АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ

УДК 528.7

DOI: 10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528

Эволюция рельефа выводного ледника Долк (залив Прюдс, Восточная Антарктида) по данным беспилотных аэрофотосъемок 2017–2019 годов

© 2021 г. Т.Н. Скрыпицына^{1*}, В.Г. Захаров², А.С. Киселева¹, Д.П. Бляхарский³, Г. Цяо⁴, С. Юань⁴, И.В. Флоринский⁵

¹Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия ²Геологический институт РАН, Москва, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия ⁴Университет Тунцзи, Шанхай, Китай

⁵Институт математических проблем биологии РАН-

филиал Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Пущино, Россия *mola mola@rambler.ru

Topography evolution of the Dålk outlet glacier (Prydz Bay, East Antarctica) based on data from unmanned aerial surveys performed in 2017–2019

T.N. Skrypitsyna^{1*}, V.G. Zakharov², A.S. Kiseleva¹, D.P. Bliakharskii³, G. Qiao⁴, X. Yuan⁴, I.V. Florinsky⁵

¹Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia ²Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ³Saint Petersburg University, St. Petersburg, Russia ⁴Tongji University, Shanghai, China ⁵Institute of Mathematical Problems of Biology – Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia *mola_mola@rambler.ru

Received June 08, 2021

Revised September 21, 2021

Accepted October 15, 2021

Keywords: unmanned aerial vehicle, photogrammetry, digital elevation model, glacier surface.

Summary. The Antarctic ice-sheet condition and its response to circulation processes in the ocean and atmosphere are assessed by its size and changes in the position of the Antarctic glaciers edge. The article is focused on the results of the application of data obtained from unmanned aerial vehicles in order to model the surface topography of glaciers in Antarctica and to analyze and estimate the dynamics of their condition. The project carried out by the Russian and Chinese specialists resulted in triplets of orthomosaics and digital surface models (DSM) of the Dålk Glacier marginal part for 2017 and 2019. Two sections were allocated for the research: the first section of the glacier was covered by surveys on January 20th, 2017 and January 14th, 2019; the second section on January 20th, 2017, February 9th, 2017 and January 14th, 2019. The photogrammetric processing of all projects was carried out with the Russian software Agisoft Metashape Professional. The analysis of the two-year changes in the topography of the Dålk Glacier and the character of its front displacement (movement) were carried out in the QGIS software in the WGS 84 UTM 43S coordinate system. General vertical displacement map was obtained by subtracting the 2019 DSM from the 2017 DSM. The horizontal displacement was determined by measuring the coordinates of identical fracture elements from orthophotos and the 2017 and 2019 DSMs. Longitudinal and transverse profiles were plotted from the DSMs

as well. The analysis of this data set allowed to identify a large surge of the glacier front, which led to the water descent from two subglacial lakes on the left side of the glacier near the rocks, the collapse of their ice arches, and the occurance of deep depressions.

Citation: *Skrypitsyna T.N., Zakharov V.G., Kiseleva A.S., Bliakharskii D.P., Qiao G., Yuan X., Florinsky I.V.* Topography evolution of the Dålk outlet glacier (Prydz Bay, East Antarctica) based on the data from unmanned aerial surveys performed in 2017–2019. *Izvestia vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying».* 2021, 65 (5): 517–528. [In Russian]. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528.

Поступила 8 июня 2021 г. После доработки 21 сентября 2021 г. Принята к публикации 15 октября 2021 г.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, геоморфометрия, цифровая модель поверхности, поверхность ледника.

Рассмотрены результаты совместной работы российско-китайского научного коллектива в районе выводного ледника Долк (Восточная Антарктида). Данные получены с помощью беспилотных аэрофотосъемок: российские выполнены в полевой сезон 2016–2017 гг.; китайские — в полевой сезон 2018–2019 гг. Эти материалы дополняют друг друга в контексте моделирования и анализа двухлетней эволюции рельефа поверхности ледника. В результате исследований выявлена подвижка ледника Долк и высказано предположение о гляциотектонической и циркуляционной причинах спуска воды из двух прискальных подледных озер, обрушения линз их ледяных сводов и образования в 2017 г. глубоких осушенных провалов.

Для цитирования: Скрыпицына Т.Н., Захаров В.Г., Киселева А.С., Бляхарский Д.П., Цяо Г., Юань С., Флоринский И.В. Эволюция рельефа выводного ледника Долк (залив Прюдс, Восточная Антарктида) по данным беспилотных аэрофотосъемок 2017–2019 годов // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 5. С. 517–528. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-4-517-528.

Введение

Крупнейший центр оледенения — Антарктида — имеет огромное значение в формировании климата Южного полушария и Земли в целом. Состояние ледникового покрова Антарктиды и его реакция на циркуляционные процессы, происходящие в океане и атмосфере, оцениваются по его размерам и изменениям положения края шельфовых и выводных антарктических ледников [1].

Исторически для исследований ледников использовались результаты полевых геодезических и фототеодолитных съемок, которые позволяли оценить их скорость и направление движения путем многократных высокоточных измерений отдельных маркированных точек [2-4]. С развитием аэрометодов и космической съемки стали доступны изображения ледового покрова континента, которые позволили получить более полную и наглядную картину пространственно-временной динамики ледников [1-3, 5, 6]. Большие успехи в изучении антарктических ледников связаны с применением геофизических методов в сочетании с геодезическими измерениями. Эти исследования позволили не только оценить проявления, проходящие на дневной поверхности ледника, но и связать их с глубинными процессами [2, 7].

Использование беспилотных воздушных судов (БВС) для исследования ледовых поверхностей началось в 2007 г. с работ А. Ходсона и соавторов [8] на леднике Мидре Ловенбрин (Шпицберген). Эту дату можно считать началом эры беспилотников в гляциологических исследованиях. Относительно безопасный и точный метод изучения принципиально нестатичных объектов, к каким относятся ледники, вывел гляциологические исследования на совершенно новый качественный и количественный уровень [9–11]. Основным достижением можно назвать получение документов о местности – ортофотопланов и цифровых моделей поверхности (ЦМП) сверхвысокого (сантиметрового) разрешения по результатам аэрофотосъемки без наземного опорного геодезического обоснования [9–13].

Данная статья посвящена исследованию изменений края и рельефа поверхности выводного ледника, которые служат объективными индикаторами изменений циркуляционных и климатических условий у антарктических побережий. В работе представлены данные, полученные с помощью БВС, для моделирования рельефа поверхности ледника Долк и получения характеристик его движения, положения края и высоты поверхности с большой точностью. Особенности данного исследования использование БВС различного типа и применение подхода прямого геопозиционирования.

Территория исследования

Исследования и беспилотная аэрофотосъемка проводились российско-китайским научным коллективом на востоке низкогорного оазиса холмы Ларсеманн в краевой части выводного ледника Долк (Восточная Антарктида) (рис. 1). Приливный выводной ледник Долк впадает в юго-восточную часть залива Прюдс берега Ингрид Кристенсен. Длина ледника составляет 15 км, высота поверхности колеблется от 50 до 140 м над уровнем моря. Холмы Ларсеманн невысоки [14]. Отдельные отметки лежат в пределах 29,8–118,7 м. Высшая точка — 160,0 м находится на втором с востока полуострове.

Холмы Ларсеманн имеют неправильно-бугристый рельеф (мелкосопочник). Они сложены свитой протерозойских гранат-биотитовых гнейсов и гранат-силлиманитовых сланцев. На скальных поверхностях хорошо выражено ячеистое выветривание. Растительность представлена черными пластинчатыми и накипными лишайниками, а также небольшими кочечками зеленых мхов. В летнее время у моря появляются пингвины Адели, среди скал гнездятся буревестники [14].

Оледенение в районе оазиса представлено выводными ледниками и наледями. С юга хол-



Рис. 1. Географическое положение исследуемого региона. Красной рамкой выделена область российско-китайских исследований Fig. 1. Geographic location of the study region.

The Russian-Chinese study area is highlighted with red

мы Ларсеманн окружены наземным материковым ледниковым покровом, в нижней части которого формируются бассейны истечения выводных ледников. Массы льда наземного материкового покрова, обходя скалы оазиса холмы Ларсеманн, сбрасываются в море ледниками, образуя айсберги. Направление движения выводного ледника Долк определено понижениями коренного ложа его подледного фьорда.

Материалы и методы

Для аэрофотосъемки выбран участок в краевой части выводного ледника Долк (см. рис. 1), на котором были проведены беспилотные аэрофотосъемки: российские в полевой сезон 2016-2017 гг.; китайские в полевой сезон 2018-2019 гг. Эти аэросъемочные данные дополняют друг друга в контексте моделирования и анализа двухлетней эволюции рельефа и микрорельефа поверхности ледника Долк. Проведение подобного исследования на основе только одной базы данных не возможно. Применение аналогичного набора аэросъемочных материалов в Антарктиде нигде ранее не осуществлялось и проведено нами впервые.

Российская беспилотная аэрофотосъемка выводного ледника Долк проходила 20 января 2017 г. Дополнительно 9 февраля 2017 г. была выполнена аэрофотосъемка в районе наиболее крупного провала, появившегося 30 января 2017 г. в краевой прискальной части левого борта ледника. Провал образовался в результате спуска воды из подледного озера и обрушения на дно его ледового свода. Высота полета в обоих случаях составляла порядка 310-350 м. Аэрофотосъемка выполнялась в солнечную погоду при температуре воздуха от -1 до -5° С. Скорость ветра варьировала от 0 до 5 м/с на высоте полета. Над ледником по утрам дул стоковый ветер, в дневное время преобладали ветры с моря [10, 15].

Аэрофотосъемка проводилась БВС «Геоскан 201 Геодезия». Тип носителя — «летающее крыло» с размахом крыла 2,3 м и

взлетной массой 8 кг. БВС оснащен модемом для телеметрической связи с наземным пультом управления с портативного компьютера (GCS), цифровой камерой Sony DSC-RX1 видимого диапазона с полевой калибровкой и камерой Carl Zeiss Vario Sonnar T (центральный затвор; фокусное расстояние 35 мм) и сенсором 35,8×23,9 мм с фильтром Байера (матрица 6000×4000 пикселей с размерами пикселей 6×6 мкм). Для определения координат центров проекции снимков (КЦП) использовался приемник GNSS Topcon b110 (GPS / ГЛОНАСС, L1 / L2). В состав наземной базовой станции GNSS входил приемник Topcon HiPer V. Точность синхронизации камеры и приемника GNSS составляет 1 мс, что позволяет определять КЦП снимков с планиметрической и вертикальной точностью до 2 см и 3-4 см, соответственно [10, 16].

Китайская беспилотная аэрофотосъемка проводилась 14 января 2019 г. БВС коптерного типа DJI Phantom 4 RTK при солнечной погоде и скорости ветра 5–9 м/с. Высота полета составляла 240 м. Управление квадрокоптером осуществлялось по радиоканалу с помощью пульта дистанционного управления. Съемка проводилась штатной камерой с центральным механическим затвором и фокусным расстоянием 8,8 мм, оборудованной однодюймовой СМОЅ матрицей размером 5472×3648 пикселей с физическим размером пикселя 2,4×2,4 мкм.

Определение координат центров фотографирования осуществлялось в режиме RTK (Real Time Kinematic) от установленной в зоне полета мобильной станции DJI D-RTK2, которая в режиме реального времени осуществляет передачу поправок на борт квадрокоптера. Заявленная производителем оборудования точность геопозиционирования составляет 1 см и 1,5 см в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно. Для совместного анализа был выбран участок площадью 2,8 км².

Камеральная фотограмметрическая обработка всех трех проектов осуществлялась в

БВС, дата съемки	Высота полета, м	СКО, м			Контрольные измерения, м		
		Х	Y	Ζ	X	Y	Z
Геоскан 201 Геодезия 20.01.2017	310-350	0,05	0,05	0,06			
Геоскан 201 Геодезия 9.02.2017	332	0,04	0,03	0,02	0,03	0,12	0,36
DJI Phantom 4 RTK 14.01.2019	240	0,11	0,12	0,17	0.03	0,07	0,023

Результаты фототриангуляции

программном обеспечении российского производства Agisoft Metashape Professional. Первый блок (от 20 января 2017 г.) уравнивался только по высокоточным центрам проекции снимков. Для увеличения надежности вычисления координат центров проекции снимков прокладывались перекрестные маршруты. В случае съемки с БВС «Геоскан 201 Геодезия» точные координаты центров фотографирования были получены методом РРК (Post Processing Kinematic) от двух базовых станций, расположенных в зоне полета на неподвижных скальных образованиях с дальнейшей обработкой в программном продукте Topcon Magnet Tool.

В ходе выполнения аэрофотосъемки китайскими специалистами БВС DJI Phantom 4 RTК точные координаты центров фотографирования прописывались в метаданные снимков во время полета. Для проектов от 9 февраля 2017 г. (второй блок) и 14 января 2019 г. (третий блок) также была проведена фототриангуляция с самокалибровкой. По ее результатам был выявлен систематический сдвиг данных, полученных с Phantom RTK (порядка 2 м). При выполнении уравнивания по опорным точкам получены результаты, приведенные в табл. 1. Чтобы минимизировать систематические ошибки, возникающие при фотогриангуляции только по координатам центров проекции, при фотограмметрической обработке более поздних блоков в качестве геодезического обоснования было решено использовать координаты твердых контуров, измеренные в первом проекте.

Для исследований были выделены два участка: первый участок ледника покрывался съемками 20 января 2017 г. и 14 января 2019 г., его размеры составили 2000×1400 м. Второй — общий для трех съемок — имел размеры

825×950 м (рис. 2). На эти участки были построены ЦМП с пространственным разрешением 0,5 м и ортофотопланы с пространственным разрешением 0,2 м (рис. 3):

на 20 января 2017 г. по результатам российской съемки;

на 9 февраля 2017 г. для зоны основного провала на леднике Долк по результатам российской съемки;

на 14 января 2019 г. по результатам китайской съемки.

Результаты и обсуждение

Выводные ледники, к которым относится исследуемый ледник Долк, представляют собой быстродвижущиеся ледяные потоки. Они достигают побережий и заканчиваются в море плавающими языками, которые продуцируют многочисленные айсберги. При переходе



Рис. 2. Участки исследования:

I — для съемок 20 января 2017 г. и 14 января 2019 г.; *2* — для съемок 20 января 2017 г., 9 февраля 2017 г. и 14 января 2019 г.

Fig. 2. Study areas:

I — for January 20th, 2017 and January 14th, 2019 surveys; *2* — for January 20th, 2017, February 9th, 2017, and January 14th, 2019 surveys

Таблица 1



Рис. 3. Ортофотопланы на участки исследования: *a* — 20 января 2017 г.; *б* — 9 февраля 2017 г.; *в* — 14 января 2019 г.

Fig. 3. Orthomosaics of the study areas:

a — January 20th, 2017, *δ* — February 9th, 2017, *ε* — January 14th, 2019 на плав в районе ледника появляются глубокие поперечные трещины, которые уверенно дешифрируются на ортофотопланах и ЦМП. Чтобы оценить двухлетние изменения рельефа ледника Долк, скорость и характер смещения (подвижек) его фронта, все полученные данные были экспортированы в геоинформационную систему QGIS в системе координат WGS 84 UTM 43S.

Вначале была получена общая картина вертикальных смещений путем вычитания ЦМП 2019 г. из ЦМП 2017 г. На карте (рис. 4) в цветовой шкале отображены разности высот двух поверхностей ледника, которые возникли в результате подвижки. Желтый цвет — область оттока льда к краю ледника, зеленый и синий — область привноса льда к краю ледника. Заслуживает внимания вытянутый участок (красный цвет) с нулевыми отметками, который разделяет полученную поверхность на области с положительными (желтый цвет) и отрицательными значениями (зеленый цвет). Этот вытянутый участок маркирует подледный ригель — поперечный уступ коренного ложа ледника.



Рис. 4. Разность высот поверхности ледника 2017 и 2019 г. (см. текст)

Fig. 4. Glacier surface elevation differences, 2017 and 2019 (see text)

При перетекании ледникового льда через ригель на поверхности ледника обычно наблюдается перегиб с зоной хорошо выраженных поперечных трещин. На полученной карте (см. рис. 4), видно, что до перехода через ригель шло убывание массы ледника 2019 г. по сравнению с 2017 г. После перетекания льда через область ригеля происходило нарастание массы льда ледника в области 2019 г. Зеленым цветом выделено положение ледника на 2017 г., а значения высот показывают превышение над ним поверхности ледника 2019 г. Синяя часть выход льда 2019 г. в море. Наибольшая высота ледника над уровнем моря достигала 88 м. Далее оценивался сдвиг отдельных частей ледника. Для этого по ЦМП были построены профили в различных направлениях таким образом, чтобы можно было выявить произошедшие между съемками смещения масс льда и изменения микрорельефа поверхности ледника. Схема расположения профилей представлена на рис. 5.

Отметим, что поперечные профили не характеризуют поперечные смещения льда в леднике, а лишь указывают на привнос льда сверху (если идет возрастание высоты по-



Рис. 5. Схема расположения профилей на ортофотоплане 2019 г.

Fig. 5. Scheme of the profiles location on the 2019 orthomosaic

верхности ледника от левого борта к правому) и на отток льда к фронту ледника (если идет уменьшение высоты ледника от левого борта к правому).

Рассмотрим подробно результаты этого этапа исследования. На рис. 6–8 *H* — высоты над средним уровнем моря, *d* — горизонтальное проложение. Здесь синим цветом проведены профили по ЦМП 20 января 2017 г., зе-



Рис. 6. Поперечные профили цифровой модели поверхности ледника (см. текст) Fig. 6. Transverse profiles of the digital glacier surface model (see text)

леным — по ЦМП 9 февраля 2017 г., красным — по ЦМП 14 января 2019 г.

Анализ поперечных профилей и характеристика провалов на западе краевой части ледника. Утром 30 января 2017 г. у скал левого борта ледника Долк произошло внезапное обрушение льда и появление крупного осушенного провала — широкой и глубокой впадины на поверхности льда с координатами 69°23′58″ ю.ш., 76°24′49″ в.д. Это событие привлекло внимание ученых [15, 17–19]. Отметим, что прорывы ледниковых озер и раньше наблюдались у скал (нунатаков) левого борта краевой части ледника Долк [3]. Однако столь крупный осушенный провал в прискальном участке ледникового языка был зафиксирован впервые за все время изучения этого ледника [17]. Поэтому нами было решено совместно рассмотреть два процесса: подвижку ледника и образование провала.

Поперечный профиль *АВ* (см. рис. 5 и 6) проведен на расстоянии 850 м от западного края ледника 2017 г. таким образом, чтобы пересечь провал, образовавшийся в феврале 2017 г. (в выделенной области — профиль *QR*).

Глубина провала на 14 января 2019 г. составляла 25 м; через две надели после осушения провала, 9 февраля 2017 г., глубина в самой низкой точке профиля составляла порядка 38 м. Такая разница объясняется накоплением толщи воды и повышением уреза воды в новом озере. Понижение поверхности ледника в 2019 г. — правая часть графика АВ — произошло в результате смещения масс льда с выдвижением фронта ледника к морю. Поперечный профиль СД проведен почти по касательной к краю средней части ледника. Слева профили совпадают — это неподвижная часть участка исследования скалы (нунатаки). Поверхности левого борта ледника, находясь в контакте с береговыми выходами коренных пород, практически неподвижны, поэтому скорости ледника здесь резко падают и разности высот колеблются от 0 до 3 м. Далее характер изменений становится более заметным в результате активного притока масс льда из тыловых частей к морю. Максимальная разность высот составила порядка 35 м.

Профиль QR (см. рис. 5 и 7) проведен через осушенное озеро под нунатаком и вновь образовавшимся 9 февраля 2017 г. провалом. Поскольку провалы при спусках воды из озера под указанным нунатаком образуются достаточно регулярно [3, 17], рассматриваемый и другие подобные случаи могут быть обусловлены особенностями динамики и гидрологии ледника Долк. Рис. 7 убедительно иллюстрирует схожесть процессов, произошедших одновременно на двух озерах. За период с 20 января по 9 февраля 2017 г. центральная часть ледника подвинулась на 12 м. Средняя скорость этой подвижки составила 1,33 м/сут., что в два раза выше средней скорости продвижения края ледника за два года.

Дальнейший анализ данных (см. рис. 6) и аэрофотоснимков позволил сделать следующие заключения. Во-первых, озера являются сообщающимися. Сам канал сообщения проходил под участком санно-гусеничной трассы, обрушившимся вниз; во-вторых, в результате подвижки ледника, произошедшей с 20 по 30 января 2017 г., на ледниковой поверхности напротив и ниже провалов образовалась четко выраженная зона глубоких раскрытых трещин, через которые и произошел спуск воды из озер внутрь ледника, а затем в море. Далее, как отмечается в работах [15, 17–19], талые воды, скопившиеся над сводами обоих озер, уже после спусков из них воды, привели к обруше-



Рис. 7. Профиль провалов после спуска воды из озер при образовании зоны трещин в результате подвижки ледника в 2017 г.

Fig. 7. Profile of the collapse after the water escape from the lake during the formation of the fracture zone as the result of glacier surge in 2017

нию ледяных линз сводов. Таким образом, провалы оказались открытыми и их очертания четко отобразились на аэрофотоснимках. К 2019 г. озеро на западе краевой части ледника Долк было уже заполнено водой (красный профиль на рис. 6 и 7).

Анализ продольных смещений ледника. Продольные профили показывают изменения рельефа ледника вдоль его течения и позволяют оценить поверхностные скорости движения и приток льда в краевую часть сверху от борта до борта (см. рис. 5). Продольные профили EF и GH (см. рис. 8, a) проведены вдоль западного борта ледника на контакте с выходами коренных пород, т.е. в области малых значений повехностных скоростей движения льда. Рельеф ледника в 2019 и 2017 г. в целом сохраняет схожий характер. Расстояние между аналогичными трещинами после перетекания ледника через область подледного ригеля (профиль *EF*) равняется 12 м, а продвижение фронта в результате подвижки составило 22 м. Профиль *GH* совпадает с пологим гребнем продольного вала сжатия и повторяет поперечную волнообразную поверхность ледника. Продвижение края в результате подвижки составило 87 м.

Профили *KL* и *MN* (см. рис. 8, δ) проведены по самой динамичной части ледника. Их можно разделить на две части: левая часть — область оттока ледникового льда; затем переход через подледный ригель, где графики пересекаются; правая часть — область привноса льда к краю ледника.

Имеющиеся данные не позволили в полной мере оценить положение фронта и рельеф краевой части в центре ледникового потока. Однако высокое разрешение ортофотопланов дало возможность выявить на разновременных изображениях одни и те же трещины и определить по ним общее за два года продвижение ледника к морю на 470 м. В этом случае средняя суточная скорость наступания ледника за два года составила 0,65 м/сут.

Сходные процессы наблюдались в Северном полушарии на пульсирующем леднике Фритьоф, являющимся южной частью двухскатной ледниковой системы Гренфьорд-Фритьоф (Шпицберген) [5]. В период активной стадии пульсации 1997–2001 гг. в среднем ледник наступал со скоростью 210–280 м/год или 0,67 м/сут. Эта скорость подвижки и характер распределения ледовой массы соответствует результатам, полученным в данном исследовании.



Рис. 8. Продольные профили цифровой модели поверхности ледника (см. текст) Fig. 8. Longitudinal profiles of the digital glacier surface model (see. text)

Выводы

В результате совместной работы российско-китайского научного коллектива проведено исследование эволюции рельефа краевой части выводного ледника Долк (Восточная Антарктида). По данным трех беспилотных аэрофотосъемок — 20 января и 9 февраля 2017 г. (Россия) и 14 января 2019 г. (Китай) были получены высокоточные ЦМП и ортофотопланы высокого разрешения.

При камеральном дешифрировании этих ортофотопланов и анализе ЦМП были выявлены: ледниковые подвижки; характер нарастания ледовой массы; определены изменения рельефа поверхности и скорости движения разных частей ледника. Дано объяснение причинам появления провалов на месте подледных

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров В.Г. Колебания ледников Антарктиды. М.: Аккоринформиздат, 1994. 128 с.

2. *Bhambri R., Bolch T.* Glacier mapping: A review with special reference to the Indian Himalayas // Progress in Physical Geography. 2009. V. 33. № 5. P. 672–704. DOI: 10.1177/0309133309348112.

3. Захаров В.Г. Динамика ледника Долк и гидрометеорологические условия в заливе Прюдс (Восточная Антарктида) в 1989/1990 и 1994 гг. // Материалы гляциологических исследований. 2002. Вып. 93. С. 169–180.

4. *Книжников Ю.Ф.* Исследования движения льда горных ледников стереофотограмметрическим методом. М.: Наука, 1973. 120 с.

5. Жидков В.А., Захаров В.Г. Результаты мониторинга пульсирующего ледника Фритьоф (о. Западный Шпицберген) за период с 1996 по 2006 гг. // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Вып. 9. М.: Геос. 2009, С. 256–265.

6. *Li R., Ye W., Qiao G., Tong X., Liu S., Kong F., Ma X.* A new analytical method for estimating antarctic ice flow in the 1960s from historical optical satellite imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. № 5. P. 2771–2785. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2654484.

7. Попов С.В., Пряхин С.С., Бляхарский Д.П., Белков А.Д., Кузнецов В.Л., Кашкевич М.П., Тюрин С.В. Основные результаты инженерных изысканий в районе станций Мирный, Прогресс и полевой базы Молодежная, Восточная Антарктида, в сезон 62-й РАЭ озер у скал западного борта ледника. На основании исследования продольных и поперечных профилей ЦМП показано, что при ледниковых подвижках происходило растяжение тела ледника с понижением поверхности и образованием свежих зон трещин. Через такие зоны растяжения происходил спуск воды внутрь ледника Долк, в результате чего на поверхности проявлялись провалы подледных озер.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ и ГФЕН Китая, гранты № 20-51-53016 и № 42011530088.

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and National Natural Science Foundation of China, grants #20-51-53016 and #42011530088.

REFERENCES

1. Zakharov V.G. Kolebaniya Lednikov Antarktidy. Antarctic Glaciers Fluctuations. Moscow: Akkorinformizdat. 1994: 128 p. [In Russian].

2. *Bhambri R., Bolch T.* Glacier Mapping: A Review with Special Reference to The Indian Himalayas. Progress in Physical Geography. 2009, 33 (5): 672–704. DOI: 10.1177/0309133309348112.

3. Zakharov V.G. Dynamics of Dalk Outlet Glacier and Hydrometeorological Conditions in Pruds Bay (Eastern Antarctic) in 1989 and 1994. *Materialy Glyatsiologicheckikh Issledovanii*. 2002, 93: 169–177. [In Russian].

4. Knizhnikov Yu.F. Issledovaniya dvizheniya l'da gornykh lednikov stereofotogrammetricheskim metodom. Studies of Ice Movement of Mountain Glaciers Using the Stereophotogrammetric Method. Moscow: Nauka, 1973: 120 p. [In Russian].

5. Zhidkov V.A., Zakharov V.G. Results of Monitoring of the Fridtjof Pulsing Glacier (West Spitsbergen Island) for the Period from 1996 to 2006. Kompleksnye issledovaniya prirody SHpicbergena. Vypusk 9. Moscow: Geos. 2009, 256–265. [In Russian].

6. *Li R., Ye W., Qiao G., Tong X., Liu S., Kong F., Ma X.* A New Analytical Method for Estimating Antarctic Ice Flow in the 1960s from Historical Optical Satellite Imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017, 55 (5): 2771–2785. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2654484.

7. Popov S.V., Pryakhin S.S., Blyakharsky D.P., Belkov A.D., Kuznetsov V.L., Kashkevich M.P., Tyurin S.V. Main Results (2016/17 г.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Т. 114. № 4. С. 86–97.

8. Hodson A., Anesio A. M., Ng F., Watson R., Quirk J., Irvine-Fynn T., Sattler B. A Glacier respires: Quantifying the distribution and respiration CO2 flux of cryoconite across an entire Arctic supraglacial ecosystem // Journal of Geophysical Research. 2007. V. 112. G04S36. DOI: 10.1029/2007JG000452.

9. *Gaffey C., Bhardwaj A.* Applications of unmanned aerial vehicles in cryosphere: latest advances and prospects // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 6, 948. DOI: 10.3390/ rs12060948.

10. 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. № 7. P. 2517–2541. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584926.

11. *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.

12. *Chiang K.-W., Tsai M.-L., Chu C.-H.* The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications // Sensors. 2012. V. 12. № 7. P. 9161–9180. DOI: 10.3390/s120709161.

13. Chudley T.R., Christoffersen P., Doyle S.H., Abellan A., Snooke N. High accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control // Cryosphere. 2019. V. 13 № 3. P. 955–968. DOI: 10.5194/tc-13-955-2019.

14. ATCM. Larsemann Hills, East Antarctica: Antarctic Specially Managed Area Management Plan // Measure 15 Annex in Antarctic Treaty Consultative Meeting XXXVII Final Report. Buenos Aires, Argentina: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2014. P. 277–309.

15. *Florinsky I.V., Bliakharskii D.P.* The 2017 catastrophic subsidence in the Dålk Glacier, East Antarctica: unmanned aerial survey and terrain modelling // Remote Sensing Letters, 2019. V. 10. № 4. P. 333–342. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1552810.

16. *Kurkov V.M, Kiseleva A.S.* DEM accuracy research based on unmanned aerial survey data // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. V. XLIII-B3-2020. P. 1347–1352. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1347-2020.

of Engineering Surveys in the Area of Mirny and Progress Stations and Molodezhnaya Field Base, East Antarctica, in the Season of the 62nd RAE (2016/17). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2017, 114 (4): 86–97. [In Russian].

8. Hodson A., Anesio A.M., Ng F., Watson R., Quirk J., Irvine-Fynn T., Sattler B.A. Glacier Respires: Quantifying the Distribution and Respiration CO2 Flux of Cryoconite Across an Entire Arctic Supraglacial Ecosystem. Journal of Geophysical Research. 2007, 112. G04S36. DOI: 10.1029/2007JG000452.

9. *Gaffey C., Bhardwaj A.* Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Cryosphere: Latest Advances and Prospects. Remote Sensing. 2020, 12 (6): 948. DOI: 10.3390/rs12060948.

10. 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, 40 (7): 2517–2541. DOI: 10.1080/01431161.2019.1584926.

11. *Bliakharskii D.P.* Features of Aerial Survey to Alpiane and Polar Glaciology Using the UAV. *Izvestia Vuzov «Geodesy and Aerophotosurveying»*. 2019, 63 (6): 650–661. [In Russian]. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-6-650-661.

12. *Chiang K.-W., Tsai M.-L., Chu C.-H.* The Development of an UAV Borne Direct Georeferenced Photogrammetric Platform for Ground Control Point Free Applications. Sensors. 2012, 12 (7): 9161–9180. DOI: 10.3390/s120709161.

13. *Chudley T.R., Christoffersen P., Doyle S.H., Abellan A., Snooke N.* High Accuracy UAV Photogrammetry of Ice Sheet Dynamics with no Ground Control. Cryosphere. 2019, 13 (3): 955–968. DOI: 10.5194/tc-13-955-2019.

14. ATCM. Larsemann Hills, East Antarctica: Antarctic Specially Managed Area Management Plan. In: Measure 15 Annex in Antarctic Treaty Consultative Meeting XXXVII Final Report. Buenos Aires, Argentina: Secretariat of the Antarctic Treaty. 2014: 277–309.

15. *Florinsky I.V., Bliakharskii D.P.* The 2017 Catastrophic Subsidence in the Dålk Glacier, East Antarctica: Unmanned Aerial Survey and Terrain Modelling. Remote Sensing Letters. 2019, 10 (4): 333–342. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1552810.

16. *Kurkov V.M, Kiseleva A.S.* DEM Accuracy Research Based on Unmanned Aerial Survey Data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020, XLIII-B3-2020: 1347–1352. 17. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг. // Геориск. 2018. Т. 12. № 3. С. 56–67.

18. *Li T., Zhang B., Xiao W., Cheng X., Li Z., Zhao J.* UAV-Based photogrammetry and LiDAR for the characterization of ice morphology evolution // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 4188–4199. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3010069.

19. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dålk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // Journal of Glaciology. 2021. DOI:10.1017/jog.2021.58.

DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1347-2020.

17. Popov, S.V, Boronina, A.S., Pryakhina, G.V., Grigoreva, S.D., Sukhanova A.A., Turin S.V. Glacial and Subglacial Lake Outbursts in the Larsemann Hills Region of East Antarctica, 2017-2018. *Georisk.* 2018, 12 (3): 56–67. [In Russian].

18. Li T., Zhang B., Xiao W., Cheng X., Li Z., Zhao J. UAV-Based Photogrammetry and LiDAR for the Characterization of Ice Morphology Evolution. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020, 13: 4188–4199. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3010069.

19. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a Large Ice Depression on Dålk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) Caused by the Rapid Drainage of an Englacial Cavity. Journal of Glaciology. 2021, DOI: 10.1017/jog.2021.58.