurkov V.M., Vorobjev N.G.* Creation of documents on the terrain in the interest of engineering surveys based on the results of aerial photography from unmanned aircraft. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation, materials*

14-й Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций. 2018. С. 659–670.

7. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha, Martín-Torres F.J., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 175. P. 196–204. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.029.

8. ГКИНП 02-033–82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000 и 1:500. М.: Недра, 1982. 98 с.

9. РАФ 89. Руководство по аэрофотосъемке в картографических целях. М: ВТУ ГШ, 1989. 104 с.

10. Бляхарский Д.П., Волгушева Н.Э., Казаков Э.Э. Мониторинг ледников в сезон абляции с использованием беспилотных аэрофотосъемочных комплексов на примере ледников Потанина и Александры, горный массив Табын-Богдо-Ола (Монголия) // *Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*. 2019. Т. 63. № 2. С. 168–179. doi: 10.30533/0536-101X-2019-63-2-168-179

11. Bliakharskii D.P., Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N. Modelling glacier topography in Antarctica using unmanned aerial survey: assessment of opportunities // *Intern. Journ. of Remote Sensing*. 2019. V. 40. № 7. P. 2517–2541. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584926.

reports 14 - All-Russian scientific-practical conference and exhibition of survey organizations. 2018: 659–670. [In Russian].

7. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha, Martín-Torres F.J., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*. 2016, 175: 196–204. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.029.

8. GKINP 02-033-82. Instructions for topographic shooting in scales 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500. Moscow: Nedra, 1982: 98 p. [In Russian].

9. RAF 89. Cartographic Aerial Photography Guide. Moscow: VTU GSh, 1989: 104 p. [In Russian].

10. Bliakharskii D.P., Volgusheva N.E., Kazakov E.E. UAS photo surveying method for glacier monitoring during ablation season: Potanin and Alexandra glaciers, Mongolian Altai mountains. *Izvestiya vuzov «Geodeziya i aerofotosyemka»*. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2019, 63 (2): 168–179. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-2-168-179. [In Russian].

11. Bliakharskii D.P., Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N. Modelling glacier topography in Antarctica using unmanned aerial survey: assessment of opportunities. *Intern. Journ. of Remote Sensing*. 2019, 40 (7): 2517–2541. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584926.