

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА И ГИДРОЛОКАТОРА КРУГОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЛЕДОВОГО ОБЪЕКТА

Развитие технологий в области беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа (БПЛА) дало возможность расширить методы изучения ледовых объектов, таких как айсберги, торосы, участки ровного льда и т.д. Изучение возможностей БПЛА по съемке ледовых объектов для построения трехмерных цифровых моделей проходило на научно-исследовательском стационаре (НИС) «Ледовая база «Мыс Баранова»», расположенном на острове Большевик архипелага Северная Земля, в рамках экспедиции «Север-2018», организованной Высокоширотной арктической экспедицией (ВАЭ) ААНИИ.

Месторасположение стационара «Ледовая база «Мыс Баранова»» уникально тем, что рядом с ним находятся места спуска ледников и образования айсбергов, в припайном льду на зиму остаются замороженными в лед множество айсбергов средней величины и их обломки. Из года в год фиксируются различные торосистые образования, близко проходит кромка припайного льда, за которой начинается дрейфующий лед. Каждый год на севере пролива Шокальского открывается заприпайная полынья с образованием участков открытой воды и молодых льдов. Использование БПЛА значительно увеличивает возможности по исследованию всех этих ледяных образований, как в сочетании с другими методами исследований, так и самостоятельно, особенно когда доступ к объекту затруднен.

БПЛА мультироторного типа представляют собой платформу, имеющую четыре и более подъемных двигателей с пропеллерами, обеспечивающими вертикальные взлет и посадку. Такая схема конструкции по-

зволяет аппарату зависать на одном месте и двигаться с максимальной, в нашем случае 70 км/ч, скоростью. Такие комфортные условия для выполнения фотосъемки позволяют делать на низких высотах полета снимки отличного качества, недоступные БПЛА самолетного типа. Съемка с высот до 500 м позволяет выполнять работу менее высокотехнологичным бортовым фотооборудованием, что снижает стоимость БПЛА.

В течение работы сезонных экспедиций на НИС испытывались БПЛА мультироторного типа марок Yuneec Typhoon H и DJI Phantom 4 Pro. Первая модель представляет собой летательный аппарат с шестью двигателями, так называемый гексакоптер. Такая конструкция обеспечивает благополучную посадку БПЛА при отказе одновременно двух двигателей. Время полета на одном полностью заряженном аккумуляторе составляет 25 минут на удалении, со стандартной антенной на наземном пульте управления до 1,6 км и до 4 км с направленной антенной, на высоте до 122 м. Полет допускается при отсутствии атмосферных осадков, силе ветра до 10 м/с и температуре воздуха от 0° до +40 °С.

Полезная нагрузка Yuneec Typhoon H имеет сменную, модульную конструкцию и включает в себя фото-видеокамеру CGO3+ с матрицей 1/2,3 дюйма и эффективным числом пикселей 12,4 Мп, обеспечивающую получение фотоснимков с размером кадра 4000×3000 пикселей и запись видео в формате 4K с частотой 30 кадров/с. Также в комплект БПЛА входит тепловизор CGO-ET с матрицей 2 мегапикселя, высокой температурной чувствительностью (NETD) < 50мК, диапазоном измеряемых температур от 10 °С до 180 °С.

БПЛА мультироторного типа Yuneec Typhoon H (слева) и DJI Phantom 4 Pro



БПЛА DJI Phantom 4 Pro выполнен по схеме с четырьмя двигателями, так называемый квадрокоптер. Полетное время от одного сменного аккумулятора составляет до 30 минут, на удалении от наземного пункта управления до 3,5 км на высоте до 500 м. Выполнение полетов допускается при отсутствии атмосферных осадков, силе ветра до 10 м/с и температуре воздуха от -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$. Полезная нагрузка представляет собой фото-видеокамеру с матрицей размером 1 дюйм и эффективным числом пикселей 20 Мп, обеспечивающей получение фотоснимков размером 5472×3078 пикселей и запись видео в формате 4К с частотой 30 кадров/с.

На обоих представленных БПЛА параметры объектива, условия фотосъемки, географические координаты и высота центра снимка автоматически записываются в дополнительный раздел каждого снимка по стандарту EXIF.

Работы по съемке ледовых объектов, расположенных в проливе Шокальского в непосредственной близости от НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»», с применением БПЛА мультироторного типа выполнялись с 1 апреля по 17 июля 2018 года, когда ветром был окончательно оторван припайный лед. За этот период было выполнено три съемки на полигоне «Айсберг», одна на полигоне «Торос», две на основном ледовом полигоне. Съемки по возможности выполнялись в дни с ясной погодой, обеспечивающей получение контрастных, четких фотоснимков. Доставка персонала к месту работ осуществлялась снегоходами.

Помимо БПЛА, к месту работ доставлялось спутниковое геодезическое оборудование, представленное в нашем случае маркой Sokkia GRX-2, работающее на базе глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS. Данное оборудование, произведенное по лицензии в России, обеспечивает определение координат и высот точек с ошибкой взаимного положения не более 1 см на удалении до 2 км от исходного пункта. Такая точность достаточна для привязки опорных знаков на местности для получения впоследствии цифровой модели рельефа (ЦМР), соответствующей по точности масштабу карты 1:500 с сечением рельефа через 0,5 м. Для этого перед выполнением съемки ледового объекта, равномерно, в границах съемки, наносится не менее 10 опорных знаков контрастирующего на общем фоне цвета в виде крестов

размером 30–50 см. Координаты и высоты крестов определяются с помощью спутникового геодезического оборудования в любое удобное время, при условии сохранности опорных знаков.

Подготовка БПЛА мультироторного типа к полету заключается в его извлечении из транспортной тары, установке пропеллеров, аккумуляторной батареи, запуске наземной станции управления и введении в него параметров предстоящего маршрута. Наземная станция управления полетом имеет вес не более 2 кг и легко удерживается оператором БПЛА в руках.

Хорошо зарекомендовавшая себя в ходе полевых работ схема полета над объектом съемки представляет собой сетку из параллельных галсов, расположенных с таким расчетом, чтобы получаемые снимки имели взаимное поперечное перекрытие, равное 60 %, и продольное 80 %. Решающее значение для качества получаемых снимков и необходимого полетного времени для выполнения съемки имеет высота полета аппарата. Например, для получения ЦМР масштаба 1:500 ледового полигона размером 200×200 м оптимальной высотой съемки являлись 100–125 м при трех полетах БПЛА общей длительностью 40–50 минут.

При выполнении съемок применялись автоматические настройки бортовой фотокамеры, предлагаемые по умолчанию производителем БПЛА, что оправдало себя, благодаря высокому качеству фотокамеры, индивидуальной калибровке каждой фотокамеры при производстве и постоянно улучшаемому бортовому программному обеспечению, отвечающему за получение цифровых фотоснимков.

В ходе эксплуатации БПЛА в высоких широтах (а НИС расположен выше 79° с.ш.) был выявлен постоянный отказ бортовых навигационных систем летательных аппаратов в автоматическом режиме полета. Это обстоятельство вынуждало прибегать к ручному управлению БПЛА. Ошибка навигационной системы БПЛА возникает из-за некорректной работы бортового магнитного компаса, обусловленной в свою очередь сложными геомагнитными условиями и большим значением магнитного склонения, достигающего на НИС значения 33° . Калибровка компасов, рекомендуемая производителем, не дала положительного результата. Отключение компаса

Подготовка к запуску БПЛА мультироторного типа (слева) и гидролокатора кругового обзора (справа) к работе



невозможно, так как его работа на программном уровне интегрирована в навигационную систему БПЛА.

Выполнение работ в таких условиях в ручном режиме требует от оператора БПЛА опыта и мастерства в управлении летательным аппаратом. Также это обстоятельство увеличивает минимально необходимое время для выполнения съемки, затрачиваемое на гарантированное перекрытие снимками площади изучаемого объекта.

Чтобы устранить сбой работы магнитного компаса в БПЛА, необходима их модернизация производителем для работы в условиях высоких широт или переход на профессиональные модели БПЛА, специально адаптированные для работы в сложных условиях магнитных помех, а также низких температур окружающего воздуха до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Надо отметить, что стоимость профессиональных БПЛА на порядок выше представленных в статье летательных аппаратов.

По завершении съемки с применением БПЛА и планово-высотной привязки опорных знаков спутниковым геодезическим оборудованием собранные полевые материалы обрабатываются с помощью специального программного обеспечения. Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) по снимкам использовалась программа Agisoft PhotoScan Professional, разработанная в России. Программа анализирует загруженные снимки, используя, в том числе, служебную информацию из дополнительного раздела снимка в формате EXIF, и ищет соответствия, для этого каждая точка снимаемого объекта должна быть снята как минимум с двух позиций. В результате поиска соответствий автоматической обработки строится разреженное облако из связующих точек и уточняется взаимное положение снимков в момент съемки. Для установления правильного масштаба создаваемой ЦМР в программе маркируются снимки с опорными знаками, которым присваиваются значения координат и высот, полученные спутниковым геодезическим оборудованием. На основе этих данных программа строит плотное облако точек, на примере выполненных работ — с расстоянием между соседними точками в 3–5 см, насчитывающее миллионы точек на площади съемки 200×200 метров. Возможен экспорт облака точек в геоинформационные системы (ГИС), отвечающие за

сбор, хранение, анализ и графическую визуализацию пространственных данных, например, таких, как ArcGIS, MapInfo, QGIS, Панорама.

Программа PhotoScan способна строить цифровые полигональные и тайловые модели, облегчающие визуальное представление трехмерных данных. Также возможно отображение поверхности модели в виде регулярной сетки значений высоты, то есть создание цифровой карты высот. На основании исходных снимков и полигональной модели или карты высот PhotoScan создает ортофотоплан высокого разрешения с возможностью его экспорта в цифровую модель местности (ЦММ) в форматах KMZ, KML, GeoTIFF и т.д., поддерживаемых ГИС. При этом прямо в программе на карте высот и ортофотоплане возможно определять координаты и высоты точек, измерять расстояния, площади и объемы по заданным пользователем трассам и полигонам, отображать профили разрезов, а также строить горизонтали с заданной высотой сечения. Результаты обработки снимков, построения трехмерных моделей, выполненных измерений представляются программой PhotoScan в графическом и текстовом формате в виде отчетов.

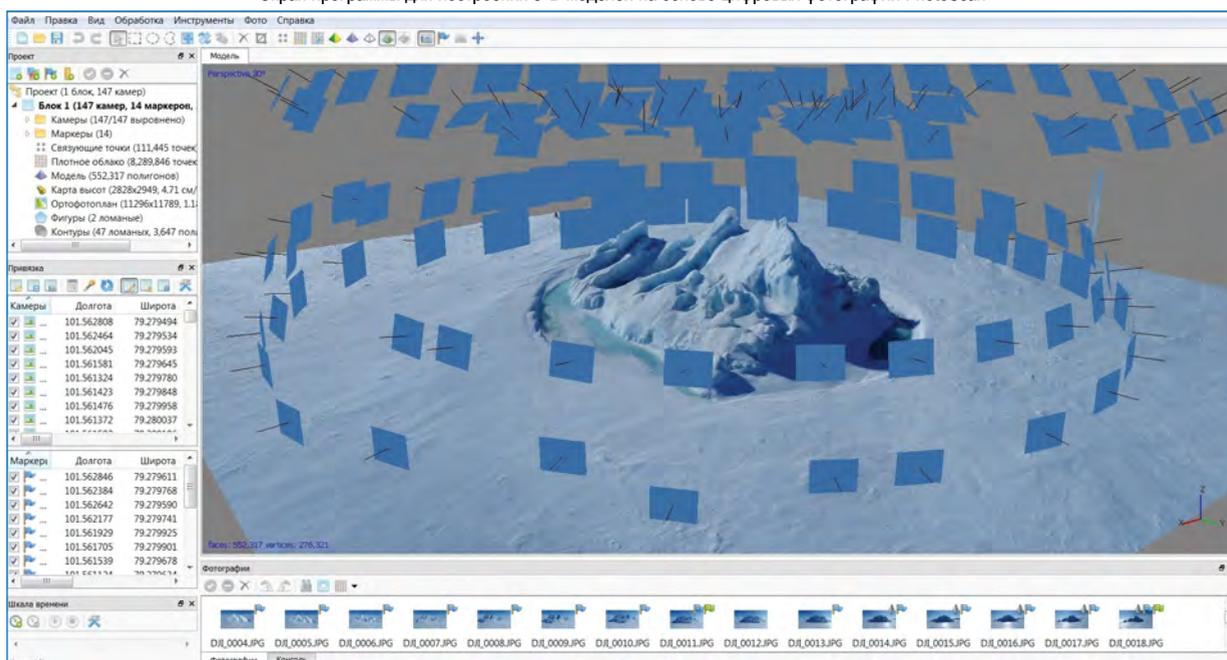
Для контроля качества получаемых с помощью БПЛА мультиторторного типа цифровых моделей рельефа в 2017 году была параллельно выполнена планово-высотная съемка полигона с айсбергом с помощью электронного тахеометра и БПЛА. Результаты сравнения показали, что расхождения положения характерных точек контуров ледового объекта в обоих вариантах съемки в плане не превышали 25 см, по высоте 15 см, что соответствует требованиям по созданию топографических планов масштаба 1:500, с высотой сечения рельефа 0,5 м.

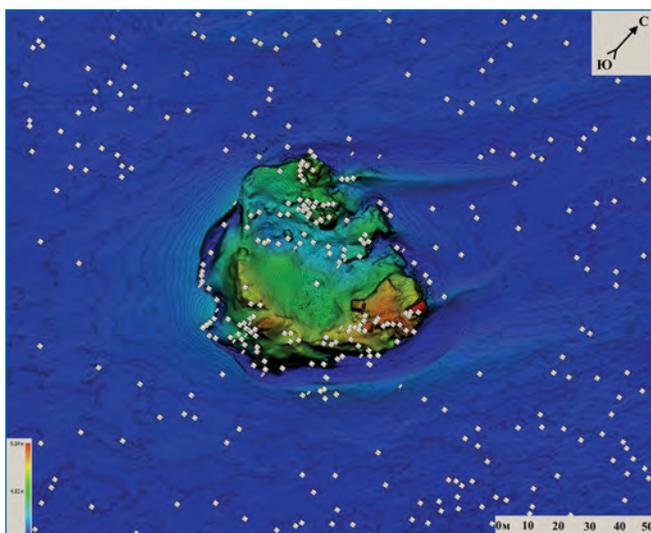
Во время работы сезонного отряда экспедиции «Север-2018» было выполнено три съемки ледового полигона «Айсберг»: 3 марта, 21 июня и 17 июля.

Съемка полигона «Торос» была выполнена 13 мая, основного ледового полигона 10 мая и 3 июля 2018 года. По результатам каждой съемки были построены масштабные цифровые модели рельефа и произведены необходимые измерения для нужд ледовых исследований.

Опираясь на опыт съемки ледовых объектов с помощью БПЛА мультиторторного типа, можно утверждать,

Экран программы для построения 3-D моделей на основе цифровых фотографий PhotoScan



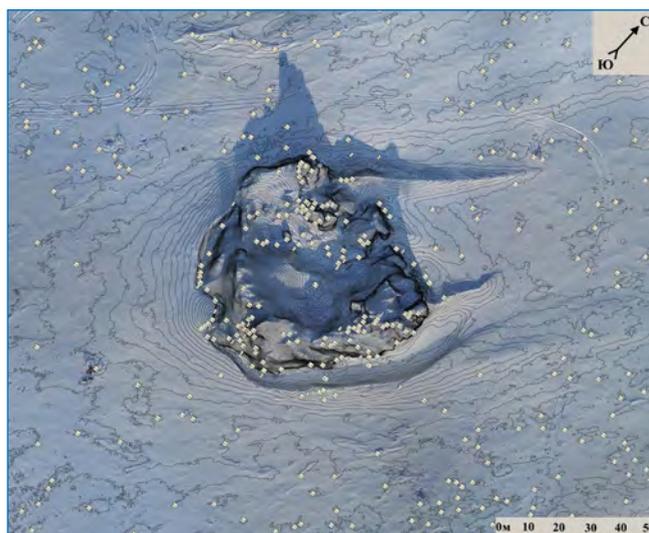


Карта высот ледового полигона Айсберг, построенная в программе PhotoScan

что полный цикл от съемки до получения цифровой модели местности типа айсберг размером 100x100 м в масштабе 1:500, с сечением рельефа через 0,5 м, займет не менее 5 часов. Из них размещение опорных знаков и их планово-высотная привязка спутниковым геодезическим оборудованием — 30 минут. Съемка айсберга с БПЛА при благоприятных метеоусловиях с получением порядка 100 фотоснимков — 30 минут. Обработка снимков в программном обеспечении PhotoScan на компьютере с частотой процессора 3,4 ГГц, оперативной памятью 16 ГБ — 4 часа. При этом время обработки в программе возможно сократить до 1–2 часов, если для работы достаточно менее детальная модель объекта, построенная на основе разреженного, а не плотного облака точек.

Достоинство метода получения трехмерной модели ледового объекта с помощью комплекса БПЛА мультироторного типа и специализированного программного обеспечения заключается в быстром получении большого объема данных высокого качества по сравнению с любыми другими методами. Также съемка ледового объекта может выполняться дистанционно, без непосредственного нахождения на нем человека, что исключает антропогенное влияние на процессы, происходящие на ледовом полигоне, а также сводит к минимуму риск травмирования людей при работах на потенциально опасных объектах, например таких, как айсберги, или при наблюдении за морским льдом в периоды его активного образования и разрушения.

Ограничением для выполнения съемки с помощью представленных БПЛА является наличие атмосферных осадков, ветер силой более 10 м/с и температура воздуха ниже 10 °С. Испытания модели DJI Phantom 4 Pro при температуре воздуха –30 °С и слабом ветре доказали работоспособность данного оборудования в течение двух последовательных полетов с установкой теплых аккумуляторных батарей и немедленного запуска БПЛА, обеспечивающего в ходе его работы разогрев элементов питания. Но надо признать, что данные БПЛА не рассчитаны на условия эксплуатации ниже –10 °С, что подтвердилось отказом оборудования при попытке выполнить третий полет подряд. Помещение БПЛА в теплое помещение восстановило его работоспособность. Надо отметить, что на розничном рынке представлены профессиональные БПЛА мультироторного типа, рассчитанные на работу при температуре воздуха до –40 °С.



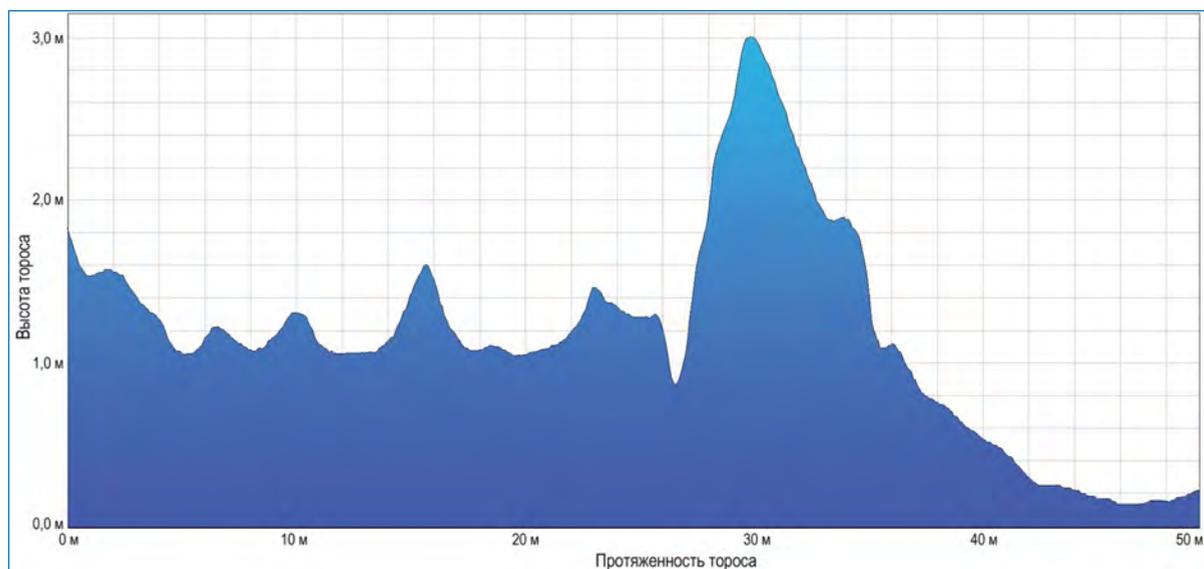
Ортофотоплан ледового полигона Айсберг, построенный в программе PhotoScan

Не исчерпаны ресурсы и по модернизации для работы в суровых климатических условиях имеющегося оборудования.

БПЛА мультироторного типа имеют свою нишу в иерархии воздушных методов исследования ледяного покрова. Спутниковая информация охватывает значительные территории от десятков до сотен километров. БПЛА самолетного типа покрывают съемкой за время работы от километров до десятков километров. БПЛА мультироторного типа могут очень оперативно исследовать площади от десятков до сотен метров, что делает их незаменимыми при изучении ограниченных участков ледяного покрова или отдельных ледообразований. На базе полученных с БПЛА материалов можно оперативно строить схемы рельефа поверхности льда и ледяных образований с заданной точностью, строить продольные профили превышения на поверхности льда в заданных направлениях, планировать ледоисследовательские работы, выполняемые контактным методом, отслеживать изменения, происходящие с ледовыми объектами во времени. Все эти работы в различных сочетаниях выполнялись на НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»», что позволило не только получать оперативные данные о состоянии ледовых объектов, но и осуществлять планирование следующих этапов исследований, учитывая происходящие в ледяном покрове изменения, на основании материалов, полученных с БПЛА.

Очень интересные результаты получаются при совместной съемке поверхности ледяного покрова с помощью БПЛА и гидролокационной съемке подводной части ледяных образований. На НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»» в 2018 году проводились такие совместные работы в районе айсберга и торосов.

Для съемки подводной части ледовых объектов применялся профилирующий гидролокатор кругового обзора Imagenex 881A (ГКО), оборудованный приводом вращения Azimuth Drive и модулем ориентации. Данное оборудование позволяет получать ЦМР с точностью до нескольких сантиметров. ГКО опускался с помощью треноги и ручной лебедки на стальном тросе на глубину до 95 м в четыре предварительно пробуренные майны диаметром 0,5 м, расположенные равномерно по периметру исследуемого ледового объекта на удалении до 60 м. Подводная съемка охватывает круг с радиусом в 100 м, в центре которого размещен гидролокатор. Степень получаемой



Профиль разреза ледового полигона «Торос», построенный в программе Agisoft PhotoScan Professional

детализации ЦМР регулируется настройкой шага сканирующего луча гидролокатора. В среднем съемка с одной точки без учета подготовительных работ, таких как бурение майны, разворачивание и настройка оборудования, занимает 1,5 часа. Точки погружения ГКО привязываются в плане и по высоте в единой системе координат высот с опорными знаками для съемки с БПЛА с помощью спутникового геодезического оборудования. Полученные в результате гидролокационной съемки данные обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения Surf3D\DataCorr, Qloud и экспортируются в ГИС в виде облака точек.

На основании материалов гидролокационной съемки удалось получить трехмерные изображения подводной части ледовых объектов, в том числе и айсберга. В результате совмещения съемок с БПЛА и гидролокационной появляется возможность с помощью современных программ обработки данных построить трехмерное изображение ледового объекта в заданном масштабе, на основании которого можно проводить расчеты по его объему или по объему его частей, выполнять срезы ледяного образования в любых заданных направлениях, а также выполнять другие расчетные процедуры, связанные с изучением ледового объекта. При этом на само ледяное образование не оказывается прямого физического воздействия, что неизбежно происходит при его изучении с помощью контактных методов. К сожалению, на современном этапе время, затрачиваемое на проведение гидролокационной съемки и обработку полученных материалов, гораздо продолжительнее, чем при получении и обработке материалов с БПЛА мультироторного типа. Это затрудняет полноценное использование этих двух методов одновременно для оперативной съемки ледяного покрова, что бывает необходимо. Развитие специального гидролокационного оборудования и методов числовой обработки данных, постоянно накапливаемый опыт проведения работ по изучению ледовых объектов позволяют надеяться, что эта проблема в ближайшее время будет разрешена.

Перспективным направлением можно считать оснащение БПЛА аппаратурой, позволяющей делать снимки в инфракрасном изображении. В зимний период, когда в арктических районах наступает полярная ночь и фотографирование в видимом диапазоне становится невозможным, инфракрасный спектр остается единственно до-

ступным для площадной фотографической съемки. Но для работы в зимних условиях необходим летательный аппарат и соответствующая аппаратура, способные выполнять работы при температурах порядка $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Напомним, что БПЛА Yuneec Turphoon H, оснащенный таким оборудованием, рассчитан для работы при температуре воздуха до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Применение БПЛА мультироторного типа открывает новые возможности в изучении ледяного покрова. Получаемые в результате съемок с БПЛА материалы могут использоваться как самостоятельно, так и в комплексе с другими методами изучения ледяных образований. На НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»» БПЛА мультироторного типа начали применяться с 2016 года. С их помощью получены площадные фотографии ровного льда, фотографии торосистых образований, фотографии айсбергов и льда вокруг них, фотографии прибрежной зоны ледяного покрова в районе интенсивного снегонакопления. Современные методы обработки фотоснимков с БПЛА позволяют получать не только качественные фотографические изображения ледовых объектов, но превышения отдельных точек рельефа относительно заданного уровня, что в свою очередь позволяет получать трехмерные изображения этих объектов или площадные схемы распределения высот с нанесенными изолиниями. Привязав полученные превышения поверхности ледяного образования к уровню моря, можно построить схемы превышений, которые, в свою очередь, можно сравнивать с другими схемами подобных объектов или прослеживать изменения, происходящие в ледяном образовании в течение заданного времени. Причем объект может находиться вне прямой досягаемости для контактных методов исследования. Например, при работе в бухте Амба пролива Шокальского картографические съемки поверхности льда и снега вокруг айсбергов, выполненные с помощью БПЛА, позволили оконтурить участки с аккумуляцией снега. Зная процессы формирования льда в условиях интенсивного снегонакопления у айсбергов, на основании материалов БПЛА появилась возможность спрогнозировать положение зон с образованием водно-снежного льда и зон наледи, предположить вероятные изменения процентного соотношения льда, нарощенного сверху и снизу, на отдельных участках.

*В.А. Бородкин, А.С. Парамзин,
С.В. Хотченков (ААНИИ)*