

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.65

doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-293-306

Развитие подвижки в западной части ледникового купола Вавилова на Северной Земле в 1963–2017 гг.

© 2018 г. И.С. Бушуева*, А.Ф. Глазовский, Г.А. Носенко

Институт географии РАН, Москва, Россия

*bushueva@igras.ru

Surge development in the western sector of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, 1963–2017

I.S. Bushueva*, A.F. Glazovsky, G.A. Nosenko

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*bushueva@igras.ru

Received January 15, 2018

Accepted April 13, 2018

Keywords: *Arctic, glacier surge, ice cap, ice velocity, Severnaya Zemlya.*

Summary

The glaciers and ice caps in the Arctic are experiencing noticeable changes which are manifested, in particular, in the intensification of their dynamic instability. In this paper we present data on a large-scale surge in the Western basin of the Vavilov ice dome on the archipelago Severnaya Zemlya, derived from satellite images and supplemented by airborne RES-2014 and available publications. Analysis of 28 space images of 1963–2017 demonstrated that the surge developed over the whole period. In the first decade (1963–1973), the advance was very slow – from 2–5 to 12 m/year. Since the 1980-ies, the ice movement began to accelerate from tens to a hundred of meters per a year in the 2000-ies. The sudden change happened in the year 2012 when the surge front began to move already at speeds of about 0.5 km/year. In 2015, the volume of advanced part reached almost 4 km³. Maximal speed 9.2 km/year was recorded in 2016. From 1963 to 2017, the edge of the glacier advanced by 11.7 km, and its area increased by 134.1 km² (by 47% relative to the basin area of 1963), that caused spreading of crevasse zone up the glacier. Surface speeds reached a maximum of 25.4 m/day in 2016 and decreased to 7.6 m/day in 2017. The authors suggest that the initial activation of the southern and western edges of the ice dome could be a reaction to the climate signal, possibly occurred several centuries ago. The ice crevassing and cryo-hydrological warming of ice, enhanced by positive feedback, resulted in instability of the glacier and the displacement of the edge of the ice belt containing moraine and frozen to the bed, which transformed into a catastrophic movement. The surge was facilitated by change of bedrock conditions as the ice lobe progressed offshore from permafrost coastal zone to the area of loose marine bottom sediments with low shear strength. The surge seems to be also stimulated by anomalously warm summer of 2012.

Citation: Bushueva I.S., Glazovsky A.F., Nosenko G.A. Surge development in the western sector of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya, 1963–2017. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018. 58 (3): 293–306. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-293-306.

Поступила 15 января 2018 г.

Принята к печати 13 апреля 2018 г.

Ключевые слова: *Арктика, ледниковый купол, подвижка ледника, Северная Земля, скорости льда.*

Исследованы скорости продвижения фронта и роста площади западного сектора ледникового купола Вавилова на Северной Земле с 1963 по 2017 г. Показано, как медленное продвижение фронта перешло в фазу катастрофической подвижки, которая достигла кульминации в 2016 г., когда скорости движения ледника достигали 9,2 км/год. В результате подвижки в акваторию Карского моря на расстояние 11,7 км выдвинулась ледниковая лопасть площадью 134,1 км² и объемом не менее 4 км³, начавшая продуцировать айсберги.

Введение

В настоящее время сокращается площадь и масса арктических ледников, изменяется их температурный режим [1]. По данным космических измерений, потери массы ледников Российской Арктики в 2003–2015 гг. составляли в среднем $-16,0 \pm 2,3$ Гт/год (-310 ± 45 мм в.э./год) [1], а скорости движения льда на их языках при общем отступании краёв ледников возросли [2]. В ряде мест Арктики усилилась динамическая неустойчивость оледенения: возникли пульсации выводных ледников и крупные подвижки отдельных бассейнов ледниковых куполов [2]. Вероятно, такие изменения – следствие перестройки внутреннего гидротермического режима ледников в результате общих изменений климата, а также прямого или косвенного взаимодействия с морем. В данной работе исследуются свидетельства такой крупной подвижки, которая развивалась в западном секторе ледникового купола Вавилова на Северной Земле [3]. На основе анализа 28 космических изображений, полученных за период 1963–2017 гг., и данных радиолокационного зондирования ледника с вертолёта Ми-8, выпол-

ненного в 2014 г., мы оценили скорости продвижения фронта ледника, увеличение его площади, поверхностные скорости движения льда, изменения высоты ледниковой поверхности и объёмов льда, перемещённого в результате подвижки.

Район исследования

Ледниковый купол Вавилова ($79,30^\circ$ с.ш., $95,47^\circ$ в.д.) расположен на о. Октябрьской Революции в архипелаге Северная Земля (рис. 1, а). В Каталоге ледников СССР [4] купол Вавилова показан как один ледник общей площадью $1816,8$ км². В данной работе исследуется западная область этого купола, которая составляет часть сектора № 6, выделенного на куполе Вавилова в работе [5]. Эта область примерно совпадает с ледниковым бассейном G094974E79307N площадью $354,65$ км², выделенным на куполе Вавилова в каталоге Randolph Glacier Inventory (RGI) [6] На рис. 1, б показаны контуры этого бассейна по каталогу RGI и его контуры, уточнённые нами на основе ЦМР ArcticDEM (<http://pgc.umn.edu/arcticdem>). Площадь этой части ледникового купола в пределах уточнённых границ

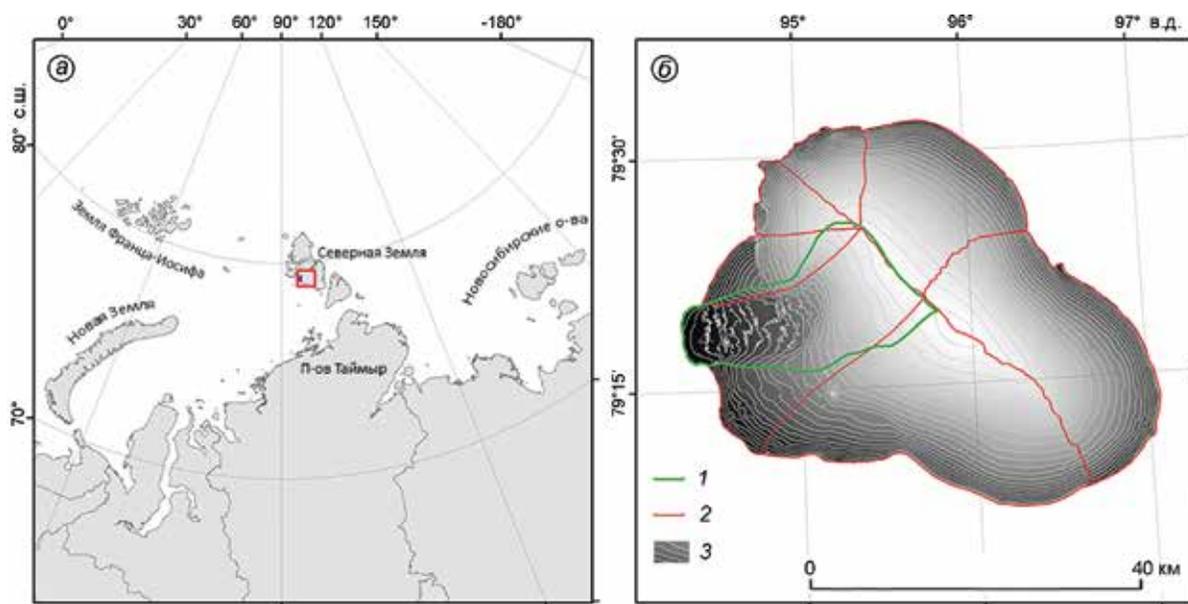


Рис. 1. Ледниковый купол Вавилова, Северная Земля.

а – красный квадрат указывает на расположение купола Вавилова; б: 1 – граница исследуемого в данной работе бассейна в 2007 г., определённая на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM; 2 – ледоразделы купола в соответствии с каталогом RGI [6]; 3 – изогипсы, построенные по цифровой модели рельефа ArcticDEM, интервал – 25 м

Fig. 1. Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya.

а – red box indicates the location of the Vavilov Ice Cap; б – 1 – studied basin in 2007 identified using ArcticDEM; 2 – glaciers borders taken from the Randolph Glacier Inventory [6]; 3 – contours calculated using ArcticDEM, interval is 25 m

составляла на 2007 г. 309,2 км². Далее в тексте эту часть ледника будем называть «западный бассейн» или «западный сектор».

Данные и методы

Плановые изменения. Для оценки планиметрических изменений выводной части западного бассейна ледникового купола Вавилова использованы данные дистанционного зондирования Земли с 1963 по 2017 г. Эти снимки получены разными космическими аппаратами: Landsat 1, 5, 7, 8, Terra (ASTER) и Corona. Основные критерии для выбора изображений: минимальная облачность; достаточная освещённость; минимальное наличие морского льда около края ледника; время съёмки предпочтительно в конце периода абляции. Для последних лет (2011–2017 гг.) использовано по несколько снимков в год. В итоге выбрано и обработано 28 изображений (табл. 1). Для снимков с космических аппаратов Landsat 7 и 8 проведена процедура паншарпенинга (создание цветных изображений с улучшенным пространственным разрешением). Снимки со спутника Landsat 8 имеют субпиксельную привязку, поэтому они использовались в качестве эталонных изображений. Остальные снимки были привязаны к эталонным изображениям на основе контрольных точек, выбранных на суше около ледника. Оцифровку границ ледника вели в ручном режиме.

Изменения высоты поверхности и объёма. Оценка изменения высоты поверхности ледника и его объёмов выполнялась по цифровым моделям рельефа (ЦМР), построенным по космическим снимкам, полученным аппаратурой ASTER (космический аппарат TERRA) в 2000 и 2015 г. Для повышения качества снимки были предварительно отфильтрованы медианным фильтром (размер окна 9 × 9 пиксела). ЦМР морского дна и ложа ледника построена на основе данных воздушного радиолокационного зондирования ледника, выполненного 15 сентября 2014 г., а также изобат и точек глубин с топографической карты масштаба 1:200 000. В этой работе также использована мозаика ЦМР ArcticDEM для выделения ледоразделов.

Скорости движения ледниковой поверхности. Скорость течения льда оценивалась с помощью двух источников. Первый источник — набор данных GoLIVE (Global Land Ice Velocity Extraction

Таблица 1. Использованные космические изображения

| Дата съёмки | Космический аппарат или съёмочная система |
|-------------|---|
| 1963 г. | Пространственное разрешение 5 м Corona |
| 20.07.73 | Пространственное разрешение 60 м Landsat 1 |
| 02.08.85 | Пространственное разрешение 30 м Landsat 5 |
| 25.07.86 | |
| 31.08.87 | |
| 24.08.88 | |
| 23.08.90 | |
| 27.06.94 | |
| 14.07.98 | |
| 12.07.00 | Пространственное разрешение 15 м Landsat 7 |
| 21.08.00 | |
| 25.06.05 | Aster |
| 04.07.07 | Landsat 7 |
| 20.08.10 | |
| 18.06.11 | |
| 14.09.11 | Aster |
| 06.07.12 | Landsat 7 |
| 24.07.12 | |
| 01.07.13 | Landsat 8 |
| 26.09.13 | |
| 24.05.14 | |
| 12.08.14 | |
| 28.08.14 | |
| 06.04.15 | |
| 12.08.15 | |
| 11.04.16 | |
| 29.07.16 | |
| 16.04.17 | |
| 12.09.17 | |

from Landsat 8 (GoLIVE), Version 1 [7]), содержащий результаты расчётов скорости льда, полученных на основе автокорреляции разновременных пар панхроматических изображений Landsat 8 [8]. Были использованы восемь пар таких изображений для периода с марта 2015 г. по март 2017 г. (табл. 2) Пространственное разрешение этих данных составляло 300 м. Второй источник — данные радиолокационных спутников (Sentinel-1 A и B) [9]. Интерферометрические пары Sentinel на область купола Вавилова имеются с ноября 2016 г. Выбрано пять интерферометрических пар, по которым, используя функции отслеживания смещений в наборе программного инструментария SNAP 5.0 (<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>), дана оценка движения ледниковой поверхности между снимками каждой пары. Пространственное разрешение радарных данных варьирует от 5 до 20 м. Все использованные для анализа скоростей движения

Таблица 2. Пары снимков, использованные для оценки скоростей движения ледника

| Дата первого снимка | Дата второго снимка |
|----------------------|---------------------|
| <i>KA Sentinel-1</i> | |
| 12.12.2016 | 24.12.2016 |
| 18.03.2017 | 30.03.2017 |
| 30.03.2017 | 11.01.2017 |
| 10.06.2017 | 22.06.2017 |
| 12.12.2017 | 24.12.2017 |
| <i>KA Landsat 8</i> | |
| 23.03.2015 | 24.04.2015 |
| 24.04.2015 | 10.05.2015 |
| 10.05.2015 | 26.05.2015 |
| 26.05.2015 | 11.06.2015 |
| 11.06.2015 | 29.07.2015 |
| 09.03.2016 | 25.03.2016 |
| 25.03.2016 | 10.04.2016 |
| 12.03.2017 | 13.04.2017 |

выводной части купола Вавилова интерферометрических пары приведены в табл. 2. Интерферометрическая пара снимков, полученная в марте и апреле 2017 г., выбрана специально для сравнения с оценками скоростей движения, устанавливаемых на те же даты из набора GoLIVE.

Результаты

Выделение ледоразделов и рельеф ложа. Согласно каталогу ледников RGI (ледник G094974E79307N), западный бассейн купола Вавилова занимает 354,65 км² (см. рис. 1, б). Используя ЦМР ArcticDEM и космический снимок со спутника Landsat 7, сделанный в 2007 г., мы выделили уточнённые границы этого ледникового бассейна. Выбор снимка 2007 г. обусловлен тем, что выделение границ в каталоге RGI для купола Вавилова также было сделано по снимкам 2007 г. По нашим данным, в 2007 г. площадь западного бассейна ледникового купола Вавилова составляла 309,2 км². На снимках, сделанных в видимом диапазоне спектра, отчётливо видно, что в верхней части бассейна основной поток льда движется с северо-востока, в средней части поворачивая на запад.

Подлёдный рельеф ледника устанавливается по данным воздушного радиозондирования, выполненного на частоте 100 МГц российско-британской экспедицией в 1997 г. [10] и на частоте 20 МГц группой отдела гляциологии Института географии РАН в 2014 г. Согласно этим данным (рис. 2), направление основного тока льда со-

впадает с направлением пологой подледниковой долины, которая лишь в самой нижней своей части погружается ниже уровня моря до глубин 50–60 м и не имеет каких-либо переуглублённых бассейнов и ригелей. Однако отметим, что зона зарождения подвижки совпадает с участком долины, расположенным ниже уровня моря.

Изменение длины, площади и развитие трещин.

На разновременных космических снимках установлено, что с 1963 г. край западного бассейна ледникового купола Вавилова, обрамлённый полосой мореносодержащего льда шириной до 500 м, начал медленно выдвигаться в сторону моря. Это продвижение захватило кромку ледникового купола протяжённостью около 7 км, располагавшуюся ближе всего к береговой линии. В результате начала формироваться всё более выраженная лопасть, постепенно выдвигавшаяся в море, но сохранявшая вплоть до 2010 г. сплошную кайму мореносодержащего льда. К 2011 г. выдвигающийся край лопасти и обрамляющая его кайма стали более раздробленными. С 2014 г. лопасть, продолжая интенсивно наступать, начала сильно расплываться в ширину. Её фронт стал сильно изрезан, мореносодержащая полоса практически разрушилась, от лопасти стали отламываться отдельные айсберги. С середины 2016 г. фронт ледника начал заметно разрушаться. В 2017 г. ледник продолжал увеличиваться в размерах, но меньшими темпами.

Чтобы количественно проанализировать изменение размеров ледника, мы оценили продвижение его фронта по десяти линиям тока (рис. 3, а) за весь период наблюдений с 1963 г. В первое десятилетие – с 1963 по 1973 г. – наступание было очень медленным: от 2–5 м/год по краям лопасти до 12 м/год в осевой части её фронта. С 1980-х годов продвижение стало медленно возрастать: от первых десятков метров в год до первой сотни метров в год в 2000-х годах. Перелом наступил в 2012 г., когда фронт стал выдвигаться уже со скоростями около 0,5 км/год, а максимальные темпы продвижения, составляющие 4,5 км/год, были отмечены в 2016 г. Всего за период с 1963 по 2017 г. край ледника выдвинулся на 11,7 км (см. рис. 3, в, г), а его площадь увеличилась на 134,1 км² (см. рис. 3, б).

Выдвижение лопасти сопровождалось интенсивным развитием трещин на её поверхности и распространением зоны трещин вверх по леднику. В сентябре 2014 г. аэровизуальные наблю-

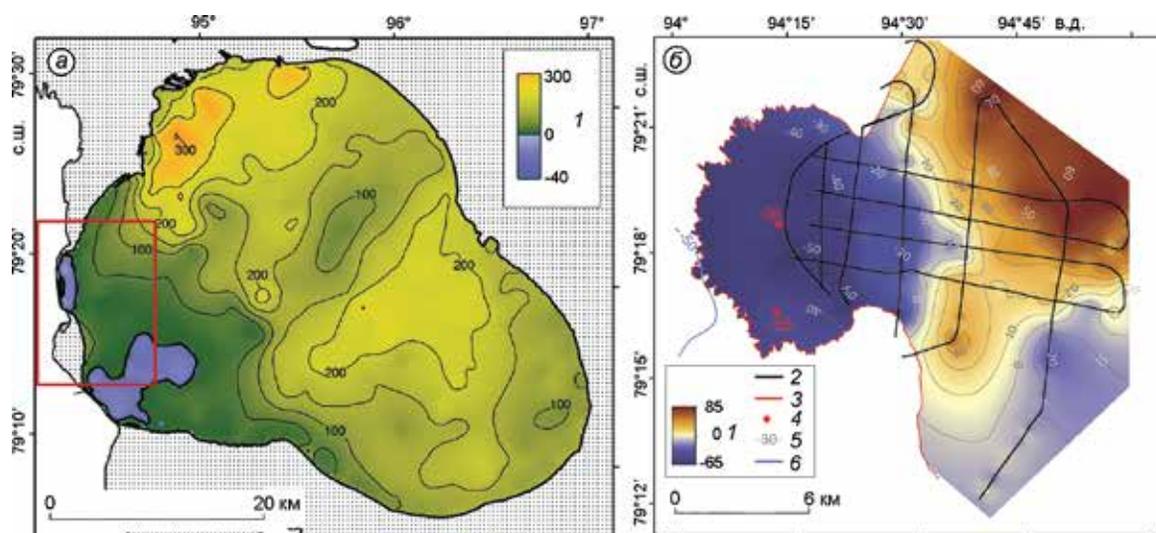


Рис. 2. Подледниковый рельеф купола Вавилова.

a – топография ложа купола по данным воздушного радиолокационного зондирования на частоте 100 МГц, выполненного в 1997 г., сечение изогипс – 50 м. Области ниже уровня моря показаны голубым цветом [10]. Красным квадратом отмечены границы рис. 2, *b*; *b* – карта подледникового ложа нижней части западного бассейна купола Вавилова по данным воздушного радиолокационного зондирования на частоте 20 МГц, выполненного 15 сентября 2014 г.: 1 – высота поверхности, м; 2 – положение маршрутов съёмки; 3 – граница ледника в 2015 г.; 4 – значения глубин, снятые с топографической карты; 5 – изолинии; 6 – изобаты

Fig. 2. Subglacial topography of the Vavilov Ice Cap.

a – topography of the glacier bed according to the data of airborne radio sounding at a frequency of 100 MHz, performed in 1997, contours are at 50 m intervals. The areas below sea level are painted blue [10]. Red box indicates the borders of fig. 2, *b*; *b* – map of the subglacial bed of the lower part of the western basin of the Vavilov Ice Cap according to the data of airborne radio sounding at a frequency of 20 MHz, performed on September 15, 2014: 1 – elevation, m; 2 – position of the sounding profiles; 3 – glacier border in 2015; 4 – bathymetric points from topographic map; 5 – contours; 6 – isobaths

дения показали, что регулярные трещины, поперечные току льда, отмечались на протяжении 16 км от края ледника, убывая в частоте и ширине по мере удаления от края. Однако на космических изображениях с разрешением 15 м эта зона в 2014 г. идентифицировалась только в районе лопасти, но уже на снимках апреля 2015 г. общая площадь зоны с трещинами составляла 86,95 км², на снимках апреля 2016 г. – 237,5 км², а апреля 2017 г. – 266,37 км² (рис. 4, *в*). Площадь зоны трещин выше границы ледника 1963 г. по отношению к площади выдвигаемой лопасти увеличилась с 76% в 2015 г. до 103% в 2017 г. Иными словами: развитие области разрывных нарушений вверх по леднику достигло и превысило всю площадь выдвигаемой лопасти.

Изменение высоты поверхности ледника. Для оценки её изменения мы использовали ЦМР, построенные по космическим снимкам ASTER, полученным в 2000 и 2015 г. Методика расчётов показана на рис. 4, *а*. Выше горизонтали 100 м (2015 г.) поверхность ледника опусти-

лась в среднем на 56,6 м, максимум – на 119 м (см. рис. 4, *б*). Увеличение объёма ледника на этой площади составило 1,918 км³. В то же время объём выводной части ледника повысился на 4,101 км³, из которого 1,223 км³ – разница между двумя ЦМР выше уровня моря, а 2,878 км³ – объём ниже уровня моря с учётом допущения, что ледник скользит по дну моря и не всплывает.

Изменение скорости движения поверхности ледника. Для сравнения скоростей движения поверхности льда выбраны семь профилей: один – вдоль линии тока и шесть – поперёк (рис. 5, *а*). Согласно данным GoLIVE, в период с 2015 по 2017 г. скорость движения поверхности ледника сначала росла и достигла максимума 25,4 м/день в 2016 г., а к 2017 г. уменьшилась до 7,6 м/день (см. рис. 5, *б*). С 2015 по 2017 г. максимум скорости продвинулся в верхнюю часть ледника вслед за развитием трещин. К сожалению, данные GoLIVE рассчитаны только в границах каталога RGI, т.е. не охватывают часть лопасти, выдвинувшуюся после 2007 г.

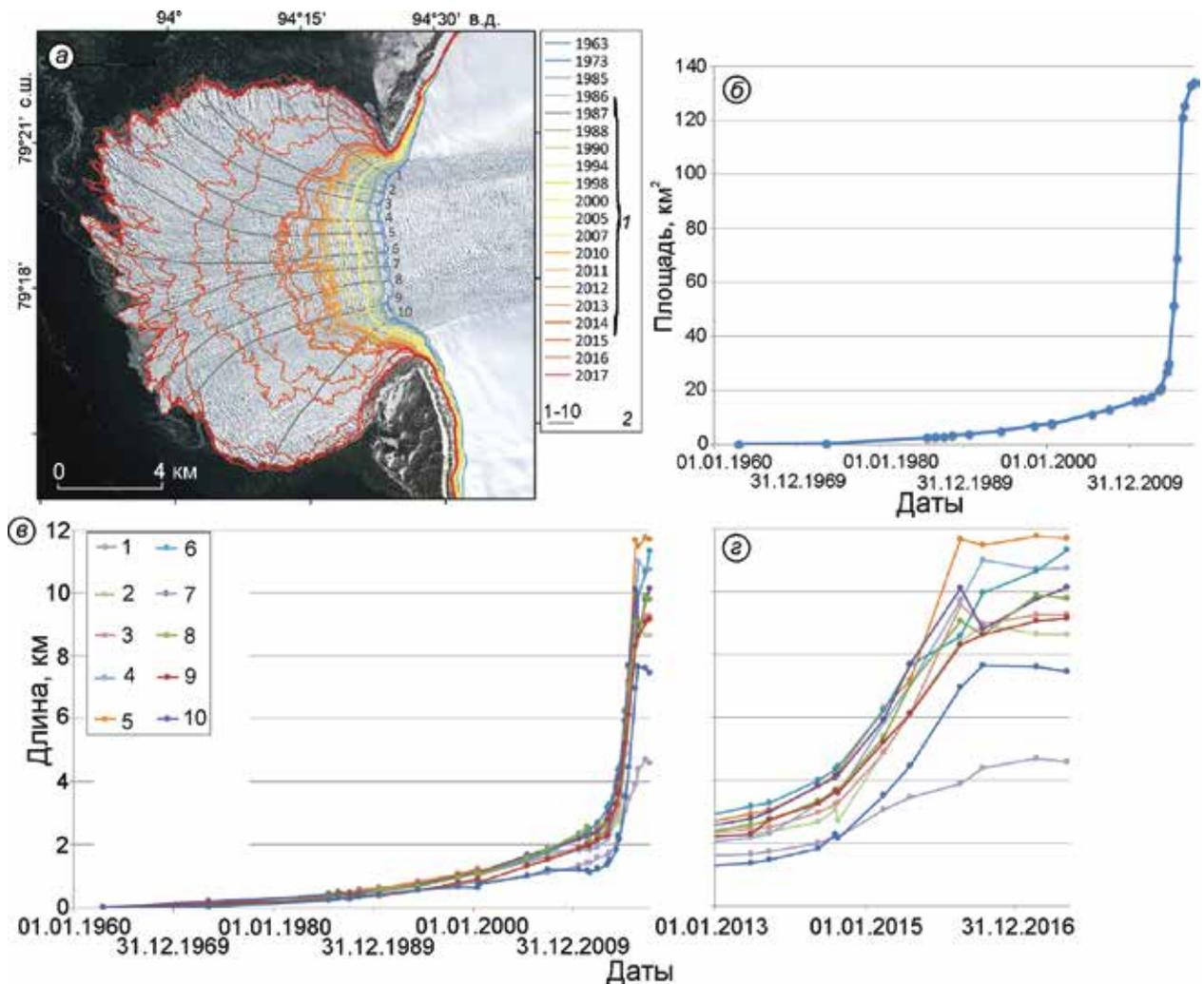


Рис. 3. Изменения размеров ледника.

a – изменение фронта западного бассейна купола Вавилова с 1963 по 2017 г.: 1 – годы; 2 – линии тока, по которым проводились измерения изменения длины ледника (см. рис. 3, *в* и *г*); *б* – изменение площади ледника с 1963 по 2017 г.; *в* – изменение длины ледника с 1963 по 2017 г.; *г* – увеличенный фрагмент графика изменения длины ледника с 2013 по 2017 г.

Fig. 3. Changes of glacier size.

a – changes of front line of the western basin of the Vavilov Ice Cap from 1963 to 2017; 1 – years; 2 – flow lines used for calculation of the glacier length changes; *б* – area changes from 1963 to 2017; *в* – length changes from 1963 to 2017; *г* – zoomed fragment of figure of length changes from 2013 to 2017

Отметим, что скорости движения поверхности ледника в апреле 2017 г., по данным GoLIVE, почти совпадают с оценками скорости, полученными для того же периода времени по радарным данным со спутников Sentinel-1. Используя радарные интерферометрические пары Sentinel-1, мы проанализировали, как менялись скорости движения поверхности ледника в течение года с декабря 2016 г. по сентябрь 2017 г. (см. рис. 5, *в*). В декабре 2016 г. ледник двигался особенно быстро – его максимальные скорости достигали 10,2 м/день; в первой половине 2017 г.

они уменьшились до 7,4 м/день, в июле были равны 6,5 м/день, а в сентябре несколько повысились до максимума 7,1 м/день.

Обсуждение

Ценные сведения об изменениях купола Вавилова во второй половине XX в. обобщены в монографии [5], а их оригинальная интерпретация дана в статье [11]. Сравнение положения края ледника по всему периметру в 1952 и

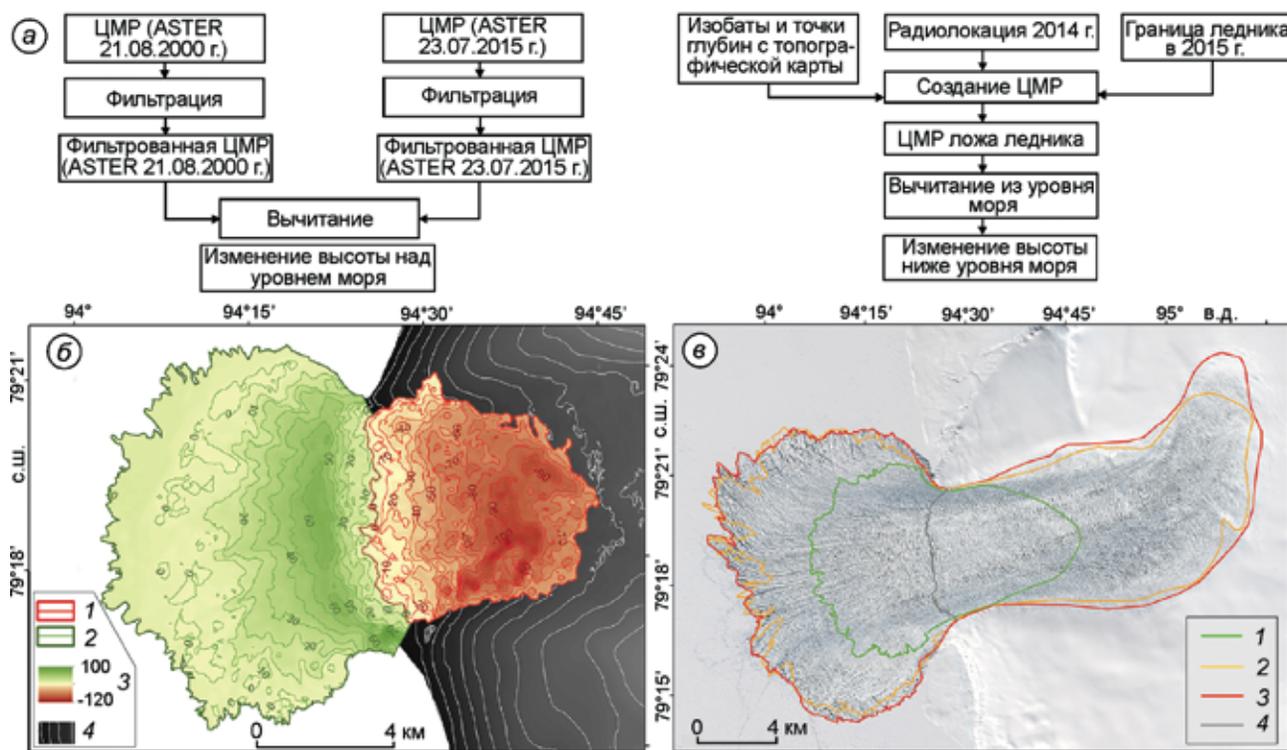


Рис. 4. Изменения поверхности ледника.

a – схема расчёта изменения высоты поверхности на леднике; *б* – изменения высоты поверхности с 2000 по 2015 г.: 1 – границы и изолинии понижения поверхности; 2 – границы и изолинии повышения поверхности; 3 – изменения высоты поверхности ледника, м; 4 – изолинии; *в* – эволюция распространения трещин на леднике: 1 – 06.04.2015; 2 – 11.04.2016; 3 – 16.04.2017; 4 – граница ледника в 1963 г.

Fig. 4. Elevation changes of the glacier surface

a – scheme of calculation of surface elevation changes; *б* – elevation changes from 2000 to 2015: 1 – border and isolines of glacier surface degradation; 2 – border and isolines of glacier surface rise; 3 – elevation changes, m; 4 – contours; *в* – evolution of crevasses on the glacier: 1 – 06.04.2015; 2 – 11.04.2016; 3 – 16.04.2017; 4 – glacier border in 1963

1985 гг. показало, что за 33 года на северном и восточном участках периметра ледникового купола его край был стабилен или отступил в среднем на 150 м (максимум 450 м), а южная кромка ледника выдвинулась почти на всём своём протяжении на расстояние от 150 до 450 м. На западном краю ледника, т.е. в области будущей пульсации, отмечен ещё один участок протяжённостью по фронту 9 км, где также наблюдалось значительное продвижение – от 170 до 400 м. Отметим, что, по нашим данным, максимальное продвижение здесь за период 1963–1985 гг. составляло 427 м. Из этого следует, что в 1952–1963 гг. продвижение было не более 30 м, т.е. скорости наступания фронта в этот период не превышали 3 м/год.

Более поздние оценки, представленные на карте изменения ледников на Северной Земле в 1980–2000-х годах [12], показывают, что скорость

движения края западного бассейна осенью 1995 г. составляла 15 см/день (55 м/год), а протяжённый участок поверхности в области бассейна с 1980-х годов по 2008 г. понизился на 10 м, причём этот участок понижения по форме совпал с формой подледниковой долины. Несколько меньшие скорости движения льда в краевой части бассейна – 15–20 м/год – были определены методом InSAR по паре изображений ERS от 15 и 16 мая 1996 г. [10]. В любом случае эти скорости заметно выше скоростей 1–2,5 м/год, полученных при модельных расчётах движения ледникового купола Вавилова [5, 10], учитывающих баланс массы, заданный по наземным измерениям.

Важно, что наступание 1952–1985 гг. южной и западной кромок сопровождалось изменениями в положении верхней границы моренного пояса, обрамляющего ледник по периметру. Моренный пояс продвинулся на расстояния, пре-

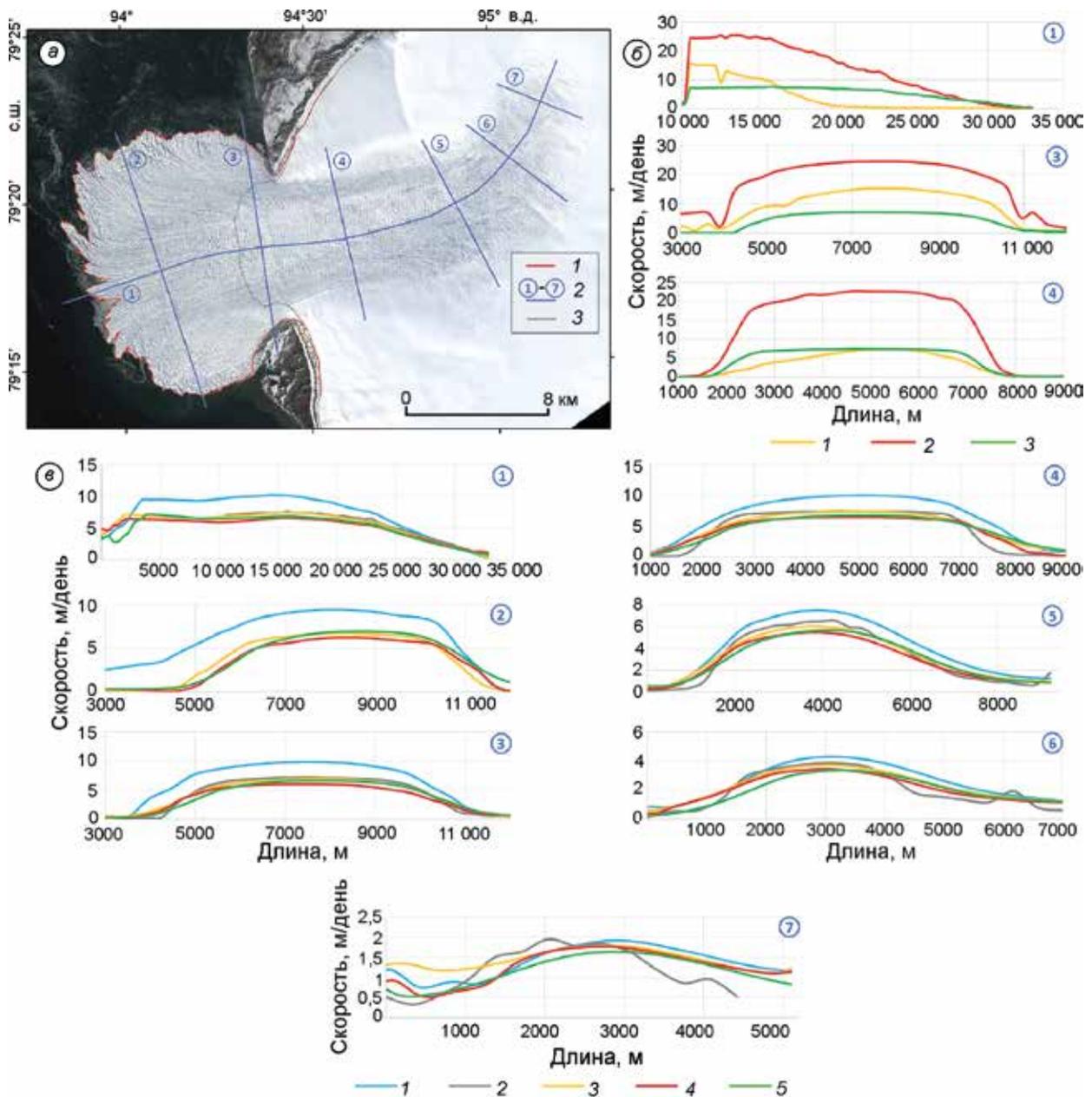


Рис. 5. Скорости движения поверхности ледника.

a – 1 – граница ледника 12 сентября 2017 г.; 2 – расположение профилей, для которых строились графики скоростей движения льда; 3 – граница ледника по каталогу RGI; *б* – скорости движения льда, по данным GoLIVE в апреле 2015 (1), 2016 (2) и 2017 гг. (3); *в* – скорости движения поверхности льда, полученные по радарным снимкам Sentinel-1 в декабре 2016 (1), апреле 2017 (3), июне 2017 (4) и сентябре 2017 гг. (5) и посчитанные в программе GoLIVE для апреля 2017 г. (2). Цифры в кружках соответствуют профилям на рис. 5, *a*

Fig. 5. Ice surface velocities.

a – 1 – position of glacier front line in 12.09.2017; 2 – position of lines which were used for graphs constructions; 3 – glacier border in the RGI [6]; *б* – glacier velocities taken from GoLIVE program in April 2015 (1), April 2016 (2) and April 2017 (3); *в* – glacier surface velocities calculated using radar data from Sentinel-1 obtained in December 2016 (1), April 2017 (3), June 2017 (4) and September 2017 (5) and taken from GoLIVE program for April 2017 (2). Numbers indicate corresponding line on the Fig. 5, *a*

вышающие наступание самой кромки ледника. Ширина его сократилась на 100–250 м в результате частичного перекрытия этого пояса более

подвижным льдом [5]. Слои мореносодержащего льда в этом поясе падают внутрь ледника под крутыми углами. Наличие в мореносодержащем льду

блоков обломочного материала с ненарушенной слоистостью и хорошей сохранностью раковин показывает, что они образовались в результате отчленения подстилающих ледник пород, находящихся в мёрзлом состоянии, и были перенесены на небольшое расстояние. По мнению [5], загиб слоёв льда и соответствующий наклон блоков рыхлых отложений, отторгнутых от ложа, связаны с подпором клина льда, примороженного к ложу по периметру ледникового купола. Такой клин был также идентифицирован нами на радарограммах краевой части ледникового купола при воздушной радиолокации 2014 г. (рис. 6, в).

По результатам наших наблюдений, мореносодержащий пояс, обрамляющий край западного бассейна, не был перекрыт или разрушен наступающим льдом при подвижке 1963–2017 гг., а выпирался им вперёд по всему фронту выдвигавшейся лопасти. Есть факты, свидетельствующие, что при сдвиге этого пояса мореносодержащего льда его нижние глубинные части остались на прежнем месте. Во-первых, практически на всех космических снимках ледниковой лопасти в рельефе её поверхности «просвечивает» структура, совпадающая с положением края ледника 1952 г. (см. рис. 6, а). Во-вторых, на профилях радиолокационного зондирования в этих же местах отмечается валообразное повышение рельефа ложа (см. рис. 6, б). На этом основании можно предположить, что клин мореносодержащего льда был срезан надвигающейся массой по внутренним сколам, а его корни остались в виде указанной подледниковой структуры.

По мнению В.Н. Голубева [11], динамика кромки купола Вавилова в 1952–1985 гг. определялась суперпозицией синхронного воздействия современного потепления и эпихронного воздействия климатических событий, которые проявляются в динамике фронта ледника через интервал времени, близкий к периоду обмена массы. На северной кромке ледника, отстоящей от ледораздела в среднем на 14 км, к такому эпихронному событию относится потепление, имевшее место около 2000 лет назад, а на южной кромке, отстоящей от ледораздела в среднем на 18 км, — похолодание, которое было около 1 тыс. 200 лет назад. С этим же похолоданием он связывает формирование пояса мореносодержащего льда, когда из-за увеличения толщины ледника действующие на его подошве усили-

превышали прочность подстилающих мёрзлых грунтов на сдвиг (около 1 МПа).

Предположение, что изменения кромки купола Вавилова представляют собой результат наложения климатических сигналов разной продолжительности, трансформируемых в динамике и температурном режиме ледника и подстилающих его пород, вполне может рассматриваться как рабочая гипотеза, которая требует дальнейших углублённых исследований. Что касается современных условий, то нельзя не учитывать, что описываемые события происходят на фоне роста температур воздуха, наблюдаемого в последние десятилетия в Арктике, где они растут в два раза быстрее, чем в среднем по миру [13]. Особенно заметен рост числа положительных температурных аномалий в полярных широтах с начала XX в. (<http://nsidc.org/soac/temperature.html#merga-temperature>). Степень потепления зависит от региона и времени года. В районе Северной Земли заметное увеличение температур воздуха на уровне 2 м приходится на летне-осенний период (рис. 7, а, б). Повышение температур сопровождается сокращением площади морских льдов в восточной части Карского моря (см. рис. 7, в), что, в свою очередь, способствует дополнительному прогреву свободной ото льда морской поверхности и увеличению продолжительности относительно более тёплого периода. Такое потепление климата должно увеличивать количество воды в жидкой фазе на поверхности и, вероятно, в теле ледника. На снимке ASTER, полученном 21 августа 2000 г. (рис. 8), видно, что граница сезонного снежного покрова поднялась почти до ледораздела. На открытой поверхности ледника, ниже границы зоны ледяного питания, хорошо видны годовые слои, а область выше неё представляет собой снежное болото, покрытое сетью временных водотоков и заполненных водой участков поверхности.

Вероятно, длиннопериодный климатический сигнал, вызвавший в 1952–1985 гг. общее продвижение южной и западной кромок купола, способствовал образованию в западном бассейне достаточного количества трещин растяжения, которые стали перехватывать поверхностный сток талых вод. В результате начало развиваться криогидрологическое отепление толщи льда, т.е. повышение его температур из-за повторного замерзания талых вод, проникающих в тело ледника по тре-

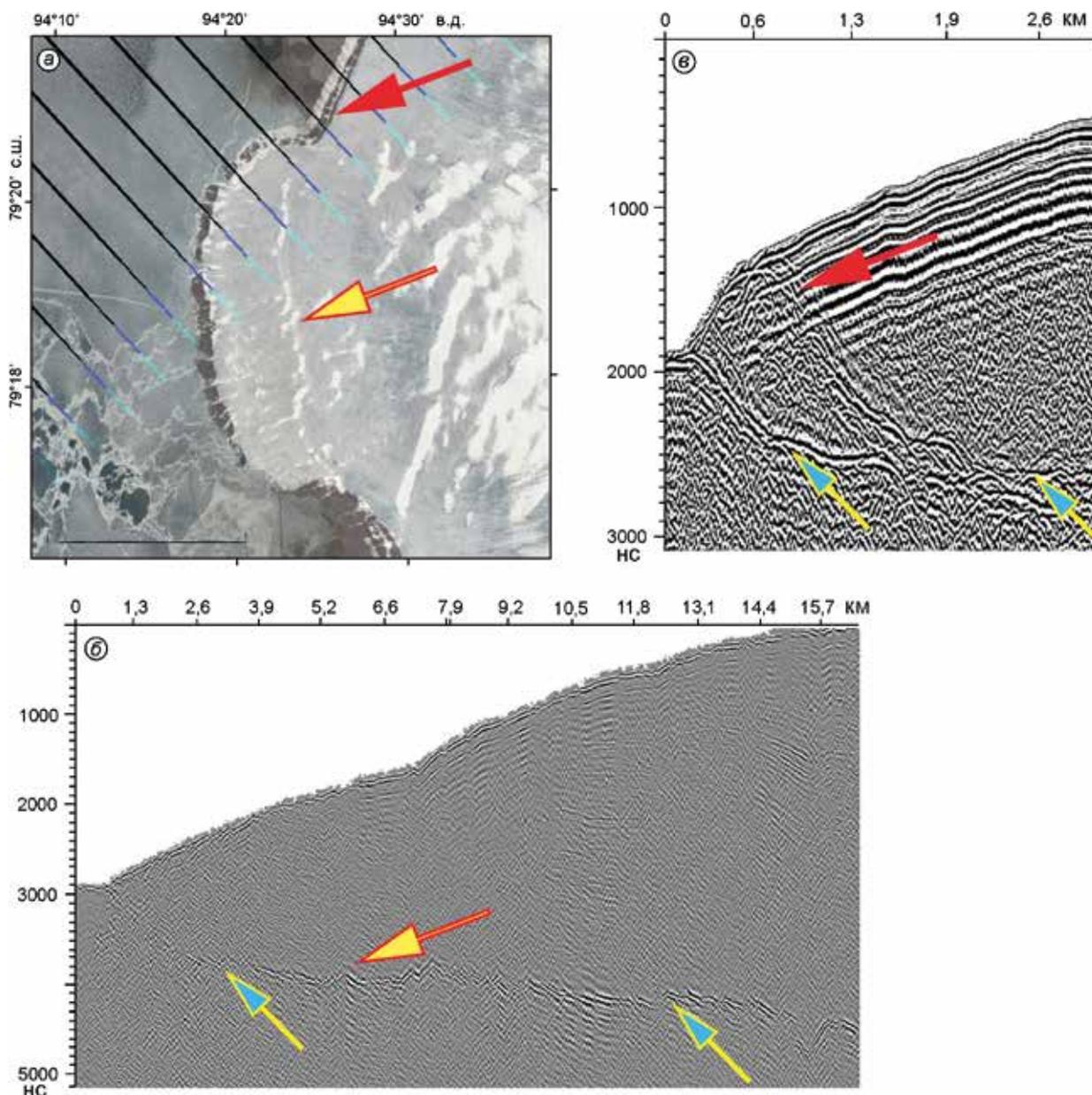


Рис. 6. Подледниковая структура (указана жёлтой стрелкой), соответствующая положению края ледника в 1952 г. Она обнаруживается на космических изображениях (а) (снимок Landsat 7 от 04 июля 2007 г.) и в рельефе подледникового ложа ледника Вавилова (б) (положение маршрута 035_014_3, снятого 15 сентября 2014 г. с запада на восток). Для сравнения приводится (в) положение маршрута 035_014_7 в краевой части купола с мореносодержащим поясом на участке, не испытавшем подвижки (красная стрелка). На рис. 6, б, в по горизонтальной оси отложено расстояние в километрах, по вертикальной оси – время двойного пробега радиоимпulses, нс. Отражения от ложа показаны голубыми стрелками

Fig. 6. Subglacial structure (indicated by a yellow arrow) corresponding to the position of the edge of the glacier in 1952. It is found on space images (a) of Landsat 7 from July 04, 2007, and in the relief of the subglacial bed (b) on the radar profile 035_014_3 of the Vavilov glacier, shot on September 15, 2014 (from west to east). For comparison the radar profile 035_014_7 is given (c). It shows the edge part of the dome with the moraine-containing belt on the area which did not experience movements (red arrow). In Fig. 6, б, в the horizontal axis is distance in kilometers, the vertical axis is the time of the double run of the radio impulse in nanoseconds. Reflections from the bed are shown with blue arrows

щинам. Не исключено, что часть вод могла проникать до ложа ледника. Из-за этого повышались скорости деформации и движения льда, росло

количество трещин, возрастали перехват поверхностного стока и криогидрологическое отопление толщи льда. Накапливавшиеся за последние тёп-

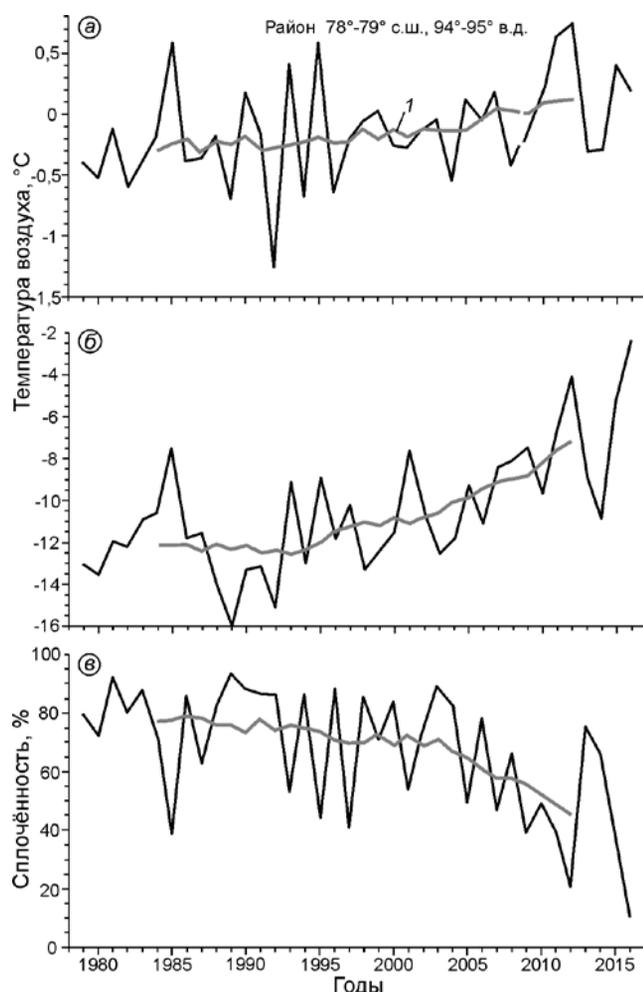


Рис. 7. Изменения средней температуры воздуха за июнь–август (*a*), сентябрь–ноябрь (*b*) и концентрации морских льдов (*c*) в период 1979–2016 гг. в районе исследований по данным [14].

1 – скользящее среднее по пятилетиям

Fig. 7. Changes of air temperatures JJA (*a*), SON (*b*) and sea ice concentration (*c*) in the period 1979–2016 in the study area according to [14].

1 – 5-year moving average.

лые десятилетия изменения гидротермической структуры западного бассейна могли оказаться достаточными для перехода к неустойчивому состоянию, которое завершилось подвижкой. Значительная протяжённость этого процесса во времени обусловлена инерционностью системы, связанной с её грандиозным масштабом.

О значительном влиянии воды на динамику арктических ледников можно судить по развитию крупной подвижки бассейна № 3 Восточного ледяного поля на Шпицбергене, начало бурного развития которой в аномально тёплом

2012 г. совпадает по времени с активизацией подвижки ледника Вавилова и продолжается до сих пор. Ступенчатое изменение скорости зафиксировано непрерывной GPS-съёмкой с весны 2008 г. и показывает ежегодную приуроченность пиков увеличения скорости к периоду таяния, когда количество воды на леднике максимально [15, 16]. В 2014 г. максимальные скорости течения на нём достигли уже 3800 м/год. С 2010 г. край бассейна № 3 увеличился на 50 км², а в 2014 г. активизировался соседний бассейн № 2.

Кроме перечисленных здесь причин и механизмов, дополнительным фактором активизации западного бассейна купола Вавилова в 2012 г. стало постепенное выдвигание лопасти в акваторию с надвиганием на рыхлые донные отложения – гораздо менее прочные на сдвиг, чем многолетнемёрзлые породы у наземного края ледника. С этого времени лопасть стала особенно быстро продвигаться и распластываться вширь, в результате чего её край стал сильно раздроблён, мореносодержащий пояс разрушился и началась активная фронтальная абляция с образованием айсбергов.

Заключение

Анализ 28 космических изображений 1963–2017 гг. позволил установить, что крупная подвижка западного сектора ледникового купола Вавилова на Северной Земле развивалась в течение всего этого периода. Но в первое десятилетие (с 1963 по 1973 г.) наступание было очень медленным – от 2–5 до 12 м/год. С 1980-х годов продвижение стало несколько ускоряться – от первых десятков метров в год до первой сотни метров в год в 2000-х годах. Перелом наступил в 2012 г., когда фронт стал выдвигаться со скоростями около 0,5 км/год. Объём выдвинувшейся лопасти в 2014 г. составил не менее 4 км³. Максимальные темпы продвижения лопасти 9,2 км/год отмечены в 2016 г. Всего за период с 1963 по 2017 г. край ледника выдвинулся на 11,7 км, а его площадь увеличилась на 134,1 км². Активное выдвигание лопасти в 2014–2017 гг. шло одновременно с распространением вверх по леднику обширной зоны трещин растяжения, площадь которой в 2017 г. (134,9 км²) достигла и превысила площадь самой лопасти, также целиком разбитой трещинами.

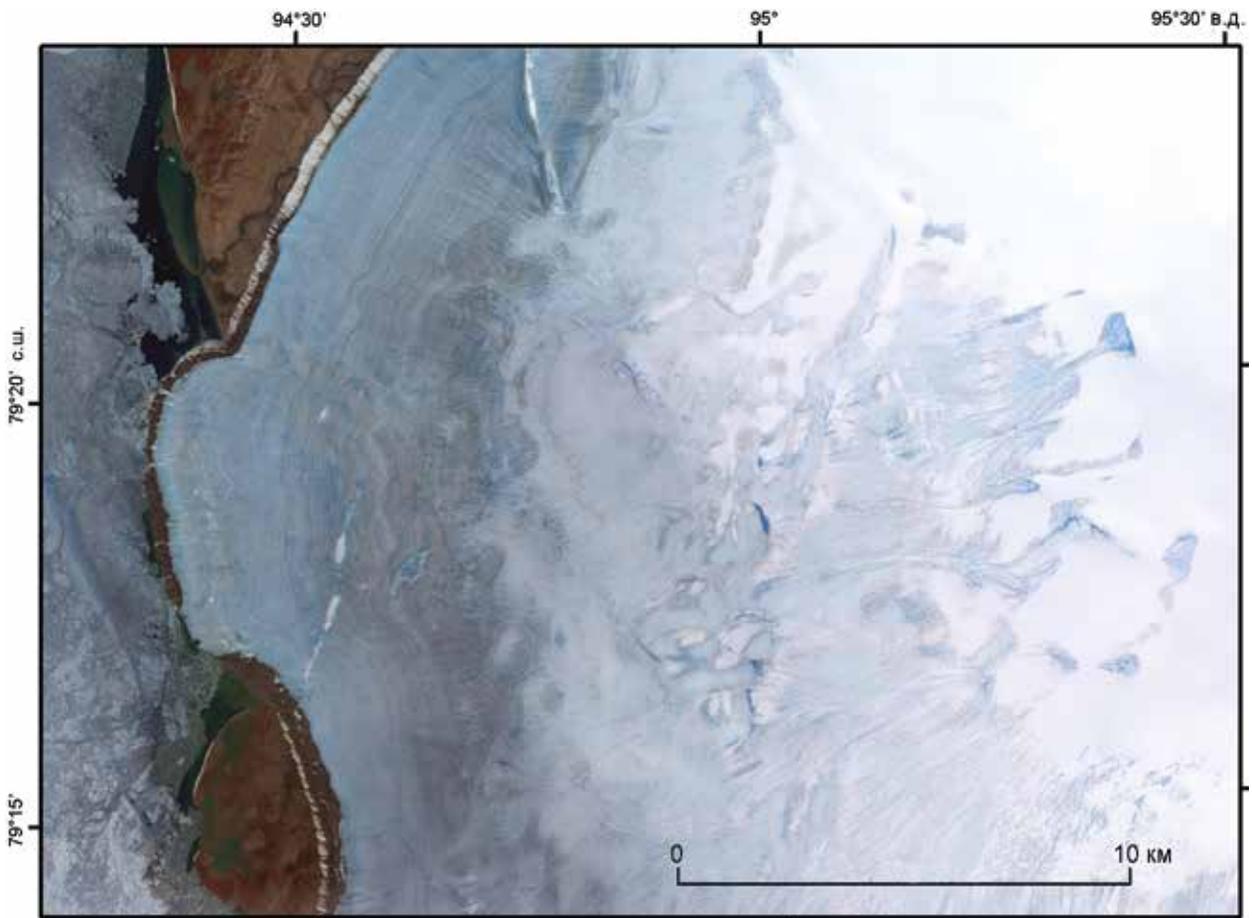


Рис. 8. Состояние поверхности ледника Вавилова в конце периода абляции на снимке ASTER (21 августа 2000 г.)
Fig. 8. Condition of the Vavilov Ice Cap surface at the end of the ablation period on the ASTER image (August 21, 2000)

Анализ поверхностной скорости движения ледника по данным космических изображений Landsat 8 и Sentinel-1 показал, что в период с 2015 по 2017 г. она сначала росла и достигла максимума 25,4 м/день в 2016 г., а в 2017 г. уменьшилась до 7,4 м/день. С 2015 по 2017 г. максимум скорости продвинулся в верхнюю часть ледника вслед за развитием зоны трещин.

На основе всех имеющихся сведений сделано предположение, что общая активизация южной и западной кромок купола Вавилова может быть связана с его реакцией на климатический сигнал, отдаленный на несколько столетий. Такая активизация в западном бассейне привела к формированию трещин растяжения в количестве, достаточном для эффективного перехвата поверхностных талых вод, образование которых усилилось в связи с наблюдаемым современным климатическим потеплением в этом районе. Результатом стало криогидрологическое отепление толщи льда, приведшее к повы-

шению деформации льда, дальнейшему усилению движения и росту числа трещин. Вероятно, такие взаимоусиливающиеся изменения в западном бассейне оказались достаточны, чтобы краевой клин мореносодержащего льда, примороженный к ложу, был срезан надвигающейся массой по внутренним сколам и ледник перешёл к неустойчивому состоянию, которое завершилось катастрофической подвижкой. Этому также способствовали аномально тёплые условия лета 2012 г., и само надвигание лопасти на рыхлые донные морские отложения с малой прочностью на сдвиг.

Учитывая всё это, необходимо, во-первых, продолжить дистанционные, а по возможности и полевые наблюдения в западном бассейне купола Вавилова; во-вторых, обратить внимание на состояние других его краёв, в частности, у озера Изменчивое. Дальнейшим направлением может стать более подробное исследование развития зоны трещин на леднике совместно с анализом интенсив-

ности поверхностного таяния. Эта крупнейшая ледниковая подвижка из когда-либо наблюдавшихся в Российской Арктике может быть сигналом глубоких и продолжительных изменений внутреннего строения арктических ледников, что обусловлено общими природными изменениями.

Благодарности. Работа выполнялась при поддержке РФФИ, гранты 16-35-00333 и 17-55-80107, госзадания № 01201352474 «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидротермического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам». А.Ф. Глазовский проводил обработку радиолокационных измерений 2014 г. в рамках проекта РНФ № 14-37-00038 «Изменения окружающей среды в Арктике и их влияние на население и народное хозяйство».

ЦМР ArcticDEM предоставлена Полярным геопространственным центром в рамках заказов NSF OPP 1043681, 1559691 и 1542736. Данные Landast, предоставленные Геологической службой США, были загружены с EarthExplorer, а данные с космического аппарата Sentinel-1 были предоставлены Европейским космическим агентством. Программное обеспечение для обработки этих данных разработано для Европейского космического агентства компанией Array в партнерстве с DLR, Brockmann Consult и OceanDataLab. Данные по спутника ASTER получены в рамках проекта Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), инициированного геологической службой США и НАСА.

Материалы о температуре июня—июля—октября, сентября—октября—ноября и концентрации морских льдов в сентябре—октябре—ноябре получены с использованием Climate Reanalyzer (<http://ccs-reanalyzer.org>), Институт изменения климата, Университет Мэна, США.

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grants № 16-35-00333 and 17-55-80107, and the Government Contract № 01201352474 «Estimates of the current state and changes in the internal hydrothermal regime of glaciers, with highlighting of the data on reference glaciers». A. Glazovsky conducted the processing of radar measurements of 2014 within the framework of the project RSF № 14-37-00038 «Environmental changes in the Arctic and their impacts on the human wellbeing and infrastructure».

ArcticDEM was provided by the Polar Geospatial Center under NSF OPP awards 1043681, 1559691 and 1542736. Landsat images courtesy of the U.S. Geological Survey, were downloaded from EarthExplorer. Sentinel-1 data was produced from ESA remote sensing data. The Sentinel-1 Toolbox was developed for ESA by Array in partnership with DLR, Brockmann Consult and OceanDataLab. ASTER data was obtained from Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) project which was initiated by the U.S. Geological Survey and NASA. Temperatures JJA, SON at 2 m and sea ice concentration were obtained using Climate Reanalyzer (<http://ccs-reanalyzer.org>), Climate Change Institute, University of Maine, USA.

Литература

1. Box J.E., Sharp M. Changes to Arctic land ice // Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017. P. 137–168.
2. Strozzi T., Paul F., Wiesmann A., Schellenberger T., Käab A. Circum-Arctic changes in the flow of glaciers and ice caps from satellite SAR data between the 1990s and 2017 // Remote Sensing. 2017. № 9 (9). 947 p. doi:10.3390/rs9090947.
3. Glazovsky A., Bushueva I., Nosenko G. «Slow» surge of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya // Proc. of the IASC Workshop on the Dynamics and Mass Balance of Arctic Glaciers. Obergurgl, Austria. 23–25 March 2015.
4. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 1. М.-Л.: Гидрометеоздат, 1980. 81 с.

References

1. Box J.E., Sharp M. Changes to Arctic land ice. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 2017: 137–168.
2. Strozzi T., Paul F., Wiesmann A., Schellenberger T., Käab A. Circum-Arctic changes in the flow of glaciers and ice caps from satellite SAR data between the 1990s and 2017. Remote Sensing. 2017. 9 (9): 947 p. doi: 10.3390/rs9090947.
3. Glazovsky A., Bushueva I., Nosenko G. «Slow» surge of the Vavilov Ice Cap, Severnaya Zemlya. Proceedings of the IASC Workshop on the Dynamics and Mass Balance of Arctic Glaciers, Obergurgl, Austria. 23–25 March 2015.
4. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 81 p. [In Russian].

5. *Большаянов Д.Ю., Макеев В.М.* Архипелаг Северная Земля. Оледенение, история развития природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1995. 216 с.
6. Электронный ресурс: RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0 // Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. 2017. P. 71. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
7. Электронный ресурс: *Scambos T., Fahnestock M., Moon T., Gardner A., Klinger M.* Global Land Ice Velocity Extraction from Landsat 8 (GoLIVE), Version 1 // [79.2–79.4°N, 93.7–95.5°E]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.7265/N5ZP442B>. Accessed on June 14, 2017.
8. *Fahnestock M., Scambos T., Moon T., Gardner A., Haran T., Klinger M.* Rapid large-area mapping of ice flow using Landsat 8 // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 185. P. 84–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.023>.
9. Электронный ресурс: Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>
10. *Bassford R.P.* Geophysical and numerical modelling investigations of the ice caps on Severnaya Zemlya // A dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements of the degree of PhD in the Faculty of Science Bristol Glaciology Centre, School of Geographical Sciences, January 2002. 220 p.
11. *Голубев В.Н.* Современные колебания ледникового купола Вавилова на Северной Земле // МГИ. 1988. Вып. 85. С. 196–204.
12. *Tyukavina A.I., Sharov A.I.* Severnaya Zemlya: Glacier changes in 1980–2000s. Map 1:100 000 scale. Inv. № 817106_02 // Joanneum Research. 2009.
13. *Serreze M.C., Barry R.G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. 2011. V. 77 (1–2). P. 85–96. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
14. Электронный ресурс: Climate Reanalyzer http://cci-reanalyzer.org/Reanalysis_monthly/tseries.php.
15. *Dunse T., Schellenberger T., Hagen J.O., Käab A., Schuler T.V., Reijmer C.H.* Glacier-surge mechanisms promoted by a hydro-thermodynamic feedback to summer melt // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 197–215. <https://doi.org/10.5194/tc-9-197-2015>.
16. *Schellenberger T., Dunse T., Käab A., Schuler T.V., Hagen J.O., Reijmer C.H.* Multi-year surface velocities and sea-level rise contribution of the Basin-3 and Basin-2 surges, Austfonna, Svalbard // The Cryosphere Discussion. 2017. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-5>, in review.
5. *Bol'shiyanov D.Yu., Makeyev V.M.* Arkhipelag Severnaya Zemlya. Oledeneniye, istoriya razvitiya prirodnoy sredy. The Northern Earth Archipelago. Glaciation, the history of development of the natural environment. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1995: 216 p. [In Russian].
6. RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media. 2017: P. 71. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
7. *Scambos T., Fahnestock M., Moon T., Gardner A., Klinger M.* Global Land Ice Velocity Extraction from Landsat 8 (GoLIVE), Version 1. [79,2–79,4° N, 93,7–95,5° E]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.7265/N5ZP442B>. Accessed on June 14, 2017.
8. *Fahnestock M., Scambos T., Moon T., Gardner A., Haran T., Klinger M.* Rapid large-area mapping of ice flow using Landsat 8. Remote Sensing of Environment. 2015, 185: 84–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.023>.
9. Copernicus Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>.
10. *Bassford R.P.* Geophysical and numerical modelling investigations of the ice caps on Severnaya Zemlya. A dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements of the degree of PhD in the Faculty of Science Bristol Glaciology Centre, School of Geographical Sciences. January 2002: 220 p.
11. *Golubev V.N.* Modern fluctuations of the Vavilov Ice Cap on the Severnaya Zemlya. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1988, 85: 196–204. [In Russian].
12. *Tyukavina A.I., Sharov A.I.* Severnaya Zemlya: Glacier changes in 1980–2000s. Map 1:100 000 scale. Inv. № 817106_02. Joanneum Research. 2009.
13. *Serreze M.C., Barry R.G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Global and Planetary Change. 2011, 77 (1–2): 85–96. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
14. Climate Reanalyzer http://cci-reanalyzer.org/Reanalysis_monthly/tseries.php.
15. *Dunse T., Schellenberger T., Hagen J.O., Käab A., Schuler T.V., Reijmer C.H.* Glacier-surge mechanisms promoted by a hydro-thermodynamic feedback to summer melt. The Cryosphere. 2015. 9: 197–215. <https://doi.org/10.5194/tc-9-197-2015>.
16. *Schellenberger T., Dunse T., Käab A., Schuler T.V., Hagen J.O., Reijmer C.H.* Multi-year surface velocities and sea-level rise contribution of the Basin-3 and Basin-2 surges, Austfonna, Svalbard. The Cryosphere Discussion, 2017. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-5>, in review.