

Мониторинг криогенных процессов полуострова Ямал на основе радарных данных TANDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2

И. И. Кирбижекова^{1,*}, Т. Н. Чимитдоржиев¹, Ю. А. Дворников²,
П. Н. Дагуров¹, А. В. Дмитриев¹, М. Е. Быков¹, А. К. Балтухаев¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

²Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Россия

*Контактный e-mail: kirbizhekova@bk.ru

Приведены результаты исследования возможности применения поляриметрических и интерферометрических данных X- и L-диапазонов TanDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2 для мониторинга криогенных рельефообразующих процессов полуострова Ямал. Выполнен статистический анализ сезонных изменений интенсивности и параметров поляриметрической $H-A-\alpha$ -декомпозиции на участках с оползнями, активно растущими и пассивными термоцирками научного полигона Васькины дачи.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, поляриметрическая декомпозиция, дифференциальная интерферометрия, TanDEM-X, ALOS-2 PALSAR-2, криоморфогенез.

Введение

В последнее время на северных территориях арктической зоны активизировались рельефообразующие криогенные процессы [1, 2]. Высокие темпы формирования оползней и термоцирков, нарушения и обрушения береговой линии являются опасными факторами геориска при освоении северных территорий [3, 4]. Необходимость мониторинга этих процессов и оценки возможного ущерба делает актуальной задачу организации мониторинга этих процессов с привлечением средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Методы ДЗЗ, учитывая быстро нарастающий поток спутниковых данных, охватывают широкий диапазон длин волн электромагнитного спектра (пространственных и временных масштабов) и позволяют надежно обнаруживать изменения земной поверхности [5, 6]. В [7] проведен анализ применения ДЗЗ в 2010–2015 гг. для обнаружения и мониторинга изменений компонентов ландшафта вечной мерзлоты, температуры поверхности, снежного покрова, рельефа, поверхностных вод, растительного покрова и антропогенной деятельности. Возможности современных датчиков, новых методов обработки изображений и многомерного анализа, расширение свободного

доступа к спутниковым данным и архивам изображений облегчают получение информации по многолетней и сезонной динамике исследуемых территорий зоны вечной мерзлоты. В работах [8, 9] представлены результаты предварительной оценки развития криогенных процессов (оползней и термоцирков) тундровых ландшафтов Центрального Ямала с использованием полевых и дистанционных методов исследования. Оценены скорости роста термоцирков, образованных вследствие аномальных летних температур 2012–2013 гг., проанализировано влияние этих процессов на озерные экосистемы Центрального Ямала [10]. Также выявлены изменения растительного покрова на трассах и поверхностях, затронутых движением вездеходного транспорта.

Наиболее перспективными направлениями ДЗЗ для обнаружения ландшафтных изменений являются: 1) радиолокационная интерферометрия, в частности для обнаружения вертикальных и горизонтальных смещений поверхности [11, 12]; 2) анализ временных рядов изображений оптического и микроволнового диапазонов высокого пространственного разрешения [13, 14]; 3) комбинирование мультисенсорных данных [15, 16].

Данные ДДЗ используются для параметризации моделей многолетнемерзлых пород (ММП) и для создания картографических изображений. Применение методов ДДЗ также позволило улучшить оценки льдистости ММП [17]. Исследования корреляции коэффициента обратного рассеяния данных С-диапазона Sentinel-1 на согласованной и кроссполяризации с наземными измерениями показали некоторые ограничения дистанционных определений температуры и влажности почвы для заболоченных территорий [18].

В [19–21] рассмотрены возможности применения метода радарной поляриметрии и текстурного анализа для изучения структуры и сезонных вариаций радиофизических свойств земных покровов, в том числе механизмов рассеяния сигнала на территории Ямало-Ненецкого округа, а также мониторинга инфраструктуры комплексов газодобычи в районе Бованенково на полуострове Ямал в L- и X-диапазонах. Выявлены предпочтительные комбинации поляризационных измерений для мониторинга растительности и газодобывающей инфраструктуры на фоне окружающей поверхности. С помощью указанных методов на основе данных космических радаров TanDEM-X и ALOS PALSAR-2 показана возможность исследования деградационных процессов рельефа в Заполярье — разрушения кромок термоцирков и эрозии береговых линий водоемов. Отмечено, что эффективным способом локализации криогенных образований является комбинирование текстурных характеристик поляризационных параметров разновременных радиолокационных изображений, в частности средних значений и вариаций параметра α поляриметрической декомпозиции Клода — Поттье [8, 21]. Описанные выше результаты важны для картирования ландшафтов Арктики, мониторинга процессов эрозии рельефа, контроля состояния газодобывающей инфраструктуры.

Методами радарной интерферометрии получены оценки смещения подстилающих покровов вследствие сезонных и годовых изменений радиофизических свойств отражающих сред [22]. Сравнение интерферометрических измерений за период 2008–2010 гг. с наземными полевыми измерениями на полигоне дельты р. Селенги позволило определить сезонные вариации точности спутниковых измерений, лежащей в пределах точности геодезического нивелирования.

Данная работа посвящена дальнейшей разработке методов обнаружения, локализации и исследования участков формирования термоцирков, обрушения береговой линии на основе интерферо- и поляриметрических радиолокационных данных санти- и дециметрового диапазонов TanDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2.

1. Территория исследования и данные ДЗЗ

Территория исследования расположена в центральной части п-ова Ямал, биоклиматической подзоне (CAVM Team, 2003). Абсолютная высота рельефа изменяется от 0 до 58 м над уровнем моря. Среднегодовая температура варьируется в пределах от -11 до -4 °С с положительным трендом в последние 20–30 лет порядка $+0.1$ °С в год. Глубина сезонного талого слоя (СТС) варьирует от 0.6 до 1.6 м и более в зависимости от ландшафта и засоленности слоя. По территории исследования широко распространены пластовые льды мощностью 6–30 м, зачастую близко к поверхности [23]. Пластовый лед перекрыт песками, суглинками и торфом. Толщина снежного покрова неравномерна и составляет 15–30 см на плоских горизонтальных участках, достигая толщины более 1 м в понижениях рельефа. Участок характеризуется развитием рельефообразующих криогенных процессов, таких как термоэрозия, термоденудация, криогенное оползание и др. [5, 9, 10]. Растительность на пологих склонах и днищах долин состоит из мхов, осоки, кустарников и кустарничков высотой менее 40 см [24].

Значительная часть территории покрыта озерами (12 %) с площадью от 0.14 до 347 га (в среднем 11.1 га), глубиной от 0.1 до 23 м (в среднем 3 м) и покрытых льдом в течение 8–9 месяцев в году, освобождаясь ото льда в июне — июле [25]. Размер водосборных бассейнов варьирует от 0.25 до 713.93 га (в среднем 46.65 га). Берега озера значительно варьируются от пляжей до крутых обрывов с активными криогенными процессами [9].

На территории исследуемого полигона происходит таяние подземных льдов с образованием отрицательных форм рельефа — криогенных оползней и термоцирков. На рис. 1 представлен пример активно развивающегося термоцирка в береговой зоне одного из озер центральной части п-ова Ямал. Активизация термоденудационных процессов обусловлена резким увеличением летней температуры воздуха и сопровождающимся ростом глубины СТС.

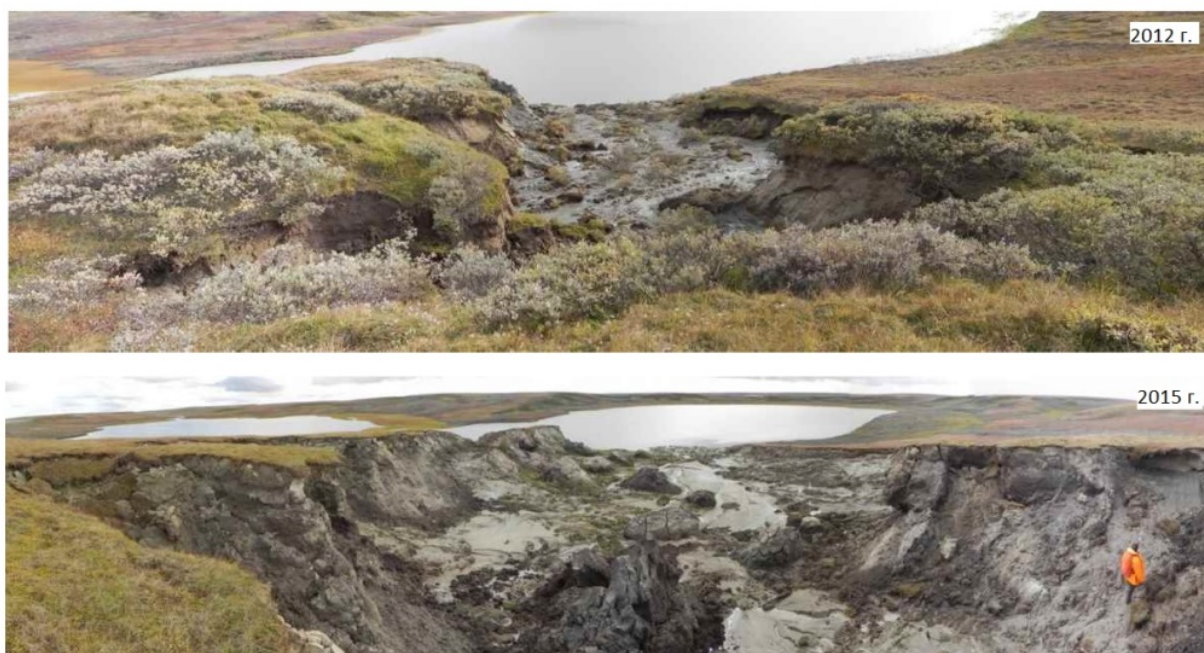


Рис. 1. Рост термоцирка в период 2012–2015 гг. в береговой зоне озера п-ова Ямал

Исследования выполнены на основе поляриметрических с двойной поляризацией (vv, vh) и интерферометрических данных X-диапазона (длина волны 3 см) TanDEM-X от 04 июня, 09 и 20 августа 2015 г., а также поляриметрических данных с двойной поляризацией (vv, vh) L-диапазона (длина волны 25 см) ALOS-2 PALSAR-2 от 23 апреля, 02 мая 2015 г. и 30 апреля 2016 г.

2. Методика исследования

Изменения территории исследований, видимые на радиолокационных изображениях, могут быть вызваны двумя основными факторами. Во-первых, это может быть обусловлено геометрическими изменениями и деформациями поверхности, такими как образование отрицательных форм рельефа вследствие вытаивания пластовых льдов с образованием термоцирков и криогенных оползней. Во-вторых, причиной могут быть изменения физических характеристик подстилающих почвенно-растительного и снежного покровов (температуры, влажности, структуры и агрегатного состояния) и как следствие сопротивления и электродинамических свойств (диэлектрической проницаемости сред, анизотропности) [26, 27].

Вертикальные смещения поверхности могут быть определены методами дифференциальной интерферометрии с миллиметровой точностью [12, 13, 19]. Ранее нами была показана возможность мониторинга быстротекущих активных процессов формирования термотеррас арктической зоны с использованием тандемных данных на коротких временных интервалах [8]. При увеличении временных интервалов между сеансами спутниковой съемки корреляция интерферометрических пар снижается. При достижении пороговых значений когерентности (определенной теоретически степени расфазированности) дальнейшая интерферометрическая обработка становится невозможной. В летний период оттаивания и активизации криогенных процессов это происходит наиболее быстро. В зимний период отражающие свойства подстилающих покровов стабилизируются, поэтому можно подобрать интерферометрические пары с разницей во времени их получения год–два и даже несколько лет. Таким образом, в настоящее время на исследуемой территории можно осуществлять мониторинг динамики криогенных процессов, фиксируя моменты их стабилизации в зимний период.

При высокой скорости роста криогенных образований более 10 м в горизонтальном направлении за время между двумя сеансами спутниковой съемки (сопоставимой с пространственным разрешением радиолокационных изображений) их можно было бы обнаружить за счет изменения как общей интенсивности радиолокационного отклика, так и процессов рассеяния, которые можно оценить методами радиолокационной поляриметрии. Существует множество способов декомпозиции матрицы рассеяния на отдельные составляющие, характеризующие вклад различных механизмов рассеяния. На территории исследования в основном преобладают участки с поверхностным механизмом рассеяния радиоволн. На участках с низкорослой растительностью или поверхности с определенной степенью шероховатости дополнительно присутствует компонента объемного рассеяния. При активизации криогенных процессов (например, при формировании и развитии термоцирка или термотеррасы) появляются участки с почти вертикально ориентированными стенками и образуются своего рода природные “уголковые отражатели”, где доминирующим становится механизм двукратного рассеяния. На завершающей стадии развития термоцирков и термотеррас при оползнях, наоборот, происходят разрушение склонов, сглаживание рельефа и доля двукратного рассеяния

снижается. Таким образом, перераспределение вклада поверхностного и двукратного рассеяния может служить индикатором наличия криогенных процессов того или иного типа.

Для проведения исследований были выбраны три направления:

1) построение цифровых моделей местности (ЦММ) с высоким разрешением методами дифференциальной интерферометрии, топографическое моделирование для выявления топографических особенностей криогенных образований, непосредственное наблюдение изменений ЦММ по разновременным данным;

2) статистический анализ и сравнение общей интенсивности и отдельных компонентов поляриметрической $H-A-\alpha$ -декомпозиции для участков с криогенными образованиями и соседних стабильных участков;

3) текстурный анализ изображений общей интенсивности и отдельных компонентов поляриметрической $H-A-\alpha$ -декомпозиции для выявления наиболее эффективных контрастных характеристик активных термоцирков, оползневых склонов и разработка методики экспресс-обнаружения подобных образований в последующем.

3. Результаты исследований

Для предварительного анализа синтезируются ложноцветовые RGB-изображения на основе комбинаций интенсивности разных каналов поляризации. На рис. 2 и 3 в качестве примера представлены RGB-изображения для полигона Васькины дачи на основе поля-

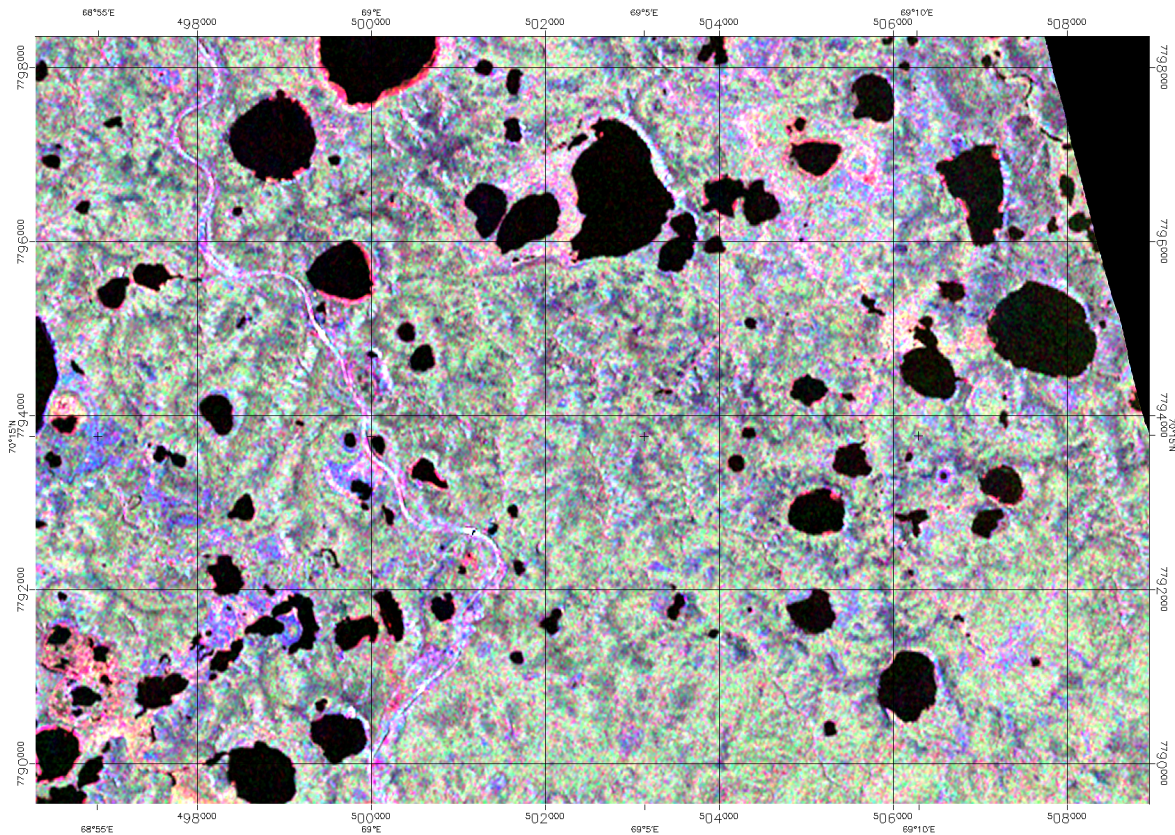


Рис. 2. RGB-изображение по поляриметрическим данным TanDEM-X 20 августа 2015 г.

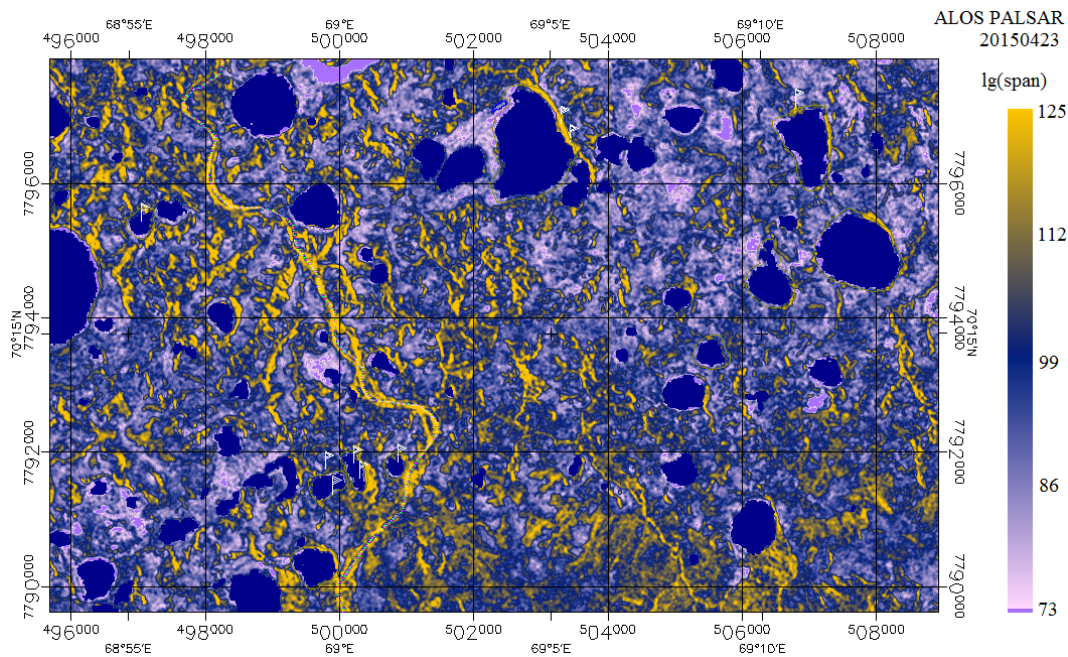


Рис. 3. Карта территории исследования на основе общей интенсивности радиолокационного отклика в L-диапазоне ALOS-2 PALSAR-2 23 апреля 2015 г.

симметрических данных TanDEM-X от 20 августа 2015 г. и ALOS-2 PALSAR-2 от 23 апреля 2015 г., сгенерированные с помощью программного обеспечения PolSARPro, которые соответствуют разложению Паули. Такие изображения демонстрируют характер отражения радиолокационного импульса на различных природных и искусственных объектах, а также сезонные изменения отражательных свойств объектов: слабое отражение от открытой воды (черный цвет в летний сезон), преобладание поверхностного отражения от озерного льда или гладкой поверхности без растительности (голубой цвет), преобладание объемного рассеяния на участках с почвенно-растительным покровом (оттенки зеленого цвета), уголковое отражение на уступах, обрывах, ледяных образованиях и торосах (оттенки красного цвета) и т. д. Наиболее крупные и активно развивающиеся криогенные объекты хорошо идентифицируются на подобных RGB-композициях. Небольшие, вяло развивающиеся или “затухающие” (заплывающие) образования малозаметны.

Затем на основе тандемных данных TerraSAR — TanDEM-X методом дифференциальной интерферометрии построена цифровая модель местности с пространственным разрешением 8 м, а также построены производные изображения (наклон поверхности, экспозиция склонов, характеристики кривизны поверхности). При комбинировании топографических параметров (рис. 4) хорошо различимы только крупные, активные, развивающиеся термоцирки, в то время как проявления криогенных процессов малого размера, в частности образования техногенного происхождения, а также участки обрушения береговой линии, слабо отличаются от соседних стабильных участков. Непосредственное наблюдение криогенных изменений ЦММ по радарным данным летнего сезона 2015 г. (TanDEM-X) и в период с 2015 по 2016 г. (ALOS-2 PALSAR-2) оказалось невозможным. В первом случае из-за низкой когерентности интерферометрических пар. Во втором — все изменения были малого размера, меньше отмечено статистических флуктуаций и пространственного разрешения (15 м) за время между съемками. Вероят-

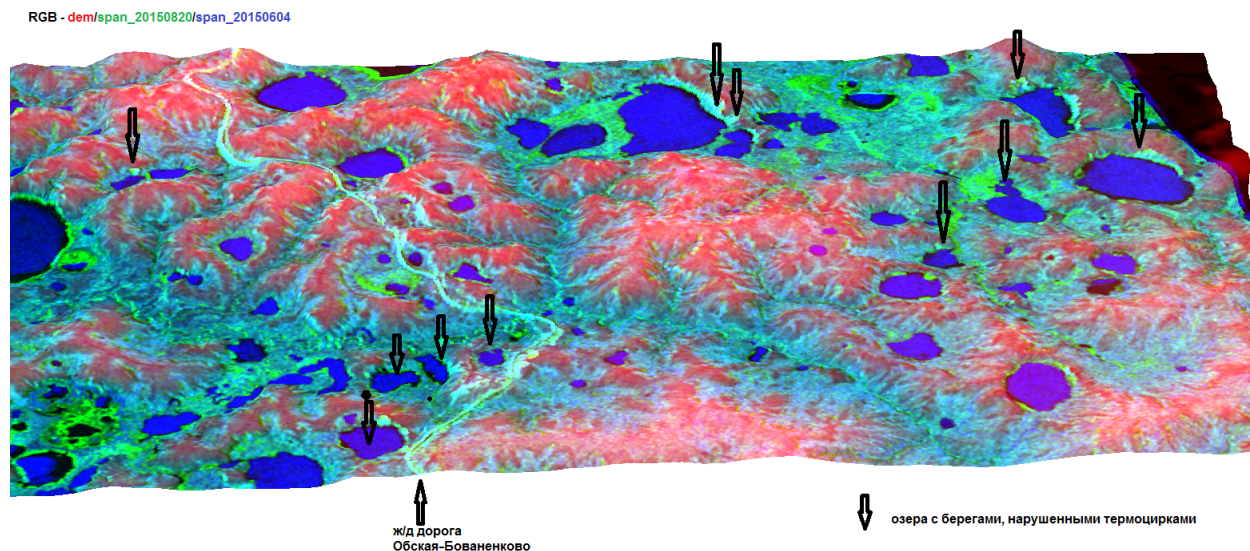


Рис. 4. Синтезированное цветное RGB-изображение, где красным цветом (R) закодирована абсолютная высота (из ЦММ), зеленым (G) — интенсивность 20 августа 2015 г., синим (B) — интенсивность 04 июня 2015 г. Стрелками обозначено местоположение термоцирков, участков обрушения береговой линии

но, для обнаружения и мониторинга проявлений криогенных процессов малого размера потребуются ЦММ с более высоким пространственным и временным разрешением.

Второе направление исследований основано на учете контраста изображений стабильных и нестабильных участков, проявляющегося в различии средних значений и характеристиках разброса значений (среднеквадратичное отклонение (СКО), диапазон значений) интенсивности и поляриметрических характеристик радиолокационных изображений TerraSAR-TanDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2 2015 и 2016 гг. На рис. 5 пред-

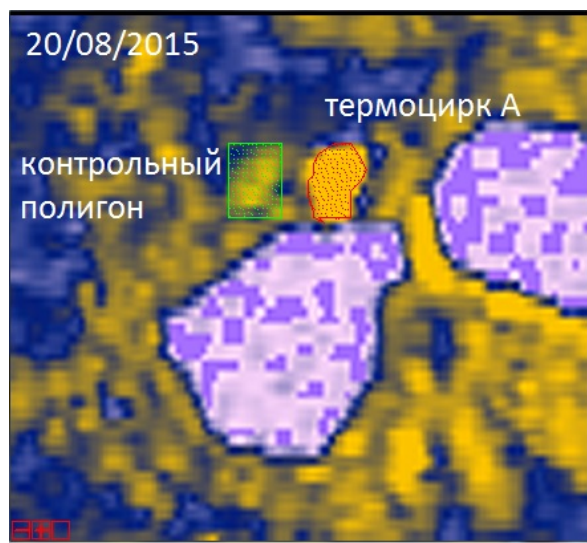


Рис. 5. Схема расположения двух участков в прибрежной зоне озера п-ова Ямал для расчета статистических характеристик: 1) термоцирк А ограничен контуром красного цвета; 2) стабильный участок — зеленого цвета

ставлена схема расположения термоцирка и стабильного участка (фон) приблизительно одной площади в прибрежной зоне одного из озер. Средние значения и разброс значений общей интенсивности (span) радиолокационного импульса варьируются в зависимости от сезона. До начала летнего периода (оттаивания снежного и ледового покрова) средние значения интенсивности стабильных и нестабильных участков мало отличаются друг от друга, величины СКО термоцирков в 2–2.5 раза выше величин СКО фоновых участков. В целом разделить стабильные и нестабильные участки до начала оттаивания достаточно сложно. В конце лета (после оттаивания) обратное отражение для активных образований существенно возрастает, для стабильных участков и пассивных объектов почти не меняется.

На основе поляриметрических радиолокационных данных TanDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2 проведена декомпозиция методом Клода—Поттье и для каждого пикселя полигона рассчитаны три параметра, характеризующих процессы рассеяния радиолокационного импульса: параметр α , энтропия H , анизотропия A . При синтезировании RGB-изображений наблюдаются высокие пространственные флуктуации этих параметров. На рис. 6 представлены две блочные диаграммы (“ящики с усами”) параметра α для активного и пассивного термоцирков. На каждом рисунке приведены диаграммы для термоцирка и фонового участка по каждой из трех дат съемки (6 “ящиков”). Как видно из рисунка, для активного термоцирка значения параметра α существенно ниже фоновых значений и аналогичных для пассивного объекта, что обусловлено, по-видимому, сглаживанием поверхности в активной фазе развития.

Для десяти озер с криогенными образованиями (термоцирками и оползневыми процессами) построены профили вдоль береговой линии по периметру для общей интенсивности и параметров поляриметрической декомпозиции α , H , A . Для сглаживания пространственных и сезонных флуктуаций произведено усреднение профилей по трем соседним пикселям и трем датам съемки. Для сравнения эффективности все характе-

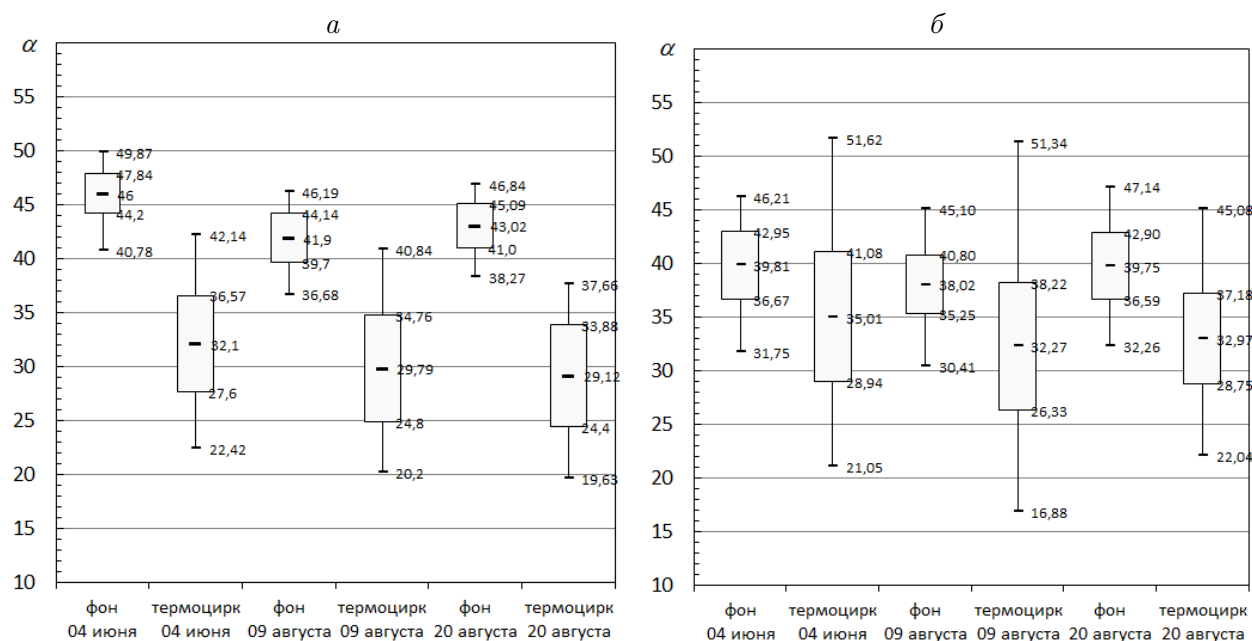


Рис. 6. Блочные диаграммы для параметра α поляриметрической декомпозиции Клода—Поттье: *a* — для активного термоцирка; *б* — для пассивного термоцирка

ристики x центрированы на средние значения $M(x)$ и нормированы на среднее квадратичное отклонение $\sigma(x)$:

$$t_x = (x - M(x)) / \sigma(x).$$

Таким образом, средние значения и σ новых переменных одинаковы и равны:

$$M(t) = 0, \quad \sigma(t) = 1.$$

Так как анизотропия A , как правило, интерпретируется совместно с энтропией, были также рассчитаны нормированные и центрированные показатели для комбинаций энтропии и анизотропии: $H \cdot A$, $(1-H) \cdot A$, $H \cdot (1-A)$, $(1-H) \cdot (1-A)$. На рис. 7 приведены изображение линии вдоль береговой линии одного из озер начиная от угловой северо-восточной точки и соответствующие профили, где по оси абсцисс отложены номера пикселей линии профиля по порядку, а по оси ординат — значения центрированных и нормированных величин H , A и т. д. Как видно из рис. 7, на стабильных участках береговой зоны отклонения указанных величин от нулевого (среднего) значения в основном не превышают σ . В то же время на участке с термоцирком отклонения преобразованных интенсивности и параметров поляриметрической декомпозиции более 3σ . Кроме того, можно отметить, что максимум профиля преобразованной интенсивности смещен относительно остальных пиков. Такое же смещение наблюдается и для других термоцирков исследуемой территории. Величина и направление смещения зависят от направления профиля, расположения объекта на южном или северном берегу озера. Для объектов на восточных и западных берегах смещение малозаметно. Эффект смещения, очевидно, обусловлен геометрией радиолокационной съемки, различиями в “освещенности” и “затенении” стенок и бровок термоцирка (склона).

Сравнительный анализ сезонных изменений распределения параметра α , энтропии H и анизотропии A показал, что наибольшие отличия участков с термоденудационными процессами от контрольных стабильных участков наблюдаются для энтропии H и параметра α в середине летнего сезона, после таяния и схода снежного и ледового покровов. Распределение анизотропии A практически не испытывает сезонных изменений для двух типов участков.

Описанный выше метод сравнения апробирован для участков с криогенными процессами трех типов: а) термоцирков 2012–2015 гг., образовавшихся в результате повышения

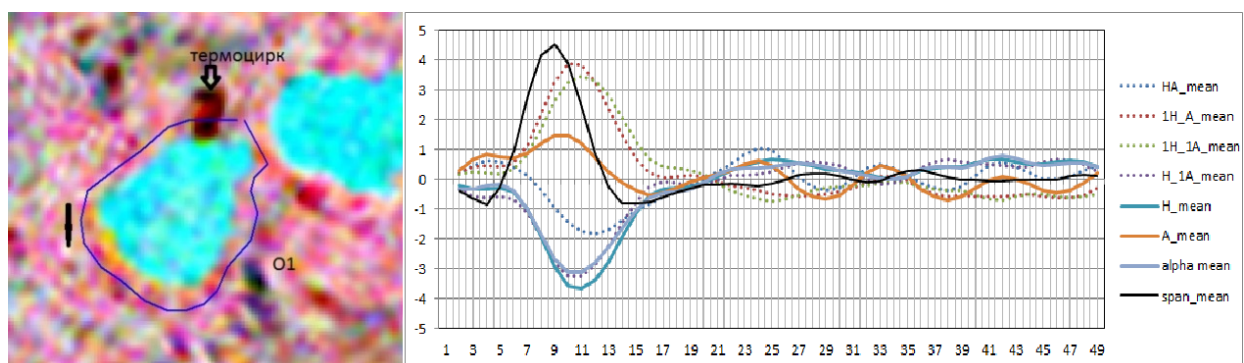


Рис. 7. Фрагмент профилей интенсивности, параметров поляриметрической декомпозиции H , A , α , комбинаций H и A с пространственно-временным усреднением вдоль береговой линии озера, начиная от северо-восточной точки. По оси x — номер пикселя, по оси y — значение центрированных и нормированных характеристик

летней температуры воздуха 2012–2013 гг.; б) термоцирков, образовавшихся в результате техногенного воздействия; в) участков с отступанием береговой линии. Для объектов первого типа большинство параметров отчетливо указывает на местоположение термоцирка, за исключением анизотропии A и комбинации $H \cdot A$. Для объектов второго типа большинство параметров малоприспособны, но существует слабая возможность индикации объектов на основе энтропии H и комбинаций H и A . Для третьего типа большинство параметров отчетливо указывает на местоположение зон отступления береговой линии, за исключением анизотропии A и комбинации $H \cdot A$.

Третье направление исследований заключалось в оценке возможности использования количественных характеристик текстуры радиолокационных изображений интенсивности и параметров поляриметрической декомпозиции α , H , A [11]. Для 12 разновременных изображений интенсивности, α , H , A TanDEM-X 2015 г. рассчитаны текстурные характеристики, такие как среднее значение, вариация, диапазон значений, однородность и т. п. Синтезировано порядка 40 RGB-композиций. Сравнительный анализ полученных изображений показал, что наиболее оптимальными для обнаружения проявлений криогенных процессов являются сочетания текстурных характеристик положения и разброса (среднее значение, вариация, диапазон значений, контраст и некоторых других) разновременных α и H . При правильном подборе составляющих RGB-изображений все исследуемые объекты (термоцирки, склоны с оползневыми процессами) словно “загораются” — контрастно выделяются, например, красным и оранжевым цветами на темно-синем фоне более стабильной территории. Таким образом, комбинирование текстурных характеристик параметров поляриметрической декомпозиции может послужить основой для экспресс-диагностики появления и активизации криогенных процессов.

Заключение

В рамках исследования возможности применения интерферо- и поляриметрических данных TanDEM-X и ALOS-2 PALSAR-2 для обнаружения, локализации и мониторинга активных термоденудационных процессов на примере полигона Центрального Ямала получены следующие результаты:

- для развитых термоцирков интенсивность, поляриметрические характеристики, параметры топографического моделирования, текстура радиолокационных изображений значительно отличаются от аналогичных характеристик соседних стабильных участков, отклонение от средних фоновых значений превышает 3σ ;
- наиболее значимыми являются вариации интенсивности, но возможность локализации криогенных образований может быть ограничена геометрическими условиями и эффектом “затенения” при неудачной ориентации объекта в момент радиолокационной съемки;
- для небольших или пассивных термоцирков, а также зон отступления и обрушения береговой линии, криогенных оползней отклонения интенсивности и поляриметрических характеристик от фоновых значений невелики — порядка σ , поэтому для большей надежности в качестве индикатора следует применять совокупность всех параметров поляриметрической H - A - α -декомпозиции и интенсивности;
- установлено, что комбинирование текстурных характеристик параметров поляриметрической декомпозиции H и α может послужить основой для экспресс-диагностики появления и активизации криогенных процессов на исследуемой территории.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 15-29-06003 офи_м “Фундаментальные проблемы мониторинга арктической зоны методами космической радарной интерферометрии и поляриметрии”.

Радиолокационные данные X-диапазона получены при поддержке Германского аэрокосмического центра DLR по проекту “The study of degradation processes cryolithozone in Arctic and subarctic zone by interferometry TanDEM-X” (IDEM_CALVAL015).

Радиолокационные данные L-диапазона получены при поддержке Японского аэрокосмического агентства JAXA “ALOS PALSAR 2 Crustal and cryogenic deformation monitoring in Siberia (Baikal rift, Kuznetsk coal basin) and Siberian Arctic (Yakutia, Yamal) with PALSAR-2 and TanDEM-X interferometry” (PI No. 3402).

Список литературы / References

- [1] **Gunther, F., Overduin, P.P., Sandakov, A.V. et al.** Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // *Biogeosciences*. 2013. № 10. P. 4297–4318.
- [2] **Кизяков А.И., Лейбман М.О.** Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX, № 4. С. 45–58.
Kizyakov, A.I., Leibman, M.O. Cryogenic relief-formation processes: a review of 2010–2015 publications // *Earth’s Cryosphere*. 2016. Т. XX, No. 4. P. 45–58. (In Russ.)
- [3] **Бешенцев В.А.** Криолитозона и криогенные процессы Ямала // *Горные ведомости*. 2015. № 1(128). С. 68–80.
Beshentsev, V.A. Cryolithozone and cryogenic processes of Yamal // *Gornye Vedomosti*. 2015. No. 1(128). P. 68–80. (In Russ.)
- [4] **Хомутов А.В., Лейбман М.О.** Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре центрального Ямала // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX, № 2. С. 49–60.
Khomutov, A.V., Leibman, M.O. Assessment of the danger of cryogenic slides landslides in the tundra of central Yamal // *Earth’s Cryosphere*. 2016. Vol. XX, No. 2. P. 49–60. (In Russ.)
- [5] **Khomutov, A.V., Leibman, M.O., Dvornikov, Y.A. et al.** Activation of cryogenic Earth flows and formation of thermocirques on Central Yamal as a result of climate fluctuations // *Proc. of the WLF4 Advancing Culture of Living with Landslides*. Ljubljana, Slovenia, 2017. P. 209–216.
- [6] **Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M. et al.** Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, iss. 7. 640 (28 p). DOI: 10.3390/rs9070640.
- [7] **Jorgenson, M.T., Grosse, G.** Remote sensing of landscape change in permafrost regions // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. Vol. 27, iss. 4. P. 324–338.
- [8] **Чимитдоржиев Т.Н., Кирбижекова И.И., Быков М.Е.** Исследование оползневых процессов и деформаций ландшафта полуострова Ямал методами радарной интерферометрии и текстурного анализа // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27, № 7. С. 610–614.
Chimitdorzhiev, T.N., Kirbizhekova, I.I., Bykov, M.E. The study of landslide processes and deformations of the Yamal Peninsula landscape by radar interferometry and textural analysis // *Optics of the Atmosphere and Ocean*. 2014. Vol. 27, No. 7. P. 610–614. (In Russ.)

- [9] **Дворников Ю.А.** Процессы термоденудации в криолитозоне и их индикация по растворенному органическому веществу: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Тюмень, ИКЗ СО РАН, 2016. 176 с.
Dvornikov, Yu.A. Thermodenudation processes in the cryolithozone and their indication by the dissolved organic matter: Dis. ... cand. geol.-min. nauk. Tyumen, IKZ SO RAN, 2016. 176 p.
- [10] **Leibman, M.O., Khomutov, A.V., Gubarkov, A.A. et al.** The research station “Vaskiny Dachi”, Central Yamal, West Siberia, Russia — A review of 25 years of permafrost studies // *Fennia*. 2015. No. 193(1). P. 3–30.
- [11] Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук / Под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 676 с.
Space based radar systems for the Earth ground survey / V.S. Verba, L.B. Neronskiy, I.G. Osipov, V.E. Turuk / Ed. V.S. Verba. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 676 p. (In Russ.)
- [12] **Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М.** Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. Изд. 3. М.: ЛЕНАНД, 2015. 248 с.
Zakharov, A.I., Yakovlev, O.I., Smirnov, V.M. Satellite monitoring of the Earth: Radar sensing of the surface. Ed. 3. Moscow: LENAND, 2015. 248 p. (In Russ.)
- [13] **Филатов А.В.** Применение многовременной радиолокационной съемки ALOS-PALSAR для обнаружения смещений земной поверхности в условиях Арктики // *Журн. радиоэлектроники*. 2016. № 2. С. 1–18. Адрес доступа: <https://elibrary.ru/download/elibrary2563060370770547.pdf> (дата обращения 14.01.2018).
Filatov, A.V. Application of ALOS-PALSAR multi-temporal radar survey for detecting ground displacements in Arctic conditions // *J. of Radioelectronics*. 2016. No. 2. P. 1–18. Available at: <https://elibrary.ru/download/elibrary2563060370770547.pdf> (accessed 14.01.2018). (In Russ.)
- [14] **Кравцова В.И., Тарасенко Т.В.** Изучение динамики термокарстовых озер Центральной Якутии по разновременным аэрокосмическим снимкам в период потепления с 1950 г. // *Криосфера Земли*. 2011. № 3. С. 31–42.
Kravtsova, V.I., Tarasenko, T.V. Study of dynamics of thermokarst lakes of Central Yakutia on different aerospace images during warming since 1950 // *Earth’s Cryosphere*. 2011. No. 3. P. 31–42. (In Russ.)
- [15] **Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Лабаров Б.Б. и др.** Исследование возможностей комплексного использования радиолокационной интерферометрии и поляриметрии TANDEM-X и субпиксельного анализа изображений LANDSAT-8 для оценки лесных ресурсов // *Вычисл. технологии*. 2016. Т. 21, № 1. С. 80–91.
Kirbizhekova, I.I., Chimitdorzhiev, T.N., Labarov, B.B. et al. Study of features of the complex use of radar interferometry and polarimetry using TanDEM-x and the sub-pixel analysis of images Landsat-8 for the forest resource assessment // *Comput. Technologies*. 2016. Vol. 21, No. 1. P. 80–91. (In Russ.)
- [16] **Захарова Л.Н., Захаров А.И., Сорочинский М.В. и др.** Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы // *Радиотехника и электроника*. 2011. Т. 56, № 1. С. 5–19.
Zakharova, L.N., Zakharov, A.I., Sorochinsky, M.V. et al. Joint analysis of optical and radar sensor data: possibilities, limitations and prospects // *J. of Communications Technology and Electronics*. 2011. Vol. 56, No. 1. P. 5–19. (In Russ.)
- [17] **Gilbert, G.L., Kanevskiy, M.M., Julian, B.M.** Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy // *Permafrost and Periglacial Proc.* 2016. Vol. 27, iss. 4. P. 377–389.

- [18] **Родионова Н.В.** Связь радарных данных SENTINEL 1 с наземными измерениями температуры почвы // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 135–148.
Rodionova, N.V. Relationship of radar data SENTINEL 1 to ground-based soil temperature measurements // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space 2017. Vol. 14, No. 5. P. 135–148. (In Russ.)
- [19] **Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Лейбман М.О. и др.** Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных // Вестн. СибГАУ. 2013. Вып. 5(51). С. 65–68.
Chimitdorzhiev, T.N., Bykov, M.E., Leibman, M.O. et al. Investigation of microdeformations and landslide processes in the northern territories of Western Siberia on the basis of interferometric data // Vestnik SibGAU. 2013. Vol. 5(51). P. 65–68. (In Russ.)
- [20] **Захаров А.И., Захарова Л.Н., Чимитдоржиев Т.Н.** Методы космической радарной поляриметрии в исследовании земных покровов Арктического региона // Тез. XIV Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 350.
Zakharov, A.I., Zakharova, L.N., Chimitdorzhiev, T.N. The methods of space-based radar-polarimetry in the study of the terrestrial coverings of the Arctic region // Abstr. of the XIV Russ. Open Conf. “Modern problems of remote sensing of the Earth from space”. Moscow: IKI RAS. 2016. P. 350. (In Russ.)
- [21] **Chimitdorzhiev, T.N., Kirbizheкова, I.I., Leibman, M.O. et al.** Assessment of the intensity of the cryogenic process Yamal peninsula of radar data // Proc. of 6th Intern. Works. on Remote Sensing and Environmental Innovations. Mongolia, Ulaanbaatar, 2013. P. 82–85.
- [22] **Chimitdorzhiev, T., Dagurov, P., Bykov, M. et al.** A comparison of ALOS PALSAR interferometry and field geodetic leveling for marshy soil thaw/freeze monitoring, case study from the Baikal Lake region, Russia // J. of Applied Remote Sensing. Bellingham, USA. SPIE. 2016. P. 1–24.
- [23] **Дубиков Г.И.** Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 246 с.
Dubikov, G.I. Composition and cryogenic structure of the frozen strata of Western Siberia. Moscow: GEOS, 2002. 246 p. (In Russ.)
- [24] **Ребристая О.В., Хитун О.В.** Ботанико-географические особенности флоры Центрального Ямала // Ботанический журн. 1998. Т. 83, № 7. С. 37–52.
Rebristaya, O.V., Khitun, O.V. Botanico-geographical features of the flora of Central Yamal // Botanicheskiy Zhurnal. 1998. Vol. 83, No. 7. P. 37–52. (In Russ.)
- [25] **Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б. и др.** Термоденудация на Ямале — источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 2. С. 33–42.
Dvornikov, Yu.A., Leibman, M.O., Khaim, B. et al. Thermodenudation on the Yamal Peninsula is the source of an increase in the concentration of dissolved organic matter in lakes // Earth’s Cryosphere. 2017. Vol. XXI, No. 2. P. 33–42. (In Russ.)
- [26] **Чимитдоржиев Т.Н., Дагуров П.Н., Захаров А.И. и др.** Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 1. С. 80–87.
Chimitdorzhiev, T.N., Dagurov, P.N., Zakharov, A.I. et al. Evaluation of seasonal deformations of swampy soils using radar interferometry and geodetic leveling // Earth’s Cryosphere. 2013. Vol. XVII, No. 1. P. 80–87. (In Russ.)

- [27] Дагуров П.Н., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. и др. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия L-диапазона для определения параметров снежного покрова // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 1–22. Адрес доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf> (дата обращения 05.06.2018).
Dagurov, P.N., Chimitdorzhiev, T.N., Dmitriev, A.V. et al. Radar differential interferometry of the L-band for the determination of snow cover parameters // J. of Radio Electronics. 2017. No. 5. P. 1–22. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf> (accessed 05.06.2018). (In Russ.)

Поступила в редакцию 22 января 2018 г.

Monitoring of cryogenic processes of the Yamal Peninsula based on radar data TANDEM-X and ALOS-2 PALSAR-2

KIRBIZHEKOVA, IRINA I.^{1,*}, CHIMITDORZHIEV, TUMEN N.¹,
DVORNIKOV, YURI A.², DAGUROV, PAVEL N.¹, DMITRIEV, ALEKSEY V.¹, БЫКОВ,
МИХАИЛ Е.¹, BALTUKHAYEV, ARKADY K.¹

¹Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, 670047, Russia

²Earth Cryosphere Institute SB RAS, Tyumen, 625000, Russia

*Corresponding author: Kirbizhekova, Irina I., e-mail: kirbizhekova@bk.ru

The article presents the results of the developed methods for thermal-degradation processes detection and monitoring based on the X- and L-bands radar data. The research objects are developing thermocircuits and collapsing slopes in the coastal zone of ten lakes of “Vaskiny Dachi” polygon (Central Yamal, 70°15'N, 69°05'E). To detect the formed and active cryogenic formations TanDEM-X and ALOS-2 PALSAR-2 interferometric and polarimetric data (VV, VH) of 2015–2016 were used.

The research was carried out in three directions: 1) digital terrain models (DTM) with high resolution construction using differential interferometry methods and the cryogenic formations topographical features identification, temporal changes in DTMs observation; 2) comparative statistical analysis of the total intensity and the polarimetric $H-A-\alpha$ -decomposition components for cryogenic formations and adjacent stable sites; 3) development of a technique for express detection of such formations on the basis of total intensity and polarimetric $H-A-\alpha$ -decomposition components images texture.

It is established that the intensity, polarimetric characteristics, topography parameters and textures of radar images significantly differ from those for neighbouring stable regions (more than 3σ) for active thermocircuits. Intensity variations are most significant, but the localization of cryogenic formations can be limited by the radar survey geometric conditions. For passive thermocircuits, landslides in the coastal zone, deviation of intensity and polarimetric characteristics from background $\sim \sigma$, therefore as an indicator a set of polarimetric $H-A-\alpha$ -decomposition parameters should be used. Combining parameters α and H can be the basis for express diagnostics of the occurrence and activation of cryogenic processes in the area of the present study.

Keywords: satellite radar, polarimetric decomposition, differential interferometry, TanDEM-X, ALOS-2 PALSAR-2, cryomorphogenesis.

Acknowledgements. The studies were supported by RFBR grant No. 15-29-06003 “Fundamental Problems of Monitoring the Arctic Zone Using Space Radar Interferometry and Polarimetry”.

The X-band radar data was obtained with the support of the German Aerospace Center DLR under the project “TanDEM-X The study of degradation processes of cryolithozone in the Arctic and subarctic zone by interferometry TanDEM-X” (IDEM_CALVAL015).

The L-band radar data was obtained with the support of the Japan Aerospace Agency JAXA “ALOS PALSAR 2 Crustal and cryogenic deformation monitoring in Siberia (Baikal rift, Kuznetsk coal basin) and Siberian Arctic (Yakutia, Yamal) with PALSAR-2 and TanDEM-X interferometry” (PI No. 3402).

Received 22 January 2018