УДК: 528.7:910.4

И.В. Флоринский¹

БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА В ЛЕТНИЙ СЕЗОН 67-Й РОССИЙСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ

АННОТАЦИЯ

Применение беспилотных авиационных систем (БАС) в гляциологии и криологии, а также при исследованиях и мониторинге полярных областей является одним из наиболее бурно развивающихся направлений беспилотных авиационных работ. Аэрофотогеодезическим отрядом 67-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) решались две основные взаимосвязанные задачи: 1) полевые испытания новейшей российской БАС Геоскан 701 в условиях Антарктики и 2) проведение беспилотной аэрофотосъемки двух антарктических территорий, характеризующихся принципиально различными природными условиями, с целью получения их высокоточных ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР) сверхвысокого разрешения. 15 января 2022 г. была проведена беспилотная аэрофотосъемка двух соседних приморских антарктических оазисов Молодежный и Вечерний и окружающих их участков ледника (Земля Эндерби, Восточная Антарктида). С 26 января по 16 февраля 2022 г. была проведена беспилотная аэрофотосъемка полуострова Файлдс (свободная от покровного оледенения юго-западная оконечность острова Кинг Джордж, Южные Шетландские острова, Западная Антарктика). Работы были осложнены тяжелыми метеорологическими условиями (низкая облачность, туман, сильный ветер и осадки). Полевые испытания БАС Геоскан 701 показали, что система может успешно применяться для беспилотной аэрофотосъемки в полярных регионах, хотя и требует определенных доработок. После камеральной фотограмметрической обработки полученных материалов будут созданы ортофотопланы и ЦМР указанных территорий с разрешением 10 и 25 см соответственно. Они будут использованы для создания современных крупномасштабных топографических карт, фотокарт, трехмерных цифровых моделей местности и геоморфометрического моделирования этих территорий, а также для оперативной и научной деятельности РАЭ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: беспилотная авиационная система, аэрофотосъемка, Антарктика

¹ Институт математических проблем биологии РАН – филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», Московская обл., Пущино, 142290, Россия; *e-mail:* **iflor@mail.ru**

Igor V. Florinsky¹

UNMANNED AERIAL SURVEY IN THE SUMMER SEASON OF THE 67TH RUSSIAN ANTARCTIC EXPEDITION

ABSTRACT

The use of unmanned aerial systems (UAS) in glaciology and cryology, as well as studying and monitoring of polar regions is one of the most rapidly developing areas of the unmanned aerial industry. An aerial photogeodetic team of the 67th Russian Antarctic Expedition (RAE) solved two main interrelated tasks: 1) field tests of the newest Russian UAS Geoscan 701 in Antarctic conditions and 2) carrying out unmanned aerial surveys of two Antarctic territories, characterized by fundamentally different natural conditions, in order to obtain their high-precision orthomosaics and digital elevation models (DEMs) of an ultra-high resolution. On 15 January 2022, we carried out an unmanned aerial survey of two adjacent Antarctic maritime oases Molodezhny and Vecherny and surrounding areas of the glacier (Enderby Land, East Antarctica). From 26 January to 16 February 2022, we performed an unmanned aerial survey of the Fildes Peninsula (the southwestern, free of ice cover portion of the King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica). The survey was complicated by severe meteorological conditions (low clouds, fog, strong winds, and precipitation). Field tests of UAS Geoscan 701 have shown that the system can be successfully used for unmanned aerial survey in polar regions. After in-office photogrammetric processing of the obtained materials, orthomosaics and DEMs of the indicated territories will be obtained with a resolution of 10 and 25 cm, respectively. These will be used for creation of modern large-scale topographic maps, photographic maps, three-dimensional and geomorphometric modeling of these territories, as well as operational and scientific activities of the RAE.

KEYWORDS: unmanned aerial system, aerial survey, Antarctica

введение

Применение беспилотных авиационных систем (БАС) в гляциологии и криологии, а также в исследованиях различной направленности и мониторинге полярных областей является одним из наиболее бурно развивающихся направлений беспилотных авиационных работ, в частности – беспилотной аэрофотосъемки [*Bhardwaj* et al., 2016; *Bliakharskii* et al., 2019; *Ewertowski* et al., 2019; *Gaffey, Bhardwaj*, 2020]. По сравнению с пилотируемой аэрофотосъемкой преимущества использования БАС (при сопоставимом качестве и точности получаемых материалов) очевидны: дешевизна полетного времени, оперативность развертывания, отсутствие необходимости в наземной инфраструктуре. БАС дополняют и могут заменять наземные маршруты по ледникам и прилегающим территориям в связи с их труднодоступностью и ограничениями по технике безопасности (опасность ледниковых трещин). Вместе с тем суровые условия высокогорья и Заполярья предъявляют дополнительные, достаточно жесткие требования как к конструкциям БАС, так и к организации полетов [*Бляхарский*, 2019; *Bliakharskii* et al., 2019].

В ноябре 2021 г. началась 67-я Российская антарктическая экспедиция^{2, 3} (РАЭ). В научную программу летнего сезона 67-й РАЭ была включена программа исследования

¹ Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia; *e-mail:* iflor@mail.ru

² В рейс 67-й РАЭ выходит научно-экспедиционное судно «Академик Фёдоров». Новости института, 1 ноября 2021 г. СПб.: ААНИИ, 2021. Электронный ресурс: https://www.aari.ru/press-center/news/novosti-aari/ v-reys-67-y-rae-vykhodit-nauchno-ekspeditsionnoe-sudno-«akademik-fyodorov» (дата обращения 29.04.2022)

³ «Академик Трешников» отправился в Антарктиду. Новости института, 1 декабря 2021. СПб.: ААНИИ, 2021. Электронный ресурс: https://www.aari.ru/press-center/news/novosti-aari/«akademik-tryoshnikov»-otpravilsya-v-antarktidu (дата обращения 29.04.2022)

различных аспектов применения БАС для изучения антарктических оазисов и других свободных от покровного оледенения прибрежных районов. Такие территории, несмотря на небольшие размеры, имеют важное научное и практическое значение для исследований Антарктики. Из-за своей относительной доступности эти территории удобны для строительства круглогодичных станций и сезонных баз, привлекают ученых возможностью получать значительный объем научного материала за короткие сроки сезонных работ, а также привлекают многочисленных туристов [Сократова, 2010].

Для проведения работ были выбраны две территории: 1) два соседних приморских оазиса Молодежный и Вечерний и окружающие их участки ледника (побережье Земли Эндерби, Восточная Антарктида) и 2) полуостров Файлдс (свободная от оледенения юго-западная оконечность острова Кинг Джордж, Южные Шетландские острова, Западная Антарктика) (*puc. 1*). Нами решались две основные взаимосвязанные задачи:

1) полевые испытания новейшей российской БАС Геоскан 701¹, предназначенной для профессиональной аэрофотосъемки, в условиях Антарктики;

2) проведение беспилотной аэрофотосъемки двух антарктических территорий, характеризующихся принципиально различными природными условиями, с целью получения их высокоточных ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР) сверхвысокого разрешения, которые, в свою очередь, должны быть использованы для создания современных крупномасштабных топографических карт этих территорий.

Первая задача не требует специальных обоснований или пояснений. Остановимся подробнее на обосновании второй задачи наших работ.



Рис. 1. Географическое положение районов исследования: 1 – оазисы Молодежный и Вечерний, 2 – полуостров Файлдс Fig. 1. Geographic position of the study areas: 1 – Molodezhny and Vecherny Oases, 2 – Fildes Peninsula

Оазисы Молодежный и Вечерний

Для территорий антарктических оазисов на протяжении всего периода изучения Антарктиды периодически проводились аэрофотогеодезические работы и составлялись средне- и крупномасштабные топографические карты различной детальности и точности [*Сократова*, 2010]. В частности, на территорию приморских оазисов Молодежный и Вечерний, в которых расположены сезонные базы Молодежная (Россия) и Гора Вечерняя (Белоруссия), соответственно, существуют топографические карты масштабов 1: 50 000 и 1: 10 000 [Топографическая карта..., 1972; Район научной стан-

¹Геоскан 701. СПб.: ГК Геоскан, 2022. Электронный ресурс: https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan701 (дата обращения 29.04.2022)

ции..., 2005] (*puc.* 2), но они уже устарели и не отвечают современным требованиям по точности и качеству.

В ходе проектирования новой сезонной базы Гора Вечерняя путем оцифровки горизонталей топографической карты масштаба 1: 25 000 была составлена ЦМР базы с разрешением 20 м [Строительство..., 2015]. ЦМР Антарктики REMA [*Howat* et al., 2019], созданная по архивным снимкам космических аппаратов WorldView и GeoEye, также имеет невысокое пространственное разрешение и точность: для района оазисов Молодежный и Вечерний ее разрешение составляет 2 м, а вертикальная ошибка – до 1 м. REMA и исходные снимки могут использоваться для рекогносцировочных целей.



Puc. 2. Оазисы Молодежный и Вечерний [Район научной станции..., 2005] Fig. 2. Molodezhny and Vecherny Oases [Area of the scientific station..., 2005]

В ходе проектирования новой сезонной базы Гора Вечерняя белорусскими коллегами проводилась беспилотная аэрофотосъемка и был получен ортофотоплан высокого разрешения [Строительство..., 2015]. В 2017 г. сотрудником ГК Геоскан также была проведена беспилотная аэрофотосъемка территории сезонной базы Молодежная. На основе полученных данных были созданы детальный ортофотоплан и ЦМР этой территории (разрешение 25 см)¹. В 2017 г. сотрудники АО «Аэрогеодезия» путем наземной топографической съемки этой сезонной базы составило топографическую карту (1: 5 000)², с севера и запада ограниченную береговой полосой, с востока – бухтой Заря, а с юга – взлетно-посадочной полосой снежно-ледового аэродрома.

Базы Молодежная и Гора Вечерняя имеют различную государственную принадлежность и расположены на расстоянии 19 км друг от друга, однако они являются связанными объектами. Для их надежного функционирования необходимо иметь актуальные высокоточные топографо-геодезические продукты высокого разрешения – ортофотоплан, ЦМР, крупномасштабную топографическую карту, фотокарту и трехмерную цифровую модель местности (3D ЦММ) – причем не только на районы баз, но и на всю территорию оазисов и окружающие их участки ледника. Особенно это важно в том случае, если будет принято решение о расконсервации Молодежной и возвращения ей статуса круглогодичной станции, что потребует проведения реновационных работ.

Полуостров Файлдс

Хотя пилотируемая и беспилотная аэрофотосъемка и топографическое картографирование полуострова Файлдс периодически проводились профильными организациями различных государств, для этой территории до сих пор отсутствуют современные высокоточные карты и модели высокого разрешения. Сотрудники РАЭ вынуждены пользоваться устаревшими неточными крупномасштабными (1: 25 000, 1: 10 000 и 1: 5 000) топографическими картами полуострова Файлдс и района станции Беллинсгаузен советского [Атлантический океан..., 1989; Остров Кинг-Джордж..., 2005] и чилийского [Isla Rey Jorge..., 1996] (*puc. 3*) производства, российской научно-популярной картой (1: 40 000) [Остров Кинг Джордж..., 2018], а также немецкой [*Braun* et al., 2001; King George Island..., 2001] и южнокорейской [King George Island..., 2011] среднемасштабными (1: 100 000) обзорными картами острова Кинг Джордж.

На указанных картах часто наблюдается некорректное изображение местности, в частности гидрографии, что связано со слабым знакомством составителей с территорией, т.к. полевое дешифрирование аэрофотоснимков ими не проводилось.

Существует ортофотоплан территории станции Беллинсгаузен, который был создан в 2019 г. сотрудниками АО «Аэрогеодезия» и отрядом мерзлотоведов ИФХиБПП РАН по данным беспилотной аэрофотосъемки, выполненной с помощью квадрокоптера потребительского класса³. Кроме того, в 2018 г. с помощью наземной топографической съемки сотрудники АО «Аэрогеодезия» составили топографическую карту масштаба 1: 5 000 на станцию Беллинсгаузен и ближайшую прилегающую территорию⁴.

Уругвайским Военно-географическим институтом в 2019–2021 гг. была проведена беспилотная аэрофотосъемка части полуострова Файлдс вблизи станции Артигас и был создан геопортал⁵, который позволяет строить топографическую карту в двух основных масштабах: 1: 40 000 на весь полуостров по данным Британской антарктической съемки⁶ (детальность, качество и точность оставляет желать лучшего) и 1: 5 000 на окрестности станции Артигас по данным уругвайской беспилотной аэрофотосъемки (ортофотоплан также доступен на геопортале).

¹Сообщение Д.П. Бляхарского, 2018

²Сообщение Д.В. Федорова, март 2022

³Сообщение Д.В. Федорова, март 2022

⁴Сообщение Д.В. Федорова, март 2022

⁵ Visualizador IGM v. 1.0.1. Montevideo: Instituto Geográfico Militar, 2021. Электронный ресурс: http:// antarctida. igm.gub.uy/ (дата обращения 29.04.2022)

⁶ Antarctic Digital Database. Cambridge: Scientific Committee on Antarctic Research, Scott Polar Research Institute, 2020. Электронный ресурс: https://www.scar.org/resources/antarctic-digital-database/ (дата обращения 29.04.2022)



Рис. 3. Полуостров Файлдс [Isla Rey Jorge..., 1996] Fig. 3. Fildes Peninsula [Isla Rey Jorge..., 1996]

ЦМР Антарктики REMA [*Howat* et al., 2019] для полуострова Файлдс имеет невысокое пространственное разрешение (2 м) и точность (вертикальная ошибка 2,5 м).

Отсутствие современных точных материалов: крупномасштабной топографической карты, фотокарты, ортофотоплана, ЦМР и 3D ЦММ высокого разрешения полуострова Файлдс затрудняет корректное проведение научных исследований и тематическое (геоморфологическое, почвенное, геологическое) картографирование этой территории, весьма популярной как среди ученых, так и среди туристов (см. сл. раздел). Специалисты смежных областей вынуждены использовать имеющиеся топографические карты, что приводит к получению достаточно дискуссионных тематических карт (например, почвенная карта полуострова в статье [*Lupachev* et al., 2020]).

Постановка задачи

Таким образом, для оазисов Молодежный и Вечерний, а также полуострова Файлдс актуально создание новых высокоточных картографо-геодезических продуктов высокого разрешения – ортофотопланов, ЦМР, крупномасштабных топографических карт, фотокарт и 3D ЦММ. Их создание в сегодняшних технических реалиях оптимально проводить на основе материалов беспилотной аэрофотосъемки. В методологическом плане такие работы – беспилотная аэрофотосъемка, фотограмметрическая обработка, топографическое картографирование и 3D моделирование – представляют существенный интерес еще и потому, что объектами исследования являются две антарктические территории, которые характеризуются принципиально различными природными условиями. В данной статье описан первый этап этих работ: беспилотная аэрофотосъемка района приморских оазисов Молодежный и Вечерний, а также полуострова Файлдс.

ОПИСАНИЕ РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оазисы Молодежный и Вечерний

Антарктические приморские оазисы Молодежный и Вечерний расположены на холмах Тала на берегу залива Алашева моря Космонавтов (*рис. 2*). В пределах оазисов рельеф представлен экзарационным скалистым мелкосопочником, состоящим из нескольких гряд, вытянутых параллельно берегу и разделенным заснеженными террасированными долинами с ледниками, озерами и руслами временных водотоков [Строительство..., 2015]. Территория характеризуется высотами от 0 до 42 м н.у.м. в оазисе Молодежный и от 0 до 272 м в оазисе Вечерний. В 1,5–2 км от берега начинается подъем на ледниковый щит.

Оазисы Молодежный и Вечерний, а также прилегающая к ним территория находятся в пределах Антарктического докембрийского кристаллического щита. Территория сложена в основном гнейсами и плагиогнейсами [Строительство..., 2015].

Для этой территории характерен климат антарктических оазисов, при котором наблюдается положительный тепловой баланс, определяемый существенным поглощением солнечной радиации темной поверхностью скал. Растительность представлена лишайниками, мхами и наземными водорослями. Фауна: пингвин Адели, южнополярный поморник, качурка Вильсона, тюлень Уэделла [Строительство..., 2015].

В оазисах Молодежный и Вечерний на расстоянии 19 км друг от друга расположены сезонные базы Молодежная и Гора Вечерняя соответственно.

Полуостров Файлдс

Полуостров Файлдс является свободной от покровного оледенения юго-западной оконечностью острова Кинг Джордж (Ватерлоо), входящего в состав Южных Шетландских островов (Западная Антарктика) (*рис. 3*). Полуостров имеет размеры ~15 × ~5 км, вытянут с юго-запада на северо-восток и ограничен с юго-востока заливом Максвелл пролива Брансфилд, с юго-запада проливом Файлдс, с северо-запада проливом Дрейка и с северо-востока ледниковым полем Арктовски.

Рельеф полуострова представляет собой в основном мелкосопочник с высотами от 0 до ~160 м и включает скалистое побережье и бухты, экзарационно-денудационное плато, древнюю и современную абразионные поверхности, денудационно-аккумулятивные морские террасы, скалистое низкогорье и долины. Северо-восточная часть полуострова между свободной от покровного оледенения территорией и ледниковым полем Арктовски занята ледниковым куполом Беллинсгаузен с высотами от 0 до ~250 м. На полуострове распространены небольшие снежники и мелкие озера; территория дренирована десятками небольших ручьев; повсеместно встречаются относительно небольшие участки топкого грунта.

Полуостров сложен вулканогенными породами (преимущественно базальтами, андезитами и туфами) позднего мела, включая прослойки вулканопластических отложений между андезитовыми породами с вышележащими слоями известняков, туфовых конгломератов, песчаника и глины раннего и среднего эоцена [Пересмотренный план..., 2009 (a)].

Климат полуострова морской антарктический. Свободная ото льда и снега территория полуострова представляет собой антарктическую пустыню; растительный покров представлен лишайниками и мхами; на отдельных участках встречаются два эндемических вида травянистой растительности. Из фауны на побережье и близлежащих островах и морских скалах имеются колонии трех видов пингвинов (папуанский, антарктический и Адели); на приморских террасах гнездятся гигантский буревестник и крачка; в бухтах встречаются колонии морского слона, морского леопарда, тюленя Уэдделла и морского котика; летом повсеместно гнездится бурый поморник.

Полуостров Файлдс является наиболее обжитой частью острова Кинг Джордж и одним из наиболее плотно населенных и застроенных районов Антарктики. Здесь расположены четыре круглогодичные станции: Беллинсгаузен (Россия), Президент Эдуардо Фрей Монталва (Чили; территориально совпадает с поселком Вилья-лас-Эстрельяс), Артигас (Уругвай) и Чанчэн (Китай), чилийский аэропорт Тениенте Родолфо Марш Мартин, бразильский сезонный полевой лагерь, а также шесть приютов (российский, китайский, немецкий, два чилийских и аргентинский). Все круглогодичные станции и аэропорт соединены грунтовыми дорогами, проходящими вдоль юго-восточного побережья полуострова; одна из дорог от станции Артигас вдоль края купола Беллинсгаузен доходит до пролива Дрейка в районе российского приюта Природа.

На полуострове имеется несколько особо охраняемых природных территорий орнитологического и палеонтологического профиля (остров Ардли, гора Окаменелостей, часть Северной долины и др.) [Пересмотренный план..., 2009 (а, б)].

Бухта Ардли, на берегу которой расположены станции Беллинсгаузен и Фрей, является местом стоянки военных и туристических круизных судов; в летнее время через станцию Фрей и аэропорт Марш идет поток туристов; ежегодно на полуострове между станциями Беллинсгаузен и Артигас проводятся Антарктические марафоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работы проводились аэрофотогеодезическим отрядом в составе двух человек: руководитель работ – автор статьи и оператор БАС С.В. Александров (ГК Геоскан). В ходе работ использовалось следующее оборудование, принадлежащее ГК Геоскан:

1. Два комплекта БАС Геоскан 701, в каждый из которых входит:

 – беспилотное воздушное судно (БВС) самолетного типа с двигателем внутреннего сгорания карбюраторного типа, позволяющим находиться в воздухе до 10 ч, оснащенное камерой Sony RX1RM2 и приемником ГНСС геодезического класса Торсоп;

- катапульта на резиновых жгутах;
- наземная станция управления (HCУ);
- радиомодем.

2. Комплект БАС Геоскан 201¹, в который входит:

– БВС типа «летающее крыло» с электрическим двигателем, позволяющим находиться в воздухе до 2,5 ч, оснащенный камерой Sony DSC-RX1 и приемником ГНСС геодезического класса Topconb110;

- катапульта на резиновых жгутах;
- НСУ;
- радиомодем.
- 3. Базовая ГНСС-станция Торсоп Hiper+.
- 4. Геодезический штатив с трегером.
- 5. Бензогенератор Hitachi E24.

Оазисы Молодежный и Вечерний

15 января 2022 г. прошли первые в условиях Антарктики полевые испытания БАС Геоскан 701. С ее помощью была проведена беспилотная аэрофотосъемка оазисов Молодежный и Вечерний и окружающих их участков ледника. Аэрофотогеодезический отряд и оборудование были доставлены на сезонную базу Молодежная на вертолете Ка-32С с борта научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Трёшников», стоявшего в припае в море Космонавтов на расстоянии 28 км от берега.

<u>Аэрофотосъемка</u>

Погодные условия были идеальны для проведения беспилотной аэрофотосъемки: ясное безоблачное небо, ветер юго-юго-западный 2 м/с у поверхности и на высоте съемки, температура +3 °C у поверхности и приблизительно –5 °C на высоте съемки.

В качестве стартовой позиции была выбрана необорудованная вертолетная площадка базы Молодежная (*puc. 4*). После создания в НСУ полетного задания и задания параметров полета [Geoscan Planner..., 2017], была проведена регламентная предстартовая подготовка БАС, а также установка базовой ГНСС-станции на геодезическом пункте на вершине ближайшего холма. Старт БВС был осуществлен с помощью катапульты.

Полет БВС проходил в автоматическом режиме с помощью автопилота, с крейсерской скоростью 90 км/ч, на высоте ~700 м над уровнем поверхности и включал 15 параллельных маршрутов (*puc. 5*). Время полета БВС составило 228 мин. Радиосвязь между НСУ и бортом и передача телеметрии поддерживалась с помощью модема, установленного на крыше ближайшего дома. Электропитание для НСУ поддерживал бензогенератор. Посадка БВС рядом с точкой старта была осуществлена с использованием парашюта и баллонета. В ходе полета элементы БАС работали штатно.

Использовались настройки камеры: выдержка 1/1000, диафрагма 4,5, подбор значений ISO автоматический; запись снимков в формате JPEG. Продольное и поперечное перекрытие снимков составило 70 и 50 % соответственно. В ходе полета с помощью бортового ГНСС-приемника были определены высокоточные координаты центров проекций снимков (подход прямого геопозиционирования [*Turner* et al., 2012; 2014]). В качестве опорного пункта использовалась станция сети International Terrestrial Reference System (ITRS) GRA1, расположенная на территории сезонной базы Молодежная.

¹Геоскан 201 Геодезия. СПб.: ГК Геоскан, 2016. Электронный ресурс: https://www.geoscan.aero/ru/products/ geoscan201/geo (дата обращения 29.04.2022)



Рис. 4. БВС Геоскан 701 на стартовой позиции на сезонной базе Молодежная. Фото автора Fig. 4. UAV Geoscan 701 at the launch position at the Molodezhnaya Seasonal Base. Photo by the author



Рис. 5. Схема отснятой территории оазисов Молодежный и Вечерний и окружающих их участков ледника. Голубые флажки – сезонные базы Молодежная и Гора Вечерняя; синие линии – маршруты полета; цифры – маршрутные точки
 Fig. 5. Scheme of the surveyed territory of the Molodezhny and Vecherny Oases and the glacier section between them. Blue flags are Molodezhnaya and Gora Vechernyaya Seasonal Bases; blue lines are flight routes; numbers are waypoints

Пеший рекогносцировочный маршрут

Для обеспечения последующего корректного камерального дешифрирования ортофотоплана при составлении новой крупномасштабной топографической карты отснятой территории 15 января автором статьи был совершен пеший рекогносцировочный кольцевой маршрут длиной около 6 км по территории базы Молодежная и прилегающей территории (*puc. 6*); при этом проводилось подробное фотографирование ландшафтов территории. Значительная часть маршрута проходила по пересеченной местности, по скалистым склонам и снежникам, часть маршрута – вдоль существующих грунтовых дорог. Ограниченность по времени (высадка на Молодежной длилась около 10 ч) не позволила провести других пеших рекогносцировочных маршрутов по отснятой территории.

Полуостров Файлдс

Беспилотная аэрофотосъемка полуострова Файлдс проводилась в январе – феврале 2022 г. Аэрофотогеодезический отряд и оборудование были доставлены на станцию Беллинсгаузен на самоходной барже «Андерма» с борта НЭС «Академик Трёшников», стоявшего на рейде бухты Ардли на расстоянии 2 км от берега.

Обустройство контрольных точек

25 и 27 января 2022 г. были пройдены 2 пеших маршрута с целью обустройства серии контрольных точек. Первый линейный маршрут проходил вдоль побережья бухты Ардли от станции Беллинсгаузен до мыса Неблес Пойнт. Второй кольцевой маршрут проходил от станции Беллинсгаузен до пролива Дрейка, вдоль пролива до пика Горацио, затем через Южные горы и Южную долину до бухты Ардли и до станции Беллинсгаузен.

В ходе маршрутов были обустроены 9 контрольных точек (*puc. 7*), для которых были определены их высокоточные геодезические координаты с использованием базовой ГНСС-станции Topcon Hiper+. На каждой точке измерения проводились в режиме статики в течение 20 мин с периодом записи 1 с. Дальнейшая обработка данных производилась методом РРК; в качестве опорного использовался пункт фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) «Беллинсгаузен».



Puc. 6. Пеший рекогносцировочный маршрут (красные линии) по оазису Молодежный. В качестве основы использована одна из карт [Район научной станции..., 2005] Fig. 6. A walking reconnaissance route (red lines) at the Molodezhny Oasis. Background is one of a map set [Area of the scientific station..., 2005]



Рис. 7. Схема отснятой территории полуострова Файлдс. Цветные линии – маршруты полетов; звездочки – положение контрольных точек Fig. 7. Scheme of the surveyed territory of the Fildes Peninsula. Colored lines are flights; asterisks are position of the control points

В начале работ для маркировки контрольных точек использовались закрепленные в грунте белые пластиковые тарелки (обычный подход для аналогичных работ в России) (*puc. 8*). Геодезические координаты определялись для центральной точки тарелки. Однако выяснилось, что поморники агрессивно реагируют на обустройство контрольных точек и вытаскивают тарелки из земли. В дальнейшем для маркировки контрольных точек из местных камней выкладывались кресты размером $\sim 1 \times \sim 1$ м (*puc. 8*). Высокоточные геодезические координаты определялись для центральной точки креста.



Рис. 8. Определение координат контрольных точек на полуострове Файлдс. Маркировка контрольных точек: верх – пластиковая тарелка; низ – каменный крест. Фото автора

Fig. 8. Determining the coordinates of control points at the Fildes Peninsula. Marking of control points: upper – plastic plate; lower – stone cross. Photo by the author

<u>Аэрофотосъемка</u>

Несмотря на небольшие размеры полуострова Файлдс, проведение работ было сопряжено с комплексом сложных для беспилотной аэрофотосъемки метеорологических условий (низкая облачность, туман, сильный ветер, осадки). В этой связи беспилотная аэрофотосъемка проводилась в 5 этапов (*puc.* 7): 26 и 28 января, а также 12, 13 и 16 февраля 2022 г.



Рис. 9. БВС Геоскан 701 (верх) и Геоскан 201 (низ) на стартовых позициях на полуострове Файлдс (станция Беллинсгаузен и Северная долина). Фото автора Fig. 9. UAVs Geoscan 701 (upper) and Geoscan 201 (lower) at the launch positions at the Fildes Peninsula (Bellingshausen Station and Northern Valley). Photo by the author

Бо́льшая, юго-западная часть полуострова Файлдс была снята 26 и 28 января с помощью БАС Геоскан 701 (по одному полету). 12, 13 и 16 февраля производилась аэрофотосъемка оставшихся, относительно небольших северо-восточных фрагментов полуострова; для этих целей применялся БАС Геоскан 201 (по одному полету 12 и 16 февраля; два полета 13 февраля) (*puc. 9*).

После создания в НСУ полетных заданий и задания параметров полетов [Geoscan Planner..., 2017], проводилась установка базовой ГНСС-станции и регламентная предстартовая подготовка БАС. 26 и 28 января, а также 12 и 16 февраля стартовой позицией для БАС служили пустыри на станции Беллинсгаузен (в этой связи время старта, посадки и прохождения маршрутов согласовывались в реальном режиме времени по радио с диспетчерами аэропорта Марш, глиссада которого проходит над станцией Беллинсгаузен). 13 февраля стартовая позиция БАС располагалась в Северной долине, у края ледникового купола Беллинсгаузен.

Старты БВС осуществлялись с помощью катапульт. Полеты БВС проходили в автоматическом режиме с помощью автопилота, с крейсерской скоростью 90 км/ч для Геоскан 701 и 72 км/ч для Геоскан 201, на высоте ~350 м над уровнем поверхности. 26 января полет включал 33 параллельных маршрута (время полета составило 200 мин; получено 3 278 цифровых снимка), 28 января – 57 параллельных маршрутов (время полета – 325 мин; 4 646 снимков), 12 февраля – 23 маршрута (время полета – 90 мин; 1 749 снимков), 13 февраля – 29 и 21 параллельных маршрутов (время полетов – 94 и 101 мин; 1 417 и 1 183 снимков), и 16 февраля – 30 параллельных маршрутов (время полета – 89 мин; 1 147 снимков) (*рис. 7*).

Использовались следующие настройки камеры: выдержка 1/ 1 000 (26 и 28 января) и 1/ 800 (12, 13 и 16 февраля); на камере БАС Геоскан 701 использовался ручной режим с установленной диафрагмой 4,5, а на камере БАС Геоскан 201 – режим приоритета выдержки с автоматическим выбором диафрагмы; автоматический подбор значений ISO; запись снимков в формате JPEG. Продольное и поперечное перекрытие между снимками в среднем составило 70 и 50 % соответственно. В ходе полетов с помощью бортовых ГНСС-приемников определялись высокоточные координаты центров проекций снимков (подход прямого спутникового геопозиционирования [*Turner et al.*, 2012; 2014]). В качестве опорного использовался пункт ФАГС «Беллинсгаузен».

26 и 28 января, а также 12 и 16 февраля радиосвязь между НСУ и бортами и передача телеметрии поддерживалась с помощью модема, установленного на Доме Аэрологии (здание станции Беллинсгаузен, расположенное на холме). 13 февраля модем размещался в поле, рядом с точкой старта, на штанге. 26 и 28 января, а также 12 и 16 февраля электропитание для НСУ поддерживалось через станционную электросеть, а 13 февраля – с помощью бензогенератора. Посадки БВС осуществлялись рядом с точками старта с помощью парашюта и баллонета.

28 января, а также 12, 13 и 16 февраля на протяжении полетов элементы БАС работали штатно. 26 января в связи со сбоем в работе датчика уровня топлива, а также некоторых других систем БАС Геоскан 701, было принято решение о преждевременном завершении полета. Причины сбоя в полевых условиях выяснить не удалось; данный вопрос должен быть прояснен специалистами технической поддержки ГК Геоскан¹. Из-за этой посадки аэрофотосъемка полуострова была прервана и продолжена 28 января (планировался один полет 26 января). 28 января при посадке из-за сноса ветром БВС Геоскан 701 нештатно приземлился на одно из строений станции Беллинсгаузен, в результате чего получил небольшие повреждения.

Пешие рекогносцировочные маршруты

Для обеспечения последующего корректного камерального дешифрирования ортофотоплана при составлении новой крупномасштабной топографической карты полуо-

¹По всей видимости, борт попал под излучение курсо-глиссадной системы аэропорта Марш (сообщение Д.П. Бляхарского, апрель 2022)

строва Файлдс в период с 29 января по 26 февраля автором статьи были совершены 20 пеших рекогносцировочных маршрутов по полуострову, в среднем по 10 км (*puc. 10*); при этом проводилась подробное фотографирование ландшафтов территории.



Рис. 10. Пешие рекогносцировочные маршруты (красные линии) на полуострове Файлдс. В качестве основы использована карта [Остров Кинг Джордж..., 2018] Fig. 10. Walking reconnaissance routes (red lines) at the Fildes Peninsula. The map is used as the basis [King George Island..., 2018]

Значительная часть маршрутов проходила по пересеченной местности с повсеместным развитием топких грунтов, по склонам, курумам, моренам, снежникам, галечниковым и песчаным пляжам. Некоторая часть маршрутов проходила вдоль существуюцих грунтовых дорог. В результате весь полуостров Файлдс оказался покрыт плотной сетью маршрутов, которые позволили наблюдать все присутствующие здесь типы рельефа и ландшафты. Исключение составляет ледниковый купол Беллинсгаузен, прохождение по которому не проводилось по соображениям техники безопасности (наличие ледниковых трещин). Маршруты пересекали краевую зону ледникового купола лишь в трех местах: над мысом Неблес Пойнт, над Ледниковой бухтой и над Северной долиной в районе группы безымянных скал и нунатака.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые испытания БАС Геоскан 701 показали, что система может успешно применяться для беспилотной аэрофотосъемки в полярных регионах, хотя и требует определенных доработок.

Основной субъективной проблемой для оператора БАС является время предполетной подготовки БАС Геоскан 701, которое существенно больше (не менее часа), чем

такое время для привычного БАС Геоскан 201 (15–20 мин). В частности, во время предполетной подготовки БАС Геоскан 701 много времени уходит на настройку карбюратора двигателя внутреннего сгорания. В условиях морского антарктического климата, в частности на острове Кинг Джордж, когда в течение одного часа погода может поменяться несколько раз от безоблачного неба до плотного тумана и снеговых зарядов, а направление ветра в приземном слое поменяться на противоположное, время предполетной подготовки – достаточно критичный фактор. Целесообразнее было бы использование двигателя внутреннего сгорания инжекторного типа.

Еще одной проблемой является вес кейсов БАС Геоскан 701 и 201. В частности, вес кейса с катапультой БАС Геоскан 701 – около 50 кг, что существенно превышает вес собственно катапульты. Эти кейсы разрабатывались для транспортировки оборудования на автотранспорте, без учета их возможной ручной погрузки в вертолеты и маломерные суда, перемещения по палубе судна, по грунтовым дорогам и бездорожью.

В результате проведенных работ была отснята территория соседних приморских оазисов Молодежный и Вечерний и окружающих их участков ледника (прибрежная полоса ~20 × ~4 км площадью ~80 км²) (*puc. 5*). Получено 1 980 цифровых снимков с пространственным разрешением ~9 см/пикс. Была также отснята территория полуострова Файлдс и прилегающих островов площадью ~105 км² (*puc. 7*). Получено 13 420 цифровых снимков с пространственным разрешением ~4,5 см/пикс.

После камеральной фотограмметрической обработки полученных материалов будут получены высокоточные продукты: ортофотопланы¹ с разрешением ~10 см и ЦМР с разрешением ~25 см. Эти продукты будут использованы для деятельности РАЭ², создания современных топографических карт, фотокарт, 3D ЦММ и геоморфометрического моделирования и др. [Флоринский, 2021; Florinsky, 2016, 2017].

Использование ЦМР высокого и сверхвысокого разрешения, полученных по материалам беспилотной аэрофотосъемки, для геоморфометрического моделирования при проведении геоморфологических, криологических и гляциологических исследований в полярных регионах неоднократно обсуждалось в литературе, в т.ч. в аналитических обзорах [Флоринский, 2021; Bhardwaj et al., 2016; Gaffey, Bhardwaj, 2020]. Применительно к территории полуострова Файлдс использование методов геоморфометрии наиболее перспективно для анализа и моделирования склоновых процессов (включая солифлюкцию), геоморфологического и почвенного картографирования, а также изучения влияния микрорельефа (через почвенно-гидрологический режим) на (микро)биологическую активность в почвах и грунтах. Для района оазисов Молодежный и Вечерний геоморфометрическое моделирование было бы полезно при проведении геолого-геоморфологических исследований.

выводы

Полевые испытания БАС Геоскан 701 показали, что эта система может успешно применяться для беспилотной аэрофотосъемки в полярных регионах.

Успешно проведена беспилотная аэрофотосъемка двух антарктических территорий: приморских оазисов Молодежный и Вечерний и окружающих их участков ледника, а также полуострова Файлдс. В результате проведенных работ получены блоки цифровых снимков с сантиметровым разрешением. После камеральной фотограмметрической обработки полученных нами аэрофотоматериалов будут созданы высокоточные продукты высокого разрешения – ортофотопланы и ЦМР. Эти продукты будут использованы для

¹Уже после подачи этой статьи в редакцию нами были получены первые версии ЦМР и ортофотопланы обеих исследуемых территорий. Ортофотоплан района оазисов Молодежный и Вечерний демонстрировался в докладе О.Т. Ишалиной и автора «Совершенствование изображения антарктических оазисов на крупномасштабных топографических картах. Постановка задачи» на Международной научной конференции «Пространственные данные: наука и технологии 2022» 23 мая 2022 г. в МИИГАиК

² В июне 2022 г. фрагменты ортофотоплана и ЦМР полуострова Файлдс, полученных в ГК Геоскан, переданы в РАЭ для проектирования продуктопровода между бухтой Каменистая и станцией Беллинсгаузен

оперативной деятельности РАЭ, создания современных топографических карт, фотокарт, 3D ЦММ и геоморфометрического моделирования отснятых территорий.

Проведенные и планируемые работы – беспилотная аэрофотосъемка, фотограмметрическая обработка, топографическое картографирование, трехмерное и геоморфометрическое моделирование – представляют интерес в методологическом отношении, т.к. объектами исследования являются две антарктические территории, которые характеризуются принципиально различными природными условиями. В перспективе нарабатываемый опыт может быть использован для исследований других приморских оазисов и свободных от покровного оледенения районов Антарктики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен Д.П. Бляхарскому (СПбГУ; ГК Геоскан), Б.В. Иванову и С.А. Егорову (ААНИИ) за помощь организационного характера при подготовке к экспедиции, А.В. Клепикову и А.Н. Николаеву (РАЭ) за поддержку инициативы по расширению научной программы аэрофотогеодезического отряда, а также начальнику станции Беллинсгаузен А.А. Селиванову (67-я РАЭ) за организационную поддержку. Основная техническая часть полевых работ была выполнена С.В. Александровым (ГК Геоскан), которому автор признателен также за помощь в подготовке итогового отчета о работе аэрофотогеодезического отряда 67-й РАЭ (в частности – за рисунки 5 и 7). При подготовке и в ходе полевых работ техническую, информационную и логистическую помощь оказали следующие сотрудники зимовочного состава 67-й и 66-й РАЭ станции Беллинсгаузен: А.Ю. Арсюхин, А.Е. Бондарев, А.И. Гребинча, С.Ю. Коробов, Д.А. Ларионов, Ф.М. Мурсалимов, А.А. Панов, И.А. Сергеев, А.В. Солдатенко, А.Н. Солдатенко, В.В. Суходолов, Ю.В. Тюмин, А.Л. Филиппов, Д.Ю. Яненков. Автор благодарен Д.В. Федорову (АО «Аэрогеодезия») и Б.Р. Мавлюдову (ИГ РАН) за консультации геодезического и гляциологического характера, соответственно. Особая благодарность Т.Н. Скрыпицыной (МИИГАиК), С.Ю. Евграфовой (ИЛ СО РАН) и А.Ю. Пшеничному (66-я РАЭ) за информационную и моральную поддержку.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to D.P. Bliakharskii (St Petersburg University; Geoscan Group), B.V. Ivanov and S.A. Egorov (AARI) for organizational assistance in preparation for the expedition, A.V. Klepikov and A.N. Nikolaev (RAE) for supporting the initiative to expand the scientific program of the aerial photogeodesic team, as well as to the Head of Bellingshausen Station A.A. Selivanov (67th RAE) for organizational support. The main technical part of the field work was carried out by S.V. Aleksandrov (Geoscan Group), to whom the author is also grateful for his help in preparing a final report on the work of the aerial photogeodesic team of the 67th RAE (in particular, for figures 5 and 7). In preparation and during field work, technical, informational, and logistical assistance was provided by the following employees of the wintering team of the 67th and 66th RAE at the Bellingshausen Station: A.Yu. Arsyukhin, A.E. Bondarev, A.I. Grebincha, S.Yu. Korobov, D.A. Larionov, F.M. Mursalimov, A.A. Panov, I.A. Sergeev, A.V. Soldatenko, A.N. Soldatenko, V.V. Sukhodolov, Yu.V. Tyumin, A.L. Filippov, and D.Yu. Yanenkov. The author is grateful to D.V. Fedorov (JSC "Aerogeodesia") and B.R. Mavlyudov (IG RAS) for geodetic and glaciological consultations, correspondingly. Special thanks to T.N. Skrypitsyna (MIIGAiK), S.Yu. Evgrafova (IF SB RAS) and A.Yu. Pshenichny (66th RAE) for informational and moral support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлантический океан. Южные Шетландские острова. Остров Кинг-Джордж (Ватерлоо). Подходы к научной станции Беллинсгаузен. М-б 1: 5 000. ГУНиО МО СССР, 1989. 1 л. 2. *Бляхарский Д.П.* Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2019. Т. 63. № 6. С. 650–661. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-650-661.

3. Остров Кинг Джордж (Ватерлоо). Полуостров Файлдс. М-б 1: 40 000. 2018. 1 л.

4. Остров Кинг-Джордж (Ватерлоо). Полуостров Файлдс. М-б 1: 25 000. Научные станции Беллинсгаузен и Теньенте-Родольфо-Марш. М-б 1: 5 000. Атлас океанов. Антарктика. СПб.: ГУНиО МО РФ, 2005. *С. 40*.

5. Пересмотренный план управления Особо охраняемым районом Антарктики № 125 «Полуостров Файлдс» (остров Кинг-Джордж / 25 Мая) (холм Фоссил, ручей Хольц (ручей Мадера), ледник Купол Беллинсгаузена (ледник Коллинз), мыс Хафтри, мыс Саффилд, мыс Фоссил, бухта Градзински и бухта Скуа). Заключительный отчет ХХХІІ Консультативного совещания по Договору об Антарктике. Мера 6, Приложение. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора по Антарктике, 2009 (а). 23 с.

6. Пересмотренный план управления Особо охраняемым районом Антарктики № 150 «Остров Ардли» (залив Максвелл, остров Кинг-Джордж / 25 Мая). Заключительный отчет XXXII Консультативного совещания по Договору об Антарктике. Мера 6, Приложение. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора по Антарктике, 2009 (б). 15 с.

7. Район научной станции Молодежная. М-б 1: 50 000. Гора Вечерняя. М-б 1: 50 000. Западная часть оазиса Молодежный. М-б 1: 10 000. Атлас океанов. Антарктика. СПб.: ГУНиО МО РФ, 2005. *С. 52*–53.

8. *Сократова И.Н.* Антарктические оазисы: история и результаты исследований. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.

9. Строительство и функционирование Белорусской антарктической станции на горе Вечерняя, Земля Эндерби. Окончательная всесторонняя оценка окружающей среды. Минск: Национальная академия наук Беларуси, Республиканский центр полярных исследований, 2015. 200 с.

10. Топографическая карта района станции Молодежная. М-б 1: 50 000. Л.: СоюзморНИИпроект, 1972. 1 л.

11. *Флоринский И.В.* Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. № 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

12. *Bhardwaj A., Sam L., Bhardwaj A., Martín-Torres F.J.* LiDAR remote sensing of the cryosphere: present applications and future prospects. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 177. P. 125–143. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.031.

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

14. Braun M., Simoes J.C., Vogt S., Bremer U.F., Blindow N., Pfender M., Saurer H., Aquino F.E., Ferron F.A. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. Antarctic Science, 2001. V. 13. No. 1. P. 41–52. DOI: 10.1017/S0954102001000074.

15. *Ewertowski M.W., Tomczyk A.M., Evans D.J.A., Roberts D.H., Ewertowski W.* Operational framework for rapid, very-high resolution mapping of glacial geomorphology using low-cost unmanned aerial vehicles and structure-from-motion approach. Remote Sensing, 2019. V. 11. No. 1. # 65. DOI: 10.3390/rs11010065.

16. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

17. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

18. *Gaffey C., Bhardwaj A.* Applications of unmanned aerial vehicles in cryosphere: latest advances and prospects. Remote Sensing, 2020. V. 12. No. 6. # 948. DOI: 10.3390/rs12060948. 19. GeoScan Planner 2.5 Версия 2017.09. Руководство по работе с наземной станцией

управления для Комплекса Геоскан самолетного типа. СПб.: Геоскан, 2017. 117 с.

20. *Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P.* The Reference Elevation Model of Antarctica. Cryosphere, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

21. Isla Rey Jorge – Península Fildes. Islas Shetland del Sur. XII Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. República de Chile. Carta topográfica. Escala 1: 10 000. Instituto Geográfico Militar de Chile, 1996. 1 papel.

22. King George Island. South Shetland Islands. Antarctica. Topographic map (satellite image map). Scale 1: 100 000. Freiburg: Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2001. 1 chart.

23. King George Island. Scale 1: 100 000. Incheon: Korea Polar Research Institute, 2011. 1 chart.

24. Lupachev A.V., Abakumov E.V., Goryachkin S.V., Veremeeva A.A. Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). Catena, 2020. V. 193. # 104613. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104613.

25. *Turner D., Lucieer A., Watson C.* An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. Remote Sensing, 2012. V. 4. No. 5. P. 1392–1410. DOI: 10.3390/rs4051392.

26. *Turner D., Lucieer A., Wallace L.* Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014. V. 52. No. 5. P. 2738–2745. DOI:10.1109/TGRS.2013.2265295.

REFERENCES

1. Area of the scientific station Molodezhnaya. Scale 1: 50 000. Mount Vechernyaya. Scale 1: 50 000. Western part of the Molodezhny oasis. Scale 1: 10 000. Atlas of the Oceans. Antarctica. St. Petersburg: Main Department of Navigation and Oceanography, Ministry of Defence, 2005. P. 52–53 (in Russian).

2. Atlantic Ocean. South Shetland Islands. King George Island (Waterloo). Accesses to the Bellingshausen Scientific Station. Scale 1: 5 000. Main Department of Navigation and Oceanography, Ministry of Defence, 1989. 1 chart (in Russian).

3. *Bhardwaj A., Sam L., Bhardwaj A., Martín-Torres F.J.* LiDAR remote sensing of the cryosphere: present applications and future prospects. Remote Sensing of Environment, 2016. V. 177. P. 125–143. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.031.

4. *Bliakharskii D.P.* Specifics of aerial survey of mountain and sheet glaciers using unmanned aerial vehicles. IzvestiaVuzov. Geodesy and Aerophotosurveying, 2019. V. 63. No. 6. P. 650–661. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-650-661 (in Russian, abs English).

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

6. Braun M., Simoes J.C., Vogt S., Bremer U.F., Blindow N., Pfender M., Saurer H., Aquino F.E., Ferron F.A. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. Antarctic Science, 2001. V. 13. No. 1. P. 41–52. DOI: 10.1017/S0954102001000074.

7. Construction and operation of the Belarusian Antarctic station on the Mount Vechernyaya, Enderby Land. Final comprehensive assessment of the environment. Minsk: National Academy of Sciences of Belarus, Republican Center for Polar Research, 2015. 200 p. (in Russian).

8. *Ewertowski M.W., Tomczyk A.M., Evans D.J.A., Roberts D.H., Ewertowski W.* Operational framework for rapid, very-high resolution mapping of glacial geomorphology using low-cost unmanned aerial vehicles and structure-from-motion approach. Remote Sensing, 2019. V. 11. No. 1. # 65. DOI: 10.3390/rs11010065.

9. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

10. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

11. *Florinsky I.V.* Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty

of Geography, 2021. V. 27. No. 2. P. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448 (in Russian, abs English).

12. *Gaffey C., Bhardwaj A.* Applications of unmanned aerial vehicles in cryosphere: latest advances and prospects. Remote Sensing, 2020. V. 12. No. 6. # 948. DOI: 10.3390/rs12060948. 13. GeoScan Planner v. 2.0. Manual for working with a ground control station of the Geoscan aerial survey complex. St. Petersburg: Geoscan LLC, 2017. 52 p. (in Russian).

14. Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. Cryosphere, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

15. Isla Rey Jorge – Península Fildes. Islas Shetland del Sur. XII Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. República de Chile. Carta topográfica. Escala 1: 10 000. Instituto Geográfico Militar de Chile, 1996. 1 papel (in Spanish).

16. King George Island. Scale 1: 100 000. Incheon: Korea Polar Research Institute, 2011. 1 chart.

17. King George Island. South Shetland Islands. Antarctica. Topographic map (satellite image map). Scale 1: 100 000. Freiburg: Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2001. 1 chart.

18. King George Island (Waterloo). Fildes Peninsula. Scale 1: 40 000. 2018. 1 chart (in Russian).
19. King George Island (Waterloo). Fildes Peninsula. Scale 1: 25 000. Bellingshausen and Teniente-Rodolpho-Marsh Stations. Scale 1: 5 000. Atlas of the Oceans. Antarctica. St. Petersburg: Main Department of Navigation and Oceanography, Ministry of Defence, 2005. P. 40 (in Russian).

20. Lupachev A.V., Abakumov E.V., Goryachkin S.V., Veremeeva A.A. Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). Catena, 2020. V. 193. # 104613. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104613.

21. Management plan for Antarctic Specially Protected Area No. 125 "Fildes Peninsula" (King George Island / 25 de Mayo) (Fossil Hill, Holz Stream (Madera Stream), Glacier Dome Bellingshausen (Collins Glacier), Halfthree Point, Suffield Point, Fossil Point, Gradzinski Cove and Skua Cove). Final Report of the Thirty-second Antarctic Treaty Consultative Meeting. Measure 6. Annex. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2009 (a). 21 p.

22. Management plan for Antarctic Specially Protected Area No. 150 "Ardley Island" (Maxwell Bay, King George Island / 25 de Mayo). Final Report of the Thirty-second Antarctic Treaty Consultative Meeting. Measure 6. Annex. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2009 (b). 13 p.

23. *Sokratova I.N.* Antarctic oases: history and research results. St. Petersburg: AANII, 2010. 274 p. (in Russian).

24. Topographic map of the Molodezhnaya station area. Scale 1: 50 000. Leningrad: SoyuzmorNIIproekt, 1972. 1 chart (in Russian).

25. *Turner D., Lucieer A., Watson C.* An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. Remote Sensing, 2012. V. 4. No. 5. P. 1392–1410. DOI: 10.3390/rs4051392.

26. *Turner D., Lucieer A., Wallace L.* Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014. V. 52. No. 5. P. 2738–2745. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2265295.