

MONITORING OF CRYOGENIC PROCESSES IN THE COASTAL LAKE ZONE OF THE YAMAL PENINSULA BASED ON POLARIMETRIC DATA TANDEM-X AND ALOS PALSAR

Irina I. Kirbizhekova¹, Tumen N. Chimitdorzhiev¹, Yury A. Dvornikov²

¹Institute of Physical Material Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia

²Tyumen Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

Abstract

The possibilities of using the TanDEM-X and ALOS2 PALSAR polarimeter data of the centimeter and decimeter ranges for monitoring the cryogenic relief-forming processes of the Yamal Peninsula are investigated. Statistical analysis of seasonal changes in intensity and parameters of polarimetric H-A- α -decomposition in areas with landslides and actively growing thermocircuits of the Vaskina dacha landfill is carried out.

Keywords: satellite radiolocation, TanDEM-X, ALOS2 PALSAR, differential interferometry, polarimetric decomposition, cryomorphogenesis

МОНИТОРИНГ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ОЗЕР П-ВА ЯМАЛ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ TANDEM-X И ALOS-2 PALSAR

Кирбижекова И.И.⁽¹⁾, Чимитдоржиев Т.Н.⁽¹⁾, Дворников Ю.А.⁽²⁾

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

² Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень

Исследованы возможности применения поляриметрических данных TanDEM-X и ALOS2 PALSAR сантиметрового и дециметрового диапазонов для мониторинга криогенных рельефообразующих процессов п-ва Ямал. Проведен статистический анализ сезонных изменений интенсивности и параметров поляриметрической Н-А- α -декомпозиции на участках с оползнями и активно растущих термоцирков полигона Васькины дачи.

Ключевые слова: спутниковая радиолокация, TanDEM-X, ALOS2 PALSAR, дифференциальная интерферометрия, поляриметрическая декомпозиция, криоморфогенез.

Введение. Вследствие глобального потепления в арктических и бореальных регионах с вечной мерзлотой происходят значительные изменения ландшафта. Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) основанные на постоянно растущем потоке спутниковых данных, охватывают широкий диапазон пространственных и временных масштабов, и позволяют надежно обнаруживать изменения в ландшафтах вечной мерзлоты. В работе [1] проведен анализ развития ситуации в период 2010-2015 в области применения ДЗЗ для обнаружения и мониторинга изменений ландшафта с участием температуры поверхности, снежного покрова, топографии, поверхностных вод, растительного покрова и структуры и нарушений в результате пожаров и деятельности человека; а также возможностей датчиков, новых методов обработки изображений и многомерного анализа, расширенный публичный доступ к данным и архивам изображений, которые облегчают получение новых сведений о многодекадной динамике ландшафтов вечной мерзлоты. В работах [2-4] представлены результаты предварительной оценки техногенного воздействия на тундровые ландшафты Центрального Ямала полевыми исследованиями и методами дистанционного зондирования. Например, наблюдаются явные изменения растительного покрова на трассах и поверхностях, затронутых движением транспорта.

К числу наиболее перспективных методов ДЗЗ для обнаружения изменений относятся среди ряда других радиолокационная интерферометрия для обнаружения топографических и подземных изменений; анализ временных рядов изображений высокого пространственного разрешения и мультисенсорное слияние данных. Данные ДЗЗ также все чаще используются в качестве параметров движения в моделях вечной мерзлоты и картографических схемах. Недавние успехи в изучении наземного льда и криостратиграфии связаны с агломерацией и деградацией мерзлоты, массивным ледообразованием и оценкой содержания наземного льда [5]. Применение методов ДЗЗ позволило улучшить оценки содержания льда в замороженных отложениях.

На современном этапе большое внимание уделяется исследованию различных аспектов и возможностей применения многолетних/мультивременных мультиполяризационных данных радаров с синтезированной апертурой (РСА). В частности, методы дистанционного зондирования посредством РСА играют важную роль в современном мониторинге сельскохозяйственных культур, извлечения морфологической информации [6, 7]. Учет пространственно-временных изменений данных TerraSAR-X с двойной поляризацией HH-VV при мониторинге водно-болотных угодий Буркина-Фасо позволил повысить точность классификации до 75-97% [8].

На полуострове Ямал проводятся исследования радиотермического дистанционного зондирования влажности и температуры почвы на базе данных спутника Soil Moisture and Ocean

Salinity (SMOS) и результаты указывают на перспективы использования полных поляриметрических многоугольных наблюдений яркостной температуры в L-диапазоне с целью измерения температуры почвы в Арктическом регионе. [9, 10].

Характеристик территории исследования. Полигон исследования расположен в центральной части п-ва Ямал, в биоклиматической подзоне (CAVM Team, 2003). Высота рельефа изменяется от 0 до 58 м над уровнем моря. Среднегодовая температура варьируется от -11 до -4°C , с растущим трендом в последние 2–3 десятилетия порядка $+0,1^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Высота сезонного талого слоя (СТС) колеблется от 0,6 до 1,6 м и более в зависимости от ландшафта, засоленности слоя и т.п. По территории полигона широко распространены пластовые льды мощностью 6–30 м неглубоко вблизи поверхности. Льды перекрыты песками, суглинками и торфом. Толщина снежного покрова неравномерна, и достигает 15–30 см на горизонтальных участках, 1 м и более в понижениях. Участок характеризуется развитием рельефообразующих криогенных процессов, таких как термоэрозия, термоденудация, криогенное оползание и др. [2, 3]. Растительность на пологих склонах и днищах долин состоит из мхов, осок, кустарников и кустарничков, высотой менее 40 см. Территория 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. Размер водосборных бассейнов варьируется от 0,25 до 713,93 га (в среднем 46,65 га). Берега озер значительно варьируются от пляжей до крутых обрывов с активными криогенными процессами.

Исследования были выполнены на основе поляриметрических и интерферометрических данных C-диапазона (длина волны 3 см) TanDEM-X 04 июня, 09 и 20 августа 2015 г., а также поляриметрических данных L-диапазона (длина волны 25 см) ALOS2 PALSAR от 23 апреля и 02 мая 2015 г. и 30 апреля 2016 г.

Методика исследования. Для предварительного анализа были синтезированы RGB-изображения на основе комбинаций интенсивности разных каналов поляризации разновременных данных. На рис. 2 приведены два RGB-изображения для полигона Васькиной дачи на основе поляриметрических данных TanDEM-X от 04 июня и 20 августа 2015 г. Они демонстрируют в цвете характер отражения радиолокационного импульса на различных объектах и сезонные изменения отражательных свойств: слабое отражение от открытой поверхности воды (черный цвет), преобладание поверхностного отражения от поверхности озерного льда (голубой цвет), преобладание объемного рассеяния на участках с почвенно-растительным покровом (оттенки зеленого цвета), угловое отражение на уступах, обрывах, ледяных образованиях и торосов (оттенки красного цвета) и т.д. Наиболее крупные и активно развивающиеся криогенные объекты хорошо идентифицируются на подобных RGB-композициях, но небольшие вяло развивающиеся или «затухающие» (заплывающие) образования малозаметны.

В качестве одного из перспективных направлений обнаружения криогенных оползней и термоцирков стало непосредственное построение цифровой модели местности (ЦММ) высокого разрешения [4] и топографическое моделирование. На основе тандемных данных TerraSAR-TanDEM-X методом дифференциальной интерферометрии была рассчитана ЦММ с пространственным разрешением 8 м, а также определены такие параметры топографической модели как наклон поверхности, азимут, характеристики выпуклости и кривизны. Как оказалось, на изображениях ЦММ и/или параметров топографического моделирования хорошо видны только крупные развитые термоцирки. А слабые криогенные образования, в частности, термоцирки техногенного происхождения, а также участки обрушения береговой линии мало отличаются от соседних стабильных участков. Вероятно, для обнаружения и мониторинга таких криогенных образований потребуются ЦММ с более высоким разрешением.

Другое направление исследований базируется на физическом контрасте поверхностей стабильных и нестабильных участков, проявляющихся в различии интенсивности и поляриметрических характеристик радиолокационных изображений сантиметрового и дециметрового диапазонов TerraSAR-TanDEM-X и ALOS PALSAR 2015-2016 г.г. Распределение общей интенсивности (span) радиолокационного импульса варьируется в зависимости от сезона. В начале летнего периода, до оттаивания снежного и ледового покровов диапазон изменения

интенсивностей значительно больше и средняя интенсивность выше по сравнению с аналогичными характеристиками в августе. Статистический анализ сезонных изменений интенсивности радиолокационного импульса показал, что в целом по полигону и в прибрежной зоне (шириной порядка 50 м) 10 исследуемых озер и 10 озер со стабильными берегами (контрольных) показал, что доля криогенных образований в изменениях интенсивности в макро и мезомасштабе незначительна. В то же время локальные различия криогенных образований с соседними участками существенны, особенно при удачной геометрии съемки.



Рис. 1. а – расположение подспутникового полигона в центральной части п-ва Ямал; б – активный термоцирк, сформировавшийся и растущий в береговой зоне озера.

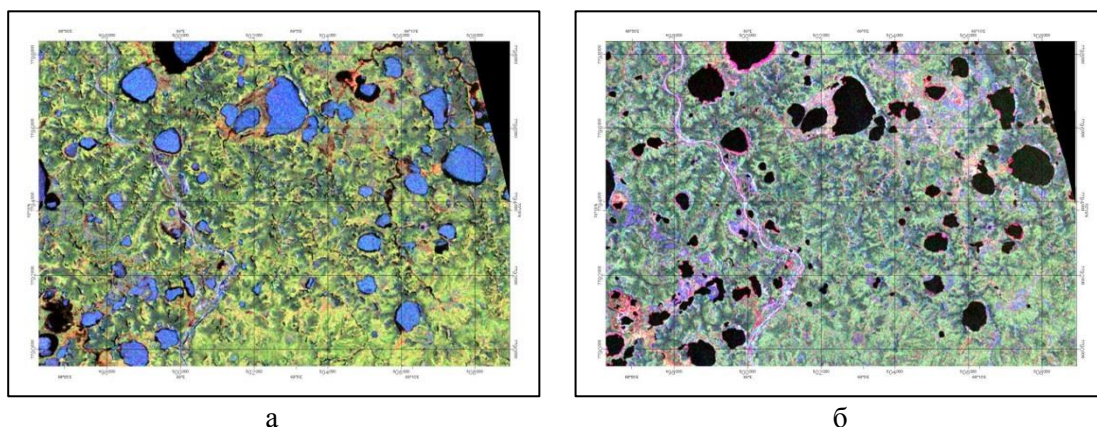


Рис. 2. RGB-изображения по поляриметрическим данным:
а – TanDEM-X 04 июня 2015 г.; б – TanDEM-X 20 августа 2015 г.

На основе поляриметрических радиолокационных данных TanDEM-X была проведена декомпозиция Клода-Поттье и для каждого пикселя полигона рассчитаны три параметра, характеризующих процессы рассеяния радиолокационного импульса: параметр α , энтропия H , анизотропия A . На синтезированных RGB-изображениях наблюдаются высокие пространственные флуктуации параметров H , A , α .

Для 10 исследуемых озер с криогенными образованиями построены профили вдоль береговой линии по периметру span , параметров α , H , A на разные даты съемки. Для сравнения эффективности каждого из указанных параметров по оси ординат отложены отклонения параметров от соответствующих средних значений и нормированных на среднее значение или среднеквадратичное отклонение и выраженные в %. Для сглаживания пространственных и сезонных флуктуаций производится дополнительное усреднение. Так как параметр анизотропия A , как правило, интерпретируется совместно с энтропией, то поэтому были также рассчитаны нормированные и центрированные показатели для комбинаций энтропии и анизотропии: $H*A$, $(1-H)*A$, $H*(1-A)$, $(1-H)*(1-A)$.

Сравнительный анализ сезонных изменений распределения параметров α , энтропии H и анизотропии A показал, что наибольшие отличия для контрольных стабильных участков и участков с термоденудационными процессами наблюдаются для энтропии H и параметра α в

середине летнего сезона после схождения снежного и ледового покровов. Распределение анизотропии A практически не испытывает сезонных изменений для обоих типов участков.

Метод апробирован на криогенных образованиях трех типов: а) термоцирков 2012-2015 гг., обусловленных повышением температуры; б) термоцирков, обусловленных техногенными факторами; в) участков обрушения береговой линии. В первом случае большинство параметров отчетливо указывает на местоположение термоцирка, при этом возможность индикации на основе анизотропии A и комбинации H^*A невелика. Во втором случае большинство параметров непригодны, существует слабая возможность индикации на основе энтропии H и комбинаций H и A . В последнем случае большинство параметров отчетливо указывает на местоположение зон разрушения, отсутствует возможность индикации на основе анизотропии A и комбинации H^*A . На рисунке 4 приведены профили нормированных и центрированных показателей для первого и последнего случаев. Как видно по рисунку большинство показателей, за исключением анизотропии A и (H^*A), являются индикаторами для объектов исследования.

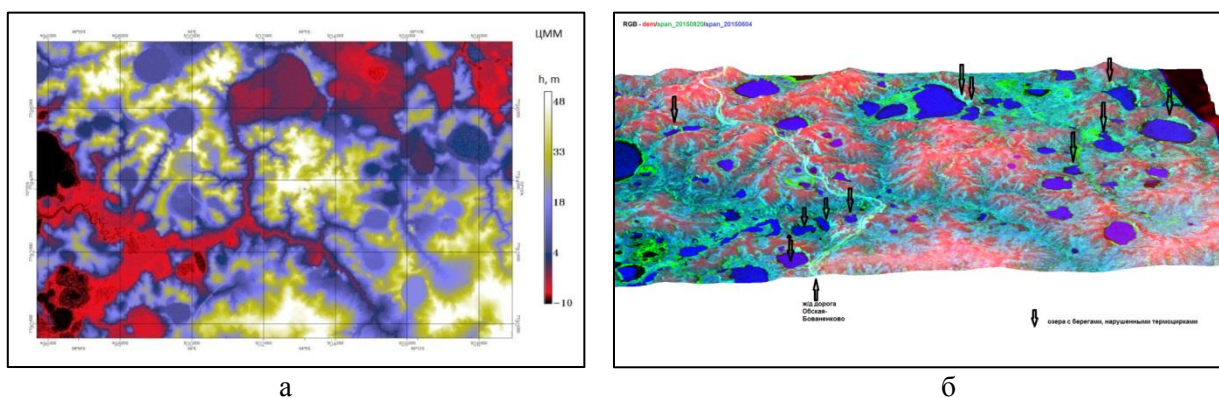


Рис. 3. а – ЦММ по интерферометрическим данным TanDEM-X с пространственным разрешением 8 м; б – 3D-модель полигона. Стрелками обозначено местоположение термоцирков, участков обрушения береговой линии.

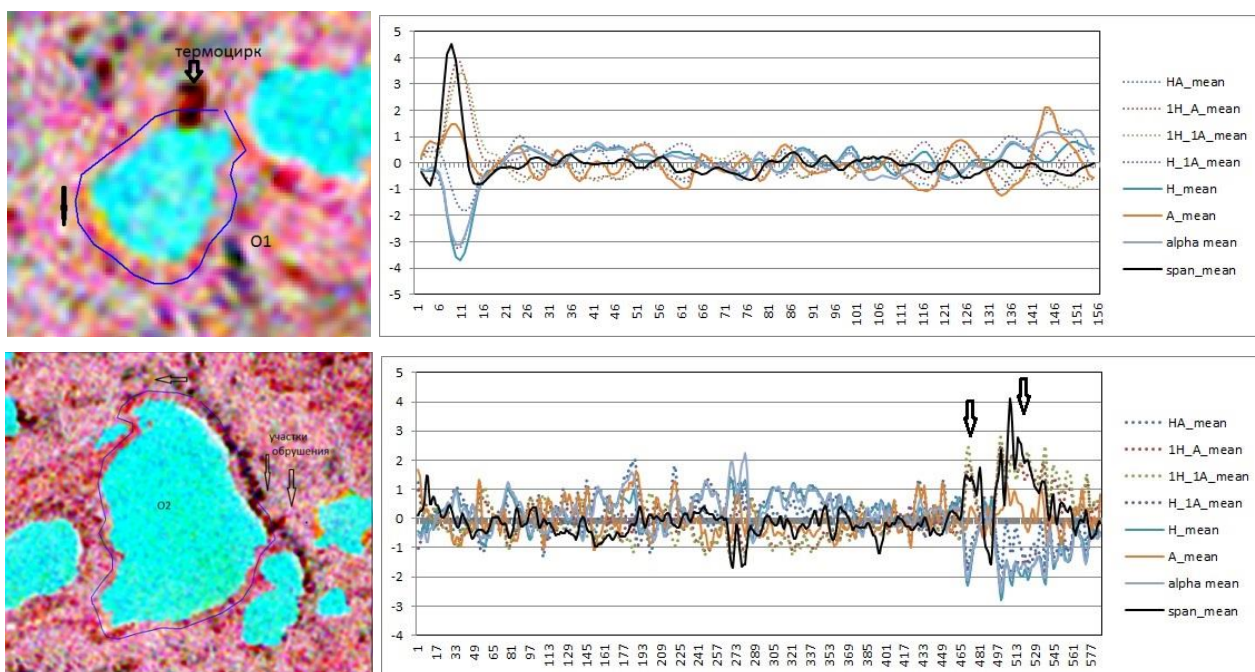


Рис. 4. Индикация криогенных образований: сверху – термоцирков, обусловленных повышением летней температуры 2012-2015 г.г.; внизу – участков обрушения береговой линии озер.

Третье направление исследований было ориентировано на оценку возможности использования количественных характеристик текстуры радиолокационных изображений интенсивности и параметров поляриметрической декомпозиции α , H , A [4]. Для 12 разновременных

изображений интенсивности, α , H , А TanDEM-X 2015 г. были рассчитаны текстурные характеристики, такие как среднее значение, вариация, диапазон значений, однородность и т.п. Синтезировано несколько десятков 40 RGB-композиций. Сравнительный анализ показал, что наиболее оптимальны для быстрого обнаружения криогенных образований сочетание текстурных характеристик положения и разброса разновременных α и H (среднее значение, вариация, диапазон значений и некоторых др.).

Заключение. В рамках исследования были получены следующие результаты:

- Показано, что для развитых термоцирков интенсивность, поляриметрические характеристики, параметры топографического моделирования, текстура изображений значительно отличаются от аналогичных показателей соседних стабильных участков, так отклонение от среднего значения береговой зоны данного озера достигает значений $2-3\sigma$;

- Установлено, что вариации интенсивности частично пригодны для локализации криогенных образований из-за влияния геометрических условий съемки, например, при недостаточной «освещенности» радиолокационным импульсом при неудачной ориентации объекта в момент радиолокации;

- Для небольших термоцирков, зон обрушения береговой линии, криогенных оползней отклонения интенсивности и поляриметрических характеристик от среднего значения порядка $1-2$, поэтому для большей надежности в качестве индикатора следует применять совокупность параметров поляриметрической $H-A-\alpha$ -декомпозиции;

- Быстрым и эффективным способом локализации криогенных образований является комбинирование текстурных характеристик разновременных радиолокационных изображений, в частности средних значений и вариаций параметра α и H .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-29-06003-офи_м).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jorgenson, M.T., Grosse, G. Remote sensing of landscape change in permafrost regions // Permafrost and periglacial processes. Oct-Dec 2016. V.27. Is.4. pp.324-338.
- [2] Khomutov, A. V.; Dvornikov, Yu. A.; Leibman, M. O.; et al. Study of techogenic disturbance dynamics and impact on landscapes of central Yamal by field and remote-sensing methods // International Conference on Arctic, Subarctic - Mosaic, Contrast, Variability of the Cryosphere. Tyumen, Russia. Jul 02-05, 2015. RAS, Siberian Branch, FundamentStoryArkos LLC SPA; Gubernia Acad. Arctic, Subarctic: Mosaic, Contrast, Variability of the Cryosphere. P. 416-419.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Gilbert, G.L.; Kanevskiy, M.; M., Julian B. recent advances (2008-2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy // permafrost and periglacial processes. V.27. Is.4.pp.377-389.
- [6] Betbeder, J., Fieuzal, R., Philippets, Y. et al. Contribution of multitemporal polarimetric synthetic aperture radar data for monitoring wheat and rapeseed crops // Journal of applied sensing. May11 2016. V.10, №026020.
- [7] Yuzugullu, Onur; Erten, Esra; Hajnsek, Irena Morphology estimation of rice field using X-band PolSAR data // 36th IEEE IGARSS. Beijing, CHINA. JUL 10-15, 2016. pp. 7121-7124.
- [8] Moser, L. Schmitt, A. Wendleder, A. et al. Monitoring of lac Bam Wetland extent using dual-polarized X-band SAR data // Remote sensing. Apr. 2016. V.8. Is.4. №.302.
- [9] Muzalevskiy, K.V., Ruzicka, Z. Retrieving soil temperature a test site on the Yamal peninsula based on the SMOS brightness temperature observations // IEEE journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing. Jun 2016. V.9. Is.6. pp.2468-2477.
- [10] Mironov, V. L.; Molostov, I. P.; Karavaysky, A. Yu. Temperature dependent multi-relaxation spectroscopic dielectric model for arctic silt clay loam soil thawed and frozen at 0,1-15 GHz // 36th IEEE IGARSS. Beijing, China. Jul 10-15, 2016. pp. 3122-3125.