Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях его картографирования

В. Ю. Ширшова^{1,2}, Е. А. Балдина¹

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: baldina@geogr.msu.ru

Методы радиолокационной интерферометрической съёмки широко используются в целях создания и обновления цифровых карт высот и исследования подвижек земной поверхности. Однако радиолокационная интерферометрия также может применяться во многих других областях, в частности для мониторинга сезонной изменчивости труднодоступных территорий. Малые арктические острова являются «белыми» пятнами на картах, ввиду того что с 50-х гг. прошлого века на них не обновлялась картографическая информация, а её актуализация с привлечением наземных измерений или снимков в оптическом диапазоне весьма трудоёмка и ресурсозатратна. Тем временем в условиях глобального изменения климата такие острова больше всех подвержены трансформациям. Малые арктические острова поэтому могут служить маркерами процессов потепления, для которых необходимо обозначить индикаторы мониторинга изменений среды. В представленной работе продемонстрировано применение интерферометрической когерентности для изучения сезонной изменчивости. Мультивременной композит с когерентностью (МТС), широко используемый как индикатор изменений для сельскохозяйственных территорий, был применён для оценки изменений арктического о. Визе. Благодаря мультивременному композиту были определены характерные особенности сезонной изменчивости поверхности в разное время года на примере о. Визе. Для этого были обработаны все доступные интерферометрические радиолокационные данные спутника Sentinel-1 на территорию о. Визе (всего 88 изображений). Детальный анализ МТС-композитов был проведён на 2019 г., для которого было получено наибольшее число карт когерентности — 26. Получены сведения о периодах свободной ото льда ближайшей к острову акватории и от снега — его поверхности на протяжении последних пяти лет, обеспеченных съёмками Sentinel-1. Проведённое исследование в перспективе послужит основой для создания тематических карт для территории о. Визе.

Ключевые слова: спутниковая радиолокационная интерферометрия, Sentinel-1, когерентность, МТС-композит, Арктика

Одобрена к печати: 16.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91

Введение

Мониторинг арктического региона интерферометрическими методами — одна из наиболее развивающихся областей дистанционного зондирования Земли из космоса. Большинство исследований направлено на изучение динамики ледников, морских льдов и многолетней мерзлоты. Одним из промежуточных продуктов интерферометрической обработки является когерентность, рассчитываемая на основе фазовой составляющей сигнала и характеризующая согласованность пришедших к радиолокатору в разное время сигналов от одного и того же объекта (Захаров и др., 2012).

Использование интерферометрической когерентности уже уверенно зарекомендовало себя как надёжный метод для анализа изменчивости поверхности. Последнее время всё больше публикаций посвящено именно самой когерентности, и чаще всего эти работы выполнены с целью оценить изменения ландшафтов или их разнообразие. Немалое количество исследований сфокусировано на применении когерентности для анализа растительного покрова

² Научный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, 127490, Россия E-mail: vshirshova.msu@yandex.ru

(Amarsaikhan et al., 2007; Engdahl, Hyyppa, 2003; Jacob et al., 2020; Khalil, Haque, 2018; Ma et al., 2018; Srivastava et al., 2006; Vicente-Guijalba et al., 2018; Wang et al., 2018). В основном эти публикации демонстрируют возможность совместного применения интерферометрической когерентности и оптических данных при классификации типов поверхности с использованием различных методов машинного обучения (Bartsch et al., 2020; Jiang et al., 2017; Yun et al., 2019). Ещё одно направление, получившее развитие, особенно при оценке состояния сельскохозяйственных районов, — это создание синтезированных изображений с когерентностью; например, наиболее известен мультивременной композит с когерентностью (англ. Multi-Temporal Coherence — MTC) (Пиетранера и др., 2012).

Стоит выделить многолетний труд учёных, выполненный в рамках проекта ESA SEOM SInCohMap (http://www.sincohmap.org/) по тестированию и анализу возможностей применения разновременных изображений когерентности по данным Sentinel-1, где продемонстрированы возможности картографирования земных покровов (Jacob et al., 2020). В этом исследовании также анализируется эффективность различных комбинаций данных в разной поляризации и интенсивности сигнала при обработке методами и алгоритмами классификации. В рамках проекта в Европе анализировались различные тестовые полигоны в Испании, Италии и Польше для максимального увеличения разнообразия типов: территория, лишённая растительности, сельскохозяйственные земли и городские высокогорные ландшафты. Общий потенциал интерферометрической когерентности Sentinel-1 для картографирования земного покрова был оценён как очень хороший. Во всех случаях результаты классификации, основанные на когерентности, обеспечивали более высокую точность, чем стратегии, основанные на интенсивности обратного сигнала (яркости), с учётом 12-дневного временного интервала Sentinel-1. На арктических территориях метод не опробовался.

В российской практике среди работ с применением когерентности можно выделить несколько исследований когерентности по амплитудным изображениям, а также по применению изображений когерентности для картографирования сельскохозяйственных районов и вулканических территорий (Виноградова, Сосновский, 2018; Достовалов, Трошко, 2020; Михайлюкова и др., 2020; Чимитдоржиев и др., 2020). Применение когерентности для исследования арктического региона проводится в основном для изучения инфраструктуры и мониторинга ввиду нехватки оптической или мультиспектральной информации. Исследование малых арктических островов или территорий Арктики с привлечением радиолокационной информации ведётся в основном для построения цифровых моделей рельефа и определения подвижек, а также, как было отмечено выше, для изучения свойств морских льдов (Sharov, 2012).

Труднодоступность и удалённость в сочетании со слабой изученностью, отсутствием карт и ускорением изменений побуждает использовать все доступные средства для характеристики свойств поверхности островов. Это обусловливает применение дистанционных методов исследования для оценки сезонной изменчивости и выявления зависимостей изменения природной среды, необходимых для дальнейшего картографирования территории. Ввиду очевидных трудностей с оптическими данными — высокие широты, а значит, сильная облачность — потенциально эффективно применение интерферометрических методов для целей оценки сезонной изменчивости поверхности о. Визе и его береговой линии. В связи с этим важно обозначить те периоды года, когда остров свободен ото льда, и оценить изменения в соответствии с погодной информацией, что позволит выявить общие черты различных типов поверхностей, необходимых для дальнейшего картографирования.

Исследуемая территория

Остров Визе, открытый в 30-х гг. прошлого века, расположен в северной части Карского моря. Простирающийся с востока-юго-востока на запад-северо-запад на 22,5 км остров имеет ширину 5,5 км. Со всех сторон о. Визе окаймлён береговым валом из камней и мелкой гальки шириной от 7 до 30 м (Визе, 1948). Последние годы отмечена тенденция к размыванию берегов, на

космическом снимке MSI/Sentinel-2 отчётливо видны поля взвесей (*puc. 1*). Сопоставление карты и современного снимка показывает, что отображаемые ими ситуации заметно различаются.



Рис. 1. Остров Визе на фрагменте топографической карты 1957 г. и снимке MSI/Sentinel-2 2019 г.

Остров сложен нижнемеловыми песчаниками и занят увалистой равниной (Романенко, 2008). Ровная поверхность острова изрезана многочисленными ложбинами, которые в летний период представляют собой русла речек и ручьёв. Между ложбинами возвышаются небольшие (не более 22 м н.у.м. (над уровнем моря)) холмы. Замкнутые ложбины заполняются талой водой, образуя мелководные озёра. Почва преимущественно песчано-глинистая, отдельные холмы исключительно песчаные. Растительность на острове почти отсутствует, так как он находится в зоне арктических пустынь. На небольших полигонах произрастает ягель и несколько видов цветковых растений, встречаются отдельные кочки, покрытые лишайниками (http://sevmeteo.polarpost.ru/articles/18/76.shtml.html).

Погодные условия ежедневно фиксируются сотрудниками полярной гидрометеорологической станции, которая была основана в 1945 г. Средняя многолетняя температура воздуха составляет –13,6 °C. Июль — самый тёплый месяц (с самой высокой средней максимальной и средней минимальной температурой: +1,7 и +0,5 °C соответственно). Наиболее холодный месяц (с самой низкой средней минимальной температурой) — февраль (—29 °C). Абсолютный минимум температуры равен —52,0 °C. Средняя многолетняя относительная влажность воздуха — 90 %. В районе станции за год выпадает около 250 мм осадков. Снежный покров на о. Визе сохраняется на протяжении 9—10 мес, в холодные годы снежники лежат всё лето. Преобладает юго-восточное направление ветра со среднегодовой скоростью 6,4 м/с. Устойчивый снежный покров образуется в середине сентября, окончательное его таяние происходит в конце июня. Однако снегопады случаются и летом. Лето короткое и холодное (https://www.weather-atlas.com).

Последние подробные описания острова найдены в открытых источниках. Это статья капитана Н. Литау о путешествии его команды на яхте в 2014 г. «...Сегодня... остров окружён чистой водой. И это бедствие для него: припай оберегал остров от разрушения, а теперь в летний период волны беспрепятственно размывают песчаный берег, и он обрушивается в море, увлекая строения метеостанции. В прошлом году (примерно 2013 г. — *Прим. автора*) под воду ушло 80 метров берега», — пишет Н. Литау (Литау, 2014) (рис. 2в, см. с. 82).

В 2011 г. научно-экспедиционное судно (НЭС) «Михаил Сомов» во время снабженческого рейса доставил на остров конструкции нового здания метеостанции, которое построили вдали от берегового уступа. Прежняя станция, возведённая в 1945 г. примерно в 100 м от берега, к 2010 г. уже практически упала в море. Было выявлено, что берега о. Визе раньше отступали со средней скоростью 1,5 м в год, а впоследствии, как установлено по космическим снимкам Landsat с 2009 по 2016 г., берег отступил в этом месте на 74 м (рис. 26, см. с. 82).



 $Puc.\ 2.$ Состояние о. Визе в окрестностях метеостанции: a — фото Н. Лугового (экспедиция «Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная Земля — 2019»); δ — снимок Всемирного фонда дикой природы (World Wildlife Fund — WWF) 2016 г. (https://wwf.ru); δ — бочки от горючего около заброшенной воинской части (фото экспедиции Н. Литау, 2014 г., https://litau.ru/2014/08/16/8946)

В ходе экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики. Северная 3емля — 2019» на HЭС «Профессор Молчанов» в августе — сентябре 2019 г. состояние острова было отмечено по ортофотопланам, поскольку полоса битого льда около берега не позволила высадиться на остров, снежный покров отсутствовал ($puc.\ 2a$). Местами отчётливо видна деятельность водотоков и маленькие полигоны растительности: мхи и лишайники.

Приведённые выше сведения складываются из отдельных редких посещений о. Визе и дают представление о слабой изученности физико-географических особенностей территории, а единственная карта подтверждает это. В период советского времени остров имел важное стратегическое назначение, затем были попытки по внесению его в заповедные территории. Сейчас же в рамках изменения климата и решения связанных с этим вопросов особое теоретическое и практическое значение имеет обоснование выбора наиболее информативных индикаторов для оценки состояния и динамики наземных экосистем Арктики, что отчётливо наблюдается на малых арктических островах, а единственным оптимальным методом является радиолокационное дистанционное зондирование.

С точки зрения радиолокационной съёмки можно выделить следующие физико-географические особенности района:

- остров окружён водой Карским морем, на открытой водной поверхности когерентность сигналов отсутствует;
- рельеф острова сильно расчленённый и в целом равнинный, геометрические искажения, такие как сжатия и растяжения, минимальны, также отсутствуют переналожения вершин у подножий небольших возвышенностей и нет объектов, создающих тени.

Материалы и методы

Когерентность в основном используется для оценки перспективы проведения дальнейшей обработки изображений. Пороговыми значениями являются превышающие $0,20\pm0,02$. Более низкие значения когерентности означают, что отражающая поверхность сильно изменилась

в промежуток между съёмками, а измерение деформаций невозможно из-за увеличения в данном случае погрешности измерений (Захаров и др., 2012; Чимитдоржиев и др., 2020; Touzi et al., 1999). Величина когерентности отражает степень зашумления интерферограммы, она вычисляется как нулевой коэффициент пространственной корреляции двух сигналов:

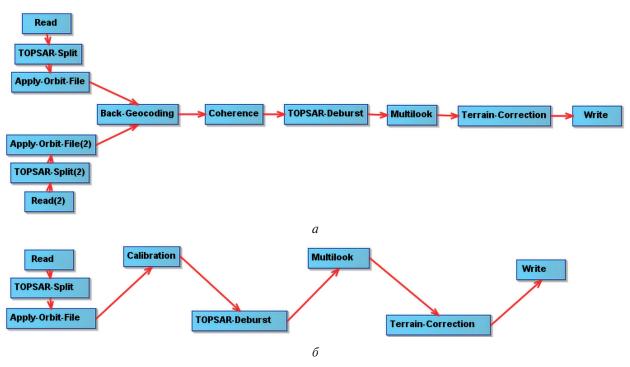
$$\gamma = \frac{S_1 S_2^*}{\sqrt{S_1 S_1^* S_2 S_2^*}},$$

где S_1 и S_2 — комплексные значения отражённого сигнала для первого и второго по датам снимков. Если значение когерентности близко к единице, то это говорит о стабильности интерферометрической фазы, в то время как низкая её величина — о разрушении фазы регистрируемых сигналов.

Для анализа сезонной изменчивости поверхности о. Визе были использованы комплексные (англ. Single Look Complex — SLC) радиолокационные данные С-диапазона (Sentinel-1) с согласованной горизонтальной поляризацией. Комплексные радиолокационные изображения содержат в себе две характеристики радиоволны: амплитуду и фазу. В таблице приведено количество снимков за каждый год радиолокационной съёмки. Были выбраны и обработаны все доступные данные Sentinel-1 за период работы космического аппарата. Таким образом, их количество за 4 года составило 88 изображений, и, соблюдая минимальную временную декорреляцию в 12 дней, из них получилось сгенерировать 84 карты когерентности.

| Год съёмки | Количество снимков |
|------------|--|
| | 0 |
| 2016 | 9 |
| 2017 | 6 |
| 2018 | 23 |
| 2019 | 29 |
| 2020 | 21 (на момент исследования — сентябрь) |

Использованные в работе радиолокационные изображения



Puc. 3. Схема обработки радиолокационных данных SLC в SNAP для получения: a —карт когерентности; δ — амплитудных изображений

Обработка выполнялась в программном обеспечении SNAP и включала ряд стандартных процедур для расчёта когерентности. К ним относятся: импорт данных, уточнение орбит, выбор полосы на территорию острова, поэлементное совмещение изображений, вычисление когерентности, устранение разрывов, некогерентное накопление и поправка на влияние рельефа (рис. 3a). Для расчёта амплитудных изображений также использовались данные SLC. Обработка включала: импорт данных, уточнение орбит, выбор полосы, калибровку, устранение разрывов, некогерентное накопление и поправку на влияние рельефа (рис. 3б).

В результате обработки для каждой пары радиолокационной информации были получены значения когерентности и амплитуды, которые затем использовались при составлении МТС-композитов (мультивременной композит с когерентностью).

Тематический продукт МТС представляет собой цветной RGB-композит, составленный из амплитуд двух радиолокационных изображений, полученных через 12 дней в одинаковой геометрии съёмки, и когерентности фаз этих же снимков (*puc. 4*).

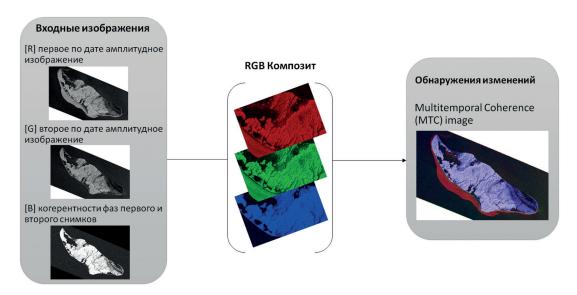


Рис. 4. Формирование МТС-композита

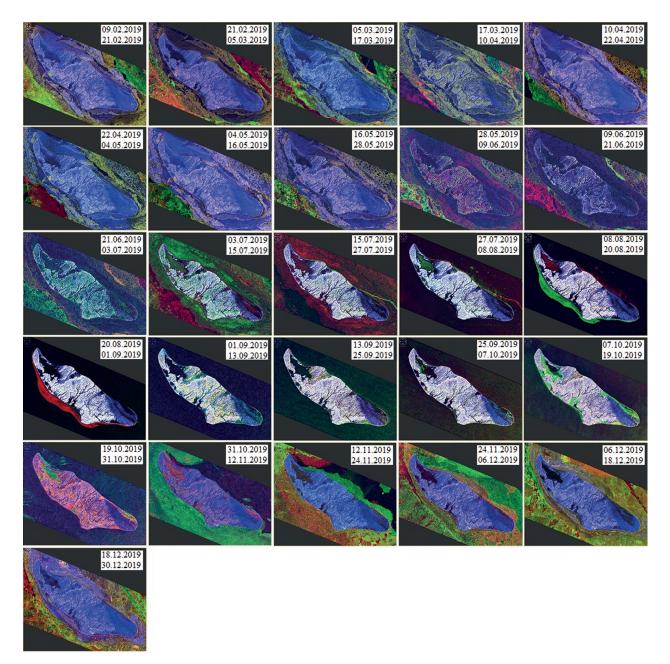
Данные о высоте снежного покрова, количестве осадков, температуре воздуха и видимости были взяты из наблюдений на метеорологической станции, расположенной на самом острове (координаты: широта 79,50° с. ш., долгота 76,98° в. д.).

Результаты

Наиболее полный временной охват радиолокационными данными (снимки были практически каждые 12 дней) приходится на 2019 г. На этот год было сгенерировано 26 синтезированных изображений — МТС-композитов (рис. 5, см. с. 85). Для таких композитов существуют расшифровки цветов, но они созданы преимущественно для сельскохозяйственных земель. Для арктических территорий интерпретация проводилась при сопоставлении с климатической информацией.

Белый цвет, обусловленный высокой когерентностью и большими амплитудами сигналов, характерен для периода с середины июля по начало октября. Такое состояние соответствует свободному от снежного покрова острову. Жёлтый цвет, встречаемый в начале сентября на двух парах: 01.09.2019—12.09.2019 и 12.09.2019—25.09.2019, распространён преимущественно вдоль рек и соответствует незначительной растительности, появившейся в этот период. Это объясняется максимумом температур, пришедшимся на конец августа и начало сентября, а также выпадением осадков в виде дождя. В остальное время года остров в основном

тёмно-синих оттенков, реже — фиолетового цвета за счёт малых амплитуд и высокой когерентности. Фиолетовый цвет характеризует изменение поверхности, обусловленное резкими вариациями температуры воздуха. Так, в середине ноября наблюдался её резкий скачок в сторону $0\,^{\circ}$ С, повлёкший за собой изменение свойств снега, что отразилось на композите 24.11.2019—06.12.2019. В конце мая—начале июня зафиксировано увеличение высоты снежного покрова. По этой причине снимки имеют низкую когерентность в этот период, что отчётливо видно на парах 28.05.2019—09.06.2019 и 09.06.2019—21.06.2019.



Puc. 5. MTC-композиты за 2019 г.

Стабильный во все сезоны ярко-жёлтый цвет с переходами в белый характерен для антропогенных объектов, т.е. для метеорологической станции и бывшей станции противовоздушной обороны (см. *puc. 2*), окружённых большим количеством металлических бочек (*puc. 6*, см. с. 86). Для антропогенных объектов характерны высокие значения амплитуды и высокая когерентность.

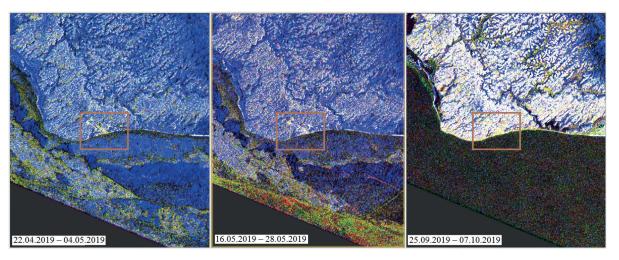
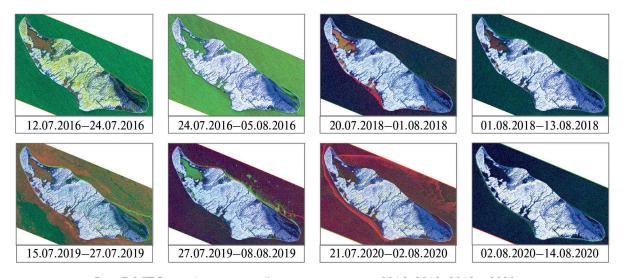


Рис. б. Антропогенные объекты на МТС-композитах (выделены рамкой)

Для подтверждения повторяемости бесснежного периода в июль—август были проанализированы все доступные данные Sentinel-1 за этот период года. Для скачивания были доступны снимки с 2016 по 2020 г., однако, к нашему сожалению, на 2017 г. снимков не было. Сформировав восемь МТС-композитов на разные годы, мы увидели те же цветовые комбинации, что были у нас выявлены в 2019 г. По композитам 05.07.2019—27.07.2019, 27.07.2019—08.08.2019 и 02.07.2020—02.08.2020 (рис. 7) можно сделать вывод, что середина августа — это время, когда в последние годы поверхность острова свободна от снежного покрова, а его берега — от морского льда. Это означает, что для картографирования поверхности и изучения динамики необходимы снимки, полученные в августе.



Puc. 7. МТС-изображения «тёплого» сезона для 2016, 2018, 2019 и 2020 гг.

Обращает на себя внимание юго-восточная часть острова — участок современной морской террасы (Романенко, 2008), для которой характерны тёмно-синие цвета на протяжении всего года. В летний период особенно заметён этот контраст. Такой цвет обусловлен малой амплитудой обоих снимков и высокой когерентностью. Этот участок характеризуется отсутствием какого-либо растительного покрова и имеет низкую шероховатость, что и обеспечивает малые амплитуды сигнала. В период между радарными съёмками равнинная территория оставалась без изменений. Чем темнее оттенок синего, тем меньше шероховатость поверхности, которой характеризуется относительно плоская и равнинная местность.

Сравнение изображений когерентности с характеристиками погоды

Анализ МТС-композитов, характеризующих состояние поверхности острова и прилегающей акватории за весь 2019 г. (см. *puc. 5*), показал, что период с ноября по апрель можно условно назвать «зима», когда сохраняется устойчивое заснеженное состояние поверхности, а с августа по сентябрь— «лето», когда заметно отсутствие снежного покрова. Промежуточные периоды характеризуются значительной неустойчивостью (постепенное таяние снега или его установление при колебаниях температуры воздуха). В целом для длительного периода зимы характерна высокая когерентность. В летний период высокая когерентность для 12 суточных интервалов была, скорее, редким состоянием (*puc. 8*).

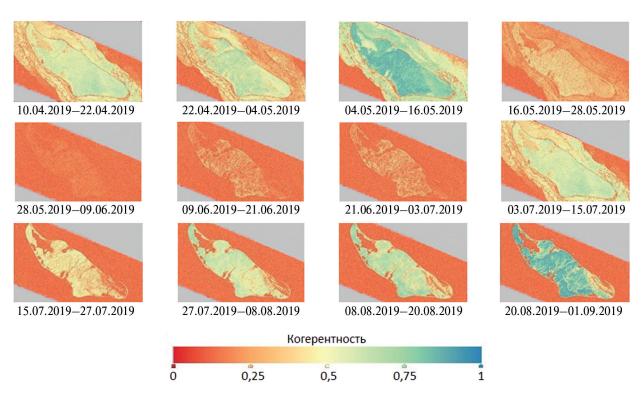


Рис. 8. Карты когерентности для нескольких пар данных съёмок за тёплый период 2019 г.

Интерес, конечно, представляет бесснежный период. Снег тает, и открывается поверхность острова. Благодаря сопоставлению изображений когерентности (см. puc.~8) с метеорологическими сведениями за $2019~\rm r.:$ количеством осадков, температурой воздуха, глубиной снега и видимостью — появилась возможность судить о связи изменений поверхности и погодных условий (puc.~9, см. c.~88).

Выводы, которые мы сделали исходя из имеющейся информации, следующие:

- 1. Значения когерентности относительно высокие за счёт стабильной высоты снежного покрова, некоторое уменьшение её значений связано с колебаниями температуры воздуха.
- 2. Высокие показатели когерентности наблюдаются при практически полном отсутствии изменения высоты снежного покрова при постепенном росте температуры.
- 3. При неизменной высоте снежного покрова в сочетании с переходом к положительным температурам воздуха, что ведёт к изменению свойств поверхности снега, наблюдаются наиболее низкие значения когерентности.
- 4. В период снеготаяния и роста температуры воздуха в сочетании с периодическими снегопадами, приводящими к увеличению высоты свежего снежного покрова, заметно снижаются значения когерентности.

- 5. После схода снежного покрова состояние поверхности меняется слабо, что даёт стабильно высокие значения когерентности, небольшое снижение вызывает выпадение осадков между съёмками.
- 6. Высокая когерентность обусловлена стабильным состоянием поверхности при почти полном отсутствии осадков за этот период на фоне максимальных за год температур воздуха.

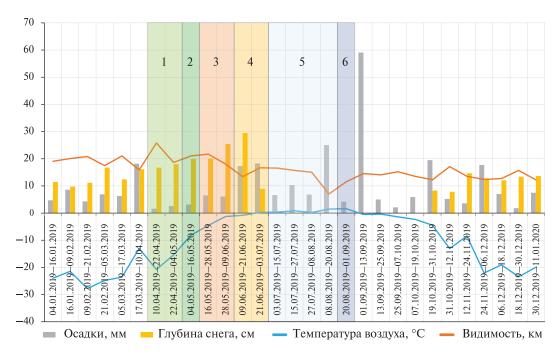


Рис. 9. Осреднённые метеорологические показатели за 2019 г. (Baldina et al., 2020)

Заключение

Ввиду тенденции к потеплению климата особое место занимает выбор индикаторов для оценки состояния и динамики наземных экосистем Арктики. Такими индикаторами могут служить интерферометрическая когерентность и метеорологические параметры: количество осадков, температура воздуха, глубина снега и видимость. В ходе изучения их корреляции были сделаны выводы о характере изменения поверхности о. Визе в зависимости от погодных условий, которые в перспективе можно адаптировать на другие арктические территории.

Проведённая работа свидетельствует о зависимости изменений значений когерентности от погодных условий. Такая зависимость, за счёт использования мультивременного композита с когерентностью МТС, позволила выделить характерные особенности изменчивости поверхности в разное время года. Сезонные изменения отражаются на изображениях посредством перемены цветов на композите. Поверхность острова летом преимущественно белого цвета, что объясняется отсутствием снежного покрова и неменяющимся состоянием редкой растительности, а также стабильно высокой влажностью поверхности; зимой цвета варьируются от синего к фиолетовому. Всё это обусловлено изменением погодных условий. Антропогенные объекты на мультивременных композитах всегда жёлтого цвета, а имеющаяся растительность вдоль рек в самый тёплый период была оттенков зелёного.

Таким образом, анализ мультивременных композитов с когерентностью и проведённая по ним интерпретация цветов послужат базой для последующего картографирования территории о. Визе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-60221).

Литература

- 1. *Визе В. Ю.* Моря Советской Арктики: очерки по истории исследования. М.: Главсевморпути, 1948. 296 с.
- 2. *Виноградова Н. С.*, *Сосновский А. В.* Использование карт когерентности для повышения точности интерферограмм при обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой // Ural Radio Engineering J. 2018. Т. 2. № 1. С. 67–80. DOI: 10.15826/urej.2018.2.1.006.
- 3. Достовалов М. Ю., Трошко К. А. Экспериментальная оценка когерентности по амплитудным изображениям радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №. 2. С. 9—18. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18.
- 4. *Захаров А. И.*, *Яковлев О. И.*, *Смирнов В. М.* Спутниковый мониторинг Земли. Радиолокационное зондирование поверхности. М.: Красанд, 2012. 248 с.
- 5. Литау Н. А. Остров и Человек // Литау.ru. 16.08.2014. URL: https://litau.ru/2014/08/16/8946.
- 6. *Михайлюкова П. Г.*, *Захаров А. И.*, *Захарова Л. Н.* Районирование Толбачинского Дола на основе значений когерентности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 85–98. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98.
- 7. *Пиетранера Л.*, *Чезарано Л.*, *Бритти Ф.*, *Джентиле В.*, *Кантемиров Ю. И.* Новый продукт МТС, рассчитываемый по данным COSMO-SkyMed // Геоматика. 2012. № 1. С. 46—51.
- 8. *Романенко Ф. А.* Интенсивность геоморфологических процессов на островах и побережьях морей Карского и Лаптевых (по материалам наблюдений полярных станций) // Геоморфология. 2008. № 1. С. 56–64. DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64.
- 9. *Чимитдоржиев Т.Н.*, *Дмитриев А.В.*, *Дагуров П.Н.* Технология совместного анализа временных рядов изображений интерферометрической когерентности Sentinel-1 и вегетационного индекса по данным Sentinel-2 для мониторинга сельскохозяйственных полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 61—72. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72.
- 10. Amarsaikhan D., Ganzorig M., Ache P., Blotevogel H. The integrated use of optical and InSAR data for urban land-cover mapping // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28. No. 6. P. 1161–1171. DOI: 10.1080/01431160600784267.
- 11. Baldina E.A., Shirshova V. Yu., Zhdanova E. Yu., Characteristics of the Small Arctic Island of Vise (Kara Sea) Basing on 2019 Multi-season Sentinel-1 Data // European Polar Science Week. 26–30 Oct. 2020 / ESA. 2020. 15 р. Р. 7. URL: http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8189_Разработка_методики_построения_ЦМР_по_радиолокационным_данным_Sentinel.pdf.
- 12. Bartsch A., Pointner G., Ingeman-Nielsen T., Lu W. Towards Circumpolar Mapping of Arctic Settlements and Infrastructure Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 15. Art. No. 2368, DOI: 10.3390/rs12152368.
- 13. *Engdahl M. E.*, *Hyyppa J. M.* Land-cover classification using multitemporal ERS-1/2 InSAR data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 7. P. 1620–1628. DOI: 10.1109/TGRS.2003.813271.
- 14. Jacob A. W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J. M., Litzinger M., Kristen H., Mestre-Quereda A., Ziółkowski D., Lavalle M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge S., Praks J., Ban Y., Pottier E., Mallorquí Franquet J. J., Duro J., Engdahl M. E. Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 535–552. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- 15. *Jiang M.*, *Yong B.*, *Tian X.*, *Malhotra R.*, *Hu R.*, *Li Z.*, *Yu Z.*, *Zhang X.* The potential of more accurate InSAR covariance matrix estimation for land cover mapping // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 126. P. 120–128. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.02.009.
- 16. *Khalil R. Z.*, *Haque S.* InSAR coherence-based land cover classification of Okara, Pakistan // The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science. 2018. V. 21. P. S23–S28. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.08.005.
- 17. *Ma G.*, *Zhao Q.*, *Wang Q.*, *Liu M.* On the Effects of InSAR Temporal Decorrelation and Its Implications for Land Cover Classification: The Case of the Ocean-Reclaimed Lands of the Shanghai Megacity // Sensors. 2018. V. 18. No. 9. P. 2939, DOI: 10.3390/s18092939.
- 18. *Sharov A. I.* Online Atlas of Glacier Fluctuations in the Eurasian High Arctic. 2012. URL: http://dib.joan-neum.at/maires/index.php?page=atlas (accessed 25.12.2020).
- 19. *Srivastava H. S.*, *Patel P.*, *Navalgund R. R.* Application potentials of synthetic aperture radar interferometry for land-cover mapping and crop-height estimation // Current Science. 2006. V. 91. No. 6. P. 783–788.
- 20. *Touzi R.*, *Lopes A.*, *Bruniquel J.*, *Vachon P. W.* Coherence estimation for SAR imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1999. V. 37. No. 1. P. 135–149. DOI: 10.1109/36.739146.
- 21. Vicente-Guijalba F., Jacob A., Lopez-Sanchez J. M., Lopez-Martinez C., Duro J., Notarnicola C., Ziolkowski D., Mestre-Quereda A., Pottier E., Mallorquí J. J., Lavalle M., Engdahl M. Sincohmap: Land-cover and vegetation

- mapping using multi-temporal Sentinel-1 interferometric coherence // 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2018. P. 6631–6634. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517926.
- 22. Wang L., Marzahn P., Bernier M., Ludwig R. Mapping permafrost landscape features using object-based image classification of multi-temporal SAR images // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2018. V. 141. P. 10–29. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.026.
- 23. *Yun H. W.*, *Kim J. R.*, *Choi Y. S.*, *Lin S. Y.* Analyses of Time Series InSAR Signatures for Land Cover Classification: Case Studies over Dense Forestry Areas with L-Band SAR Images // Sensors. 2019. V. 19. No. 12. Art. No. 2830. DOI: /10.3390/s19122830.

The seasonal changes investigation of Vize Island surface for the mapping purposes using a multi-temporal coherence composite (MTC)

V. Yu. Shirshova 1,2, E. A. Baldina 1

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: baldina@geogr.msu.ru Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia E-mail: vshirshova.msu@yandex.ru

Radar interferometry methods are widely used to create and update digital elevation maps and to study the movements of the Earth's surface. However, radar interferometry can also be used in many other applications, in particular for monitoring seasonal variability of hard-to-reach areas. Small Arctic islands are "white spots" on maps, due to the fact that since the 1950s the cartographic information on them has not been updated, and its updating with the use of ground measurements or images in the optical range is very labor- and resource-intensive. Meanwhile, in the conditions of global climate change, such islands are the most susceptible to transformations. Small Arctic islands can therefore serve as markers of warming processes, for which it is necessary to designate indicators for monitoring environmental changes. The presented work demonstrates the application of interferometric coherence to study seasonal variability. The multitemporal coherence composite (MTC), widely used as a change indicator for agricultural areas, was applied to assess changes in Arctic Vise Island. With the help of the multitemporal composite, the characteristic features of seasonal surface variability at different times of the year were determined on the example of Vise Island. For this purpose, all available interferometric radar data from Sentinel-1 satellite on the territory of the island were processed. Vise (a total of 88 images). A detailed analysis of the MTC composites was performed for 2019, the year for which the largest number of coherence maps was obtained, which was 26. We obtained data on the periods of ice-free water area closest to the island and snow-free surface over the past five years, provided by Sentinel-1 surveys. The conducted study will serve as a basis for creating thematic maps for the territory of Vise Island in the future.

Keywords: satellite radar interferometry, Sentinel 1, coherence, MTC composite, Arctic

Accepted: 16.06.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91

References

- 1. Vize V. Yu., *Morya Sovetskoi Arktiki: ocherki po istorii issledovaniya* (Seas of the Soviet Arctic: Essays on the History of Research), Moscow: Glavsevmorput', 1948, 296 p. (in Russian).
- 2. Vinogradova N. S., Sosnovsky A. V., Coherence maps application for InSAR data accuracy improving, *Ural Radio Engineering J.*, 2018, Vol. 2, No. 1, pp. 67–80 (in Russian), DOI: 10.15826/urej.2018.2.1.006.
- 3. Dostovalov M. Yu., Troshko K. A., An experimental estimation of coherence using magnitude Sentinel-1 synthetic aperture radar images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No 2, pp. 9–18 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-9-18.

- 4. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli. Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite Earth observation. Radar remote sensing of the surface), Moscow: Krasand, 2012, 248 p. (in Russian).
- 5. https://litau.ru/2014/08/16/8946.
- 6. Mikhaylyukova P. G., Zakharov A. I., Zakharova L. N., Zoning of the Tolbachinsky Dol based on InSAR coherence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 85–98 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-85-98.
- 7. Pietranera L., Cesarano L., Britti F., Gentile V., Kantemirov Y., New MTC product based on COSMO-SkyMed data, *Geomatika*, 2012, No. 1, pp. 46–51 (in Russian).
- 8. Romanenko F.A., The geomorphic processes intensiveness on the islands and coasts of the Kara and Laptev seas (on the base of polar stations data), *Geomorfologiya*, 2008, No. 1, pp. 56–64 (in Russian), DOI: 10.15356/0435-4281-2008-1-56-64.
- 9. Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N., Technology of joint analysis of Sentinel-1 interferometric coherence time series and vegetation index based on Sentinel-2 data for monitoring agricultural fields, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 61–72 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-61-72.
- 10. Amarsaikhan D., Ganzorig M., Ache P., Blotevogel H., The integrated use of optical and InSAR data for urban land-cover mapping, *Intern. J. Remote Sensing*, 2007, Vol. 28, No. 6, pp. 1161–1171, DOI: 10.1080/01431160600784267.
- 11. Baldina E.A., Shirshova V.Yu., Zhdanova E.Yu. *Characteristics of the Small Arctic Island of Vise (Kara Sea) Basing on 2019 Multi-season Sentinel-1 Data*, European Polar Science Week, ESA, 2020, 15 p., p. 7, available at: http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8189_Paзpaботка_методики_построения_ЦМР_по_радиолокационным_данным_Sentinel.pdf.
- 12. Bartsch A., Pointner G., Ingeman-Nielsen T., Lu W., Towards Circumpolar Mapping of Arctic Settlements and Infrastructure Based on Sentinel-1 and Sentinel-2, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 15, Art. No. 2368, DOI: 10.3390/rs12152368.
- 13. Engdahl M. E., Hyyppa J. M., Land-cover classification using multitemporal ERS-1/2 InSAR data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, Vol. 41, No. 7, pp. 1620–1628, DOI: 10.1109/TGRS.2003.813271.
- 14. Jacob A. W., Vicente-Guijalba F., Lopez-Martinez C., Lopez-Sanchez J. M., Litzinger M., Kristen H., Mestre-Quereda A., Ziółkowski D., Lavalle M., Notarnicola C., Suresh G., Antropov O., Ge S., Praks J., Ban Y., Pottier E., Mallorquí Franquet J.J., Duro J., Engdahl M. E., Sentinel-1 InSAR Coherence for Land Cover Mapping: A Comparison of Multiple Feature-Based Classifiers, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, Vol. 13, pp. 535–552, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2958847.
- 15. Jiang M., Yong B., Tian X., Malhotra R., Hu R., Li Z., Yu Z., Zhang X., The potential of more accurate InSAR covariance matrix estimation for land cover mapping, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, Vol. 126, pp. 120–128, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.02.009.
- 16. Khalil R. Z., Haque S., InSAR coherence-based land cover classification of Okara, Pakistan, *The Egyptian J. Remote Sensing and Space Science*, 2018, Vol. 21, pp. S23–S28, DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.08.005.
- 17. Ma G., Zhao Q., Wang Q., Liu M., On the Effects of InSAR Temporal Decorrelation and Its Implications for Land Cover Classification: The Case of the Ocean-Reclaimed Lands of the Shanghai Megacity, *Sensors*, 2018, Vol. 18, No. 9, Art. No. 2939, DOI: 10.3390/s18092939.
- 18. Sharov A. I., *Online Atlas of Glacier Fluctuations in the Eurasian High Arctic*, 2012, available at: http://dib.joanneum.at/maires/index.php?page=atlas (accessed 25.12.2020).
- 19. Srivastava H. S., Patel P., Navalgund R. R., Application potentials of synthetic aperture radar interferometry for land-cover mapping and crop-height estimation, *Current Science*, 2006, Vol. 90, No. 6, pp. 783–788.
- 20. Touzi R., Lopes A., Bruniquel J., Vachon P.W., Coherence estimation for SAR imagery, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1999, Vol. 37, No. 1, pp. 135–149, DOI: 10.1109/36.739146.
- Vicente-Guijalba F., Jacob A., Lopez-Sanchez J. M., Lopez-Martinez C., Duro J., Notarnicola C., Ziolkowski D., Mestre-Quereda A., Pottier E., Mallorquí J. J., Lavalle M., Engdahl M., Sincohmap: Land-cover and vegetation mapping using multi-temporal Sentinel-1 interferometric coherence, 2018 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2018, pp. 6631–6634, DOI: 10.1109/ IGARSS.2018.8517926.
- 22. Wang L., Marzahn P., Bernier M., Ludwig R., Mapping permafrost landscape features using object-based image classification of multi-temporal SAR images, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, Vol. 141, pp. 10–29, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.03.026.
- 23. Yun H. W., Kim J. R., Choi Y. S., Lin S. Y., Analyses of Time Series InSAR Signatures for Land Cover Classification: Case Studies over Dense Forestry Areas with L-Band SAR Images, *Sensors*, 2019, Vol. 19, No. 12, Art. No. 2830, DOI: /10.3390/s19122830.