

ДИНАМИКА БЕРЕГОВ ОСТРОВОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ (ст. 1. Остров Ушакова)

© 2021 г. Ф. А. Романенко^{1,*}, Е. А. Балдина¹, Н. Н. Луговой^{1,2}, Е. Ю. Жданова¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

*E-mail: faromanenko@mail.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принята к публикации 09.04.2021 г.

Анализ большого комплекса материалов — космических снимков, съемок квадрокоптером, метеорологических наблюдений полярных станций, архивных данных позволил установить скорости отступления берегов о-ва Ушакова — ледникового купола, лежащего на частично находящемся ниже уровня моря цоколе, сложенном нижнемеловыми и четвертичными породами. Остров находится на самом севере Центрально-Карской возвышенности, был открыт советской морской экспедицией в 1935 г. и посещался учеными крайне редко. Длительное время ледяные берега острова сохранялись в условиях слабо отрицательного (до 1% объема ежегодно) баланса льда, короткого безледного периода и долго державшегося припая, оберегавшего края ледника от штормовых волн. В начале XXI века ситуация изменилась — начала заметно расти температура воздуха, уменьшалась площадь морского льда, усиливалась волновая деятельность в теплый период года. Края ледяного купола острова Ушакова стали обламываться равномерно по периметру и “уплывать” в море в виде айсбергов с возрастающей средней скоростью: от 10.9 м/год в 1954–2011 гг. до 27.8 м/год в 2011–2019 гг. Площадь острова уменьшалась в 2002–2019 гг. на 230.8 га/год, в 2015–2019 гг. — до 294 га/год. Поверхность ледника вокруг полярной станции снизилась на 15 м за 65 лет. В результате в 2018 г. ушла в море полярная станция, поставленная в 1954 г. в 800 м от края ледника. Изменился подтип ледяных берегов, ледяные барьеры высотой до 3 м (низкие клифы плавучих льдов) сменились ледяными стенами высотой до 45 м и более.

Ключевые слова: малые острова, ледяные берега, ледниковый купол, термоабразия, усиление штормовой активности, скорость отступления клифа

DOI: 10.31857/S043542812103010X

Начало XXI века сопровождается не только социально-экономическими потрясениями во всем мире, но и заметными изменениями природной среды. Колебания климата и погоды, природные катастрофы с каждым годом все сильнее угрожают планете и населению. В то же время столь быстрые изменения редкая возможность увидеть их последствия не через века и десятилетия, а за считанные годы, глазами одного поколения. Так происходит и на небольших арктических островах, когда-то окруженных толстыми ледяными полями, и где, казалось бы, рельеф спит.

Цель данного сообщения — выявить изменения очертаний небольших о-вов Ушакова и Визе на севере Карского моря. Они посещаются крайне редко, и многие детали их геоморфологического строения не известны до настоящего времени, несмотря на то, что некоторые аспекты динамики их рельефа уже обсуждались [1–5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

21–23 августа 2019 г. в ходе экспедиции “Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная Земля — 2019” (начальник — М.В. Гаврило) на научно-исследовательском судне (НИС) “Профессор Молчанов” Северного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (капитан С.В. Хохлов) авторам данного сообщения удалось посетить район островов. Высадиться на о-в Визе оказалось невозможным из-за шторма и полосы битого льда, окаймлявшей остров (съемку с квадрокоптера Н.Н. Луговой вел с моторной лодки). Недоступны для высадки были и вертикальные ледяные уступы на о-ве Ушакова высотой до 45 м (рис. 1).

При подготовке текста были использованы наблюдения с борта судна; анализ космических снимков; материалы полярных станций о-вов Визе и Ушакова (шесть отчетов за 1945–1959 гг. общим объемом около 1500 л., хранящиеся в Рос-

сийском государственном архиве экономики (РГАЭ); фонд Главного управления Северного морского пути – ГУСМП); а также другие материалы по истории станций [6].

Для выявления динамики береговой линии использовались топографическая карта 1957 г. м-ба 1:200000 и космические снимки *Landsat* из архива Геологической службы США [7]. Современная ситуация охарактеризована на основе снимков *OLI/Landsat-8* из того же архива и *Sentinel-2* [8]. Было отобрано более 10 малооблачных снимков теплого периода (1986–2019 гг.), на которых острова можно отделить от морских льдов. Пространственное разрешение снимков: 10 м (*Sentinel-2*), 15 и 30 м (*Landsat 7, 8*), до 30 м (*Landsat 5*).

На первом этапе обработки пришлось преодолеть трудности совмещения разновременных данных ввиду недостаточной точности пространственной привязки снимков *Landsat 5* (1986–2008 гг.). Данные на малые арктические острова предоставляются с уровнем обработки L1GS, не скорректированные по рельефу и практически не обеспеченные наземными опорными точками [9]. Поэтому привязка архивных снимков осуществлялась вручную на основе однозначно опознаваемых точек в пределах каждого из островов. Дополнительную коррекцию обеспечили снимки *OLI/Landsat-8* (уровень обработки L1GT) с обоими островами, например, от 18 августа 2019 г. Однако ввиду малого количества необходимых точек ошибка в определении пространственного положения объектов оказалась в целом не менее 1 пиксела, т.е. 30 м, а при расположении объектов на разновременных снимках – до 50 м. Для снимков *OLI/Landsat-8* ошибка пространственного положения – около 12 м.

23 августа 2019 г. с борта судна квадрокоптером *J1 Phantom 4 PRO V2.0* Н.Н. Луговой провел аэрофотосъемку берега о-ва Ушакова возле бывшей полярной станции. На ее основе построены ортофотоплан и цифровая модель местности. Сопоставление с космоснимком *MSI/Sentinel-2* от 21.08.2019 показало относительную плановую погрешность в пределах 5 м – точность, достаточная для проведения измерений.

Интенсивность ведущих процессов разрушения арктических берегов – термоабразии, термоденудации, иногда термоэрозии – в значительной степени связана с климатическими флуктуациями [10 и др.]. Период с положительными среднесуточными температурами воздуха продолжается на островах не более двух-трех месяцев, в любое время года возможны заморозки. Среднемесячная температура воздуха около и немного выше 0°C только в июле. Снежный покров на о-ве Визе сохраняется в течение 9–10 мес, на о-ве Ушакова – часто круглогодично; в холодные годы снежники лежат все лето. Наибольшие скорости ветра

наблюдаются в холодный период, бывают и ураганы со скоростью 40 м/с и более. Часты метели, даже летом.

Для оценки влияния изменения климатических условий на динамику берегов использовались следующие данные метеорологической станции о-ва Визе (79.48°с.ш., 76.98°в.д.): скорость и направление ветра, температура воздуха. В архиве ВНИИГМИ-МЦД [11] метеорологические наблюдения начинаются в 1955 г., наиболее полный ряд – с 1968 г. Поэтому дополнительно привлекались данные метеорологических реанализов ERA5 [12] за период с 1979 по 2019 г. и ERA-20C [13] за период с 1952 по 2010 г. с пространственным разрешением 0.25°. Из сеточных данных реанализов были выбраны узлы с координатами 80.75° N, 79.5° E для о-ва Ушакова и 79.25° N, 77° E – для о-ва Визе. Для скорости ветра выбранное временное разрешение данных реанализов составляло 3 ч, для температуры воздуха – 6 ч. На основании срочных наблюдений и реанализов были рассчитаны среднесуточные значения скорости ветра и температуры воздуха, а также суммы отрицательных и положительных температур за год – индексы замерзания и таяния [14], количество дней со среднесуточной температурой воздуха в диапазоне –2 – +2°C. Для косвенной оценки влияния морского волнения на разрушение берегов использовалась информация о скорости ветра: было определено количество дней с преобладанием сильного ветра (скорость более 10 м/с) за год в целом и за теплый (с положительными среднесуточными температурами воздуха) период. За дни с сильным ветром принимались те, в течение которых средняя скорость ветра за 6 ч превышала 10 м/с. Для о-ва Визе отдельно было рассчитано количество дней с сильным ветром южных румбов (110–258°), поскольку они вызывают особенно опасное для южной оконечности острова волнение.

ОТКРЫТИЕ ОСТРОВОВ

Известный полярник В.Ю. Визе предсказал существование острова [15] на основе анализа дневника наблюдений за погодой в 1912–1914 гг. шхуны “Святая Анна” экспедиции Г.Л. Брусилова, увлеченной льдами севернее Земли Франца-Иосифа. 13 августа 1930 г. с ледокольного парохода (л/п) “Г. Седов” (начальник экспедиции О.Ю. Шмидт, капитан В.И. Воронин) примерно в указанном районе экипаж увидел неизвестную низменную землю [16]. Большая группа членов экспедиции добралась до острова. В.Ю. Визе сказал о нем: “Много мне приходилось видеть полярных земель, но более безотрадного ландшафта, чем здесь, я еще никогда не встречал” [17, с. 112]. Он был разочарован небольшими размерами ост-



Рис. 1. Ледяной уступ о-ва Ушакова, над которым в 1954–2019 гг. располагалась полярная станция. Сейчас от нее остались в основном бочки (на первом плане), строения упали в море в результате разрушения уступа. Поверхность ледника расчленена ледниковыми руслами, на клифе видны водопады. Аэрофото с квадрокоптера, оператор Н.Н. Луговой, 23.08.2019 г.

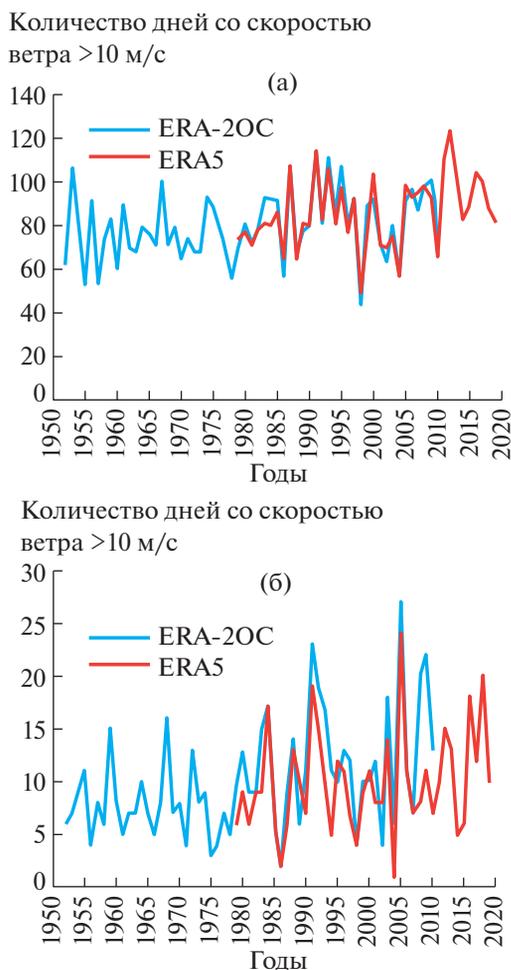


Рис. 2. Количество дней с сильным ветром (больше 10 м/с) на о-ве Ушакова за год (а) и в течение теплого периода (б).

рова, так как считал, что препятствие для движения льдов должно быть крупнее.

Это недоумение рассеялось после Первой Высокоширотной экспедиции ГУСМП на л/п “Садко” (начальник экспедиции Г.А. Ушаков, капитан Н.М. Николаев). 1 сентября 1935 г. штурман А.Г. Шишкин определил, что перед носом парохода – остров, а не скопление айсбергов. Существование еще одной суши предсказал океанограф Вс. А. Березкин, наблюдая за приливами у о-ва Визе в 1932 г. На торжественном ужине приняли предложение Н.Н. Зубова назвать остров в честь Г.А. Ушакова. Он первым ступил на ледяной берег. Л.Л. Балакшин измерил глубину океана у края припая – 19 м, И.Д. Жонголович определил координаты острова и магнитное склонение. Открытие острова объяснило изгибы линии дрейфа “Святой Анны” [18].

Таким образом, и о-в Визе, и о-в Ушакова были открыты не случайно, а в результате блестящего океанографического прогноза опытных полярников В.Ю. Визе и Вс.А. Березкина.

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТРОВА УШАКОВА

Научные экспедиции добирались до острова весьма редко. В 1947–1948, 1955 и 1963 г. его посещали географ Я.Я. Гаккель, зоолог Г.Л. Рутилевский, гляциологи П.А. Шумский и Л.С. Говоруха, в 1948 и 1952 г. трест “Арктикразведка” провел аэрофотосъемку. Л.С. Говоруха рассчитал, что ледниковый купол ежегодно теряет примерно 1% объема (около 0.09 км³) [19].

Весной 1954 г. по личному указанию начальника ГУСМП В.Ф. Бурханова на о-ве Ушакова основали полярную станцию, первым начальником которой стал радист Е.Т. Ветров [20]. Закрыли ее 20 мая 1991 г.

В 1976 г. НПО “Севморгеология” (Ю.Г. Самойлович, И.П. Федоров, И.И. Рождественская и др.) провело на о-ве Ушакова десантную экспедицию с бурением [21]. В августе 2007 г. и сентябре 2008 г. остров облетели участники комплексных Высокоширотных экспедиций “Арктика–2007” и “Арктика–2008” на НЭС “Академик Федоров”. В 2008 г. геологам (начальник В.М. Анохин) удалось высадиться на выступившие изо льда скалы в центре острова. Несколько раз в 2012–2019 гг. на короткое время остров посещали авиационные орнитологические (М.В. Гаврило) и историко-географические экспедиции “По следам двух капитанов” (О.Л. Продан).

Таблица 1. Количество дней с сильным ветром (больше 10 м/с) в течение года и теплого периода на о-вах Ушакова и Визе

Период	1957–2019 гг.	1986–2019 гг.	2008–2019 гг.
О-в Ушакова			
Год	82	87	95
Теплый период	9	10	11
О-в Визе			
Год	87	92	102
Теплый период	12	15	19

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ И РЕЛЬЕФЕ ОСТРОВА

Остров Ушакова — ледниковый купол, лежащий на мел-четвертичном цоколе неясной конфигурации, сложенном нижнемеловыми (аптальбскими) песчаниками, алевролитами и песками. Скважины вскрыли под ледником также четвертичные морские песчано-галечные образования — продукты переотложения мезозойских пород [22, 23].

Учитывая наличие трех ледяных куполов и разделяющих их пологих седловин, можно предположить и неровности рельефа скального основания. В северной части острова из-под ледника вытаял останец, показанный на топографической карте скалой высотой 6 м; на геологической карте — моренной грядой [24]. На урезе воды из-под льда оказалась небольшая галечная коса [25], размытая к 2019 г., — нам ее обнаружить уже не удалось.

ДИНАМИКА БЕРЕГОВ О-ВА УШАКОВА

Берега о-ва Ушакова целиком ледяные. Первооткрыватели отметили, что непосредственно под ледяным уступом он опоясан гладким припаем, высота подошвы которого до 3 м, и она несет следы размыва в виде волноприбойных ниш. Тогда же существовали отлогие берега, и участники высадки смогли не только высадиться на припай, но и подняться на ледник без помощи альпинистской техники.

Зимовщики полярной станции с самого начала видели обрушение ледяных обрывов [20], припай обычно отрывало (не каждый год) в середине-конце августа. В январе на него можно было уже спускаться, т.е. лед снова устанавливался.

В дни с положительными температурами ледник интенсивно таял, при этом формировались ледяные русла. Так, летом 1984 г. температура достигла “невиданных ранее” +4°C [26]. В период интенсивного таяния мачты флюгеров, метеобудки, осадкомер сильно накренились, их все время приходилось переставлять. Из-за этого и снеж-

ных заносов пришлось два раза (в 1968 и 1978 г.) перемещать метеоплощадку.

По данным аэрофотосъемки 23 августа 2019 г. ледник был свободен от снежного покрова и изрезан многочисленными руслами шириной до 3 м и глубиной до 1 м. Потоки воды заканчивались водопадами на бровке клифа (рис. 1). Остатки отдельных конструкций, в том числе мачты и столбы с проводами, лежат на леднике, что говорит о снижении его поверхности в результате таяния. По ЦМР удалось измерить высоту ледяного клифа — 44–45 м. Так как изначальная высота станции над уровнем моря была около 59 м [20], то за 65 лет ее поверхность снизилась примерно на 15 м (в среднем 23 см/год). Эти данные хорошо сходятся с картой динамики ледника о-ва Ушакова [27, 28], согласно которой полярная станция находится в пределах контура со снижением поверхности 5–15 м за период с 1950-х до 2010-х годов. Однако эти данные противоречат топографической карте острова, построенной по материалам спутниковой съемки 2016 г. [5], на которой высота полярной станции 28 м над у. м.

Для острова характерны штормы. Так, в начале ноября 1959 г. ветер со скоростью 28 м/сек вызвал высокий накат, который разрушил кромку ледника, смыл лежавшие у основания уголь и дрова [20]. Осенние штормы, как правило, имели самые заметные последствия из-за отсутствия припая. Еще более сильный ураган (до 40 м/сек) в январе 1965 г. особых разрушений не принес.

По воспоминаниям зимовщиков 1950-х годов и участника экспедиции 2001 г. В.Н. Государева, на припай можно было легко спуститься не только зимой, но и летом. Припай целиком отрывало не каждый год, и штормовые волны не достигали краев самого ледника. Но в некоторые годы судна снабженцы швартовались прямо к ледяным уступам. Ситуация изменилась в XXI веке.

В последние годы в северной части Карского моря количество дней с сильным ветром увеличивается как в целом за год, так и в теплый период (табл. 1). Максимум их отмечен в 2012 г., максимум в теплый период — в 2005 г. (рис. 2). Отличи-

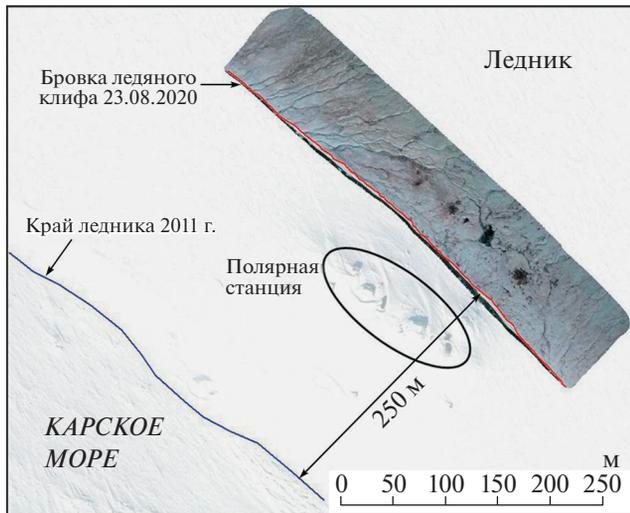


Рис. 3. Наложение ортофотоплана, построенного Н.Н. Луговым по съемкам с квадрокоптера, на космический снимок WorldView-1 2011 г. Юго-западный берег острова, район полярной станции.

тельная особенность ледового режима 2005 г. – многолетний лед к концу лета отсутствовал [29].

В 2019 г. нами было обнаружено, что домиков полярной станции, основанной в 800 м от края ледника [20], больше не существует: они упали в море (рис. 3). Следовательно, за 65 лет (1954–2019) средняя скорость отступления бровки ледяного клифа составляет 12.3 м/год. За период 1954–2011 гг. – всего 10.9 м/год, но за 9 лет (2011–2020) увеличилась до 27.8 м/год. Уступ со станцией, вероятно, обрушился совсем недавно, в 2018 г., так как она зафиксирована на космических снимках 2017 г. [5], а в августе 2019 г. ледяной клиф находился в 60 м дальше от моря, чем бывшие строения. Таким образом, за последнее десятилетие скорость разрушения ледяного берега о-ва Ушакова увеличилась в 2.6 раза. В результате в 2019 г. остров окружили вертикальные ледяные уступы высотой в десятки метров. Высадиться на берег, как это сделал в 1935 г. Г.А. Ушаков, стало невозможно.

Детальный анализ изменений площади ледникового купола о-ва Ушакова [5] показал, что с 1986 по 2017 г. его площадь уменьшилась на 36 км², причем максимальные скорости отступления отмечены в 2011–2013 гг. и в 2017 г. Наши исследования подтверждают выявленные тенденции (рис. 4, табл. 2). Данные за 2018–2019 гг. показывают ускорение разрушения ледяных берегов и уменьшение площади острова в среднем за 2002–2019 гг. на 230.8 га/год; за 2015–2019 гг. – 294 га/год. Из-за этого в последние десятилетия произошла смена подтипа ледяных берегов от ледяного барьера (низких клифов во льдах, держащихся на плаву) к ледяным стенам высотой в десятки метров [30].

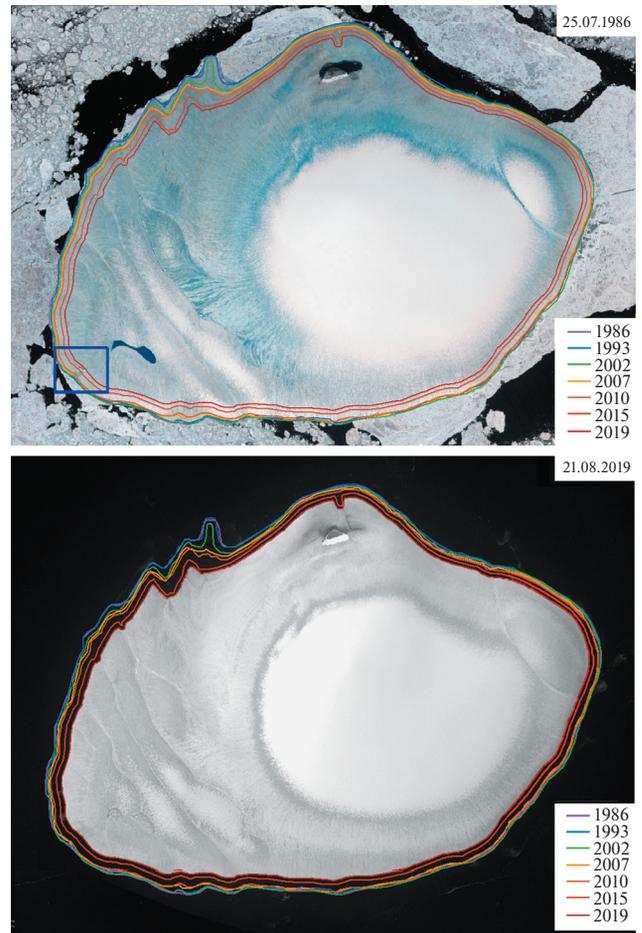


Рис. 4. Изменение очертаний берегов о-ва Ушакова по данным космических съемок. Прямоугольником отмечен участок, где находилась полярная станция.

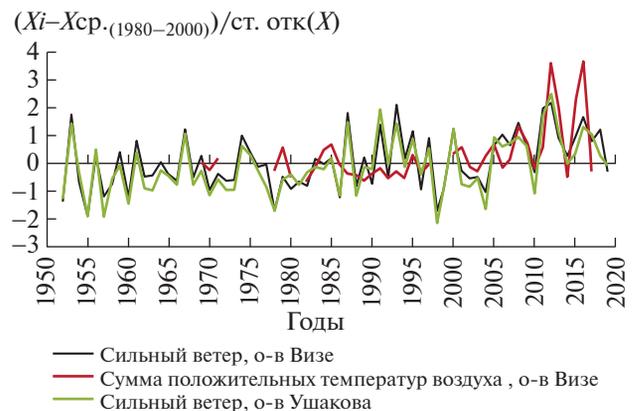


Рис. 5. Отклонения суммы положительных среднесуточных температур воздуха и количества дней со скоростями ветра больше 10 м/с от их среднего значения за период 1980–2000 гг., нормированные на стандартное отклонение для о-вов Визе и Ушакова.

Проблема отступления ледяных берегов давно известна в Антарктиде, где на них приходится около 90% береговой линии [31], причем около

Таблица 2. Уменьшение площади о-ва Ушакова по данным космических снимков

Дата снимка	Тип снимка	Площадь острова, км ²
25 июля 1986 г.	<i>TM/Landsat 5</i>	324.23
12 августа 1993 г.	<i>TM/Landsat 5</i>	325.43
24 августа 1999 г.	<i>ETM +/Landsat 7</i>	не рассчитывалась
19 июля 2002 г.	<i>ETM +/Landsat 7</i>	321.49
2 июля 2007 г.	<i>ETM +/Landsat 7</i>	314.46
8 августа 2010 г.	<i>ETM +/Landsat 7</i>	311.74
1 августа 2015 г.	<i>OLI/Landsat-8</i>	294.02
9 сентября 2016 г.	<i>MSI/Sentinel-2</i>	не рассчитывалась
18 августа 2018 г.	<i>OLI/Landsat-8</i>	не рассчитывалась
21 августа 2019 г.	<i>MSI/Sentinel-2</i>	282.26

55% — находящиеся на плаву, а остальные — уступы ледникового щита. Но в Антарктиде из-за ее гигантских размеров механизм отступления ледяных берегов другой: они ежегодно выдвигаются в море на 200 м в среднем (максимум — до 2 км/год), и обламываются сотнями айсбергов, размеры которых с 1960-х годов колеблются от десятков метров до десятков и даже сотен километров (максимум 6–11 тыс. км²). Ледяные берега также ежегодно теряют около 375 км³ за счет таяния погруженной в воду части. Понятно, что режимных наблюдений за отступанием ледяной кромки не ведется из-за размеров объекта. Ничего похожего нет на о-ве Ушакова, ледниковый купол которого лежит в основном на горных породах и движется медленнее из-за несравнимо меньшей мощности.

Для определения роли метеорологических факторов, вслед за Н.Н. Шабановой и соавт. [14], для каждого года мы рассчитали отклонения сумм положительных температур воздуха и количества дней с сильным ветром относительно среднего периода 1980–2000 гг. ($\bar{X}_i - \bar{X}_{ср. 1980-2000 \text{ гг.}}$), которые затем были нормированы на стандартное отклонение. Период 1980–2000 гг. для расчета средних значений был выбран как относительно однородный. Такое нормирование позволяет сопоставить влияние изменений температуры и скорости ветра. В последнее десятилетие термический фактор значительно менялся год от года (рис. 5), оказав максимальное воздействие на динамику берегов в 2012 и 2016 г. Наибольшее воздействие ветрового фактора — в 2012 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, о-в Ушакова вплоть до конца XX века существовал в условиях слабо отрицательного (до 1% объема ежегодно) баланса льда,

короткого безледного периода и долго державшегося припая, оберегавшего края ледника от штормовых волн. В начале XXI века ситуация изменилась: начала заметно расти температура воздуха, уменьшалась площадь морского льда, усиливалась штормовая активность в теплый период года. Края ледяного купола стали обламываться равномерно по периметру, уходить в море в виде айсбергов и отступать с возрастающей скоростью — до 27.8 м/год. Края ледникового купола снижаются примерно на 0.2 м/год. Ушла в море полярная станция, поставленная в 1954 г. в 800 м от края ледника. Изменился подтип ледяных берегов. Возможно, через несколько десятилетий будет возможно изучать рельеф коренного ложа острова, если оно не будет размыто.

Процессы катастрофического разрушения ледяных берегов о-ва Ушакова подтверждают общую для высоких широт тенденцию ускорения береговых процессов, особенно на участках, сложенных льдом или высокольдистыми породами. Данная тенденция — еще одна грань глобального изменения климата, приводящего к сокращению ледяного покрова и сроков его существования, усилению штормовой активности и другим, не совсем пока понятным последствиям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнены в рамках госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова № АААА-А16-11632810089-5. Экспедиция организована Ассоциацией «Морское наследие: исследуем и сохраним» и Северным управлением по гидрометеорологии и мониторингу природной среды (г. Архангельск). Анализ космических снимков и метеорологической информации проведен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-60221). Авторы глубоко признательны к.б.н. М.В. Гаврило

(ААНИИ, Ассоциация “Морское наследие”) и В.Н. Государеву (МГУ) за ценные консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко Ф.А. Строение и динамика рельефа островов Карского моря // Динамика арктических побережий России. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 131–153.
2. Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых // Геоморфология. 2008. № 1. С. 56–64.
3. Романенко Ф.А. Региональные особенности развития арктических берегов в голоцене // Геоморфология. 2012. № 4. С. 81–92.
4. Романенко Ф.А., Михалев Д.В., Николаев В.И. Подземные льды на островах у берегов Таймыра // Материалы гляциологических исследований. 2001. Вып. 91. С. 129–137.
5. Алейников А., Липка О. Деграция покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок // Исследование Земли из космоса. 2018. № 9 (25). С. 32–39.
6. <http://www.polarpost.ru>
7. <https://earthexplorer.usgs.gov/> Геологическая служба США
8. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> Европейское космическое агентство
9. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing>
10. Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: Наука, 1985. 172 с.
11. www.meteo.ru ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., and Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, (n/a). DOI: n.d. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
13. Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., and Trémolet Y. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century // Journal of Climate. 2016. 29 (11). 4083–4097.
14. Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., and Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state // Geography, Environment, Sustainability. 2018. 11 (1). 113–129. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129>
15. Визе В.Ю. О поверхностных течениях в Карском море // Известия Центрального Гидрометеобюро. 1924. Вып. 3. 16 с.
16. Самойлович Р.Л. Работы арктической экспедиции на ледокольном пароходе “Седов” в 1930 году // Природа. 1930. № 11–12. Стлб. 1135–1154.
17. Громов Б. Гибель Арктики. М.: Молодая гвардия, 1932. С. 108–112.
18. Зубов Н.Н. Экспедиция “Садко” // Советская Арктика. 1936. № 1. С. 28–50.
19. Говоруха Л.С. О соотношении прихода и расхода льда на острове Ушакова в современных климатических условиях // Изв. ВГО. 1966. Т. 98. Вып. 1. С. 62–64.
20. Материалы истории полярной станции о. Ушакова. 1955–57 // РГАЭ. Фонд 9570, оп. 2, дело 3332. 23 л.
21. Самойлович Ю.Г., Рождественская И.И. Новые данные по стратиграфии малых островов Карского моря // Литология и палеогеография Баренцева и Карского морей. Л.: НИИГА, 1981. С. 66–84.
22. Макарьев А.А., Макарьева Е.М. Геологическая карта дочетвертичных образований // Государственная геологическая карта РФ. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). СПб.: ПМГРЭ, 2008.
23. Дымов В.А., Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Орлов В.В., Старк А.Г. Государственная геологическая карта РФ. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 220 с.
24. Качурина Н.В., Дымов В.А. Геоморфологическая карта // Государственная геологическая карта РФ. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). СПб.: ПМГРЭ, 2008.
25. Гаврило М.В. О современном распределении атлантического моржа (*Odoboenus rosmarus rosmarus*) на севере Карско-Баренцевоморского региона // Морские млекопитающие Голарктики / Мат-лы 6-й междунар. конф. Калининград: 2010. С. 125–129.
26. Журнал истории полярной станции о. Ушакова. 1984–1990. Фото В.Н. Государева. 2001. Архив авторов.
27. http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf “Online Atlas of Glacier Fluctuations in The Eurasian High Arctic”
28. Никольский Д.Б. Разработка профильно-площадной методики спутникового зондирования островных ледников Российского Заполярья. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИГАиК, 2013. 24 с.
29. Kwok R. Near zero replenishment of the Arctic multi-year sea ice cover at the end of 2005 summer // Geophysical Research Letters. 2007. 34 (5). <https://doi.org/10.1029/2006GL028737>
30. Морская геоморфология. Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения / Под ред. В.П. Зенковича и Б.А. Попова. М: Мысль, 1980. 280 с.
31. Дубровин Л.И. Человек на ледяном континенте. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 160 с.

Shoreline Dynamics of the islands of the northern part of the Kara Sea (paper 1. Ushakov Island)

F. A. Romanenko^{a, #}, E. A. Baldina^a, N. N. Lugovoy^{a, b}, and E. Yu. Zhdanova^a

^a Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

^b Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

[#] E-mail: faromanenko@mail.ru

The analysis of a large complex of materials – satellite images, UAV surveys, meteorological observations of polar stations, and archival data made it possible to establish the shoreline retreat rates of Ushakov Island. The island is entirely covered by the glacial dome formed above the late Cretaceous and Quaternary rock formations. The ice/rock interface is partially located below sea level. Ushakov island is located in the northern part of the Central Kara Upland and was discovered in 1935 by Soviet sea expedition visited by scientific expeditions extremely rare. For a long time, Ushakov Island was maintained by slightly negative (up to 1% volume annually) ice balance, a short ice-free period, and protected from storm waves by fast ice. At the beginning of the XXI century, the situation changed – the air temperature began to increase noticeably, the area of sea ice decreased, and the wave activity increased during the warm season. The edges of Ushakov ice dome began to break off and float into the sea as icebergs evenly around the perimeter with an increasing rate: from 10.9 m/year in 1954–2011, up to 27.3 m/year in 2011–2019. The area of the island decreased in 2002–2019 by 230.8 ha/year, in 2015–2019 – up to 294 ha/year. The glacier surface around the polar station has decreased by 15 m in 65 years. A monument of science and technology – the polar station (built in 1954, 800 m from the edge of the glacier) was washed away to the sea in 2018. The subtype of ice shores has changed from ice barriers up to 3 m high (low cliffs of floating ice) to ice walls up to 45 m and more.

Keywords: small islands, ice shores, ice dome, thermal abrasion, increased storm activity, cliff retreat rate

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out as part of the state assignment of the Department of Geomorphology and Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University No. AAAA-A16-11632810089-5. The expedition was organized by the Association “Marine Heritage: Explore and Preserve” and the Northern Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Arkhangelsk). The analysis of satellite images and meteorological information was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-60221). The authors are deeply grateful to M.V. Gavrilo (AARI, Marine Heritage Association) and V.N. Gosudarev (Moscow State University) for valuable advice.

REFERENCES

- Romanenko F.A. *Stroenie i dinamika rel'efa ostrovov Karskogo morya* (The structure and dynamics of the relief of the islands of the Kara Sea). *Dinamika arkticheskikh poberezhii Rossii* (Dynamics of the Arctic coasts of Russia). M.: Izd-vo Moskovskogo universiteta (Publ.), 1998. P. 131–153. (in Russ.)
- Romanenko F.A. *Intensivnost' geomorfologicheskikh protsessov na ostrovakh i poberezh'yakh morei Karskogo i Laptevskikh* (The intensity of geomorphological processes on the islands and coasts of the Kara and Laptev seas). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2008. No. 1. P. 56–64. (in Russ.)
- Romanenko F.A. *Regional'nye osobennosti razvitiya arkticheskikh beregov v golotsene* (Regional features of the development of the Arctic coast in the Holocene). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2012. No. 4. P. 81–92. (in Russ.)
- Romanenko F.A., Mikhalev D.V., and Nikolaev V.I. *Podzemnye l'dy na ostrovakh u beregakh Taimyra* (Underground ice on the islands off the coast of Taimyr). *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* (Materials of glaciological studies). 2001. Vol. 91. P. 129–137. (in Russ.)
- Aleynikov A. and Lipka O. *Degradatsiya pokrovnogo oledeneniya ostrova Ushakova po materialam kosmicheskikh s'emok* (Degradation of the glaciation of Ushakov Island based on satellite imagery). *Zemlya iz kosmosa* (Earth from space). 2018. No. 9 (25). P. 32–39. (in Russ.)
- <http://www.polarpost.ru>
- <https://earthexplorer.usgs.gov>
- <https://scihub.copernicus.eu/dhus>
- <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing>
- Are F.E. *Osnovy prognoza termoabrazii beregov* (Basics of coastal abrasion forecast). Novosibirsk: Nauka (Publ.), 1985. 172 p. (in Russ.)
- www.meteo.ru
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., and Thépaut J.-N. The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (n/a). <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, n.d.
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., and Trémolet Y. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journal of Climate*. 2016. 29(11). 4083–4097.
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., and Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western

- Russian arctic coastal dynamics: XX-century history and current state. *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. 11 (1). 113–129.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129>
15. Vize V.Yu. *O poverkhnostnykh techeniyakh v Karskom more* (On surface currents in the Kara Sea). *Izvestiya Tsentral'nogo Gidrometeoburo* (Bulletin of the Central Hydrometeorological Bureau). Issue 3. 1924. P. 16. (in Russ.)
 16. Samoilovich R.L. *Raboty arkticheskoi ekspeditsii na ledokol'nom parokhode "Sedov" v 1930 godu* (Arctic expedition work on the Sedov icebreaker in 1930). *Priroda* (Nature). 1930. No. 11–12. Col. 1135–1154. (in Russ.)
 17. Gromov B. *Gibel' Arktiki* (The death of the Arctic). M.: OGIZ-Molodaya gvardiya (Publ.), 1932. P. 108–112. (in Russ.)
 18. Zubov N.N. *Ekspeditsiya "Sadko"* (Expedition "Sadko"). *Sovetskaya Arktika* (Soviet Arctic). 1936. No. 1. P. 28–50. (in Russ.)
 19. Govorukha L.S. *O sootnoshenii prikhoda i raskhoda l'da na ostrove Ushakova v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh* (On the ratio of the income and discharge of ice on the island of Ushakova in modern climatic conditions). *Izvestiya VGO*. T. 98. Vol. 1. 1966. P. 62–64. (in Russ.)
 20. *Materialy istorii polyarnoi stantsii o. Ushakova*. (History materials of the polar station). 1955–1957. RGAE (Russian State Archive of Economics). Fond 9570, op. 2, delo 3332. P. 23. (in Russ.)
 21. Camoilovich Yu.G. and Rozhdestvenskaya I.I. *Novye dannye po stratigrafii malyykh ostrovov Karskogo morya* (New data on the stratigraphy of the small islands of the Kara Sea). *Litologiya i paleogeografiya Barentseva i Karskogo morei* (Lithology and paleogeography of the Barents and Kara Seas). L.: NIIGA (Publ.), 1981. P. 66–84. (in Russ.)
 22. Makar'ev A.A. and Makar'eva E.M. *Geologicheskaya karta dochetvertichnykh obrazovaniy* (Geological map of pre-Quaternary formations). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF (tret'e pokolenie)* (State geological map of the Russian Federation). 1:1000000 (third generation). *Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya* (Series North-Kara-Barents Sea). List U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands). SPb.: PMGRE (Publ.), 2008.
 23. Dymov V.A., Kachurina N.V., Makar'ev A.A., Makar'eva E.M., Orlov V.V., and Stark A.G. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF (tret'e pokolenie)* (State geological map of the Russian Federation). 1:1000000 (third generation). *Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya* (Series North-Kara-Barents Sea). List U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands). SPb.: Kartfabrika VSEGEI (Publ.), 2011. P. 220. (in Russ.)
 24. Kachurina N.V. and Dymov V.A. *Geomorfologicheskaya karta* (Geomorphological map). *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF (tret'e pokolenie)* (State geological map of the Russian Federation). 1 : 1000000 (third generation). *Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya* (Series North-Kara-Barents Sea). List U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands). SPb.: PMGRE (Publ.), 2008.
 25. Gavrilov M.V. *O sovremennom raspredelenii atlanticheskogo morzha (Odobaeus rosmarus rosmarus) na severe Karsko-Barentsevomorskogo regiona* (About the modern distribution of the Atlantic walrus (*Odobaeus rosmarus rosmarus*) in the north of the Kara-Barents Sea region). *Morskije mlekopitayushchie Golarktiki* (Marine mammals of the Holarctic). *Mat-ly 6-i mezhdunar. konferencii*. Kaliningrad: 2010. P. 125–129. (in Russ.)
 26. *Zhurnal istorii polyarnoi stantsii o. Ushakova* (Journal of the history of the polar station o. Ushakova). 1984–1990. Ph. by V. N. Gosudarev. 2001. Archive of authors (in Russ.)
 27. http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf "Online Atlas of Glacier Fluctuations in The Eurasian High Arctic"
 28. Nikol'skii D.B. *Razrabotka profil'no-ploshchadnoi metodiki sputnikovogo zondirovaniya ostrovnykh lednikov Rossiiskogo Zapolyar'ya* (Development of a profile-areal technique for satellite sounding of island glaciers in the Russian Arctic). PhD thesis. M.: MIIGAiK (Publ.), 2013. 24 p. (in Russ.)
 29. Kwok R. Near zero replenishment of the Arctic multi-year sea ice cover at the end of 2005 summer. *Geophysical Research Letters*. 2007. 34 (5).
<https://doi.org/10.1029/2006GL028737>
 30. *Morskaya geomorfologiya* (Marine geomorphology). *Terminologicheskii spravochnik. Beregovaya zona: protsessy, ponyatiya, opredeleniya* (Terminological reference. Coastal zone: processes, concepts, definitions). V.P. Zenkovich i B.A. Popov (Eds.). M: Mysl' (Publ.), 1980. 280 p. (in Russ.)
 31. Dubrovin L.I. *Chelovek na ledyanom kontinente* (A man on the icy continent). L.: Gidrometeoizdat (Publ.), 160 p.