

УДК: 528.77

ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ И СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАЛЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВОВ (ВИЗЕ И УШАКОВА) ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ И РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СНИМКАМ

Е.А. Балдина¹, В.Ю. Ширшова², Ф.А. Романенко³, Н.Н. Луговой⁴, Е.Ю. Жданова⁵

¹⁻⁵ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

¹ *Кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: baldina@geogr.msu.ru*

² *Кафедра картографии и геоинформатики, аспирант; e-mail: vshirshova.msu@yandex.ru*

³ *Кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: faromanenko@mail.ru*

⁴ *Кафедра геоморфологии и палеогеографии, науч. сотр.; e-mail: lugovoy-n@yandex.ru*

⁵ *Кафедра метеорологии и климатологии, науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com*

В Арктике отчетливо наблюдается повышение среднегодовой температуры воздуха, сокращаются площадь и толщина морского льда [IPCC, 2021] и, следовательно, увеличивается динамически активный период открытой воды, вследствие штормов тают и обламываются края ледников, разрушаются высокие берега и появляются обширные отмели. Эти изменения наиболее заметны на небольших арктических островах, когда-то круглый год окруженных мощными ледяными полями, но все чаще омываемых открытой водой. В августе – сентябре 2019 г. в ходе комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля» на научно-экспедиционном судне «Профессор Молчанов» проведены визуальные обследования островов, выполнены беспилотные съемки с квадрокоптеров. Последующие исследования по космическим снимкам призваны соединить точечные детальные полевые обследования с обзорным видением этих островов. Разный характер островов определил и состав дистанционных методов изучения изменений их береговой линии и поверхности. Динамика береговой линии прослежена по разновременным источникам: топографической карте 1957 г. (1 : 200 000) и космическим снимкам со спутников Landsat-5, 7; современная ситуация охарактеризована по безоблачным снимкам со спутников Landsat-8 и Sentinel-2. Многократные интерферометрические съемки радиолокационной системой спутника Sentinel-1B (IW – Interferometric Wide Swath) уровня обработки SLC – Single Look Complex за период с 1 января по 31 декабря 2019 г. обеспечили выявление сезонной динамики состояния поверхности о. Визе. Реконструирована многолетняя динамика отступления уступа ледникового купола о. Ушакова. Анализ скорости его отступления показал ускорение сокращения площади ледника с начала 2010-х гг. Показано влияние изменений скорости и направления ветра, температуры воздуха на многолетние изменения береговой линии о-в Визе и Ушакова. Для о. Визе характерен неравномерный размыв берегов, выявлены участки с наибольшей скоростью их отступления и появление аккумулятивных форм – кос. Многовременные композиты с когерентностью, полученные по радиолокационным данным, позволили охарактеризовать сезонную динамику состояния поверхности о. Визе и ее связь с изменчивостью погодных условий. Результаты исследований показывают четко выраженную реакцию береговой линии малых арктических островов на изменения климата в XX–XXI вв.

Ключевые слова: космические снимки, изменение климата, многолетние изменения береговой линии, сезонная динамика поверхности, радиолокационные спутниковые методы

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата и сокращение морского ледового покрова в арктических морях – хорошо известные тенденции [IPCC, 2021], которые с начала XXI в. заметно ускоряются и отчетливо проявляются на малых арктических островах, когда-то окруженных мощными ледяными полями. Реакция береговой линии и поверхности малых островов на эти изменения до сих пор слабо изучена.

В августе – сентябре 2019 г. два автора статьи приняли участие в комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля» на научно-экспедиционном судне «Профессор Молчанов» Северного управления по гидрометеороло-

гии и мониторингу окружающей среды (начальник экспедиции – канд. биол. наук М.В. Гаврило, капитан – С.В. Хохлов) [Открытый океан..., 2019]. Работы включали высадки на берег, где оказывалось возможным, и полевые обследования, наблюдения берегов с судна и съемку отдельных участков квадрокоптерами (как видовую, так и сплошную) для последующего построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Все это послужило стимулом к более развернутому исследованию с применением обзорных космических снимков.

Работа посвящена о-вам Ушакова и Визе, которые находятся в редко посещаемой северной части Карского моря. Они существенно отличаются по

многим параметрам, принадлежат к двум разным типам: о. Ушакова – ледниковый купол высотой 294 м, лежащий на скальном основании, о. Визе – низменный (22 м), холмистый, с очень бедной растительностью, лишенный покровного оледенения. Берега о. Ушакова – вертикальные ледяные уступы высотой до 45 м, о. Визе окаймляла полоса битого льда, и съемку с квадрокоптера Н. Луговой выполнял с моторной лодки.

Остров Ушакова, лежащий на 81° с. ш. и 79° в. д., был открыт в 1935 г. Ледник лежит на мелочетвертичном цоколе неясной конфигурации, сложенном песчаниками, алевролитами и песками. Наличие трех ледяных куполов и разделяющих их пологих ледяных седловин позволяет предположить неровную поверхность скальной кровли [Дымов и др., 2011]. Берега о. Ушакова целиком ледяные. Полярная станция была построена в 1954 г. в 800 м от кромки ледника на высоте 59 м [Романенко и др., 2021] и действовала до 1991 г. Обрушение ледяных стен отмечалось работниками станции с самого начала ее существования. Экспедиция 2019 г. строениями станции не обнаружила, так как они упали в море при обрушении края ледника. По данным детальной аэросъемки с квадрокоптера 23 августа 2019 г. свободная от снежного покрова поверхность ледника была изрезана многочисленными ледяными руслами шириной до 3 м и глубиной вреза до 1 м (рис. 1).

Остров Визе, открытый в 1930 г., находится на $79^\circ 30' - 40'$ с. ш. и $76^\circ - 77^\circ$ в. д. «На берег острова В.Ю. Визе ступил 14 августа 1930 г. и с сожалением записал в своем дневнике: „Затерянный среди арктических льдов, этот остров производит крайне унылое и безотрадное впечатление. Он низменный, сложен из осадочных пород, и поверхность его почти лишена растительности. Крайне бедна и его животная жизнь. Даже птицы, обычно встречающиеся на арктических островах в большом количестве, здесь имелись только в единичных экземплярах“» [Стругацкий, 2010]. По современным данным [Аверина, 1970; Ромашенко, 2005; Романенко, 2008, 2012; Качурина, Дымов, 2008; Дымов и др., 2011], центральную часть о. Визе занимает перекрытая четвертичным чехлом пологоувалистая эрозионно-денудационная равнина высотой 10–22 м с меловым цоколем и склонами миоцен-голоценового возраста. Многочисленные ложбины и долины расчленяют равнину на плосковершинные холмы с более пологими южными и более крутыми (до 45°) северными склонами. Самые крупные фрагменты равнины находятся в центральной и южной частях острова. Они окружены сниженными участками, полого спускающимися к цокольной морской террасе высотой 4–8 м. Современная морская терраса высотой до 3 м окаймляет остров, образуя крупный фрагмент на его востоке и многочисленные песчано-галечные косы, отчленяющие лагуны.

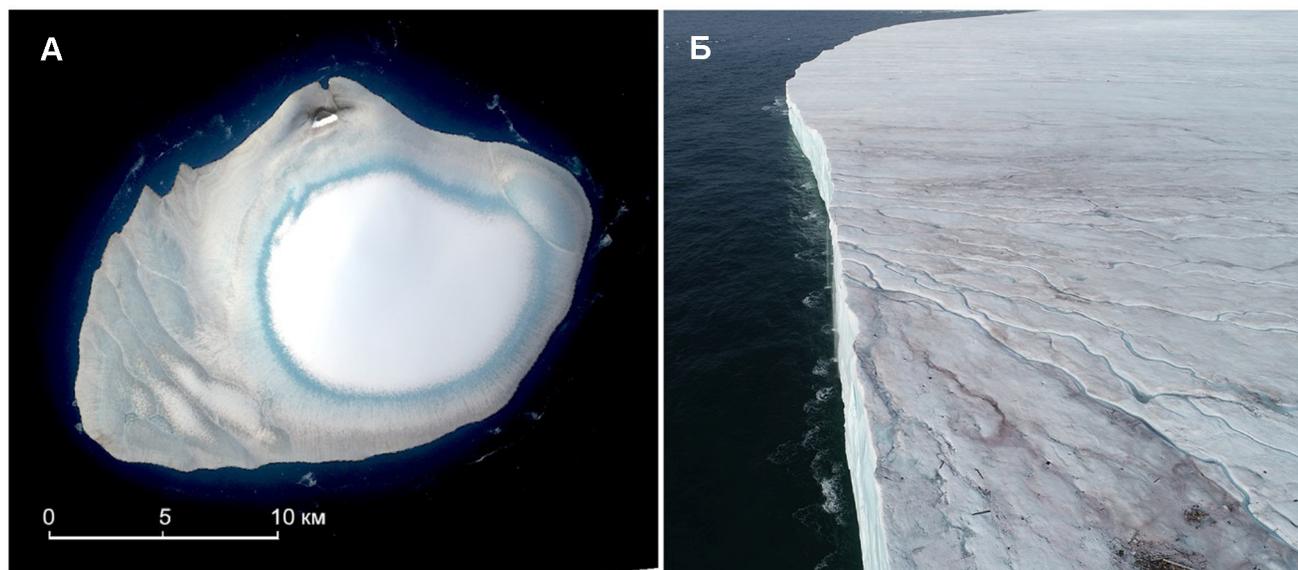


Рис. 1. Остров Ушакова:
А – снимок со спутника Landsat-8, август 2019 г.; Б – ледяной уступ, фотосъемка с квадрокоптера. Фото Н. Луговой

Fig. 1. Ushakov Island:
А – Landsat-8 satellite image, August 2019; Б – ice cliffs photographed from a quadcopter. Photo by N. Lugovoy

В 1945 г. на острове Визе в 100 м от берега была построена полярная гидрометеорологическая стан-

ция, одна из самых уединенных в мире, которая продолжает работать и в настоящее время, обеспе-

чивая многолетний ряд метеонаблюдений. Строе-ния станции периодически приходится переносить вглубь острова из-за обрушения берега (рис. 2). «Кают-компания и дизельная рухнули в воду, стан-ционные дома все время приходилось перетаски-вать. Несколько дней назад (2010) рухнул теплый

склад...» [Стругацкий, 2010]. Средняя скорость от-ступления бровки берегового уступа колебалась око-ло 1,5 м/год [Романенко, 2008]. В 2011 г. «Михаил Сомов» во время снабженческого рейса доставил на остров конструкции нового здания, которое постро-или вдали от берегового уступа.

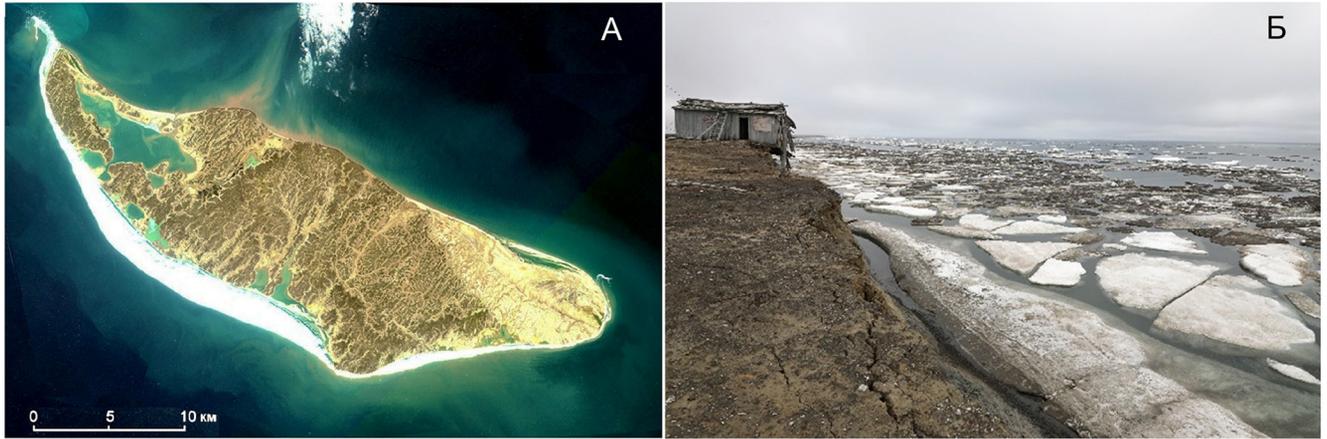


Рис. 2. Остров Визе:

А – снимок со спутника Sentinel-2, август 2019 г.; Б – участок разрушающегося берега со строением полярной станции.
Фото М.В. Гаврило, 2020

Fig. 2. Vize Island

А – Sentinel-2 satellite image, August 2019; Б – a section of the crumbling coast with the buildings of the polar station.
Photo by M.V. Gavrilov, 2020

Проведенные исследования призваны объединить материалы высокодетаальных аэросъемок с данными обзорной космической съемки в оптическом и радиолокационном диапазонах. Их цель – выявить и проанализировать многолетние изменения на существенно различающихся по своей природе о-вах Ушакова и Визе на основе доступных архивных ма-териалов съемок (Landsat-5, 7, 8; Sentinel-2).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления динамики береговой линии островов были подобраны космические снимки со спутников Landsat-5, 7, 8 из архива Геологической службы США [EarthExplorer..., 2021]. Наиболее ранняя ситуация на середину 1950-х гг. отображена на топографической карте масштабом 1 : 200 000, изданной в 1957 г. по материалам съемок берегов 1930-х гг., и гидрографической съемки акватории 1950-х гг. Современная ситуация охарактеризована на основе снимков со спутников Landsat-8 из того же архива и Sentinel-2 [Copernicus Open Access Hub..., 2020]. Съемки выполнены в августе 2019 г. почти в те же даты, когда экспедиция провела детальную аэросъемку небольших участков квадрокоптером. Отобраны практически все безоблачные снимки теплого периода (более 10 малооблачных снимков

за 1986–2019 гг.), когда острова можно уверенно от-делить от окружающих их морских льдов (табл. 1). Пространственное разрешение снимков – 10 м (MSI/Sentinel-2), 15 и 30 м (ETM+ и OLI/Landsat-7, 8), 30 м (TM/Landsat-5).

Для более детального выявления сезонных из-менений поверхности о. Визе привлекались данные радиолокационных съемок, которые позволяют по-лучать изображения интересующих объектов неза-висимо от наличия облачности, обычной летом в Арктике. Были отобраны комплексные (SLC) радио-локационные данные С-диапазона (Sentinel-1 [Co- pernicus Open Access Hub..., 2020]) с согласованной горизонтальной поляризацией. Наиболее полным набором данных был обеспечен 2019 г., для пред-шествовавших лет использовались только материалы за теплый период года. Всего проанализировано 67 изображений (табл. 2).

Изменения состояния поверхности арктических островов, как и интенсивность разрушения их берегов, во многом связана с динамикой климатических усло-вий. Основным климатообразующим фактором в се-верной части Карского моря является расположение в высоких широтах, что определяет сезонные различия в поступлении солнечной радиации. Самые низкие значения температуры воздуха отмечаются в феврале (–26°С в среднем и до –44°С). Активная циклониче-

ская деятельность в холодный период года способствует сильным ветрам, преимущественно южной четверти, большой межсуточной изменчивости температуры воздуха, значительной облачности, частым, но не обильным осадкам. Снежный покров на о. Визе сохраняется в течение 9–10 месяцев, на о. Ушакова – иногда круглогодично. В летний период вследствие высоких отражательных свойств снежно-ледового покрова радиационный баланс низкий, что отражается в низких значениях температуры воздуха. Среднемесячная температура воздуха превышает нулевую отметку только в июле – августе. Лето короткое,

пасмурное, с более слабыми ветрами по сравнению с холодным периодом, циклоническая деятельность ослабляется. Длительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха не превышает двух-трех месяцев, в любое время года могут наблюдаться заморозки. Годовое количество осадков не более 200 мм. По данным спутниковых наблюдений OSI-450 и OSI-430 [Lavergne et al., 2019] в период с 1988 по 2020 г. на прилегающей к о. Визе акватории среднегодовое количество морского льда сокращается (11–15%/10 лет), продолжительность безледного периода увеличивается на 4 дня/год.

Таблица 1

Снимки оптического диапазона, использованные в исследовании

О. Ушакова, даты съемок	Аппарат	О. Визе, даты съемок	Аппарат
25 июля 1986	TM/ Landsat-5	24 июля и 10 августа 1986	TM/ Landsat-5
		6 сентября 1990	TM/ Landsat-5
		10 августа 1992	TM/ Landsat-5
12 августа 1993	TM/ Landsat-5	26 и 29 августа 1993	TM/ Landsat-5
24 августа 1999	ETM+/Landsat-7	5 и 24 августа 1999	ETM+/Landsat-7
19 июля 2002	ETM+/Landsat-7		
2 июля 2007	ETM+/Landsat-7	26 июля 2008	ETM+/Landsat-7
8 августа 2010	ETM+/Landsat-7	3 августа 2010	OLI/Landsat-8
1 августа 2015	OLI/Landsat-8		
9 сентября 2016	MSI/Sentinel-2	2 августа 2018	MSI/Sentinel-2
18 августа 2018	OLI/Landsat-8	18 августа 2019	OLI/Landsat-8
21 августа 2019	MSI/Sentinel-2	21 августа 2019	MSI/Sentinel-2

Таблица 2

Радиолокационные снимки Sentinel-1, использованные для исследования о. Визе

Год съемки	Количество снимков	Сезоны съемок
2016	9	Июль–декабрь
2017	6	По 1 снимку март–декабрь
2018	23	Весь год через 12 дней
2019	29	Весь год через 12 дней

Для определения влияния изменения климатических условий на динамику берегов островов использовались данные измерений (температура воздуха, скорость и направление ветра) полярной метеорологической станции о. Визе (79,48° с. ш., 76,98° в. д.), содержащиеся в архиве [ВНИИГМИ-МЦД..., 2021], а также данные метеорологических реанализов ERA5 [Hersbach et al., 2020] за 1979–2019 гг. и ERA-20C [Poli et al., 2016] за 1952–2010 гг. с пространственным разрешением 0,25°. Из сеточных данных реанализов были выбраны узлы с координатами

80,75° с. ш., 79,5° в. д. для о. Ушакова и 79,25° с. ш., 77° в. д. – для о. Визе. Для скорости ветра временное разрешение данных реанализов составляло 3 часа, для температуры воздуха – 6 часов. Для косвенной оценки влияния морского волнения на разрушение берегов использовалась информация о скорости ветра. Для выявления сезонных изменений поверхности о. Визе за 2016–2019 гг. и их связи с метеорологическими условиями использовались срочные данные о погоде [ВНИИГМИ-МЦД..., 2021]: высота снежного покрова, количество осадков, температура воздуха.

Выполненная с борта судна квадрокоптером DJI Phantom 4 PRO V2.0 аэрофотосъемка участков о-ов Визе (22 августа) и Ушакова (23 августа) обеспечила возможность построения ортофотопланов и цифровых моделей местности (ЦММ) с использованием программного комплекса AgiSoft Metashape. Разрешение полученных таким образом ортофотопланов и ЦММ составило несколько сантиметров, что значительно выше имеющихся материалов космических съемок. Это позволило по результатам анализа полевых материалов оценить точность выявления динамики береговой линии по космическим снимкам и определить на них дешифровочные признаки форм берегового рельефа и процессов динамики рельефа.

Работа с разновременными космическими снимками проводилась в программном комплексе ArcGIS. Для анализа многолетних изменений необходимо максимально точное совмещение неизменившихся участков. Современные материалы космических съемок, получаемые из общедоступных источников уже, как правило, обеспечены координатной привязкой и пространственно совместимы с точностью, которая указывается в характеристике, предоставляемой поставщиком данных. Для снимков видимого диапазона OLI/Landsat-8 ошибка пространственного положения оценивается в 12 м. Однако материалы архивных съемок со спутников Landsat на малые арктические острова в настоящее время предоставляются с уровнем обработки L1GS. Данные этого уровня не только не скорректированы по рельефу, как более новые данные уровня L1GT, но и практически не обеспечены наземными опорными точками [Landsat levels..., 2019]. Привязку исходных архивных снимков TM/Landsat-5 (1986–2008) и их взаимное совмещение пришлось проводить визуально на основе однозначно опознаваемых точек в пределах каждого из островов к более надежным по пространственному положению новым снимкам OLI/Landsat-8. Для малых арктических островов эта задача представляется непростой, поскольку легко опознаваемых контурных элементов крайне мало: помимо многолетних изменений очертаний береговой линии имеют место сезонные различия в состоянии местности. В частности, внутренние водоемы на о. Визе имеют разный размер и общие очертания в начале и в конце короткого теплого периода, а на о. Ушакова снежный покров в отдельные моменты лета закрывает контурные элементы ледового купола. Такими опорными элементами для о. Визе стали перелетывающие снежники на склонах северной экспозиции и участки небольших узких водоразделов между многочисленными эрозионными ложбинами; для о. Ушакова – строения полярной станции, скальный останец в северной части острова, полogie седловины ледникового купола. Дополни-

тельную возможность коррекции, проверки масштаба и ориентации обеспечили снимки с уровнем обработки L1GT ETM+/Landsat-7 (24 августа 1999 г.) и OLI/Landsat-8 (18 августа 2019 г.), которые охватывали район с обоими островами одновременно. Однако ввиду малого количества необходимых точек ошибка пространственного положения объектов в целом составляет не менее 1 пиксела, т. е. 30 м, а для взаимного расположения объектов на разновременных снимках ~50 м.

В результате пространственного совмещения разновременных снимков стало возможным и было выполнено дешифрирование границы между морем и сушей (о. Визе) или ледяным уступом (о. Ушакова), условно называемой далее береговой линией. Расстояния между береговыми линиями разных лет, определенные в нескольких наиболее характерных местах, использовались для вычисления средней скорости изменения положения береговой линии за соответствующий период. Для о. Ушакова, береговая линия которого составляла единый замкнутый полигон, были вычислены площади острова в каждый из анализируемых сроков.

Обработка радиолокационных снимков (2016–2019) с целью исследования сезонных изменений поверхности о. Визе предполагала получение и анализ изображений когерентности. Когерентность является одним из продуктов интерферометрической обработки, рассчитывается на основе фазовой составляющей сигнала и характеризует согласованность пришедших к радиолокатору в разное время сигналов от одного и того же объекта [Захаров и др., 2012]. Первоначально изображения когерентности служили средством оценки качества данных для создания цифровых карт высот и их изменений (например, просадок и других смещений поверхности). Известен метод формирования цветного радиолокационного изображения – МТС-композигов – путем комбинирования пары разновременных амплитудных снимков и изображения когерентности как меры их сходства (МТС – Multi-temporal coherence) [Пиетранера и др., 2012], используемый для оценки изменений в сельскохозяйственных районах. Последнее время использованию интерферометрической когерентности как средства оценки изменений ландшафтов или их разнообразия, в том числе анализа растительного покрова, посвящается все больше публикаций, например [Jacob et al., 2020]. В нашем исследовании для получения МТС-композигов с изображением о. Визе в программном обеспечении SNAP выполнялась обработка всего набора данных на каждый год. Она включала в себя ряд стандартных процедур (импорт данных, уточнение орбит, выбор полосы, покрывающей остров, поэлементное совме-

щение изображений, вычисление когерентности, устранение разрывов, некогерентное накопление и поправка за влияние рельефа). В итоге для анализа состояния поверхности и его изменений было получено 26 МТС-композигов на весь 2019 г. и по два-три на наиболее интересный теплый период года для других лет для оценки повторяемости состояния поверхности. МТС-композигов, а также изображения когерентности сравнивались с изображением вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по снимкам OLI/Landsat-8 и Sentinel-2 (18 и 21 августа соответственно) и цифровой моделью рельефа ArcticDEM с детальностью 2 м [ArcticDEM..., 2021] для установления характеристик поверхности о. Визе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате последовательного дешифрирования положения ледяного уступа о. Ушакова на снимках разных лет с 1986 по 2019 г. был получен набор линий, соответствующих уступу, что позволило проследить изменение его положения за исследуемый период времени, выполнить оценку площади острова (рис. 3), а также сравнить полу-

ченные результаты с аналогичными исследованиями, проведенными ранее.

Так, детальный анализ изменений площади ледникового купола о. Ушакова [Алейников, Липка, 2018] показал, что с 1986 по 2017 г. его площадь уменьшилась на 36 км², причем максимальные скорости отступления отмечены в 2011–2013 и в 2017 г. Наши исследования подтверждают выявленные тенденции. Площадь о. Ушакова, определенная в результате картографирования Арктики в середине 1950-х гг. (топографическая карта масштаба 1 : 200 000), составила 328 км². Значения площади острова, которые приведены в таблице на рисунке 3, определены по доступным снимкам 1986–2015 гг. (см. табл. 1). Они соответствуют значениям площади для тех же сроков [Алейников, Липка, 2018]: за период 1986–2002 гг. сокращение площади составляло в среднем 0,5 км²/год. Новые данные за последние два года (2018–2019) показывают ускорение процессов разрушения ледяных берегов и уменьшения площади острова. Так, если за 2002–2015 гг. сокращение площади в среднем составило 2,1 км²/год, то за 2015–2019 гг. оно увеличилось до 2,94 км²/год [Романенко и др., 2021].

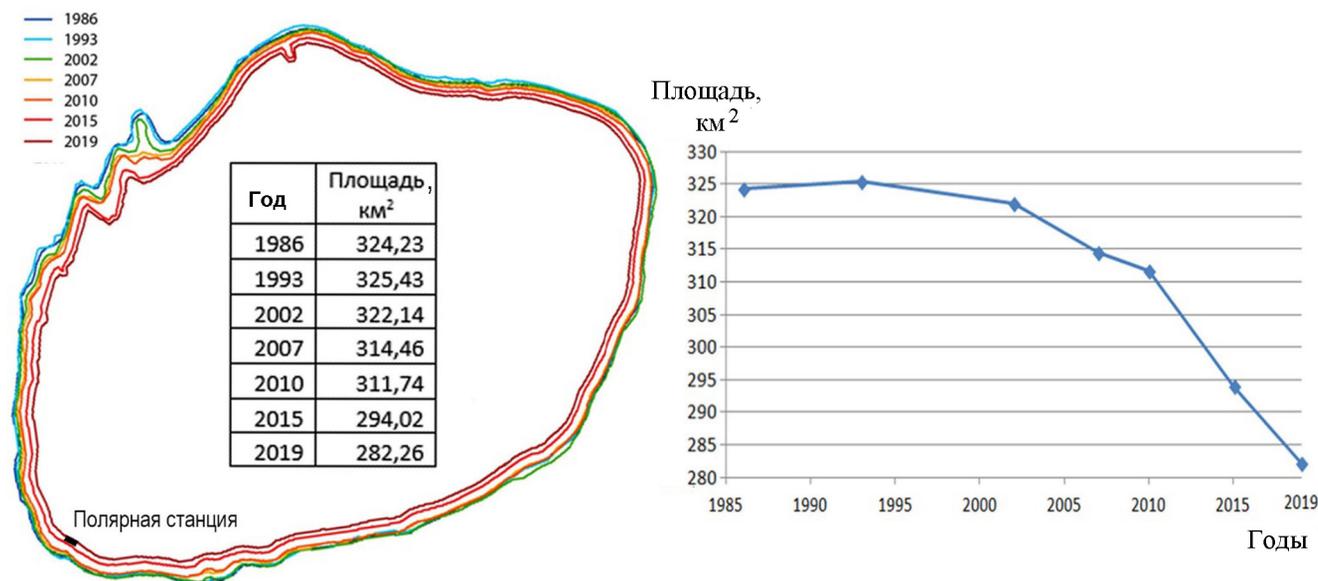


Рис. 3. Динамика положения ледяного уступа о. Ушакова и изменение его площади

Fig. 3. The dynamics of the ice escarpment location of Ushakov Island and changes in its area

Береговая линия о. Ушакова, проведенная по топографической карте, практически совпадает с линией, проведенной по снимку TM/Landsat-5 1986 г., за исключением наиболее активно разрушавшегося ледяного выступа на северо-северо-западе острова. С 1986 по 2010 г. скорость отступления кромки составляла в среднем 10,9 м/год, а за последние 9 лет

(2010–2019) она увеличилась до 38 м/год, причем для периода 2015–2019 гг. – до 52 м/год. То есть за последнее десятилетие скорость разрушения ледяного берега о. Ушакова увеличилась в 3,5 раза.

По детальной цифровой модели местности удалось измерить высоту ледяного клифа о. Ушакова в районе, где прежде была полярная станция, –

44–45 м. Так как изначальная высота станции над уровнем моря была около 59 м [Материалы..., 1957], то за 65 лет ее существования поверхность снизилась примерно на 15 м (в среднем 23 см/год). Эти данные хорошо сходятся с картой динамики поверхности ледника о. Ушакова, созданной на основе данных лазерного альтиметра GLAS, установленного на спутнике ICESat (2003–2009 гг., позволявшего определять высоту с точностью до 10 см), и результатов интерферометрической обработки радиолокационных снимков TerraSAR-x/TanDEM-x [Online Atlas..., 2013; Никольский, 2013], на которой полярная станция лежит в пределах контура со снижением поверхности 5–15 м за 1950–2010 гг. Однако эти данные противоречат топографической карте острова, построенной по материалам спутниковой съемки 2016 г. [Алейников, Липка, 2018], где высота полярной станции – 28 м над уровнем моря. Следует также отметить, что высота участка, определяемая по ArcticDEM до момента обрушения станции, составляет 38–40 м над уровнем моря. Такие расхождения в очередной раз свидетельствуют о сложностях сведения данных, полученных разными исследователями, использующими неодинаковые методы, а также о необходимости продолжения поиска оптимальных методик определения абсолютных значений высот. В то же время для оценки относительных изменений планового положения береговой линии может быть достаточно доступных космических снимков.

Тот же цикл работ по дешифрированию положения береговой линии на разновременных снимках с 1986 по 2019 г. (см. табл. 1) был проведен для о. Визе, лишённого покровного оледенения. Наложение береговых линий разных лет на самый новый снимок (август 2019 г.) позволило установить, что остров размывается и сокращается не так равномерно, как о. Ушакова. Разрушение берегов о. Визе идет активнее на мысах, причем на разных участках с разной скоростью, которая обозначена на рисунке 4 в соответствующих местах для разных периодов времени, заданных сроками доступных съемок. Скорость размыва берегов, определенная, исходя из площади размыва участка за какой-то промежуток времени, оказывается наибольшей (от 6,5 до 10,9 м/год) на юго-западной стороне острова, начиная с 2008 г. При этом отчетливо выросли косы, хорошо определяемые по снимку 2019 г. благодаря полному отсутствию льда (см. рис. 4, участки 1, 2 и 3). Отмель у выхода из большой лагуны (участок 2) выросла на 80 м в 1999–2009 гг. и еще на 160–190 м за следующие 10 лет. Их рост относительно положения на топографической карте 1957 г. достиг 3,5 км на участке 3 и 2 км на участке 1, где одновременно северная часть косы искривляется, приближаясь к

берегу, а южная часть почти исчезает. На врезке (см. рис. 4В) показана современная коса участка 3, хорошо заметная на снимке 2019 г., но отсутствующая на топографической карте. По непосредственным наблюдениям зимовщиков полярной станции [Романенко, 2008], скорость отступления южного берега в 1950–1958 гг. колебалась от 0,46 до 7,2 м/год, составляя в среднем 1,5–1,6 м.

Наложение двух созданных по высокодетальной аэросъемке с квадрокоптера ортофотопланов (съемка 22 августа 2019 г.) на космический снимок со спутника Sentinel-2 (съемка 21 августа того же года) (см. рис. 4Б) показывает высокую степень пространственного соответствия в пределах разрешения космического снимка (10 м). Сопоставление изображений, размер пиксела которых отличается более чем в 100 раз, не позволяет перенести дешифровочные признаки отдельных объектов с детального изображения на космический снимок. Однако положение береговой линии 2019 г. на них определяется однозначно, а при сравнении со снимком TM/Landsat-5 24 июля 1986 г., на котором дано положение береговой линии на три периода времени, выявляется разная степень ее отступления вглубь острова. Этот участок не относится к числу мысов, однако и на нем идет неравномерный размыв берега, в том числе и по небольшим термоэрозионным ложбинам.

Изображения когерентности, полученные по радиолокационным интерферометрическим данным, позволили интерпретировать состояние и изменение поверхности острова и части прилегающей к нему акватории в течение 2019 г. Приведенные на рисунке 5 МТС-композиции иллюстрируют наиболее характерное «сезонное» состояние поверхности острова и ближайшей акватории за 12-дневные периоды. Период конец августа – начало сентября отличается максимальными температурами и, как следствие, отсутствием льда вокруг острова. Также только сентябрьскому композиту присущ яркий белый цвет, за счет высоких значений сигнала, свидетельствующий о постоянстве состояния поверхности за 12 дней. Можно отметить, что это типично при высоком уровне отражения, обусловленном высокой влажностью поверхности и наличием скудной растительности. Состояние поверхности острова в январе, мае и августе на первый взгляд кажется одинаковым ввиду отображения преимущественно в оттенках синего: в мае с переходом в фиолетовый, в августе – в белый. Однако речная сеть имеет более четкое отображение в августе, и мы видим сильную расчлененность острова, что говорит об отсутствии снежного и ледового покрова. В свою очередь, характерный для января яркий синий цвет – высокая когерентность – отсутствие изменений и низкое

отражение, так как поверхность покрыта снегом и скована морозом. При этом прилегающая акватория в зимний период (МТС-композиты на январь, май) изображена различными не только ледовыми текстурами, но и разными цветами, что свидетельствует о значительных изменениях в ледяном покрове: как перемещении, так и таянии льдов. В мае на фоне той же картины скованности льдом переходы от синего к фиолетовому характеризуют изменение поверхности, обусловленное резкими изменениями температуры воздуха. Так, в середине мая наблюдалось ее резкое повышение в сторону 0°C , повлекшее за собой изменение свойств снега, что отразилось различием в цветах на майском композите.

Сопоставление изображений с подробной информацией об изменчивости погодных условий показало, что высокая когерентность, обусловленная стабильным состоянием поверхности при почти полном отсутствии осадков за этот период

на фоне максимальных за год значений температуры воздуха, приходится на «теплый период года». После схода снежного покрова состояние поверхности меняется слабо, что дает стабильно высокие значения когерентности, небольшое снижение дает выпадение осадков между съемками. Значения когерентности относительно высокие при стабильной высоте снежного покрова, некоторое уменьшение ее значений связано с колебаниями температуры воздуха: значения когерентности заметно снижаются в период снеготаяния и роста температуры воздуха в сочетании с периодическими снегопадами, приводящими к увеличению высоты свежего снежного покрова. Наиболее низкие значения когерентности наблюдаются при неизменной высоте снежного покрова в сочетании с переходом к положительным температурам воздуха, ведущим к изменению свойств поверхности снега.

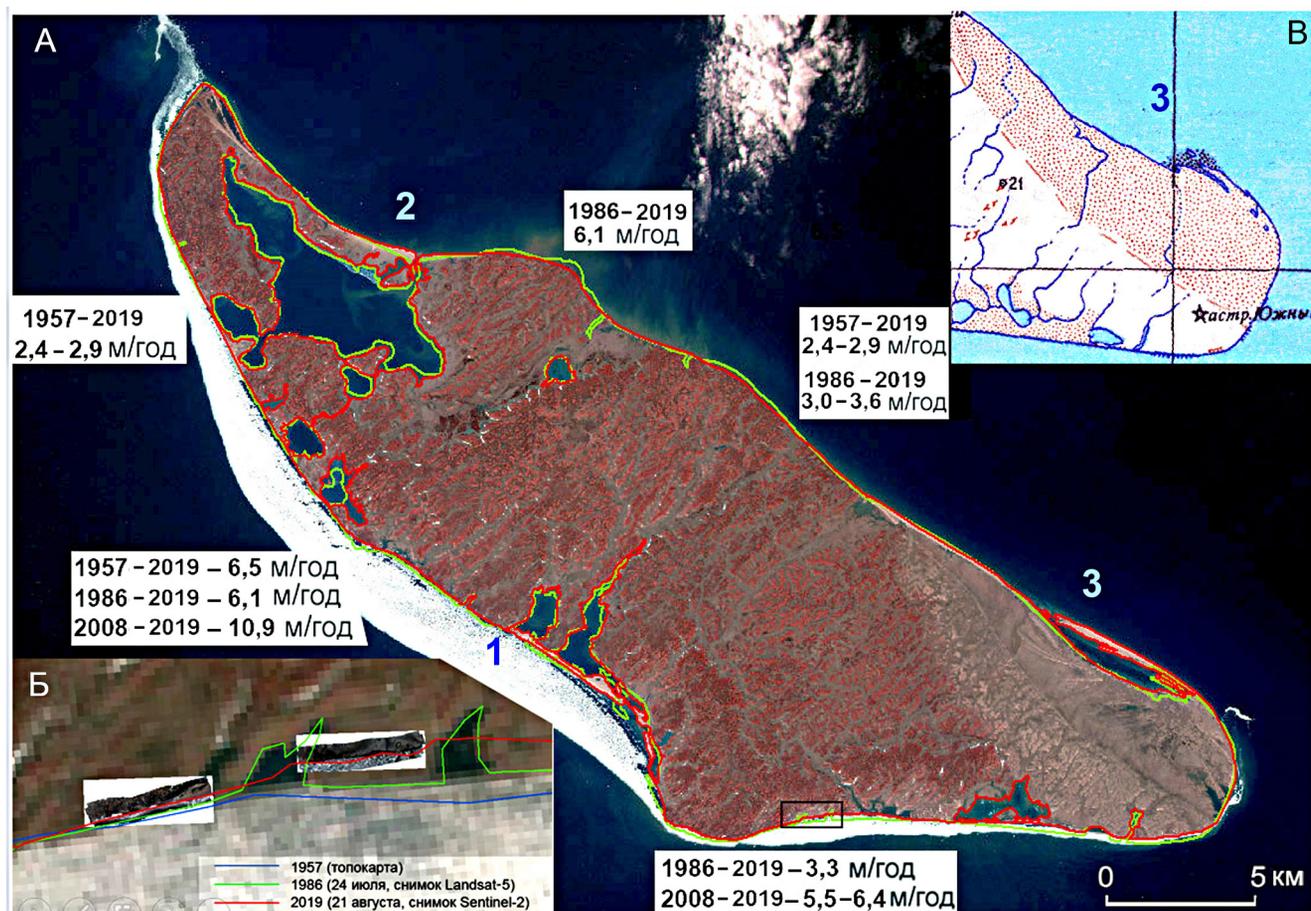


Рис. 4. Изменение очертаний о. Визе:

А – космический снимок со спутника Sentinel-2 (21 августа 2019 г.); Б – небольшой фрагмент снимка TM/Landsat-5 (1986 г.) с наложенными береговыми линиями и ортофотопланами (участок обозначен рамкой на снимке А); В – фрагмент топографической карты (середина 1950-х гг.)

Fig. 4. Changes in the outlines of the Vize island:

А – Sentinel-2 satellite image from August 21, 2019; Б – small fragment of 1986 TM/Landsat-5 image with superimposed coastlines and orthophotomaps (the area is indicated by a frame in the photo А); В – a fragment of a topographic map (mid-1950s)

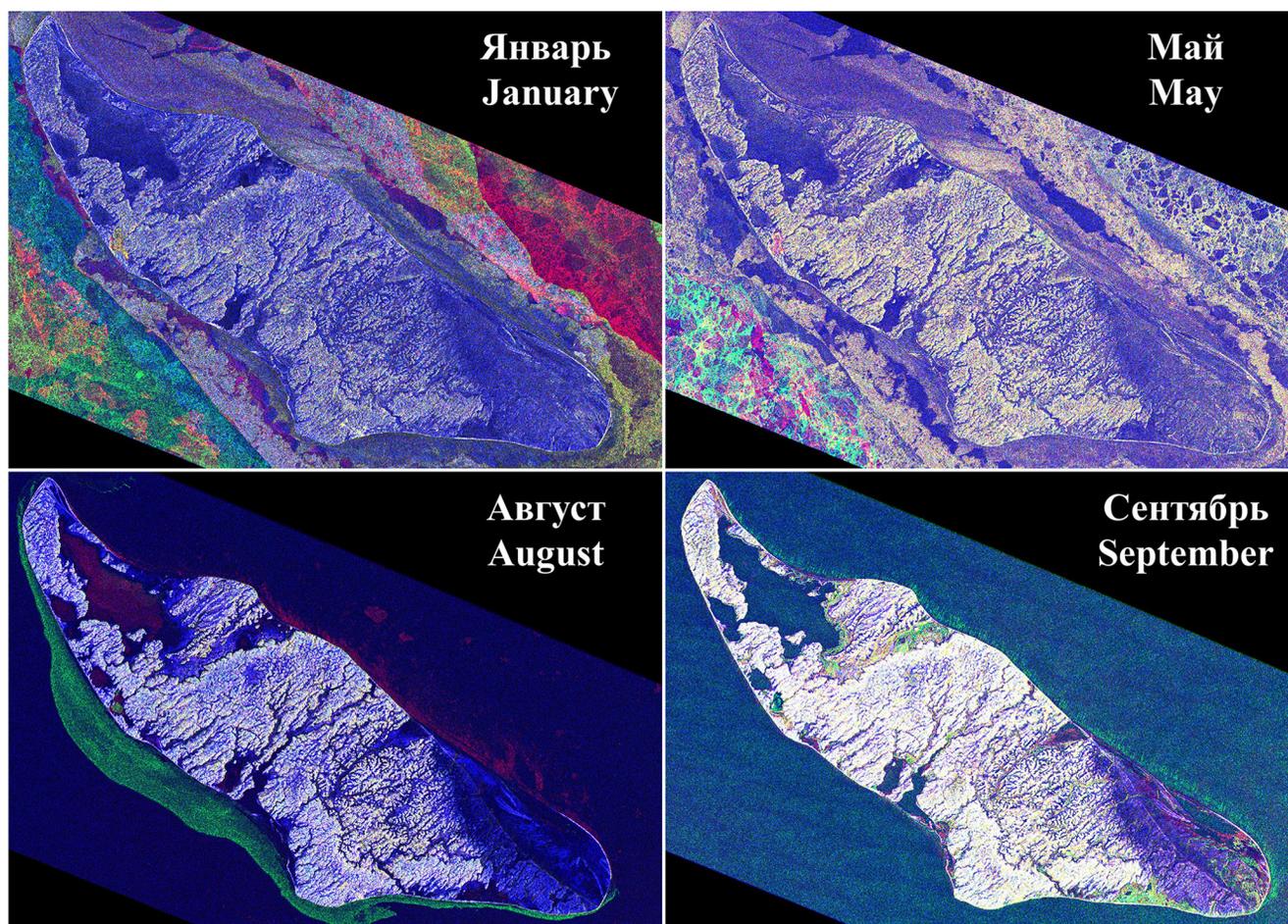


Рис. 5. Состояние поверхности и изменение о. Визе и ближайшей акватории на многовременных композитах с когерентностью (МТС-композиты) для некоторых 12-дневных периодов 2019 г.

Fig. 5. Surface conditions and changes in Vize Island and nearby water areas on multitemporal coherent composites (MTS composites) for some 12-day periods in 2019

Наиболее заметные изменения ледового покрова, непосредственно примыкающего к острову и воздействующего на его берега, наблюдались в январе 2019 г., с конца июня до начала сентября, затем с конца октября до середины декабря 2019 г. Эти периоды характеризовались интенсивной циклонической деятельностью, значительной изменчивостью температуры воздуха, выпадением осадков, и, следовательно, изменением состояния поверхности. Остров Визе был окружен практически неизменными льдами с начала февраля по июнь 2019 г.

Свойства поверхности острова в бесснежный период можно охарактеризовать путем сравнения изображений МТС-композитов, ЦМР ArcticDEM и рассчитанных по данным оптического диапазона значений вегетационного индекса NDVI. Основной рисунок поверхности создается сочетанием термоэрозионных ложбин разного порядка, лишенных всякого растительного покрова, и разделяющих их междуречий шириной до нескольких десятков или сотен метров. Ложбины в течение теплого периода

практически неизменны и дают слабую интенсивность радиолокационного отражения, что свойственно, например, ровным песчаным поверхностям. Такие фрагменты имеют интенсивно темный синий цвет на МТС-композитах. Водораздельные участки более яркие, что свидетельствует о большей интенсивности радиолокационного сигнала при сохранении стабильного состояния, что может говорить в пользу как тонкого слоя растительности, так и повышенной влажности (рис. 6). О наличии разреженного растительного покрова на междуречьях свидетельствуют значения NDVI 0,1–0,25 (см. рис. 6В). Территория бывшей воинской части (закрытой еще в 1993–1994 гг.), выделенная на рисунке 6 рамкой, отличается стабильным во все сезоны ярко-желтым цветом с переходами в белый, очевидно, из-за находящихся там остатков строений и большого числа металлических бочек и контейнеров. Известно, что для антропогенных объектов характерны высокие значения амплитуды и высокая когерентность. Заслуживает внимания и тот факт,

что растительность на том же участке значительно обильнее (NDVI 0,25–0,35), чем в остальной части острова. Причины этого кроются в обогащении

грунта бытовыми отходами воинской части, отепляющем воздействии на почву остатков строений и бочек, влиянии небольшой колонии белых чаек.

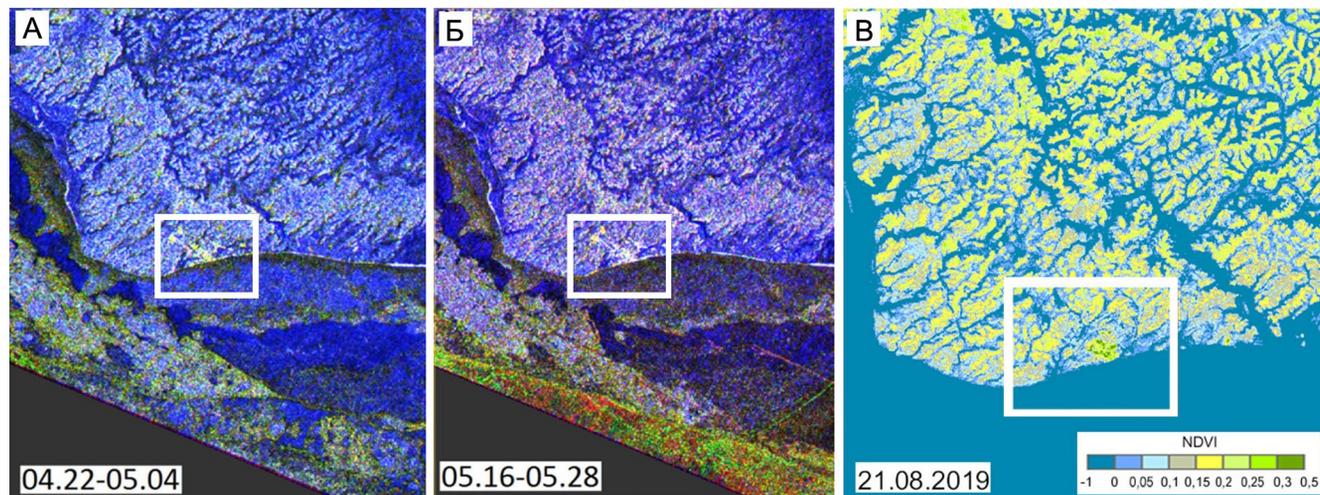


Рис. 6. Южная часть о. Визе с на МТС-композициях (А, Б) и индексном изображении (NDVI) по снимку Sentinel-2 21.08.2019 (В). Рамкой выделен участок расположения недействующей воинской части, характеризующийся аномальными значениями всех параметров

Fig. 6. Southern part of Vize Island on MTC composites (A, B) and index (NDVI) images from Sentinel-2 image, 21.08.2019 (B).

The frame marks the location of an inactive military unit, characterized by abnormal values of all parameters

Известный тренд повышения среднегодовой температуры в Арктике [IPCC, 2021] характерен и для исследованных островов. Прослеживается увеличение в последние годы количества дней с сильным ветром как в целом за год, так и в теплый период года по данным реанализов ERA5 и ERA-20C. Данные реанализов были тестированы по стационарным наблюдениям на станции Визе. Оказалось, что среднесуточная скорость ветра по данным реанализа ERA5 в среднем на 0,1 м/с выше стационарных данных, а по данным реанализа ERA-20C – на 0,8 м/с меньше. Для получения однородного ряда скоростей ветра данные реанализа ERA-20C были увеличены на 1 м/с. За дни с сильным ветром принимались дни, когда средняя скорость ветра за 6 часов превышала 10 м/с. В более южном районе о. Визе, чаще посещаемом циклонами, дней с сильными ветрами наблюдается больше (табл. 3).

Для определения роли метеорологических факторов в многолетней динамике берегов по аналогии с работой [Shabanova et al., 2018] для каждого года были рассчитаны отклонения сумм положительных значений температуры воздуха и количества дней со скоростями ветра более 10 м/с относительно их среднего значения за период с 1980 по 2000 г. ($X_i - X_{cp}$), которые затем были нормированы на стандартное отклонение (σ). Данный временной период для расчета средних значений был выбран как относительно

однородный. Такая нормировка позволяет сопоставить изменчивость температуры воздуха и скорости ветра. Как видно на рисунке 7, в последнее десятилетие термический фактор претерпевал значительные межгодовые изменения. Можно предположить, что максимальное воздействие термического фактора на изменения положения береговой линии приходится на 2012 и 2016 гг., а наибольшее воздействие ветрового фактора – на 2012 г. [Жданова, 2021]. Стоит отметить, что в августе 2012 и 2016 гг. наблюдались особенно глубокие арктические циклоны [Simmonds, Rudeva, 2012; Yamagami et al., 2017]. Изменчивость циклонической активности в разные сезоны года определяет и изменчивость ледового покрова. Так, аномальные штормы в августе 2012 и 2016 гг. обусловили рекордно низкие значения площади морских льдов [Parkinson, Comiso, 2013; Petty et al., 2018].

ВЫВОДЫ

В настоящее время на островах открытого моря разрушение разных типов берегов идет с высокими скоростями, и облик этих небольших участков суши может в ближайшие десятилетия коренным образом измениться. Береговая линия арктических островов меняется за счет комплекса гидрометеорологических факторов: роста температуры воздуха, уменьшения площади морского льда, усиления ветро-волновой активности в теплый период года.

Таблица 3

Количество дней со скоростью ветра больше 10 м/с в течение года и его теплого периода для о. Визе и о. Ушакова по данным реанализов ERA5 и ERA-20C

Период	1957–2019	1986–2019	2008–2019
<i>о. Ушакова</i>			
Год	82	87	95
Теплый период	9	10	11
<i>о. Визе</i>			
Год	87	92	102
Теплый период	12	15	19



Рис. 7. Отклонения суммы положительных среднесуточных температур воздуха и количества дней со скоростями ветра больше 10 м/с от их среднего значения за 1980–2000 гг., нормированные на их стандартное отклонение для о. Визе и о. Ушакова [Зhdанова, 2021]

Fig. 7. Deviations of the sum of positive average daily air temperatures and the number of days with wind speeds of more than 10 m/s from their average value for 1980–2000, normalized to the standard deviation for Vize Island and Ushakov Island [Zhdanova, 2021]

Совместное использование доступных дистанционных данных разного пространственного охвата и временной периодичности позволяет существенно расширить получаемый диапазон сведений о малоизученных и труднодоступных островах Карского моря, открывает возможности их регулярного мониторинга.

Установлено, что на о. Визе размываются главным образом мысы, а низкие косы заметно растут. Скорость размыва мысов на о. Визе оказалась наибольшей (до 10,9 м/год) на юго-западной стороне острова за период с 2008 по 2019 г. и от 3 до 6,5 м/год в среднем за период с 1986 по 2019 г. на остальных мысах. При этом отмечается отчетливый рост кос относительно положения на топографической карте от 2 до 3,5 км.

Напротив, ледниковая шапка о. Ушакова сокращается равномерно по периметру. Скорость умень-

шения площади острова Ушакова увеличилась с 2,1 км²/год в 2002–2015 гг. до 2,94 км²/год за 2015–2019 гг. Отступление кромки ледяного уступа за последние 9 лет составило в среднем 38 м/год при росте до 52 м/год за последние четыре года.

Многовременные разносезонные радиолокационные данные и особенно цветные композиты с когерентностью позволяют наглядно выделить «спокойные и активные» периоды в состоянии ледяного покрова вокруг островов, а также активность термоэрозионных процессов на поверхности в беснежный период. Новый тип дистанционных данных подтвердил, что поверхности островов сильнее всего меняются в период выпадения и таяния снега, а наиболее стабильной, несмотря на выпадавшие жидкие осадки, поверхность острова Визе была в течение августа и первой половины сентября 2019 г. на фоне максимальных за год значений температуры воздуха.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания кафедры картографии и геоинформатики Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051400061-9) и кафедры геоморфологии и палеогеографии (№ АААА-А16-11632810089-5). Анализ космических снимков и метеорологической информации выполнен при поддержке РФФИ (проект № 18-05-602211). Авторы глубоко признательны М.В. Гаврило за организацию экспедиции и предоставленные фотоматериалы 2020 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверина И.М. Острова Карского моря / Советская Арктика. М.: Наука, 1970. С. 388–391.
- Дымов В.А., Качурина Н.В., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Орлов В.В., Старк А.Г. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист U-41-44 (Земля Франца-Иосифа – восточные острова). Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 220 с.
- Жданова Е.Ю. Гидрометеорологические факторы изменения береговой линии арктических островов // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы VI Международной научно-практической конференции, Майкоп, 17–21 мая 2021 года, 2021. С. 102–107.
- Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. Спутниковый мониторинг Земли: радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
- 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.
- Материалы истории полярной станции о. Ушакова. 1955–1957, РГАЭ. Фонд 9570, оп. 2, дело 3332. 23 л.
- Никольский Д.Б. Профильно-площадная методика дистанционного зондирования ледников // Известия вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 5. С. 77–83.
- Пиетранера Л., Бритти Ф., Чезарано Л., Джентиле В., Кантемиров Ю. Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. № 1. С. 46–51.
- Романенко Ф.А. Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых // Геоморфология. 2008. № 1. С. 56–64. DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64.
- Романенко Ф.А. Региональные особенности развития арктических берегов в голоцене // Геоморфология. 2012. № 4. С. 81–92. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-4-81-92.
- Романенко Ф.А., Балдина Е.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю. Динамика берегов островов северной части Карского моря (ст. 1. Остров Ушакова) // Геоморфология. 2021. Том. 52. № 3. С. 116–124. DOI: 10.31857/S043542812103010X.
- Ромашенко О.Г. Геоморфологическая карта. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист T-41-44 (мыс Желания). Объяснительная записка. СПб.: МАГЭ-ПМГРЭ, 2005.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, p. 1999–2049. DOI: 10.1002/QJ.3803.
- Jacob A.W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J.M., Litzinger M., Kristen H., Mestres-Quereda A., Ziolkowski D., Lavallo M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge Sh., Praks J., Ban Y., Pottier E., Franquet J.J.M., Duro J., Engdahl M.E. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, vol. 13, p. 535–552. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner B.M., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T. Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records, *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 49–78. DOI: 10.5194/tc-13-49-2019.
- Parkinson C.L., Comiso J.C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 1356–1361. DOI: 10.1002/grl.50349.
- Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, p. 433–452. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-12-433-2018>.
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G.H., Peubey C., Thépaut J.N., Trémolet Y., Hólm E.V., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 11, p. 4083–4097. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Simmonds I., Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012: The great arctic cyclone of august 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, iss. 23, L23709, 6 p., 2012. DOI: 10.1029/2012GL054259.
- Yamagami A., Matsueda M., Tanaka H.L. Extreme Arctic cyclone in August 2016. *Atmospheric Science Letters*, 2017, vol. 18, p. 307–314, DOI: 10.1002/asl.757.

Электронные ресурсы

- Алейников А., Липка О. Деградация покровного оледенения острова Ушакова по материалам космических съемок // Земля из космоса. 2018. № 9(25). С. 32–39. URL: <http://zikj.ru/images/25/7.pdf> (дата обращения 01.05.2021).
- ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.06.2021).
- Открытый океан: Архипелаги Арктики – 2019. Северная Земля // Русское Географическое Общество. Санкт-Петербургское городское отделение. 2019. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/otkrytyy-ocean-arhipelagi-arktiki-2019-severnaya-zemlya> (дата обращения 01.05.2021).
- Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения 01.05.2020).
- Стругацкий В. В поисках «ледяного дома» // Росбалт, 2010. URL: <https://www.rosbalt.ru/main/2010/10/05/778042.html> (дата обращения 01.05.2021).
- ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arctic-dem/> (дата обращения 01.05.2021).
- Copernicus Open Access Hub: European Programme for the Establishment of a European Capacity for Earth Observation. URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (дата обращения 01.02.2020).
- EarthExplorer. USGS. Science for changing world. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 01.05.2021).
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 2021, URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (дата обращения 20.09.2021).
- Landsat Levels of Processing. 2019. URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing> (дата обращения 01.05.2021).
- Online Atlas of Glacier Fluctuations in the Eurasian High Arctic. 2021. URL: http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf (дата обращения 01.05.2021).

Поступила в редакцию 03.06.2021

После доработки 15.07.2021

Принята к публикации 20.07.2021

DYNAMICS OF COASTLINE AND SURFACE CONDITIONS OF THE SMALL ARCTIC ISLANDS (VIZE AND USHAKOVA) FROM MULTITEMPORAL OPTICAL AND RADAR IMAGES

E.A. Baldina¹, V.Yu. Shirshova², F.A. Romanenko³, N.N. Lugovoi⁴, E.Yu. Zhdanova⁵

¹⁻⁵ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Cartography and Geoinformatics, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: baldina@geogr.msu.ru*

² *Department of Cartography and Geoinformatics, post graduate student; e-mail: vshirshova.msu@yandex.ru*

³ *Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: faromanenko@mail.ru*

⁴ *Department of Geomorphology and Paleogeography, Researcher; e-mail: lugovoy-n@yandex.ru*

⁵ *Department of Meteorology and Climatology, Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com*

There is a clear trend in the Arctic of increasing mean annual air temperature, decreasing area and depth of the sea ice cover [IPCC, 2021], increasing open water period; the glacier edges thaw and break due to storms, high shores destruct and extensive shoals appear. These changes are most noticeable on small Arctic islands, once surrounded by thick ice fields but increasingly exposed to open water, thus making them of special interest. During the unique complex expedition “Open Ocean: Archipelagoes of the Arctic. Severnaya Zemlya-2019” on the Professor Molchanov research vessel in August-September 2019 full-scale field surveys of the islands and unmanned surveys from quadcopters were conducted. Subsequent surveys based on remote sensing data are intended to combine detailed field surveys with an overview coverage of these islands. Different nature of the islands requires applying different methods of studying their dynamics with remote sensing data. Changes in the islands’ coastline are traced using a set of different time sources, i. e. the 1957 topographic map (1 : 200 000) and space images from Landsat 5, 7 satellites. The current situation is described according to cloud-free images from Landsat 8 and Sentinel 2 satellites. Multiple interferometric images of Sentinel-1B (IW – Interferometric Wide Swath) radar system processing level SLC – Single Look Complex for 2019 supported a study of the seasonal dynamics of the Vize Island surface. The multiyear dynamics of ice edge retreat was revealed for the Ushakov Island. The retreat rate analysis proved the accelerated decrease of the ice cap area since the 2010-s. We assessed the influence of changing climatic conditions on the coastline dynamics of the Vize and Ushakov islands with due account of the wind speed and direction and the air temperature. Uneven coastal erosion is characteristic of the Vize Island, and the areas with the highest rate of coastline retreat were identified, as well as new accumulative forms, e. g. bars. Multitemporal composites with coherence obtained from the radar data made it possible to characterize the seasonal dynamics of the state of the Vize island surface

and its dependence on variable weather conditions. The results of research show an obvious response of the small islands' coastlines to the climate changes of the 20th–21st centuries.

Keywords: satellite imagery, climate change, long-term shoreline changes, seasonal surface dynamics, radar satellite methods

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Department of Cartography and Geoinformatics (No. 121051400061-9) and the Department of Geomorphology and Paleogeography (No. AAAA-A16-11632810089-5) of the Geographical Faculty of Lomonosov Moscow State University. The analysis of space images and meteorological information was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-05-602211).

REFERENCES

- Averina I.M. Ostrova Karskogo morya, *Sovetskaya Arktika* [Islands of the Kara Sea. Soviet Arctic], Moscow, Nauka Publ., 1970, p. 388–391. (In Russian)
- Dymov V.A., Kachurina N.V., Makar'ev A.A., Makar'eva E.M., Orlov V.V., Stark A.G. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF, 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List U-41-44 (Zemlya Frantsa-Iosifa – vostochnyye ostrova). Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. 1 : 1000 000 (third generation). Series North-Kara-Barents Sea. Sheet U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands). Explanatory note.] St. Petersburg, VSEGEI Publishing house, 2011, 220 p. (In Russian)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soti C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., Chiara de G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, p. 1999–2049, DOI: 10.1002/QJ.3803.
- Jacob A.W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J.M., Litzinger M., Kristen H., Mestre-Quereda A., Ziolkowski D., Lavallo M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge Sh., Praks J., Ban Y., Pottier E., Franquet J.J.M., Duro J., Engdahl M.E. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, vol. 13, p. 535–552, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- Kachurina N.V., Dymov V.A. *Geomorfologicheskaya karta. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF, 1:1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List U-41-44 (Zemlya Frantsa-Iosifa – vostochnyye ostrova)* [Geomorphological map RF. State geological map of the Russian Federation, 1:1 000 000 (third generation). Series North-Kara-Barents Sea. Sheet U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands)], St. Petersburg, PMGRE Publ., 2008. (In Russian)
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner B.M., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T. Version 2 of the EU-METSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records, *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, p. 49–78. DOI: 10.5194/tc-13-49-2019.
- Materialy istorii polyarnoy stantsii o. Ushakova* [Materials on the history of the polar station on the Ushakov Island]. 1955–1957, RGAE, Fond 9570, op. 2, file 3332, 23 p. (In Russian)
- Nikolsky D.B. Profil'no-ploshchadnaya metodika distantsionnogo zondirovaniya lednikov [Profile-areal technique for remote sensing of glaciers], *Izvestiya VUZov: Geodesy and Aerophotos'emka*, 2013, no. 5, p. 77–83. (In Russian)
- Parkinson C.L., Comiso J.C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 1356–1361, DOI: 10.1002/grl.50349.
- Petty A.A., Stroeve J.C., Holland P.R., Boisvert L.N., Bliss A.C., Kimura N., Meier W.N. The Arctic sea ice cover of 2016: a year of record-low highs and higher-than-expected lows, *The Cryosphere*, 2018, vol. 12, p. 433–452, DOI: 10.5194/tc-12-433-2018.
- Pietranera L., Britti F., Cesarano L., Gentile V., Kantemirov Yu. Novyj produkt MTC, rasschityvayemy po dannym COSMO-SkyMed [New MTC product calculated from the COSMO-SkyMed data], *Geomatica*, 2012, no. 1, p. 46–51. (In Russian)
- Poli P., Hersbach H., Dee D.P., Berrisford P., Simmons A.J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D.G.H., Peubey C., Thépaut J.N., Trémolet Y., Hólm E.V., Bonavita M., Isaksen I., Fisher M. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century, *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, no. 11, p. 4083–4097, DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Romanenko F.A. Intensivnost' geomorfologicheskikh protsessov na ostrovakh i poberezh'yakh morey Karskogo i Laptevykh [The geomorphic processes intensiveness on the islands and coasts of the Kara and Laptev seas], *Geomorfologiya*, 2008, no. 1, p. 56–64, DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64. (In Russian)
- Romanenko F.A. Regional'nyye osobennosti razvitiya arkticheskikh beregov v golotsene. [Regional features of the Arctic coasts' evolution in Holocene], *Geomorfologiya*, 2012, no. 4, p. 81–92, DOI: 10.15356/0435-4281-2012-4-81-92. (In Russian)
- Romanenko F.A., Baldina E.A., Lugovoy N.N., Zhdanova E.Yu. Dinamika beregov ostrovov severnoj chasti Karskogo morya (st. 1. Ostrov Ushakova) [Shoreline dynamics of the islands of the northern part of the Kara Sea (paper 1. Ushakov Island)], *Geomorfologiya*, 2021, no. 3, p. 116–124, DOI: 10.31857/S043542812103010X. (In Russian)
- Romashchenko O.G. *Geomorfologicheskaya karta. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List T-41-44 (mys*

- Zhelaniya*) [Geomorphological map. State geological map of the Russian Federation, 1:1000 000 (third generation). Series North Kara-Barents Sea. Sheet T-41-44 (Cape Zhelaniia)], St. Petersburg, MAGE-PMGRE Publ., 2005. (In Russian)
- Shabanova N., Ogorodov S., Shabanov P., Baranskaya A. Hydrometeorological forcing of western Russian Arctic coastal dynamics: XX-century history and current state, *Geography, Environment, Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, p. 113–129, DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-1-113-129.
- Simmonds I., Rudeva I. The great Arctic cyclone of August 2012: The great arctic cyclone of august 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, iss. 23, L23709, 6 p., DOI: 10.1029/2012GL054259.
- Yamagami A., Matsueda M., Tanaka H.L. Extreme Arctic cyclone in August 2016, *Atmospheric Science Letters*, 2017, vol. 18, p. 307–314, DOI: 10.1002/asl.757.
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M. *Sputnikovyi monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie pov-erkhnosti* [Satellite Earth observation. Radar remote sensing of the surface], Moscow, Krasand Publ., 2012, 248 p. (In Russian)
- Zhdanova E.Yu. Hydrometeorological factors of changes in the coastline of the Arctic islands, *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informacionnykh tehnologij: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Majkop, 17–21 maja 2021 goda* [Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies, Proc. VI International Scientific and Practical Conference, Maykop, 17–21 May 2021], 2021, p. 102–107. (In Russian)
- Web sources*
- Aleiniĸov A., Lipka O. Degradatsiya pokrovnogo oledeneniya ostrova Ushakova po materialam kosmicheskikh s"yemok [The degradation of the ice cover of the island of Ushakov according to the materials of space images survey], *Earth from space*, 2018, no. 9(25), p. 32–39, URL: <http://zikj.ru/images/25/7.pdf> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- ArcticDEM, URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arctic-dem/> (access date 01.06.2021).
- Copernicus Open Access Hub: European Programme for the Establishment of a European Capacity for Earth Observation, URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/> (access date 01.02.2020).
- EarthExplorer. USGS. Science for changing world, URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (access date 01.05.2021).
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 2021, URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/> (access date 20.09.2021).
- Landsat Levels of Processing, 2019, URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-levels-processing> (access date 01.05.2021).
- Online Atlas of Glacier Fluctuations in The Eurasian High Arctic, URL: http://dib.joanneum.at/maires/downloads/KOMS_SCHM_USH.pdf (access date 01.05.2021).
- Otkrytyy okean: Arkhipelagi Arktiki – 2019. Severnaya Zemlya [“Open Ocean: Archipelagoes of the Arctic – 2019. Severnaya Zemlya”], URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/otkrytyy-okean-arhipelagi-arktiki-2019-severnaya-zemlya> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- Pogoda i klimat [Weather and climate], URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- RIHMI-WDC, URL: <http://meteo.ru/data> (access date 01.06.2021).
- Strugatsky V. V poiskakh “ledyanogo doma” [Searching for the “Ice House”], URL: <https://www.rosbalt.ru/main/2010/10/05/778042.html> (access date 01.05.2021). (In Russian)

Received 03.06.2021

Revised 15.07.2021

Accepted 20.07.2021