

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ширшова Вера Юрьевна

Методики применения результатов радиолокационной интерферометрии в географических исследованиях (на примере малых арктических островов и Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии)

1.6.20 – Геоинформатика, картография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

- Научный руководитель** – *Балдина Елена Александровна, кандидат географических наук, доцент*
- Официальные оппоненты**
- *Чимитдоржиев Тумэн Намжилович, доктор технических наук, доцент, профессор РАН, заведующий сектором, главный научный сотрудник Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук*
 - *Пьянков Сергей Васильевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета*
 - *Харченко Сергей Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова*

Защита диссертации состоится «14» ноября 2024 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.4/3137>

Автореферат разослан «4» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



Е. Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. *Радиолокационная спутниковая интерферометрия* – один из методов дистанционного зондирования Земли, позволяющий получить высокоточную информацию о рельефе местности. Методом *дифференциальной интерферометрии* рассчитываются изменения высоты земной поверхности. Результаты съемок обеспечивают создание цифровых моделей рельефа/местности (ЦМР/ЦММ) и цифровых карт смещений. Интерферометрическая обработка основана на совмещении минимум двух радиолокационных изображений, полученных при одинаковых технических условиях съемки в разное время (исключение тандемный режим съемки – получение одновременно пары изображений). Ввиду этого актуальным направлением в наши дни стало развитие мониторинговых методов для таких задач, как определение изменений земной поверхности (*Верба и др., 2019*). Помимо широко применяемых результатов интерферометрической обработки – ЦМР и карт смещений – создается мультитременной композит с когерентностью МТС (*от англ. The Multitemporal Coherence Composite*). Это геоизображение формируется из промежуточных результатов обработки радиолокационных данных: изображений амплитуды и когерентности. Интерферометрические методы до недавнего времени были реализованы только на данных с зарубежных космических аппаратов, однако, на сегодняшний день в Российской Федерации запущен первый гражданский спутник с радиолокатором с синтезированной апертурой «Кондор-ФКА» №1 и в ближайшее время данные станут доступны для широкого круга потребителей. На нём запланирован интерферометрический режим съемки и стоит множество задач в целях социально-экономического развития Российской Федерации (*Федеральная космическая программа, 2016*). Формирование методик применения интерферометрических информационных продуктов для географических исследований является актуальной и приоритетной научной задачей для картографов и геоинформатиков.

Применение радиолокационных данных особенно актуально для исследования и картографирования арктических островов малой площади (до 500 км²), на которых изменение климата в Арктике сказывается наиболее заметно, а также для районов активного вулканизма, где для мониторинга изменения высоты поверхности требуются надежные методики обработки интерферометрических данных.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и усовершенствовании методик применения радиолокационной спутниковой интерферометрии для изучения географических объектов на примере картографирования современного состояния поверхности малых арктических островов и мониторинга их сезонной динамики, а также выявления изменений высоты земной поверхности на территориях активного вулканизма с учетом природных условий и метеорологической обстановки.

Достижение сформулированной цели предусматривает выполнение следующих **задач исследования**:

– проанализировать тенденции развития мирового радиолокационного ДЗЗ: существующие и перспективные съемочные системы, возможности применения интерферометрических информационных продуктов в географических исследованиях;

– разработать методику применения информационных продуктов интерферометрической когерентности для мониторинга сезонных изменений земной поверхности и картографирования малых арктических островов на основе интерпретации цветов на МТС; апробировать ее на примере о. Визе: создать базу радиолокационных изображений, оптимизировать процесс их обработки, проанализировать влияние метеорологических параметров на результат;

– обосновать методический подход к выбору параметров интерферометрической пары для определения смещений земной поверхности на территориях активного вулканизма методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии на примере Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии и доказать необходимость мониторинга метеорологических параметров (осадков, температуры и направления ветра) при интерферометрической обработке с целью выявления многолетних изменений.

Объектом исследования являются физико-географические условия и свойства местности, оказывающие влияние на результаты обработки радиолокационной интерферометрии. **Предметом** выступает метод радиолокационной спутниковой интерферометрии в применении для географических исследований и картографирования.

Фактический материал, личный вклад автора. В основе работы лежат исследования автора, проводимые с 2017 года на кафедрах картографии и геоинформатики Института Наук о Земле СПбГУ и географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также практическая деятельность с 2019 года в Научном центре оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» в отделе целевого применения спутников ДЗЗ радиолокационного наблюдения. Основные исходные материалы в работе – радиолокационные данные, полученные со спутника Sentinel-1, и программные комплексы для обработки радиолокационных данных SNAP и для геоинформационного анализа QGIS. Используемые данные ДЗЗ и программные комплексы являются свободно распространяемыми, соответственно описываемые автором методы обработки и методики становятся доступными для широкого круга географов. Материалы диссертации использованы в проектах, поддержанных грантами РФФИ № 18-05-60221 и РНФ № 21-17-00216.

Методология и методика. В основе работы лежат научно-методические принципы картографии и геоинформатики, разработанные К.А. Салищевым, А.М. Берлянт, Е.Г. Капраловым, В. С. Тикуновым, И.К. Лурье. Методологическая база исследования опирается на методы географического дешифрирования аэрокосмических снимков, разработанные Л.Е. Смирновым, Ю.Ф. Книжниковым, В.И. Кравцовой, И.А. Лабутиной, методы радиолокационного зондирования и обработки радиолокационных данных, созданные В.С. Верба, Л.Б. Неронским, Г. Зибкером, Д. Массонетом, Я. Вудхаусом, Л.А. Школьным, Р.Ф.

Ханссеном, А.И. Захаровым, Р. Бамлером, А. Фарретти, и методики их применения в географических исследованиях и картографировании, предложенные Е.А. Балдиной, Ю.И. Кантемировым, Т.Н. Чимитдоржиевым, К.А.Трошко, П.Г. Илюшиной (Михайлюковой) и др.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на основе мультिवременных композитов с когерентностью сформирована методика картографирования природно-территориальных комплексов малых арктических островов и мониторинга сезонных изменений поверхности.

2. Впервые исследована и обоснована необходимость выбора параметров радиолокационной съемки в зависимости от физико-географических условий местности, а также учета метеорологических параметров, что позволило усовершенствовать методический подход при обработке данных методом дифференциальной интерферометрии.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная методика применения МТС композитов для картографирования малых арктических островов, апробирована на территории о. Визе, в дополнение к ней также сформированы:

- система интерпретации цветов на МТС;
- дешифровочные признаки изменений состояния местности и их цветовая интерпретация по МТС;
- характеристики межсезонных МТС для природно-территориальных единиц о. Визе.

Составленная карта природно-территориальных комплексов о. Визе служит примером применения разработанной методики, что открывает перспективу для проведения работ по обновлению картографической информации на территории других арктических островов, а сами МТС дают возможность для отслеживания многолетних изменений с учетом сезонных изменений поверхности.

Методический подход определения изменений высот земной поверхности в пределах Узон-Гейзерной вулканно-тектонической депрессии стал основой для формирования методики, разработанной в разных тестовых районах по данным Sentinel-1. Методика является универсальным инструментом при работе с интерферометрическими данными и внедрена при планировании интерферометрической съемки и последующей обработке радиолокационной информации с «Кондор-ФКА» №1 и перспективных отечественных спутниках.

Защищаемые положения:

1. Мультिवременной композит с когерентностью является новым видом геоизображений и представляет собой как источник для картографирования, так и инструмент для мониторинга сезонных и кратковременных состояний земной поверхности.

2. Методика оценки учета природных условий при двухпроходной дифференциальной интерферометрии позволяет адаптировать и усовершенствовать классический подход при выборе данных и порядке их обработки для природных территорий.

3. Учет метеорологических показателей и параметров съемки является при интерферометрической обработке радиолокационных изображений гарантией получения достоверных результатов мониторинга.

Степень достоверности. Экспертное дешифрирование снимков высокого разрешения в видимом диапазоне подтверждает достоверность выделения природно-территориальных единиц о. Визе с применением МТС композитов. Надежность методики учета физико-географических условий при определении изменения высоты земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии подтверждается стабильностью получаемых результатов при разных конфигурациях радиолокационной съемки спутника Sentinel-1 за несколько лет. Выявленные незначительные изменения высоты земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии, не противоречат предшествующим геофизическим обследованиям (Кугаенко, Салтыков, 2009; Kiryukhin, 2016; Чебров и др., 2019), что подтверждает достоверность результатов обработки.

Апробация работы. Результаты исследования и основные положения диссертации представлены автором на открытой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2020, 2022); международной конференции *European Polar Science Week* (Дания, 2020); международном арктическом саммите ASSW 2021 (Португалия, 2020); XXXII Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред», (Санкт-Петербург, 2021); *FRINGE 2021* (Нидерланды, 2021); X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», (Москва, 2021); научной конференции «Ломоносовские чтения-2021» (Москва, 2021); на всероссийской конференции с международным участием «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования – в практику берегопользования» (Калининград, 2022); IX Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (Красноярск, 2022); IV Всероссийской научно-практической конференции «GeCa» (Санкт-Петербург, 2019, 2022); XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU-2022 (Москва, 2022); XIV Международной научно-практической конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. Навигация» (Москва, 2023); VII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (Хабаровск, 2023); XI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ» (Москва, 2023).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 рецензируемых изданиях (журналах) из списка Scopus, WoS и RSCI, 8 статей в сборниках и материалах всероссийских и международных конференций и 8 тезисов докладов. Во всех работах вклад автора является определяющим. Постановка научных задач обработка и интерпретация полученных данных, подготовка и предоставление их в печать проводились

непосредственно соискателем. При подготовке текста диссертации использован текст публикаций, в которых, согласно Положению о присуждении учёных степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования. Личный вклад автора является определяющим, им подготовлен текст работы, графически материалы, проведено представление рукописи в редакцию и работа с рецензентами (Ширшова, Балдина, 2021; Ширшова и др.2023).

Структура и объем работы. Помимо Введения и Заключения, диссертационная работа состоит из четырех глав, включающих 44 рисунка и 9 таблиц. Объем диссертации составляет 209 страниц, основной текст изложен на 168 страницах. В работе содержится 6 приложений. Список литературы содержит 307 наименований (в том числе 205 – на иностранном языке).

Благодарности. Автор выражает благодарность за неоценимую помощь в процессе исследования своему научному руководителю *к.г.н. Е.А. Балдиной*, всему коллективу кафедры картографии и геоинформатики и коллективу лаборатории аэрокосмических методов в особенности, *д.г.н. В.И. Кравцовой*, заведующему лабораторией *к.г.н. М.В. Зимину* и *к.г.н. П.Г. Илюшиной*, заведующей кафедрой *д.г.н. И.К. Лурье*; за ценные консультации *к.г.н. Ф.А. Романенко*, *к.г.-м.н. Е.И. Пижанковой*, *к.г.н. Е.В. Лебедевой*, *к.г.н. Е.Ю. Ждановой*, *к.т.н. Е.А. Костюку*, а также всему коллективу отдела целевого применения радиолокационных космических систем и руководству Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» за поддержку и помощь в участии в конференциях, посвящённых ДЗЗ. Также особо признателен *М.А. Ширяеву*, студенту кафедры картографии и геоинформатики за картографический и аналитический вклад в создание карты ПТК о. Визе, *В.А. Халманову*, заместителю директора ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник» за предоставление архивных материалов, *к.б.н. М.В. Гаврило* (заместитель директора национального парка Русская Арктика по научной работе «ААНИИ») за фотографии о. Визе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Методы радиолокационной спутниковой интерферометрии (РСИ) в географических исследованиях. Обзор литературы

Методы радиолокационной интерферометрии находятся в постоянном развитии, особенно в области дифференциальной интерферометрии, позволяющей определять смещения земной поверхности. В главе приведена краткая история появления и применения РСА в мире, а также комплексный анализ основных вопросов обработки радиолокационной спутниковой интерферометрии и решаемых по этим данным тематических задач.

Космический аппарат с радиолокатором с синтезированной апертурой с 50-х годов прошлого века применялся в интересах изучения Луны и ближайших планет Солнечной системы. В 1978 г. стартовала первая программа по съемке Земли. Интерферометрия зарекомендовала себя как надежный метод получения ЦМР, благодаря которому были сформированы глобальные покрытия, сформированные по результатам радиолокационной

съемки из космоса: SRTM и WorldDEM. Развитие интерферометрических методов позволило открыть еще одно направление в исследованиях – мониторинг смещений поверхности методами дифференциальной интерферометрии.

Информационные продукты радиолокационной спутниковой интерферометрии в географических исследованиях, как правило, применяются в целях получения данных о характере рельефа и его изменениях. Однако, все чаще встречаются работы по применению промежуточного продукта интерферометрической обработки – когерентности. Когерентность изначально служила «гарантом» качества при интерферометрической обработке, представляя собой коэффициент сходства двух изображений. Этот параметр принимает значения от 0 до 1, характеризуя степень изменения местности. Принято считать, что от 0 до 0,3 – низкая когерентность, от 0,4 до 0,6 – средняя и от 0,7 до 1 – высокая. Чувствительность когерентности к изменениям на земной поверхности позволяет анализировать ее с дополнительными географическими данными, такими как метеорологические параметры, и устанавливать их взаимосвязь (Захаров и др., 2017; Baldina et al., 2019). Изображения когерентности широко применяют в таких географических задачах как: анализ растительного покрова (Srivastava et al., 2006; Engdahl, Нуурпа, 2003; Amarsaikhan et al., 2007; Ma et al., 2018;) и классификация ландшафтов (Vicente-Guijalba et al., 2018). Метод МТС, основанный на использовании когерентности и амплитуды обратного рассеяния, применяется для тематического анализа и картографирования состояния территории.

Высокие значения когерентности являются гарантом качества интерферометрической обработки пары снимков при формировании ЦМР и определении смещений земной поверхности. Низкие значения когерентности представляют собой один из основных источников ошибок при интерферометрической обработке (Bamler, Hartl, 1998; Pepe, Calò, 2017). В то же время изменения, обусловленные деформациями земной поверхности, также представляют собой низкие значения когерентности. Один из факторов снижения когерентности – большие значения временной базовой линии (временного интервала), способствующие временной декорреляции – различия в состоянии атмосферы при съемках (Massom, Lubin, 2006; Gupta, 2017). Следующим фактором, приводящим к понижению значений когерентности – различие в характеристиках рассеивания сигнала со временем (Hanssen, 2001; Pepe, Calò, 2017), обусловленное изменениями в состоянии растительного покрова (вегетация, движение листьев из-за ветра), антропогенной деятельностью, замерзанием и оттаиванием грунта (Bamler, Hartl, 1998).

Таким образом, когерентность представляет интерес для географических исследований как составной компонент при формировании МТС, ранее не использованный для арктического региона, и как коэффициент корреляции интерферометрической пары, значения которого влияют на корректность результата обработки.

Глава 2. Исходные пространственные данные и программное обеспечение для интерферометрической обработки

В главе проанализирован мировой опыт географических исследований с привлечением радиолокационной информации, который показывает, что интерферометрическую съемку для построения ЦМР предпочтительнее проводить в L-диапазоне, для определения смещений – в X- и C-диапазонах. Для задач, основанных на информационных продуктах (когерентность), диапазон не так однозначен, поэтому использование свободно распространяемых данных Sentinel-1 (С-диапазон) является актуальным с точки зрения расширения возможностей их применения в географических исследованиях.

Особенность интерферометрической обработки снимков заключается в необходимости привлечения дополнительной (пространственной) информации и последующем ее влиянии на качество результата. К дополнительной информации относятся: ЦМР и параметры тропосферы. ЦМР применяется для точного совмещения изображений – для достижения субпиксельной точности, необходимой для интерферометрической обработки. Параметры тропосферы позволяют спрогнозировать когерентность между изображениями и оценить корректность полученных информационных продуктов после обработки. Современное программное обеспечение поддерживает подгрузку вспомогательной ЦМР при обработке. В то же время учет параметров тропосферы определяется при анализе данных с метеостанций.

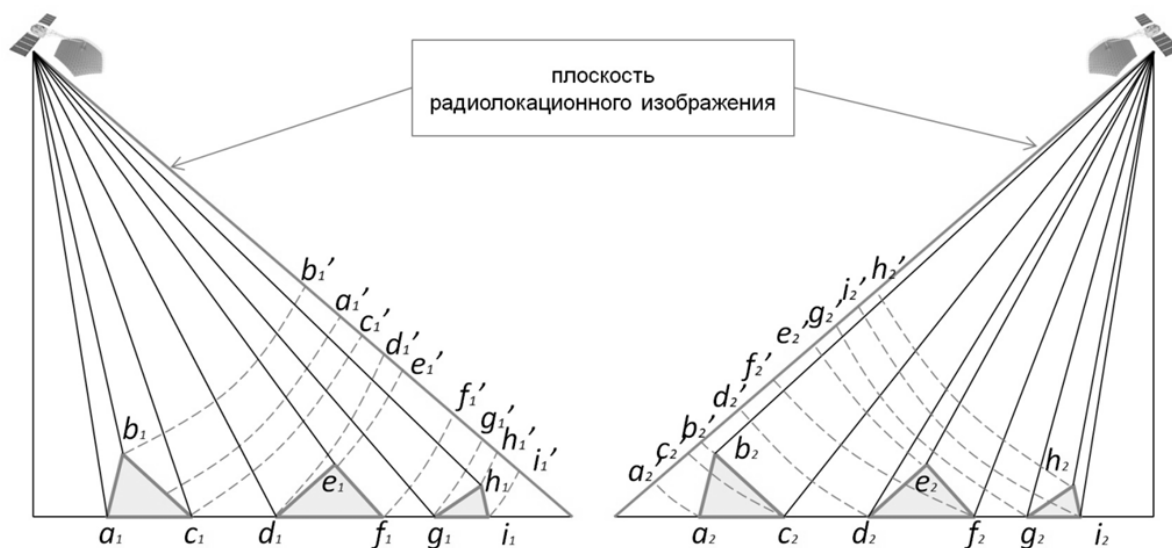


Рисунок 1. Геометрия радиолокационного изображения: левая – восходящий виток, правая – нисходящий виток, где из-за эффекта переналожения b_1', h_2', e_2' на радиолокационном изображении отображается ближе, чем a_1', i_2', f_2' соответственно; не освещаются радиолокатором подножья i_1', a_2' , находящиеся в радиолокационной тени вершин h_1', b_2' ; геометрические искажения, связанные с растяжением и сжатием изображения, которые заменены на отрезках между вершинами и подножьями треугольников (a_1b_1, b_1c_1, c_1d_1 и т.д.)

Анализ параметров снимков, важных для интерферометрической обработки, подтвердил тезис о первостепенной роли предварительной оценки природных условий местности при выборе параметров съемки. Так, выбор угла визирования и витка напрямую

связаны с рельефом местности, без его учета нет понимания того, каких объектов земной поверхности коснутся геометрические эффекты радиолокационных изображений. Направление съемки (восходящее или нисходящее) определяет геометрические эффекты: переналожения вершин и наличия радиолокационной тени (см. рис. 1). При геометрии съемки с восходящего витка склон b_1 изображается с преувеличенной длиной, а при съемке с нисходящего склон b_2 – наоборот. При этом точки подножий i_1, a_2 находятся в радиолокационной тени вершин h_1, b_2 .

Для разработки методик выбрано ПО SNAP, которое создано в первую очередь для обработки данных с Sentinel-1.

Обзор литературы показал, что исходные радиолокационные снимки следует выбирать после анализа характеристик земной поверхности исследуемой территории – экспозиции склонов, углов наклона местности, перепадов высот, сезонной изменчивости и погодных условий в момент съемки. Параметры радиолокационных изображений – диапазон длин волн, пространственное разрешение, поляризация, угол визирования и направления съемки, пространственная базовая линия и когерентность – определяются для конкретной тематической задачи и территории исследования.

Глава 3. Методика применения мультिवременного композита с когерентностью (МТС) для мониторинга и картографирования малых арктических островов (на примере о. Визе, Карское море)

Заметное увеличение среднегодовой температуры воздуха в Арктике приводит к увеличению периода открытой воды, разрушению берегов и появлению обширных отмелей, изменениям ландшафтов за счет таяния подземных льдов и «позеленения тундры» (Алексеев, 2013; Огородов и др., 2022; Тишков и др., 2015). В большей степени эти факторы оказывают влияние на небольшие арктические острова, которые ранее были окружены мощными ледовыми полями значительную часть года. Ввиду малого размера и суровых природных условий такие острова малоизучены и слабо представлены на тематических картах, а топографические не обновлялись с 50-х гг. прошлого века. Задача картографирования современного состояния ландшафтов таких островов и отслеживания их сезонной изменчивости актуальна, так как обеспечивает основу для прослеживания многолетней динамики, обусловленной изменениями климата. Так, на о. Визе повышение температуры за последние 10 лет составляет 1,5 °С (Степина, Подрезова, 2023), что приводит к неизбежным изменениям в природно-территориальных комплексах. Одним из методов определения качественных изменений поверхностей является мультिवременной композит с когерентностью (МТС). Наличие действующей метеорологической станции на о. Визе и обеспечение актуальной метеорологической информацией на моменты радиолокационной съемки определяет выбор его для интерпретации МТС на территории малых арктических островов.

Для формирования изображений интерферометрической когерентности и затем мультिवременного композита на ее основе (МТС) для поверхности острова Визе были использованы комплексные радиолокационные данные со спутника Sentinel-1B с согласованной горизонтальной поляризацией. Количество снимков почти за 6 лет активного существования спутника Sentinel-1B (с декабря 2021 года по официальному заявлению ЕКА спутник вышел из строя) составило 121 изображение и, соблюдая минимальную временную декорреляцию в 12 дней, из них было сформировано 84 изображения когерентности. Обработка выполнялась в программном обеспечении SNAP и включала в себя ряд стандартных процедур для расчета когерентности.

Формирование мультिवременных композитов с когерентностью

Мультिवременной композит с когерентностью представляет собой цветное изображение, составленное из двух амплитудных радиолокационных изображений, полученных с интервалом 12 дней в одинаковой геометрии съемки, и изображения когерентности, сформированного по этим же исходным снимкам (рис. 2).

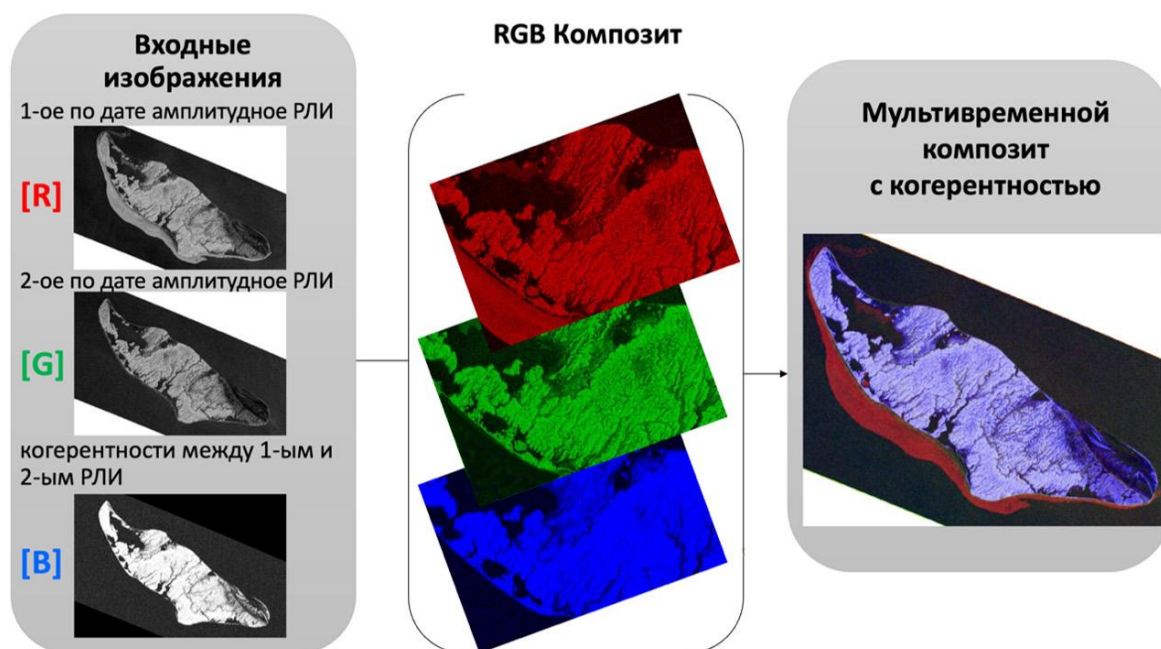


Рисунок 2. Формирование МТС-композиата. Остров Визе

Интерпретация цветов на МТС

Принципы интерпретации цветов на МТС были ранее разработаны (Пиетранера и др., 2012; Дмитриев и др., 2014) для лесных и сельскохозяйственных районов зоны умеренного климата. Однако цвета, получаемые на композитах для малых арктических островов, отличаются, они остаются такими же только для антропогенных металлических объектов. Интерпретация цветов изображения производилась на примере о. Визе при анализе физико-географических описаний местности и метеорологической информации. Важную роль играла возможность установления вида объекта по высокодетальной космической съемке в видимом диапазоне (съемка со спутника Sentinel-2, общедоступная космическая подложка ESRI World Imagery). В комплексе это позволило выявить закономерности проявлений в

цветах изображения разных объектов местности изменений за 12 дней, обусловленных метеорологическими факторами (рис. 3).

Цвет на МТС	Временной период	Дешифрируемые объекты	Формирование цвета МТС-композиата		
			[R] 1-ая по дате амплитуда	[G] 2-ая по дате амплитуда	[B] Значение когерентности
	С конца июня по конец августа	Плоские приводораздельные участки с редкой растительностью	Высокая	Высокая	Высокое
	С конца мая по конец июня	Днища долин	Средняя	Высокая, средняя	Средние
	С конца сентября по середину октября	Образование льда в лагунах; песчаные пляжи			
	С марта по конец мая	Плоские приводораздельные участки, днища долин	Низкая	Средняя	Средние
	С конца сентября по середину ноября	Плоские приводораздельные участки	Высокая	Низкая	Средние
	С конца июня по конец августа	Морские террасы	Низкая	Низкая	Средние
	С середины ноября по март	Плоские приводораздельные участки			
	Весь год	Термоэрозионные промоины			
	Весь год	Антропогенные объекты, каменистые гряды	Высокая, средняя	Высокая	Высокое

Рисунок 3. Интерпретация цветов на геоизображении МТС

Характеристика сезонных изменений поверхности по МТС

Изменения цвета отображаемых объектов и процессов, в разные сезоны приведено для двух фрагментов о. Визе (рис. 5), которые выделены на высокодетальном космическом снимке (рис. 4).

Синий цвет характерен в течение года для всех поверхностей, имеющих низкую шероховатость, из-за слагающего ее плотного дисперсного грунта (рис. 5). В зависимости от выпадения осадков между съемками значения когерентности меняется, что выражается в разных оттенках синего цвета на зимних композиатах. Плоские приводораздельные поверхности, покрытые сухим снегом зимой, представляющие собой так же слабо шероховатую структуру, отображаются в синих цветах (рис. 5д). С ноября по май реки острова покрыты льдом, и отчетливо видны только днища долин и термоэрозионные промоины в пределах плоской приводораздельной поверхности (рис. 5а). С конца июня по

конец августа, когда поверхность свободна от снега, особенно темным синим цветом выделяются подтапливаемые участки суши, лишенные растительности (рис. 5б, в).

Приводораздельные поверхности летом покрыты незначительной растительностью, которая дает объемное рассеивание сигнала и как следствие высокие значения амплитуд: при отсутствии осадков и перепадов температур за интервал между съёмками, получаются высокие значения когерентности, что на МТС выражается в белом цвете этих

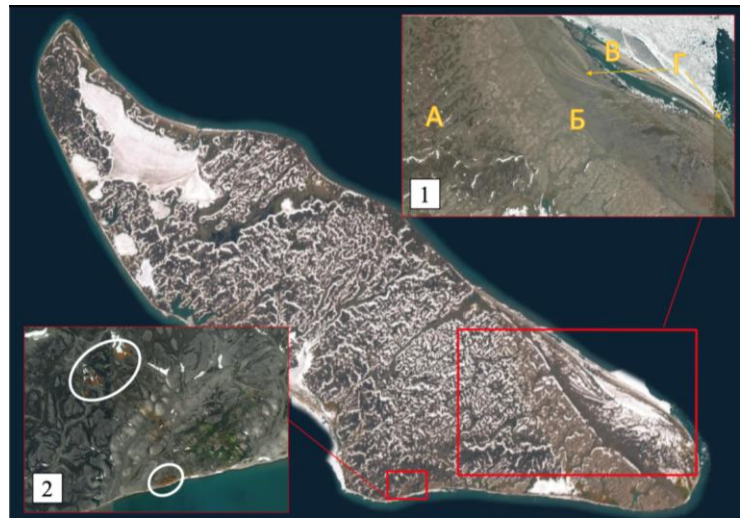


Рисунок 4. О. Визе на общедоступной космической подложке ESRI World Imagery, где красными рамками выделены 2 фрагмента: 1 – участок острова, включающий А – приводораздельные участки с термоэрозионными промоинами, Б – морская терраса, В – песчаный пляж на косе, Г – каменистые гряды; 2 – участок острова с постройками - выделены металлические объекты (сооружения, бочки)

участков. Такое состояние встречается только в летний период, когда достигается минимум осадков и поверхность острова свободна от снега (рис. 5в). Весной цвет приводораздельных поверхностей меняется на фиолетовый, который обусловлен слабо выраженными процессами таяния снега. Увлажненные поверхности, в одну из дат съемок, дают повышенное отражение сигнала и это приводит к различиям в значениях двух амплитуд МТС. Такие же процессы наблюдаются в днищах долин, но из-за их слабой шероховатости они отображаются более темными оттенками фиолетового (рис. 5а). Противоположная ситуация наблюдается в осеннее время, когда приводораздельные поверхности на короткое время приобретают розовый цвет, что объясняется выпадающими осадками в сочетании с резким наступлением отрицательных температур (рис. 5г).

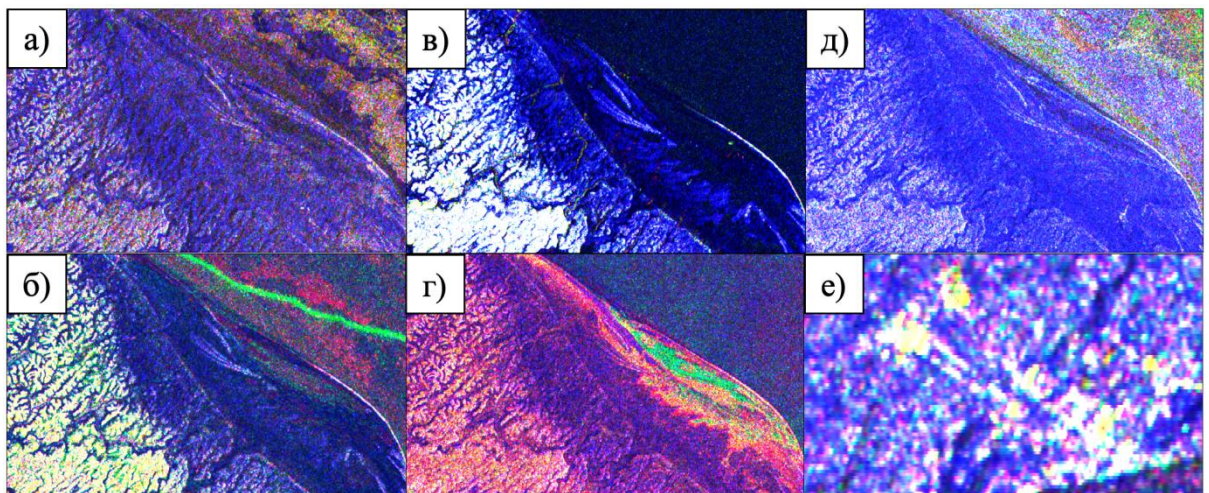


Рисунок 5. Фрагменты острова Визе на МТС, где 1-ый фрагмент: а) 16 мая – 28 мая; б) 3 июля – 15 июля; в) 8 августа – 20 августа; г) 25 сентября – 7 октября; д) 24 ноября – 6 декабря; 2-ой фрагмент: е) 16 мая – 28 мая

Жёлтый цвет распространен преимущественно на участках делювиально-солифлюкционных склонов, с появлением редкой растительности к началу июля, что приводит к увеличению яркости (значений амплитуды) в один из сроков. В этот период наблюдается и зелёный цвет на приводораздельных участках из-за увеличения растительной массы и соответственно шероховатости поверхности; появившаяся полоса льда также отображается зеленым цветом (рис. 5б). В осеннее время – с конца сентября по середину октября – жёлтый цвет также характерен для приводораздельной поверхности в результате выпадения осадков и соответствует участкам местности в разной степени подверженным увлажнению (рис. 5г). Жёлтый и зеленый цвета заметны в пределах современной морской террасы и пляжей в осеннее время. В конце августа, начале сентября фиксируются максимальные значения температуры и осадков.

Стабильный во все сезоны белый цвет с ярко-желтыми вкраплениями преимущественно характерен для метеорологической станции и построек, окруженных большим количеством металлических бочек: для антропогенных объектов характерны высокие значения амплитуды и высокая когерентность (рис. 5е). По высокой яркости отображаются также участки кос и побережья, сложенные крупнообломочным материалом (см. рис.5).

Мультивременные композиты с когерентностью и дешифрирование по ним природно-территориальных комплексов острова Визе

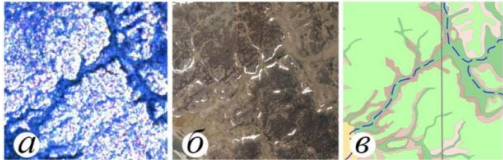
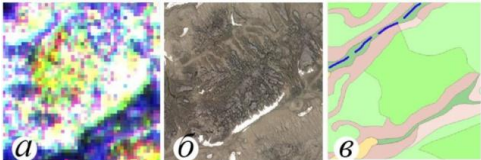
Визуальный метод дешифрирования сезонного состояния территории по МТС, с привлечением дополнительных источников пространственных данных, включая геоморфологическую схему (Романенко, 2008), позволил составить карту природно-территориальных комплексов острова Визе. Для арктических территорий интерпретация цветов проводилась при анализе метеорологической информации и физико-географических описаний местности, в результате чего была составлена таблица дешифровочных признаков ПТК на МТС композитах и снимке в видимом диапазоне для о. Визе (табл.1).

Таким образом, совмещение амплитудных изображений и изображения когерентности помогло лучше установить границы разных типов поверхности, за счет определяемых на них изменений. Было выявлено, что высокая когерентность фаз сигналов двух соседних по дате снимков на летний период сохраняется для большей части острова, в частности для поверхности равнин и валунно-галечных пляжей. Когерентность нарушается у водных поверхностей, а также у площадок, подверженных переувлажнению. Низкие значения когерентности наблюдаются и в тех местах, где объем растительности наибольший. Влияет на когерентность и сильная расчлененность поверхности криогенным микрорельефом – она приводит к уменьшению значений когерентности.

Машинно-визуальный метод дешифрирования может быть применен как оптимизирующий шаг при визуальном дешифрировании. Были проведены эксперименты по автоматической классификации МТС, но наличие спекл-шума на изображениях не позволяет выделять объекты малой площади (узкие долины, короткие участки склонов). Устранение

спекл-шума влечет за собой потери значимой информации, что не позволяет полагаться только на машинные методы. Ввиду невозможности автоматического выделения природно-территориальных комплексов по данным Sentinel-1 для оптимизации процесса опробован машинно-визуальный метод: автоматическое выделение классов по летним МТС и затем визуальное дешифрирование, что продемонстрировано в основном тексте работы.

Таблица 1. Интерпретация МТС композитов (фрагмент)*

1	<i>Денудационные равнины с термоэрозионными оврагами</i>	2	<i>Равнины с сильновыраженным криогенным полигональным микрорельефом</i>
			
	<p>Денудационные равнины в летний период характеризуются высокими значениями когерентности, что говорит о малом влиянии внешних факторов на данные участки в 12-дневный период. А сочетание выраженного полигонального микрорельефа и разреженной растительности, обуславливающие шероховатость поверхности, дают высокие амплитудные значения, в результате чего равнины приобретают на композитах МТС белый или близкие к белому цвета.</p>		<p>На некоторых композитных изображениях встречаются участки равнин с низкими значениями когерентности, но с высокими значениями амплитуд в оба срока, что обуславливает на композитах МТС желтый цвет. На материалах оптической съемки сверхвысокого разрешения в этих местах хорошо выделяются мелкие сильно раздробленные полигоны. Таким образом, снижения когерентности относятся к междуречным участкам с сильным криогенным расчленением рельефа, вследствие чего возникают искажения сигнала.</p>

* а) летний МТС композит; б) снимок в видимом диапазоне; в) карта ПТК о. Визе

Порядок реализации методики применения мультивременного композита с когерентностью для мониторинга и картографирования малых арктических островов

Применение МТС композитов продемонстрировано на примере решения двух задач исследования малых арктических островов: мониторинга сезонной изменчивости земной поверхности и картографирования ПТК.

Первым этапом вне зависимости от задачи, согласно предлагаемой методике, анализируются основные физико-географические условия местности и собираются существующие картографические источники для территории исследования.

Задача мониторинга сезонных изменений решается путем визуального анализа геоизображений МТС с использованием разработанной системы интерпретации цветов (см. рис. 3). Дешифрирование природно-территориальных комплексов имеет два способа

решения: визуальный или машинно-визуальный. Так как база дешифровочных признаков была составлена для о. Визе, то при картографировании других малых арктических островов возможно расширение набора природно-территориальных единиц на МТС композитах.

Итак, мультивременные композиты с когерентностью представляют собой новый источник пространственных данных для мониторинга сезонных изменений земной поверхности, а изображения, полученные в летний период, позволяют картографировать природно-территориальные единицы малых арктических островов. Для картографирования природно-территориальных единиц арктических островов пригодны летние геоизображения МТС, так как на них отображается большее разнообразие состояний поверхности, необходимых для составления природных карт.

Глава 4. Методика учета природных условий и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на примере Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии

Определение смещений земной поверхности кальдеры Узон методом дифференциальной интерферометрии (*Lundgren, Lu, 2006*) получило неоднократное обоснование в работах, основанных на данных о геологическом строении и микросейсмических исследованиях (*Кугаенко и др., 2010 и 2015; Kiryukhin, 2016; Чебров и др., 2019*). Проведенное по данным со спутника RADARSAT-1 исследование за период времени с 1999 по 2004 годы, позволило зафиксировать поднятие примерно на 0,15 м по паре снимков 2000 и 2003 г. Однако по парам с 1999 по 2000 г. и с 2003 по 2004 г. деформаций не выявлено, что оставляет неясным причину нестабильности результата интерферометрической обработки. В то время как территория Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии характеризуется высокой активностью склоновых и газогидротермальных процессов, проявления которых могут быть зафиксированы методом дифференциальной интерферометрии. Основными свойствами выбранной территории являются: сочетание равнинного и горного рельефа, неравномерное покрытие растительностью (от стланиковых зарослей и отдельно стоящих берез на склонах, до низкотравья в кальдере Узон и полного отсутствия растительности на осыпях и обнажениях горных пород) и резко переменчивая погода при относительно коротком бесснежном периоде, а самое главное – наличие процессов, приводящих к изменениям высоты земной поверхности. С точки зрения интерферометрии такие природные условия накладывают ряд ограничений, связанных с выбором данных и их обработкой. Отсутствие устойчивых отражателей, характерное для всех природных территорий, обосновывает необходимость разработки особого методического подхода при выборе и обработке пар изображений.

Для определения смещений рельефа в пределах вулканотектонической депрессии методика дополнена за счет учета условий местности и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии. В условиях того, что физико-географические свойства местности могут внести ложные смещения из-за некорректно выбранных исходных данных

и/или ошибок в обработке информации, именно это обстоятельство определяет выбор из архива снимков с требуемыми параметрами и также формирует оптимальные требования к съемке.

1) *Учет влияния рельефа местности.* Определения направления движения спутника и углов визирования позволяют избежать радиолокационных теней и переналожений склонов на территории исследования (см. рис. 1).

Для территории Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии в архиве Sentinel-1 было доступно 4 варианта геометрии съемки с разными углами визирования и направлением орбит (табл. 2, рис. 6). Для всех возможных 4 геометрий съемки комплексные изображения были обработаны до геокодированных амплитудных изображений и на них отмечен участок смещения, выявленный в предыдущем исследовании (Lundgren, Lu, 2006).

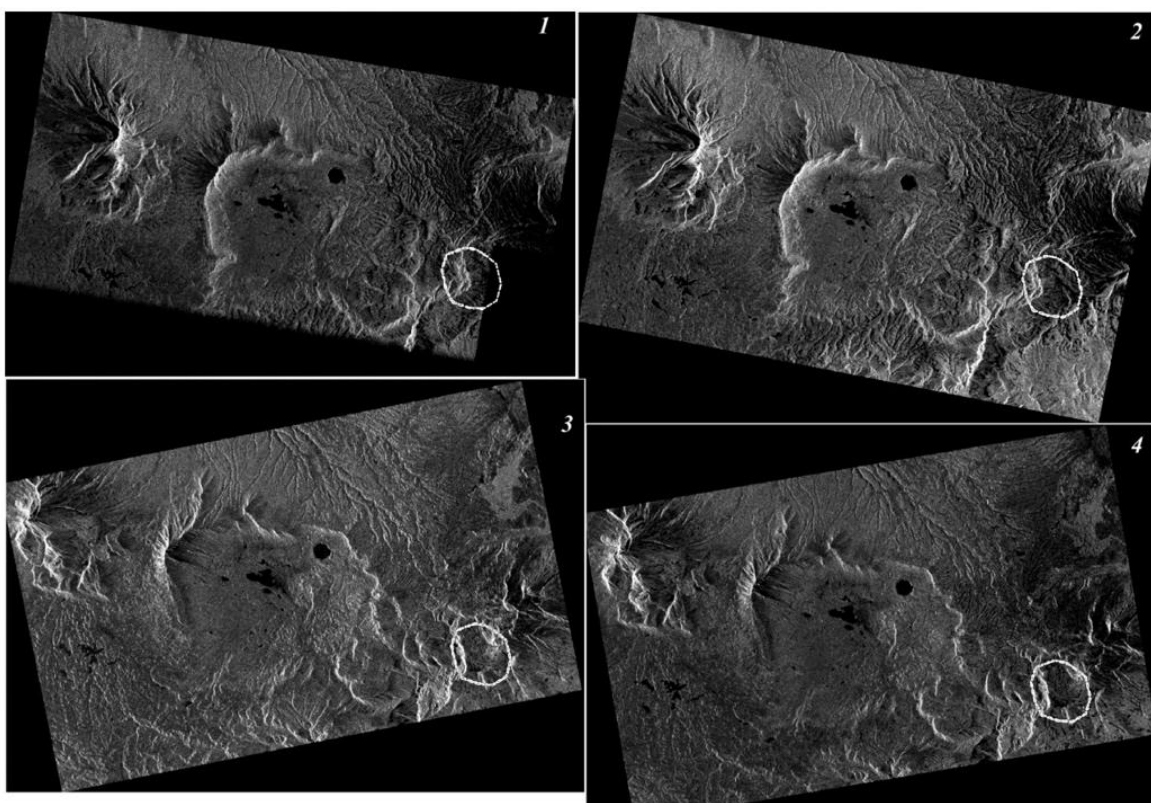


Рисунок 6. Амплитудные снимки Sentinel-1, где цифрами обозначены номера геометрии съемки, а белым контуром показан участок, внутри которого были определены смещения в 2003 году

Таблица 2. Параметры съемок на территорию Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии

Параметр	Геометрия 1	Геометрия 2	Геометрия 3	Геометрия 4
Направление орбиты	нисходящее	нисходящее	восходящее	восходящее
Поляризация	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ	ВВ+ВГ
Путь	162	60	140	38
Кадр	408	409	176	172
Углы визирования	~ 41°-46°	~ 29°-35°	~ 29°-35°	~ 41°-46°

Проведенный предварительный анализ промежуточных результатов обработки показал, что минимизировать негативные радиолокационные эффекты в области интереса позволяет использование данных с нисходящей орбиты и углами визирования от 29° до 35°, что соответствует геометрии 2.

2) *Учет погодных условий съемок.* Несмотря на хорошо известную независимость получения снимков от облачности, результат интерферометрической обработки данных сильно зависит от постоянства метеорологических параметров, прежде всего, температуры и наличия осадков не только в моменты съемки, но и накануне.

Этот этап позволяет исключить снимки, однозначно непригодные в связи с чувствительностью интерферометрической когерентности к изменениям погоды. Проведенные эксперименты показали, что в случаях, когда накануне съемки выпали осадки, когерентность с большой долей вероятности оказывалась настолько низкой, что интерферограмма

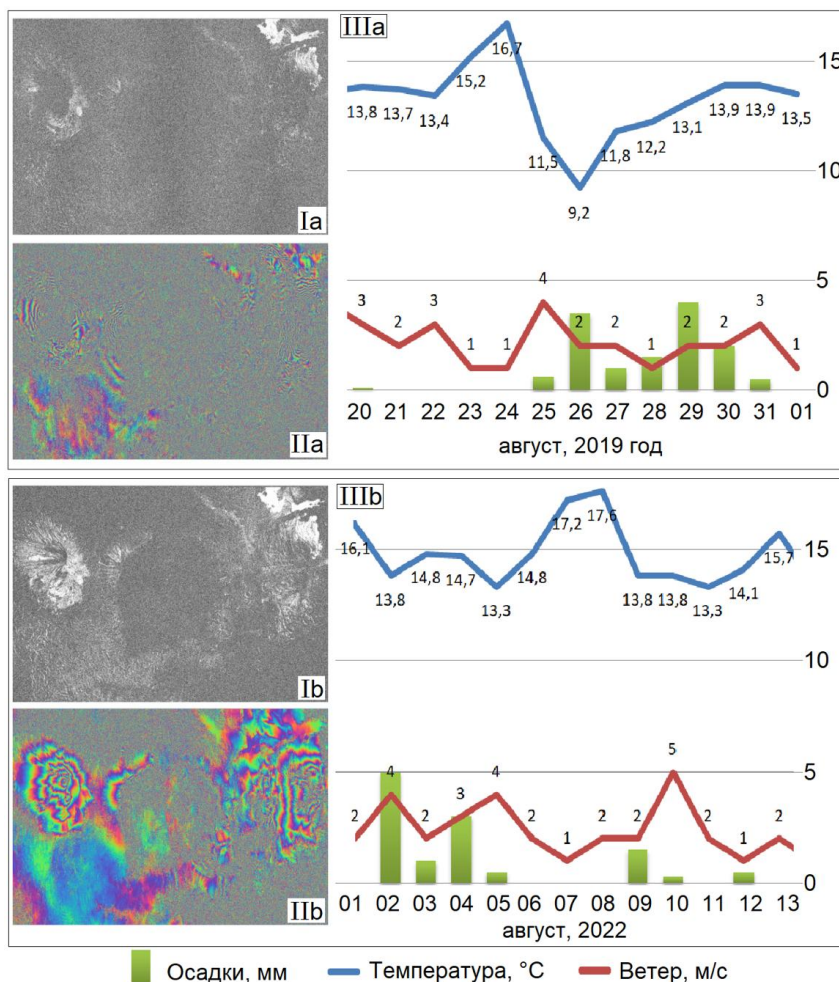


Рисунок 7. Сопоставление изображений когерентности (I), интерферограмм (II) и графиков изменения метеорологических параметров (III): а) низкая когерентность у пары 20.08.2019 и 01.09.2019, б) приемлемая когерентность у пары 01.08.2022 и 13.08.2022

была не пригодна для последующей обработки (см. рис. 7 Ia). В то же время, если осадки и перепады температур приходились на середину 12-ти дневного интервала или за несколько дней до съемки, то когерентность была высокой – местами до 0,9 (см. рис. 7 Ib).

Установленная зависимость когерентности от погодных условий во время съемок стала важным фильтром для выбора пар радиолокационных изображений. Из пригодных по когерентности пар снимков был произведен отбор пар с возможностью реализации дифференциальной интерферометрии по временному условию – с наибольшим временным интервалом – временной базовой линией.

3) *Выбор данных с учетом базовой линии* – с минимально возможным расстоянием между положениями космического аппарата в момент первой и второй съемок (прим. это

расстояние называется величиной перпендикулярной базовой линии). Итоговая интерферограмма содержит в себе различные вклады: топографические, деформационные, атмосферные и шумовые. При многопроходной интерферометрии, когда временная базовая линия не равна нулю (как при одновременной съемке), любые вариации дальности могут быть вызваны либо движением объектов, либо ненулевыми значениями перпендикулярной базовой линии, либо тем и другим вместе. Так как нулевые значения геометрической базовой линии практически не реализуемы, предпочтительны минимальные значения перпендикулярной базы (A.Ferretti, 2014).

В то время как для урбанизированных территорий с наличием стабильных объектов, служащих естественными устойчивыми отражателями, обеспечивающими высокие значения когерентности, принципиально важным является пункт 3 – *выбор данных с учетом базовой линии*, то при изучении областей без неизменных объектов – в условиях природных территорий – первостепенную важность имеют пункты 1 и 2 – *определение направления движения спутника и углов визирования и учет погодных условий* соответственно.

Исходя из изложенных соображений выбраны 2 опорных снимка, полученных 18.08.2017 и 30.08.2017, относительно которых рассчитывались карты смещений. На основе анализа значений базовых линий для всех выбранных пар, минимально возможная величина пространственной базовой линии и максимально возможная величина временной базы была у пары снимков 18.08.2017 и 04.08.2022 с базовой линией в 5,77 м. По выбранной интерферометрической паре снимков пространственное распределение смещений составило от -15 до +7 см (рис. 8).

Карта смещений поверхности (от англ. *displacement map* – визуализация раstra смещений, рассчитанных интерферометрическим методом), представляющая собой информационный продукт, полученный в результате обработки радиолокационных изображений 18.08.2017 и 04.08.2022, составлена при следующих характеристиках:

- 1) с нисходящей орбиты, при углах визирования от 30° до 36°;
- 2) временном интервале 1812 дней (при максимально похожих погодных условиях во время съемок);
- 3) величине базовой линии 5,77 м. Карта показывает участки подъема поверхности до +7 см, которые обнаружены в северной части кальдеры Узон южнее маара оз. Дальнее. Исследование смещений на территории Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии с применением радиолокационных данных со спутника Sentinel-1 позволило обнаружить даже незначительные изменения высоты земной поверхности.

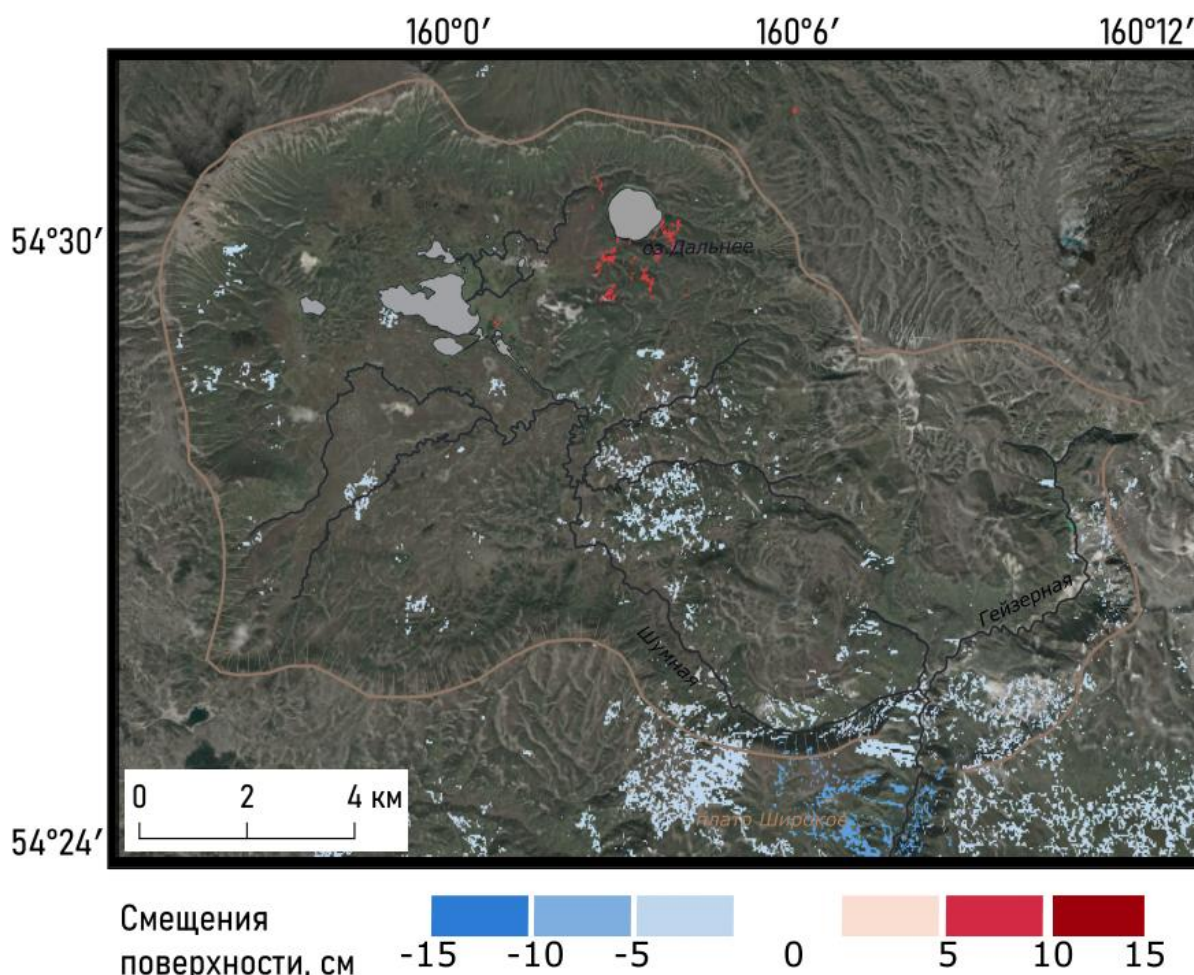


Рисунок 8. Изменения высоты земной поверхности за период с 18.08.2017 по 04.08.2022 в пределах Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии

Проведенное исследование послужило обоснованием для поиска оптимальных требований к набору интерферометрических данных. Первым этапом при интерферометрической обработке должен быть анализ условия местности исследуемой территории, который позволяет выбрать благоприятный сезон, параметры съемки (направление, угол визирования и пространственную базу), затем привлечение погодной информации, позволяющее отфильтровать неподходящие радиолокационные изображения по значениям когерентности, тем самым сэкономить время на обработку заведомо некондиционных пар. Стабильность благоприятных погодных условий не только в момент съемки, но и накануне – за несколько дней до съемки, является одним из основных фильтров отбора данных для интерферометрической обработки. К благоприятным погодным условиям во время съемки относится, прежде всего, отсутствие осадков и ветра, а также стабильные температурные показатели – без резких перепадов.

Порядок реализации методики учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии

Для получения корректных результатов при определении смещений земной поверхности методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии природной территории сформирована специальная методика, предусматривающая учет физико-

географических факторов, включая метеорологические на этапах выбора радиолокационных изображений и их обработки.

Первый этап методики, как уже было отмечено выше, представляет собой формирование базы данных для последующей обработки. На основании анализа основных физико-географических свойств местности на втором этапе выбираются зависящие от них параметры изображений: углы визирования при съемке, направление орбиты, диапазон базовой линии и временной охват исследования.

На третьем этапе проводится дифференциальная интерферометрическая обработка. Важным является этап сопоставления метеоданных и когерентности, учет изменений погоды накануне съемки. Как было установлено, это позволяет отобрать только потенциально достоверные информационные интерферометрические продукты.

Финальный этап – оформление полученных результатов. В случае обработки нескольких многовременных пар проводится сопоставление их по пространственной и временной базе. Корректировка заведомо ложных смещений осуществляется на основании собранных физико-географических особенностей местности и возможных прецедентов опусканий и поднятий земной поверхности на полигоне исследования.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы исследования.

Мультивременной композит с когерентностью, ранее применявшийся только для мониторинга сельскохозяйственных районов, является новым видом геоизображений – самостоятельным информационным продуктом, применимым для выявления изменений и картографирования земной поверхности. Для картографирования природно-территориальных единиц арктических островов следует применять летние геоизображения МТС, при использовании которых и была создана первая карта природно-территориальных комплексов о. Визе. Для мониторинга сезонной изменчивости возможно применение мультивременных композитов с когерентностью, сформированных по данным Sentinel-1 с 12-дневным интервалом между съемками в течение всего года.

Определение смещений поверхности на природных территориях методом двухпроходной дифференциальной интерферометрии проводится с учетом условий местности и метеорологической обстановки до начала обработки радиолокационных изображений и в процессе анализа промежуточных информационных продуктов. Это позволило определить изменения высоты земной поверхности Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии спустя 20 лет после последних наблюдений методом дифференциальной интерферометрии.

Для радиолокационной интерферометрии одним из главных критериев отбора данных служит контроль стабильности благоприятных погодных условий в момент и – за несколько дней до съемки. В областях с сильной погодной изменчивостью длительность временного интервала между съемками играет ключевую роль при дифференциальной интерферометрической обработке данных. Благоприятные погодные условия включают

отсутствие осадков и ветра, а также стабильные температурные показатели без резких колебаний.

На основе информационных продуктов, сформированных по данным спутника Sentinel-1, апробированы *две методики*: 1) применения мультивременных композитов с когерентностью для картографирования современного состояния малых арктических островов и в исследовании сезонной динамики их поверхности, 2) учета физико-географических факторов и метеорологических параметров при дифференциальной интерферометрии на примере природной территории. Апробации выполнены для первой методики на территорию о. Визе, для второй – Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии. В создание карты природно-территориальных комплексов о. Визе были заложены перечисленные принципы работы с радиолокационными интерферометрическими данными, а также привлечены снимки в оптическом диапазоне и другие доступные источники сведений о местности. Также и в случае выявленных изменений высоты земной поверхности – определение их локализации и генезиса может производиться только на основе физико-географических факторов.

Сформированные методики на основе данных спутника Sentinel-1 направлены на развитие методов радиолокационного ДЗЗ и их применение в географических исследованиях по результатам съемки отечественными космическими группировками «Кондор-ФКА» и «Обзор-Р». Их внедрение при изучении и мониторинге сезонных изменений отдаленных территорий России может служить основой для получения картографических материалов малых арктических островов и предотвращения чрезвычайных ситуаций, вызванных подвижками земной поверхности. Перспективами дальнейшей работы для совершенствования разработанных методик может быть их автоматизация и расширение территорий для апробации.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.20:

1. *Ширшова В.Ю., Балдина Е.А., Лебедева Е.В.* Опыт применения метода дифференциальной интерферометрии для определения смещений земной поверхности в Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным Sentinel-1A за 2017–2022 годы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2023. — №4. — С. 133-146. — DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-133-146 (SJR: 0.308).

2. *Балдина Е.А., Ширшова В.Ю., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н., Жданова Е.Ю.* Динамика береговой линии и состояния поверхности малых арктических островов (Визе и Ушакова) по разновременным оптическим и радиолокационным снимкам // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2022. — №1. — С. 107-122 (SJR: 0.197).

3. *Ширшова В.Ю., Балдина Е.А.* Применение мультивременного композита с когерентностью (МТС) для изучения сезонной изменчивости поверхности о. Визе в целях

его картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2021. — №4. — С. 79-91. — DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-79-91 (SJR: 0.308).

4. **Шишова В.Ю.** Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. — 2019. — №4. — С. 399-408. — DOI: 10.30533/0536-101X-2020-64-4-000-000 (импакт-фактор РИНЦ: 0.282).

Публикации в материалах конференций:

5. **Шишова В.Ю.** Методика анализа физико-географических параметров территории для планирования интерферометрической съемки // Материалы XI Междунар. науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ» — М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2023. — С. 157.

6. **Шишова В.Ю.** Мультивременные композиты с когерентностью в дешифрировании природно-территориальных комплексов острова Визе // Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» — Изд-во ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, 2023 — С. 260-268.

7. **Шишова В.Ю.** Физико-географическая характеристика территории как основной фактор выбора параметров интерферометрической пары // Материалы IX междунар. науч. конф. — Изд-во Сиб. федер. ун-т, Красноярск, 2022. — С. 81-83.

8. **Аниканова М.А., Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., Орлова Н.В., Тараканов Ю.А., Шишова В.Ю.** Технические решения по реализации технологии планирования интерферометрической съемки КС радиолокационного наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.559.

9. **Шишова В.Ю., Балдина Е.А.** Опыт определения смещений земной поверхности в районе Узон-Гейзерной депрессии и вулкана Кихпиныч (Камчатка) по данным радиолокационной спутниковой интерферометрии Sentinel-1 с разными параметрами съемки данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.G.311.

10. **Пижанкова Е.И., Балдина Е.А., Гаврилов А.В., Шишова В.Ю.** Дистанционные данные в исследовании природных процессов малых островов Карского моря данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XX Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2022. — С. XX.G.201.

11. **Пижанкова Е.И., Балдина Е.А., Гаврилов А.В., Кучейко А.А., Шишова В.Ю., Ширяев М.А.** Экзогенная геодинамика малых островов арктических морей (по результатам дешифрирования космических снимков) // Сборник докладов VI конф. геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» — М.: КДУ «Добросвет», 2022 — С. 484-491.

12. Балдина Е.А., **Ширшова В.Ю.**, Романенко Ф.А. Оптические и радиолокационные снимки для изучения динамики береговой линии малых арктических островов // сб. матер. XXIX Всерос. береговой конф. с междунар. участием — Изд-во БФУ им. И. Канта Калининград, 2022. — С. 299-301.

13. **Ширшова В.Ю.** Разработка методики построения ЦМР по радиолокационным данным Sentinel-1 методом дифференциальной спутниковой интерферометрии в условиях Арктики на примере острова Визе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 106.

14. **Ширшова В.Ю.**, Балдина Е.А. Применение многовременных композитов с когерентностью для характеристики сезонной изменчивости поверхности арктического острова Визе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 107.

15. **Ширшова В.Ю.** Применение интерферометрической когерентности для изучения поверхности арктического острова Визе // Ломоносов-2021: Материалы межд. молодеж. науч. форума. — М.: МАКС Пресс, 2021.

16. **Ширшова В.Ю.**, Балдина Е.А. Опыт картографирования о. Визе (Карское море) по радиолокационным интерферометрическим данным // Сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» — Изд-во «Политехника» Санкт-Петербург 2021 — С. 380-384.

17. Балдина Е.А., Жданова Е.Ю., Луговой Н.Н., Романенко Ф.А., **Ширшова В.Ю.** Исследование сезонной и многолетней динамики малых арктических островов Визе и Ушакова по оптическим и радиолокационным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы XVIII Межд. конф. — М.: ИКИ РАН, 2021. — С. 301.

18. Бадак Л.А., Захаров А.И., Костюк Е.А., **Ширшова В.Ю.** Методические рекомендации по проведению радиолокационной интерферометрической съемки с целью формирования цифровой модели рельефа земной поверхности // Сборник трудов X Всероссийской науч.-тех. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» — М.: АО «Российские космические системы», 2021. — С. 139-147.

19. Балдина Е.А., **Ширшова В.Ю.** Изображения когерентности для характеристики сезонной изменчивости поверхности арктического острова Визе // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) — Т. 1. — Издательство ПГНИУ Пермь, 2020 — С. 13-16.

20. **Ширшова В.Ю.** Мониторинг оседаний земной поверхности в урбанизированных районах с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии (на примере г. Санкт-Петербург) // Сборник III Всерос. науч.-практ. конф. «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование» — Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена СПб, 2019, — С. 60-65.