

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. н.; 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. н.; 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. н.; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com

В Арктике отчетливо наблюдается повышение среднегодовой температуры воздуха, сокращается площадь и толщина морского льда 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 заметно проявляются на небольших арктических островах, когда-то окруженных мощными ледяными полями, но все чаще подверженных воздействию открытой воды, что вызывает особый интерес к ним. В августе–сентябре 2019 года в ходе уникальной комплексной экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная Земля – 2019» на научно-экспедиционном судне «Профессор Молчанов» проведены натурные обследования островов, выполнены беспилотные съемки с квадрокоптеров. Последующие исследования по космическим снимкам призваны соединить точечные детальные полевые обследования с обзорным видением этих островов. Различный характер островов обусловил разные методы изучения изменений их береговой линии и поверхности по данным дистанционного зондирования. Изменение положения береговой линии прослежены по комплексу разновременных источников: 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 2019 год обеспечили исследование сезонной динамики состояния поверхности о. Визе. Для о. Ушакова выявлена многолетняя динамика отступления кромки льда. Анализ скорости ее отступления показал ускорение сокращения площади ледяного купола с начала 2010-х гг. Показано влияние изменений климатических условий на многолетние изменения береговой линии о. Визе и Ушакова: учитывались скорость и направление ветра, температура воздуха. 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 наблюдаемые изменения климата в XX–XXI вв.

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

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата и сокращение морского ледового покрова в арктических морях – хорошо известная тенденция, которая с начала XXI в. заметное ускоряется и отчетливо проявляется на малых арктических островах, которые когда-то были окружены мощными ледяными полями. Реакция малых островов, их береговой линии и поверхности, на эти изменения до сих пор слабо изучена. В августе–сентябре 2019 г. проводилась уникальная комплексная экспедиция «Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная Земля – 2019» на научно-экспедиционном судне «Про-

фессор Молчанов» [Открытый океан..., 2019], в которой приняли участие два автора статьи. Она имела заметный медийный отклик, были получены многочисленные кадры фотографов-профессионалов (National Geographic), обследования включали высадку на берег там, где это было возможно, 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.

Исследование посвящено островам Ушакова и Визе, которые находятся в северной, редко посещаемой, части Карского моря. Эти острова существенно отличаются между собой по многим параметрам, но при этом они представляют два характерных типа малых островов, поскольку один из них – ледниковый купол, лежащий на скальном основании, а другой – низменный с небольшими холмами, лишенный растительности и покровного оледенения. Высадка с судна на оба острова в ходе экспедиции оказалась невозможной. Берега о. Ушакова – вертикальные ледяные уступы высотой до 45 м. Остров Визе был недоступен из-за шторма и окаймлявшего его полосы битого льда. В обоих случаях 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. Это ледниковый купол, лежащий на мел-четвертичном цоколе неясной конфигурации, сложенном песчаниками, алевролитами и песками. Наличие трех ледяных куполов и разделяющих их пологих 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. Обрушение ледяных стен отмечалось работниками станции с самого начала ее существования. Полярная станция действовала на острове до 1991 г. В ходе экспедиции 2019 г. строения станции не были обнаружены: они были смыты в море из-за обрушения прибрежных льдов. По данным детальной аэро-съемки с квадрокоптера 23 августа 2019 г. поверх-

ность ледника была свободна от снежного покрова и 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 $76–77^{\circ}$ 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; Дымов и др., 2011; Качурина, Дымов, 2008], 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.

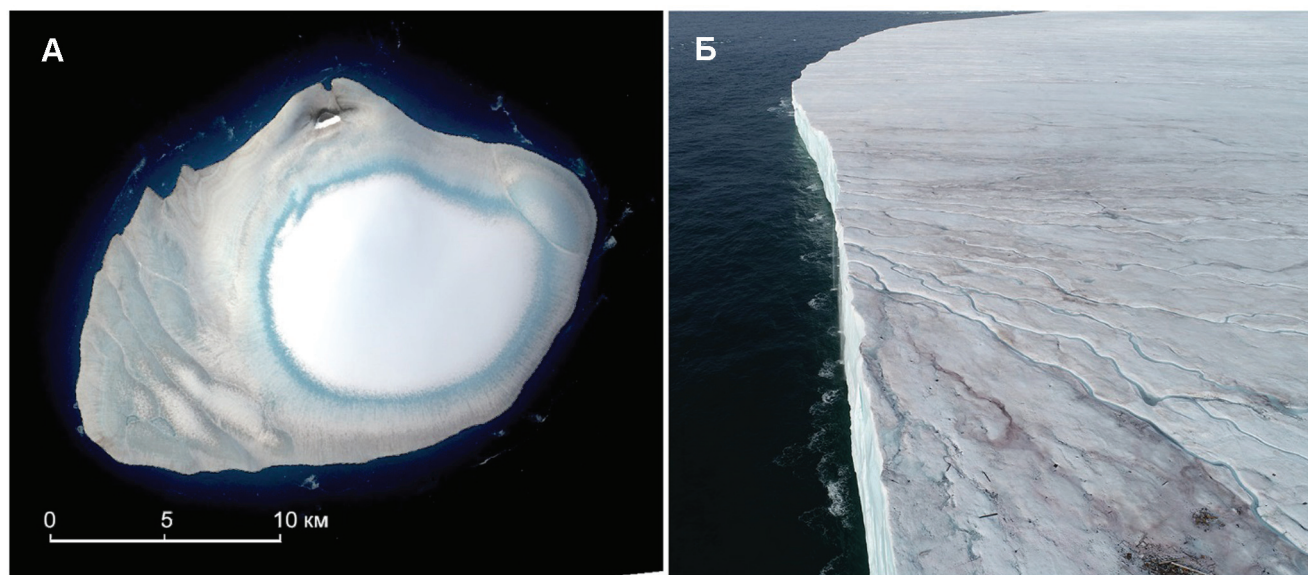


Рис. 1. Остров Ушакова:

А – снимок со спутника Landsat-8, август 2019 г., Б – ледяной уступ, фотосъемка с квадрокоптера (фото Н. Луговой)

Fig. 1. Ushakov Island:

A – Landsat-8 satellite image, August 2019, B – ice cliffs photographed from a quadcopter (photo by N. Lugovoy)

В 1945 г. на острове в 100 м от берега была построена полярная гидрометеорологическая станция, одна из наиболее северных в мире, которая продолжает работать и в настоящее время, обеспечивая многолетний ряд метеонаблюдений. Однако строения станции периодически приходится переносить вглубь острова из-за обрушения берега (рис. 2). «Кают-компания и дизельная рухнули в воду, станционные дома все время приходилось перетаскивать. Несколько дней назад (2010) рухнул теплый склад...» [Стругацкий, 2010]. По этим наблюдениям средняя скорость отступления бровки берегового уступа за 65 лет составила около 1,5 м/год. В 2011 г. «Михаил Сомов» во время снабженческого

рейса доставил на остров конструкции нового здания, которое построили вдали от берегового уступа.

Проведенные исследования призваны объединить точечные детальные обследования и полученные материалы высокдетальных аэросъемок с данными обзорной космической съемки в оптическом и радиолокационном диапазонах. Их цель – выявить и проанализировать многолетние изменения на существенно различающихся по своим свойствам островах Ушакова и Визе на основе доступных архивных материалов съемок (Landsat-5, 7, 8, Sentinel-2), по возможности связать их с современным состоянием этих островов.

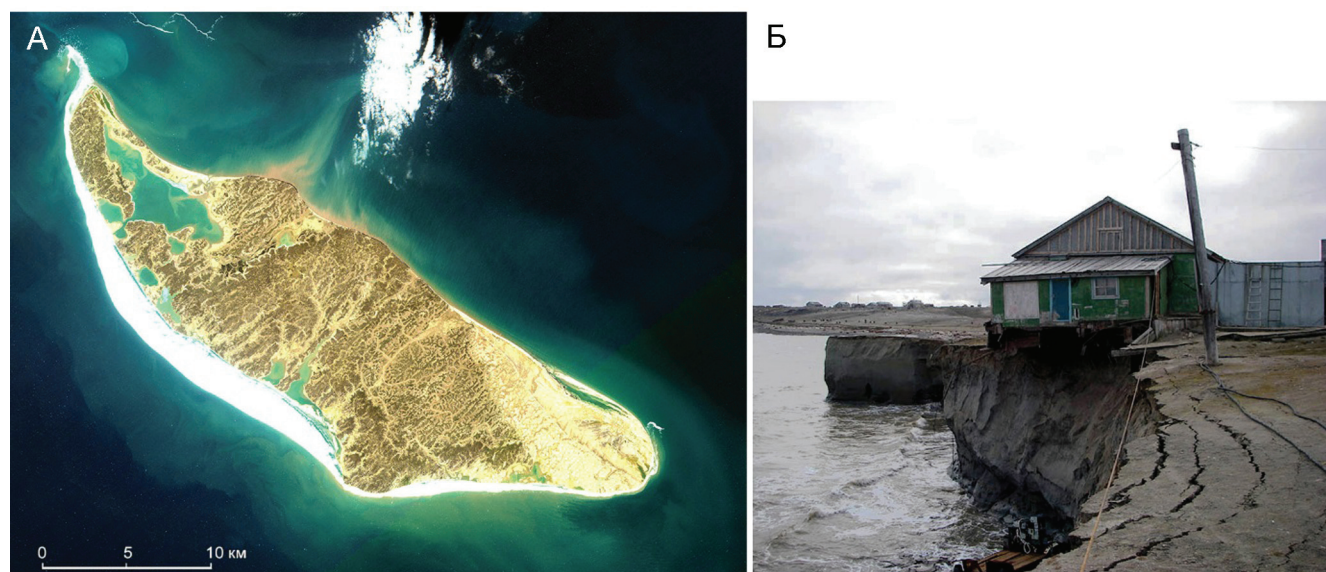


Рис. 2. Остров Визе:

А – снимок со спутника Sentinel-2, август 2019 г., Б – участок берега со строениями полярной станции (фото Ю. Карякина [Литау, 2014])

Fig. 2. Vize Island

A – Sentinel-2 satellite image, August 2019, Б – a section of the crumbling coast with the buildings of the polar station (photo by Yu. Karyakin [Litau, 2014])

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 масштаба 1:200 000, изданной в 1957 г. Современная ситуация охарактеризована на основе снимков со спутников Landsat-8 из того же архива и Sentinel-2 [Copernicus..., 2020]. Съемки выполнены в августе 2019 г. почти в те же даты, когда острова посещались экспедицией, и была проведена детальная аэросъемка небольших участков квадрокоптером. Отобраны практически все безоблачные снимки теплого периода (более

10 малооблачных снимков за 1986–2019 гг.), когда острова можно уверенно отделить 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 исследования сезонных изменений поверхности о. Визе привлекались данные радиолокационных съемок, которые позволяют получать изображения интересующих объектов независимо от наличия облачности, часто наблюдающейся в арктической зоне. Были отобраны комплексные (SLC) радиолокационные данные С-диапазона (Sentinel-1 [Copernicus..., 2020]) с согласованной горизонтальной поляризацией. Наиболее полным набором данных был обеспечен 2019 г.,

для предшествующих лет использовались только данные за теплый период года. Всего анализировалось 67 изображений (табл. 2).

Интенсивность изменения состояния поверхности арктических островов, разрушения их берегов связана с изменчивостью климатических условий. Основным климатообразующим фактором в северной части Карского моря является расположение в высоких широтах, что определяет сезонные различия в поступлении солнечной радиации. Самые низкие значения температуры воздуха отмечаются в феврале. Активная циклоническая деятельность в холодный период года способствует сильным ветрам, преимущественно южной четверти, большой междусуточной изменчивости температуры воздуха, значительной облачности, частым, но не обильным осадкам. Снежный покров на о. Визе сохраняется в течение 9–10 месяцев, на о. Уша-

кова – возможно круглогодично. В летний период вследствие высоких отражательных свойств снежно-ледового покрова радиационный баланс низкий, что отражается в низких значениях температуры воздуха. превышает нулевую отметку. Лето короткое, пасмурное, с более слабыми ветрами по сравнению с холодным периодом, циклоническая деятельность ослабляется. Длительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха составляет не более двух–трех месяцев, в любое время года могут наблюдаться заморозки. Годовое количество осадков не превышает 200 мм. По данным спутниковых наблюдений в 1988–2020 гг. на прилегающей к о. Визе морской акватории наблюдается сокращение среднегодовой концентрации морского льда (11–15%/10 лет) и увеличение продолжительности безледного периода 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) метеоро-

логической станции, расположенной на 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.

При исследовании сезонных изменений поверхности о. Визе за 2016–2019 гг. и их связи с метеоусловиями использовались данные о погоде с сайта [Погода..., 2002], [ВНИИГМИ-МЦД..., 2021]: высота снежного покрова, количество осадков, температура воздуха.

Выполненная с борта судна квадрокоптером DJI Phantom 4 PRO V2.0 аэрофотосъемка участков островов 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 первые сантиметры, 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 дешифровочные признаки на космических снимках для форм берегового рельефа и процессов рельефообразования.

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 скорректированные 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–гг.) 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 в очертаниях 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 перелетовывающие 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, пологие седловины ледникового купола. Дополнительную 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 пикселя, 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 гг.) 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-компози́тов – 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 средству оценки изменений ландшафтов или их разнообразия, в том числе анализа растительного покрова, посвящено все больше публикаций [например, Jacob et al., 2020]. В нашем исследовании для получения МТС-компози́тов 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 совмещение 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-компози́тов на весь 2019 г. и по два–три на наиболее интересный теплый период года для других лет для оценки повторяемости состояния поверхности. МТС-компози́ты, 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 берегового уступа о. Ушакова на снимках разных лет с 1986 по 2019 гг. 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 полученные 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 территории Арктики в середине 1950-х гг. (топографическая карта м-ба 1:200 000), составила 328 км². Значения площади острова, которые приведены в таблице на рис. 3, определены по доступным снимкам 1986–2015 гг. (см. табл. 1). Они соответствуют значениям площади для тех же сроков из исследования [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 гг.) 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.

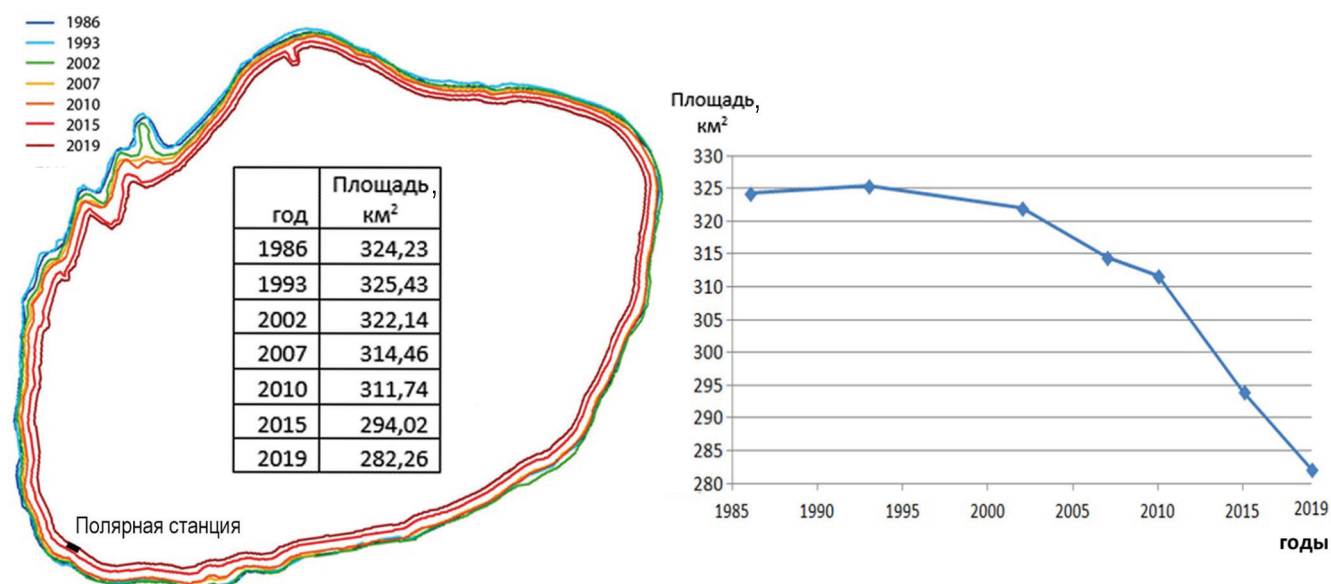


Рис. 3. Динамика положения берегового уступа о. Ушакова и изменение его площади

Fig. 3. The dynamics of the coastal 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 гг. скорость отступления кромки составляла в среднем 10,9 м/год, а за последние 9 лет (2010–2019 гг.) 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, полученных с использованием 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 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 гг. (см. табл. 1) был проведен для о. Визе, лишенного покровного оледенения. Наложение береговых линий разных лет на наиболее новый снимок августа 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 рис. 4 в соответствующих местах для разных перио-

дов 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 года. При этом отчетливо выросли косы, хорошо определяемые по снимку 2019 г. благодаря полному отсутствию льда (на участках 1, 2 и 3). Отмель у выхода из большой лагуны (участок 2) приросла 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 (рис. 4В) показана современная коса участка 3, хорошо заметная на снимке 2019 г., но отсутствующая на топографической карте.

Наложение двух созданных по высокдетальной 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 года. Приведенные на рис. 5 МТС-композиции иллюстрируют наиболее характерное «сезонное» состояние поверхности острова и ближайшей акватории за 12-дневные периоды. 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 значительном уровне отражения, обусловленном высокой влажностью поверхности и наличием скудной раститель-

ности. Состояние поверхности острова для января, мая и августа 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 свидетельствует об отсутствии снежного и ледового покрова. В свою очередь, характерный для января яркий синий цвет – высокая когерентность – отсутствие изменений и низкое отражение, т. к. поверхность покрыта снегом и скована морозом. При этом прилегающая акватория в зимний период (МТС-компози́ты на январь, май) изображена различными не только ледовыми текстурами, но и разными цветами, что свидетельствует о значительных изменениях в ледовом покрове: как перемещении, так и таянии льдов. В мае видна та же картина скованности льдом. Однако 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 о 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

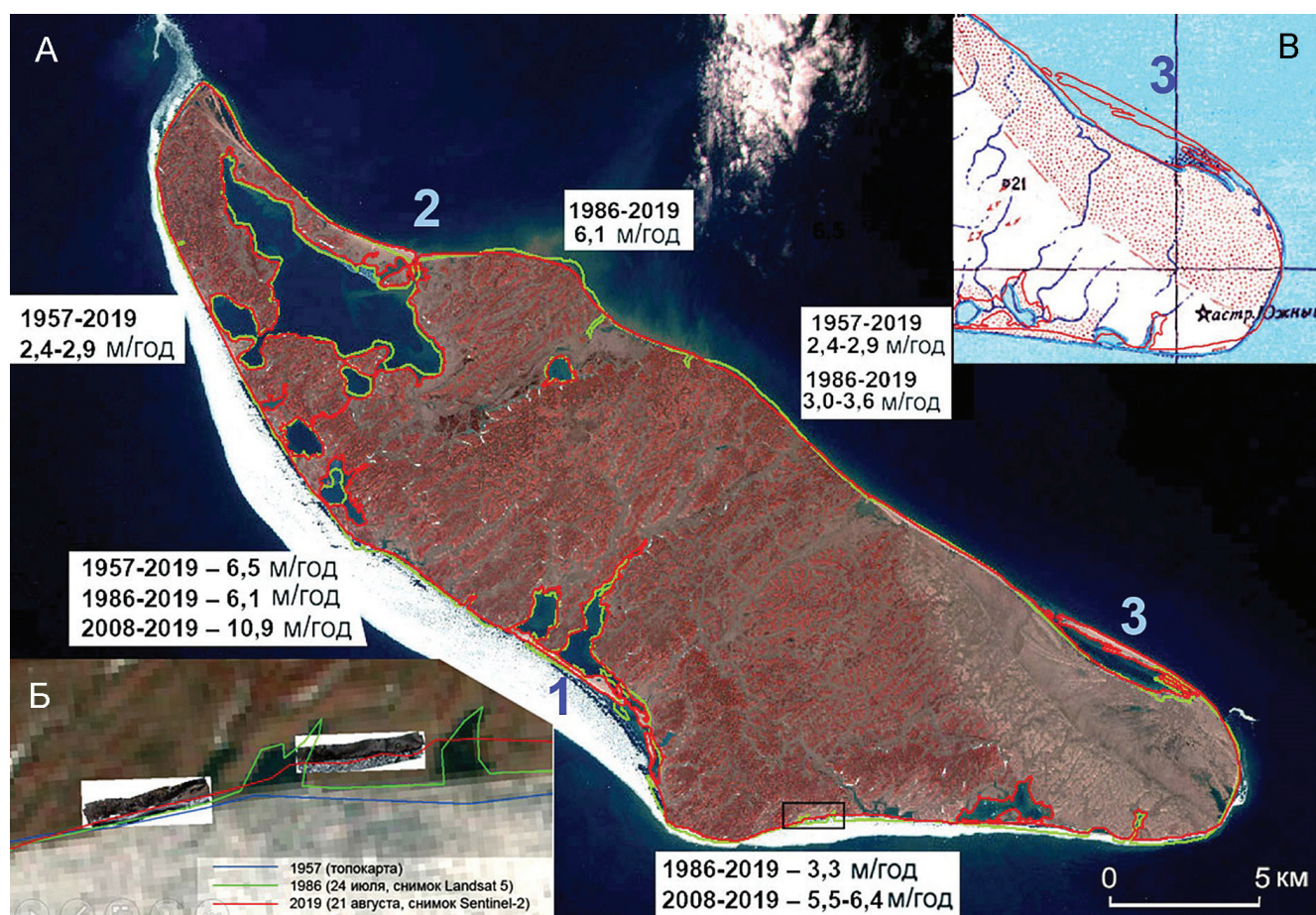


Рис. 4. Изменение очертаний о. Визе:

А – космический снимок со спутника Sentinel-2 21 августа 2019; 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.) с наложенными очертаниями современной косы (2019 г.)

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) with superimposed outlines of the modern spit (2019)

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.

Наиболее заметные изменения в ледовом покрове, непосредственно примыкающем к острову и воздействующим на его берега, наблюдались в периоды января 2019 г., с конца июня до начала сентября, затем с конца октября по середину декабря 2019 г. Эти периоды характеризовались временами 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-композигов, ЦМР ArcticDEM и рассчитанных по данным оптического диапазона значений вегетационного индекса NDVI. Основной рисунок поверхности создается сочетанием узких термоэрозионных ложбин разного порядка, лишенных всякого растительного покрова и узких водоразделов. Ложбины в течение теплого периода практически неизменны и дают слабую интенсивность радиолокационного отражения, что также свойственно, например, песчаным поверхностям. Такие поверхности имеют интенсивно темный синий цвет на МТС-композигах. 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 всех водоразделах свидетельствуют значения NDVI 0,10,25

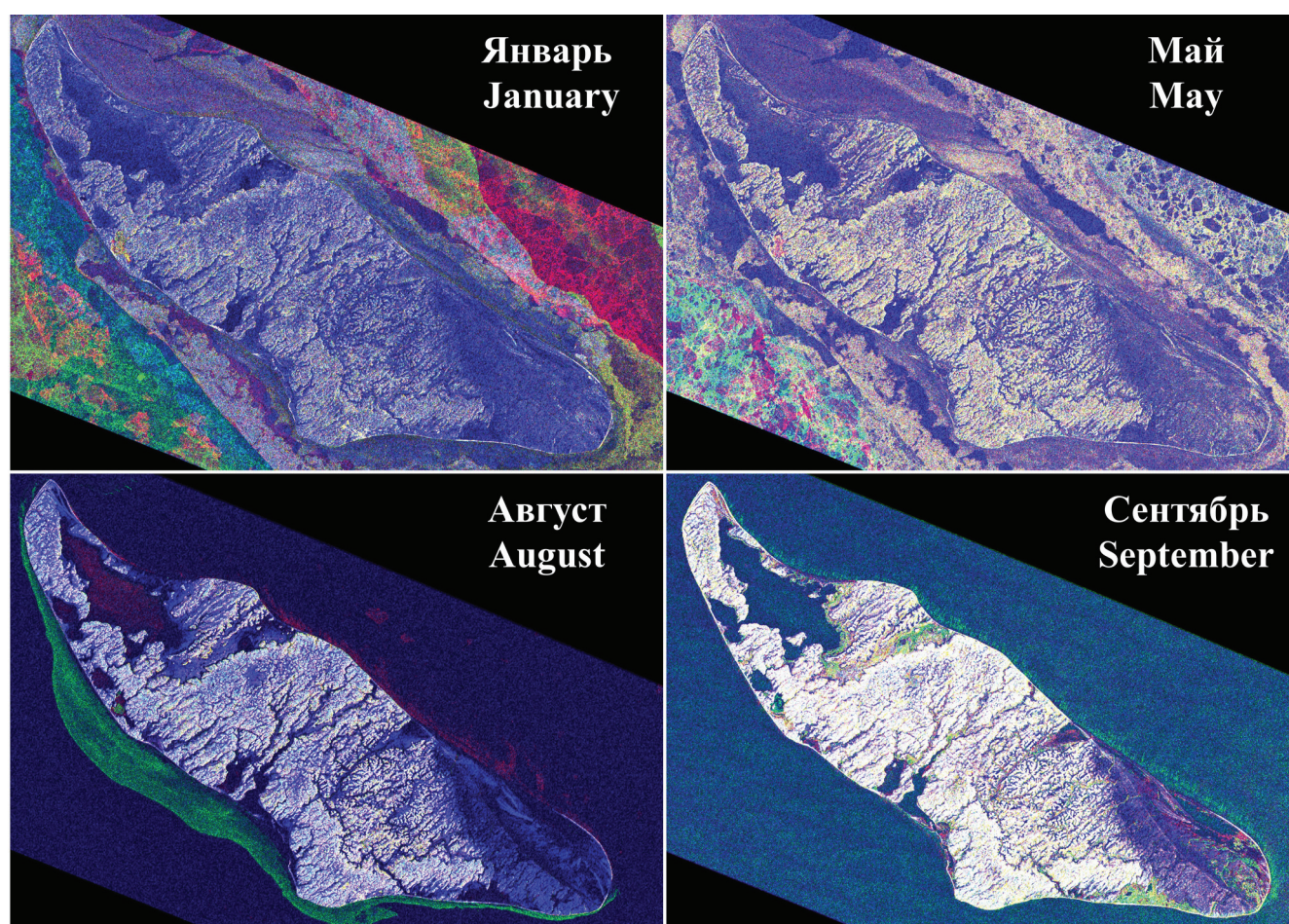


Рис. 5. Состояние поверхности и изменение о. Визе и ближайшей акватории на многовременных композитах с когерентностью (МТС-композигов) для некоторых 12-дневных периодов 2019 г.

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

(см. рис. 6В). Интересно отметить, что для небольшого участка расположения бывшей воинской части (закрытой еще в 1993 г.), выделенного рамкой на рис. 6, характерен стабильный во все сезоны ярко-желтый цвет 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 на остальной части острова. Причиной этого может быть как отепляющее воздействие на почву остатков строений и бочек, так и, например, влияние небольшой колонии белых чаек, гнездящихся на этом участке [Стругацкий, 2010].

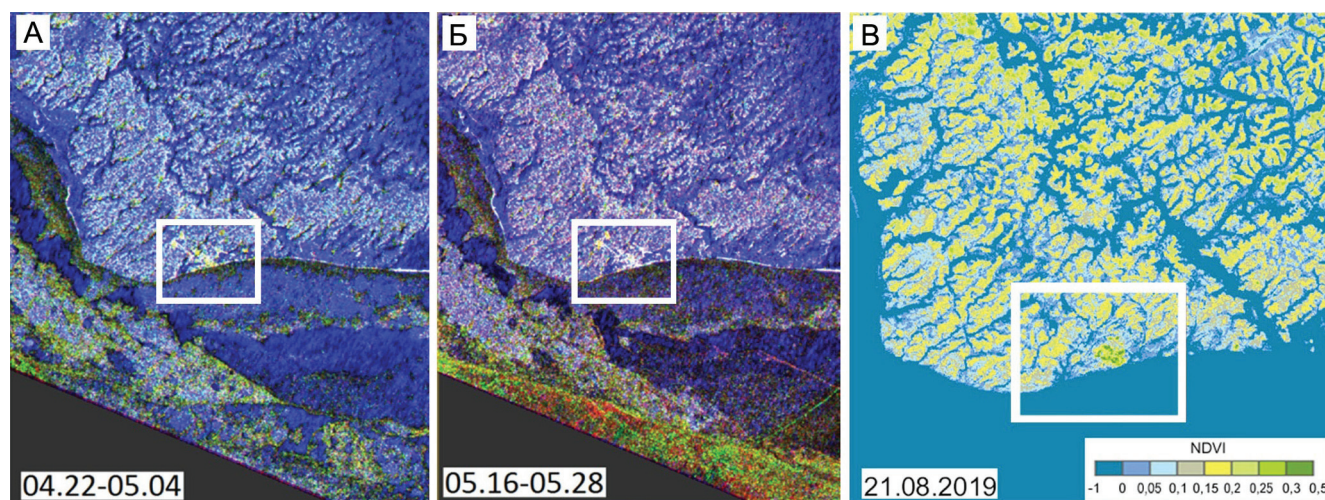


Рис. 6. Южная часть о. Визе с на МТС-композициях (А, Б) и индексом изображении (NDVI) (по снимку Sentinel-2 21.08.2019 (В)). Рамкой выделен участок расположения недействующей воинской части, характеризующийся аномальными значениями всех параметров

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

Хорошо известен выраженный тренд повышения среднегодовой температуры в Арктике, который характерен и для исследованных островов. На островах прослеживается также увеличение в последние годы количества дней со сильными скоростями ветра как в целом за год, так и в теплый период года по данным реанализов ERA5 и ERA-20С. Данные реанализов были тестированы по станционным наблюдениям на станции Визе. В результате получено, что среднесуточная скорость ветра по данным реанализа ERA5 в среднем на 0,1 м/с выше станционных данных, а по данным реанализа ERA-20С – на 0,8 м/с меньше. Для получения однородного ряда скоростей ветра данные реанализа ERA-20С были увеличены на 1 м/с. За дни со сильным ветром принимались те дни, в течение которых средняя скорость ветра за 6 часов превышала 10 м/с. Для района о. Визе, расположенного южнее и вероятнее достигаемого 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 1980–2000 гг. ($X_i - X_{cp}$), которые затем были нормированы на стандартное отклонение (σ). Период 1980–2000 гг. для расчета средних значений был выбран как относительно однородный. Такая нормировка позволяет сопоставить изменчивость температуры воздуха и скорости ветра. Как видно на рис. 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 экстремальные арктические циклоны [Simmonds, Rudeva, 2012; Yamagami et al., 2017]. Заметим, что изменчивость циклонической активности в разные сезоны года связана с изменчивостью ледового покрова. В частности, усиление циклонической активности в регионе в июле приводит к

увеличению продолжительности ледового покрова в течение года. В свою очередь, аномальные штормовые условия в августе 2012 и 2016 гг. обусловили рекордно низкие значения площади ледового покрова [Parkinson, Comiso, 2013; Petty et al., 2018].

ВЫВОДЫ

В настоящее время на островах открытого моря разрушение разных типов берегов идет с катастрофическими скоростями, и облик этих небольших участков суши может в ближайшие десятилетия коренным образом измениться. Изменения береговой линии арктических островов происходит за счет комплекса гидрометеорологических факторов: рост температуры воздуха, уменьшение площади морского льда, усиление ветроволновой активности в теплый период года.

Совместное использование доступных для научных исследований 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.

По результатам исследования 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 2008–2019 гг. и от 3 до 6,5 м/год в среднем за период 1986–2019 гг. на остальных мысах. При этом отмечается отчетливый рост кос относительно положения на топографической карте от 2 до 3,5 км.

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 [Жданова, 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

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

снежный период. Сопоставление с полученными метеорологическими данными позволило сделать вывод о том, что изменения на поверхности острова наиболее заметны и активны 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

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 18-05-602211.

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. 1955–57, 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. 8192. DOI: 10.15356/0435-4281-2012-4-81-92.
- 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., De Chiara 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. 19992049. 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.
- 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.
- 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 L., 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. 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: www.zikj.ru/images/25/7.pdf (дата обращения 01.05.2021).
- ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.06.2021).
- Литау Н. Остров и Человек // *Литау.ру*. Сайт капитана Николая Литау. 2014. URL: <https://lita.ru/2014/08/16/8946> (дата обращения 01.05.2021).
- «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).
- 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 *Кафедра картографии и геоинформатики, вед. науч. сотр., канд. геогр. н.; 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. н.; 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. н.; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com*

In the Arctic, there is a clear trend of increasing average annual air temperature, decreasing sea ice cover, increasing open water period, melting, and breaking of glacier edges due to storms, destruction of high shores and appearance of extensive shoals. These changes are most noticeable on small Arctic islands, once surrounded by thick ice fields but increasingly exposed to open water, which causes a special interest in them. In August–September 2019, during the unique complex expedition “Open Ocean: Archipelagoes of the Arctic. Severnaya Zemlya-2019” on the research vessel Professor Molchanov full-scale 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. The different nature of the islands has led to different methods of studying their dynamics from remote sensing data. Changes in the position of the islands’ coastline are traced by a set of different time sources: the topographic map of 1957 (1:200 000) and space images from Landsat 5, 7 satellites; the current situation is characterized by cloud-free images from Landsat 8 and Sentinel 2 satellites. Multiple interferometric images of Sentinel-1B (IW – Interferometric Wide Swath) processing level SLC – Single Look Complex radar system for the period from January 1 to December 31, 2019 provided a study of seasonal dynamics. For Ushakov Island revealed the multiyear dynamics of ice edge retreat. Analysis of the rate of ice edge retreat on Ushakov Island. We assess the influence of changes in climatic conditions on the dynamics of the shoreline of Vize and Ushakov islands: wind speed and direction and air temperature. Uneven coastal erosion was characteristic of Vize Island, and areas with the highest rate

of coastal retreat were identified. Multitemporal composites with coherence obtained from radar data allowed us to characterize the seasonal dynamics of the state of the surface of the Vize island and its relation to weather characteristics. The results of the research show a different, but the unambiguous response of these islands' shorelines to the observed climate changes in the 20-21st century.

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

Acknowledgements. The study was funded by the Russian Foundation of Basic Research, grant No 18-05-60221.

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 letter.] St. Petersburg, VSEGEI Publishing house, 2011, 220 p. (In Russian)
- Zhdanova E.Yu. Gidrometeorologicheskie faktory izmeneniya beregovoy linii arkticheskikh ostrovov Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geojekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informacionnykh tekhnologij: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Majkop, 17–21 maja 2021 goda, [Hydrometeorological factors of changes in the coastline of the Arctic islands/ Fundamental and applied aspects of geology, geophysics and geocology using modern information technologies, VI International Scientific and Practical Conference, Maykop, 17–21 May 2021], 2021, p. 102–107. (In Russian)
- Zakharov A.I., Yakovlev O.I., Smirnov V.M., *Sputnikovy monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* [Satellite Earth observation. Radar remote sensing of the surface], Moscow, Krasand Publ., 2012, 248 p. (In Russian)
- 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. 1:1000 000 (third generation). Series North-Kara-Barents Sea. Sheet U-41-44 (Franz Josef Land – Eastern Islands)]. St. Petersburg, PMGRE Publ., 2008. (In Russian)
- Materialy istorii polyarnoy stantsii o. Ushakova* [Materials of the history of the polar station on Ushakov island]. 1955–57, RGAE, Fond 9570, op. 2, file 3332. 23 sh. (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)
- Pietranera L., Britti F., Cesarano L., Gentile V., Kantemirov Yu. Novyy produkt MTC, rasschityvayemyy po dannym COSMO-SkyMed [New MTC product calculated from COSMO-SkyMed data], *Geomatica*, 2012, no. 1, p. 46–51. (In Russian)
- Romanenko F.A. Intensivnost' geomorfologicheskikh protsessov na ostrovakh i poberezh'yakh morey Karskogo i Laptevskikh [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)
- 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)
- 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., De Chiara 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.
- 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.

- 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 L., 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. 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.
- Web sources*
- Alenikov 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://www.zikj.ru/images/25/7.pdf> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- RIHMI-WDC, URL: <http://meteo.ru/data> (access date 01.06.2021).
- Litau N. Ostrov i Chelovek. [The Island and the Man], URL: <https://litau.ru/2014/08/16/8946> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- "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)
- Pogodaiklimat [Weather and climate], URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (access date 01.05.2021). (In Russian)
- Strugatsky V. V poiskakh "ledyanogo doma" [In Search of the "Ice House"], URL: (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).
- 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: (access date 01.05.2021).

Received 03.06.2021

Revised 15.07.2021

Accepted 20.07.2021