

# Исследование оползневых процессов и деформаций ландшафта полуострова Ямал методами радарной интерферометрии и текстурного анализа

Т.Н. Чимитдоржиев, И.И. Кирбижекова, М.Е. Быков\*

*Институт физического материаловедения СО РАН  
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8*

Поступила в редакцию 28.02.2014 г.

Представлены результаты исследования микродеформаций почвенного покрова и оползневых процессов по-ова Ямал методами дифференциальной интерферометрии и анализа сезонных и долговременных изменений текстур радиолокационных изображений.

*Ключевые слова:* радарная интерферометрия, текстурный анализ, оползневые процессы; radar interferometry, texture analysis, landslide processes.

## Введение

До середины XX в. антропогенная деятельность была направлена главным образом на использование биоресурсного потенциала северных ландшафтов — собирательство, охотничий промысел, пастбищное животноводство с незначительными последствиями, рассеянными по большой территории [1]. В конце XX — начале XXI в., в связи с разработкой месторождений полезных ископаемых, строительством различных сооружений, дорог, нефтяных и газовых трубопроводов в арктической тундре, антропогенное воздействие приобрело очаговый и линейный характер, часто нарушая термический режим циклических процессов формирования и таяния подземных пластов льда и провоцируя необратимые последствия [2, 3].

При освоении северных территорий в настоящее время одной из наиболее актуальных задач является исследование быстротекущих и порой катастрофических изменений ландшафта, вызванных как деятельностью человека, так и глобальным потеплением. С середины XX в. наблюдается рост средней приповерхностной температуры, причем с каждым десятилетием динамика усиливается, также участились аномальные погодные и климатические явления [4–6]. По данным Росгидромета за последние 30 лет в отдельных регионах России приrost среднегодовой температуры приповерхностного слоя превысил 1 °С/10 лет.

Изменение климата в России влечет за собой ярко выраженные последствия даже на фоне мирового глобального потепления, поскольку около 63,5%

территории страны находится в легко уязвимой зоне вечной мерзлоты или криолитозоне. Как показывают данные мерзлотно-климатического мониторинга, геотермических измерений в глубоких скважинах, материалы ландшафтных исследований и региональных инженерно-геологических и геокриологических работ, современное потепление климата является основной причиной преобразований температурного режима почвенно-грунтовой толщи [7, 8].

На арктических равнинах и низменностях вопреки ожиданиям наблюдается незначительный приrost среднегодовой приповерхностной температуры, в основном за счет роста температуры в зимний период, но при этом повышение температуры воздуха сопровождается изменениями особенностей снежного покрова (высота, плотность, длительность залегания), которые до сих пор малоизучены. Наибольшее влияние на криолитозону оказывают однонаправленные изменения температуры воздуха и высоты снежного покрова [8].

Полевые наблюдения показали, что с начала 90-х гг. активизировались криогенные процессы, ускорились процессы развития склоновых оползней, термоцирков, разрушения береговых линий и т.п. [9, 10]. В настоящее время резко возросли геологические риски и вероятность значительного экономического ущерба вследствие разрушительного действия криогенных процессов. Для оперативного обнаружения, исследования и мониторинга таких явлений на протяженных и труднодоступных участках северных территорий необходимо привлекать данные дистанционного зондирования Земли.

Из-за сложных погодных условий, продолжительных полярных зим, мощного снежного покрова, огромной протяженности территории наиболее пер-

\* Тумэн Намжилевич Чимитдоржиев (tchimit@ipms.bscnet.ru); Ирина Ивановна Кирбижекова (kirbizheкова@bk.ru); Михаил Евгеньевич Быков (evgomond@yahoo.com).

спективными для исследований и мониторинга являются спутниковые методы радиолокации [11–14]. В частности, методы радарной интерферометрии продемонстрировали высокую эффективность при обнаружении горизонтальных и вертикальных смещений почвенного покрова сейсмического и техногенного характера, «морозного пучения» влажных и заболоченных участков, подвижек льда и др. [15–19].

В настоящей статье представлены результаты исследования ландшафтных изменений тестовых участков Ямало-Ненецкого округа методами дифференциальной интерферометрии и текстурного анализа на основе радиолокационных спутниковых данных дециметрового и сантиметрового диапазонов среднего и высокого разрешения, полученных ALOS PALSAR в 2007–2010 гг. и TANDEM-X в 2013 г.

### Характеристика территории исследования

В качестве объектов исследования выбраны три тестовых участка, расположенных на территории Ямало-Ненецкого округа. Исследовательская станция Васькины Дачи (70°17' с.ш., 68°55' в.д.) была заложена в 1988 г. для научного сопровождения разработки месторождения Бованенково в центральной части п-ова Ямал. Второй полигон расположен вблизи г. Надым (65°32' с.ш., 72°31' в.д.). Оба тестовых участка более 20 лет являются базой исследования оползневых и термоабразионных явлений, подвижек пластов льда, влияния климатических флуктуаций и других криогенных процессов специалистами Института криосферы Земли СО РАН, их зарубежными коллегами, аспирантами и студентами. В качестве третьего тестового участка выбран западный участок полуострова вблизи м. Марре-Сале (69°42' с.ш., 66°52' в.д.), где в 1914 г. была основана метеостанция. В последние десятилетия сотрудники метеостанции отмечают уменьшение толщины льда в Карском море и ускорение процессов обрушения береговой линии.

Полуостров Ямал расположен на севере Западной Сибири, между 68–73° с.ш. и 66–73° в.д. и широко известен благодаря открытию и началу освоения крупнейших газовых и нефтегазоконденсатных месторождений. Центральная и северная части п-ова Ямал покрыты тонким слоем осадочных отложений из крупнозернистой фракции, песка, глины и торфа, образующих хорошую дренажную структуру. Выходов коренных скальных пород нет. Средняя температура воздуха за последние 15 лет составила  $-7,5^{\circ}\text{C}$ , за последние 45 лет она возросла на  $1,3^{\circ}\text{C}$ . Территория в течение 9–9,5 мес покрыта снегом, толщина которого в среднем составляет 30 см, местами достигая 3–6 м. Толщина слоя вечной мерзлоты достигает 250–400 м, на молодых речных террасах — 50–100 м.

Установлено, что на территории широко распространены залежи пластового льда, на участках

с близким залеганием к поверхности формируются термоцирки [10]. Около 80% площади занимают склоны, и при аномально высокой летней температуре воздуха активизируются склоновые оползни — «оползни-сплывы», «солифлюкация», «быстрая солифлюкация». В настоящее время на полигонах развернуты исследования почвенных характеристик и вегетации, закладываются основы для мониторинга и моделирования быстро изменяющихся процессов с привлечением методов ДЗЗ.

### Результаты применения методов дифференциальной интерферометрии

Методы дифференциальной интерферометрии позволяют определять вертикальные и горизонтальные смещения, при этом необходимо выполнять ряд последовательных стандартных процедур [19]: поиск общих опорных точек; совмещение изображений; формирование комплексной интерферограммы; построение карты когерентности; вычитание фазового набега, характерного для гладкой Земли; фильтрацию шумов интерферограммы; развертку фазы, необходимую для построения цифровой модели рельефа (ЦМР). Для построения ЦМР нужна пара радиолокационных изображений с подходящими для интерферометрической обработки условиями съемки, для определения вертикальных смещений земной поверхности — как минимум три.

Для предварительного качественного анализа сезонных и многолетних изменений были сформированы RGB-изображения, где красным слоем представлена интерферометрическая когерентность, зеленым  $G$  — усредненная по двум датам интенсивность, синим  $B$  — разность интенсивностей за две даты. Для выявления сезонных изменений используются разносезонные снимки одного года, для долгосрочных — зимние снимки, соответствующие периоду устойчивых процессов деформаций. При такой комбинации стабильная поверхность без сезонных и долгосрочных деформаций выделяется оранжевым цветом. Участки поверхности со значительными сезонными и двугодичными микродеформациями в процессе таяния-замерзания приобретают насыщенный темно-зеленый цвет на изображении. Дальнейшая интерферометрическая обработка радарных данных по тестовым участкам позволяет построить цифровые карты относительных смещений земной поверхности между сеансами спутниковой съемки с миллиметровой точностью.

На рис. 1 представлена фильтрованная геокодированная интерферограмма по паре изображений ALOS PALSAR 5 февраля 2008 — 28 марта 2010 гг. тестового участка вблизи м. Марре-Сале.

Видно, что большая часть территории полуострова стабильна (светлые тона) — за два года между съемками деформация поверхности отсутствует. Вдоль южной и северной береговых линий протянулись

небольшие узкие участки, «просевшие» на 5–6 см (серые тона), а в центре полуострова находится территория с поднятием от 2–3 см по краям до 5–6 см в середине (темно-серые тона).

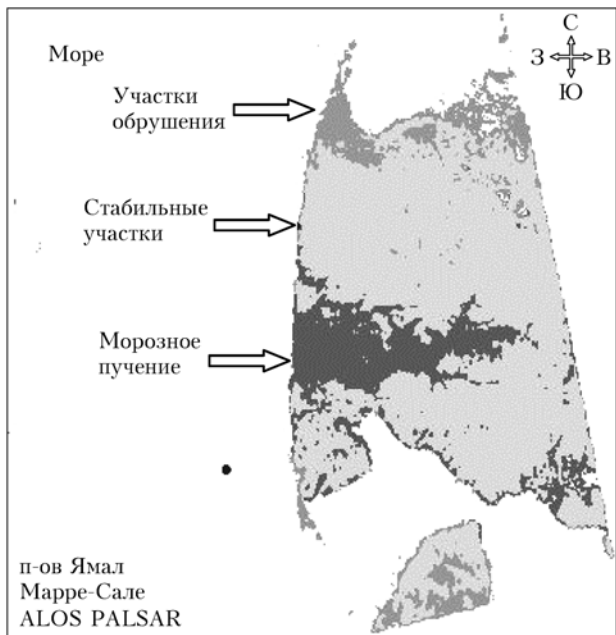


Рис. 1. Фильтрованная геокодированная интерферограмма по территории м. Марре-Сале, п-ов Ямал, по паре радиолокационных изображений ALOS PALSAR 5 февраля 2008 – 28 марта 2010 гг.

Необходимо отметить, что обозначенные деформации на рис. 1 носят долговременный характер. В частности, опускание верхней и нижней оконечностей полуострова, возможно, происходит из-за подтаивания ледовой подложки частей, выдающихся в море, а из-за перехлестывания волн через эти фрагменты происходит смыв-размыв этих выступающих частей. Центральная зона поднятия соответствует морозно-

му пучению почв вдоль заболоченного русла реки. Так как величина морозного пучения почвы пропорциональна средней температуре в зимний период [20], то поднятие до 6 см могло возникнуть за счет разницы амплитуд пучения зимой 2008 г. и более холодной зимой 2010 г.

Летом 2013 г. на основе интерферометрических данных сантиметрового диапазона TanDEM-X были проведены дистанционные измерения деформации земной поверхности тестового полигона Васькины Дачи на коротком временном интервале в 10–15 дней. Интерферометрическая когерентность радиолокационных волн трехсантиметрового диапазона позволила обнаружить процессы образования термоцирков (амфитеатровидное углубление) и термотеррас (рис. 2).

Установлено, что в период с 21 июня по 1 августа 2013 г. в нижней части большинства термоцирков произошло поднятие поверхности до 2–3 см, в отдельных местах до 4 см (рис. 3). Составлена цифровая карта пространственного распределения деформаций поверхности, произошедших за 10-дневный срок между съемками TanDEM-X.

На рис. 3 представлен пример активизации оползневых процессов за 10 дней между съемками на участке АБВ, соответствующем границе термоцирка в виде двух профилей – ЦМР и вертикальных смещений (ВС). Участок А соответствует границе термоцирка, линия АВ – склону, В – нижней части, где происходит скопление сползшего материала. Далее в нижней части термоцирка ВС уменьшаются, но сохраняют положительные значения. Отчасти это может быть следствием повышения степени влажности почвенного покрова между съемками, в результате чего уменьшается глубина проникновения радиолокационного импульса. В *L*-диапазоне при длине волны 24 см это вызывает эффект ложного поднятия до 3 см [19], в *X*-диапазоне при длине волны 3 см ложное поднятие должно быть в несколько раз меньше.

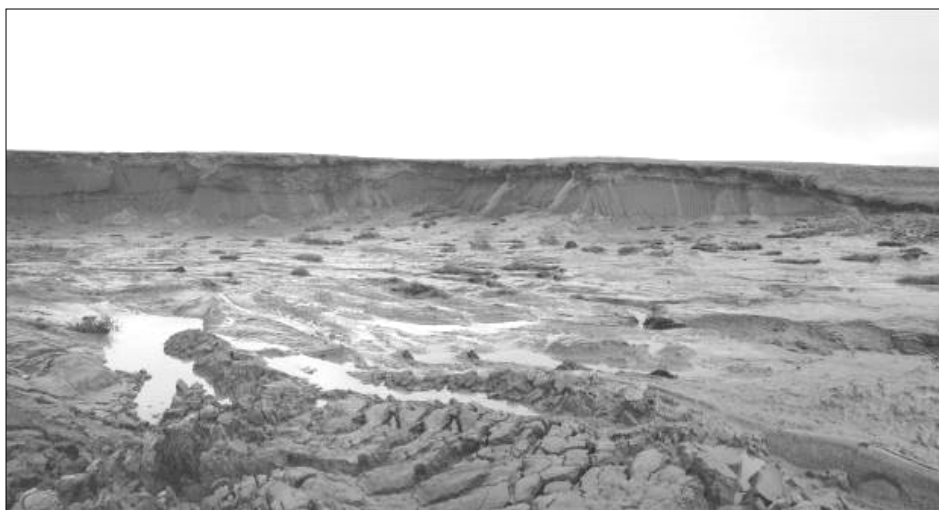


Рис. 2. Термотерраса, сформировавшаяся к августу 2013 г. на территории тестового полигона Васькины Дачи Института криосферы Земли СО РАН (п-ов Ямал)

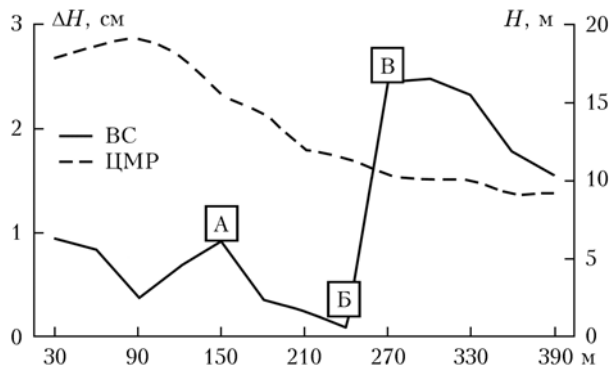


Рис. 3. Результаты интерферометрических измерений высоты рельефа  $H$  и ее изменения  $\Delta H$  за 10–15 дней между тандемными съемками TanDEM-X на участке с термоцирком полигона Васькины Дачи в августе 2013 г.

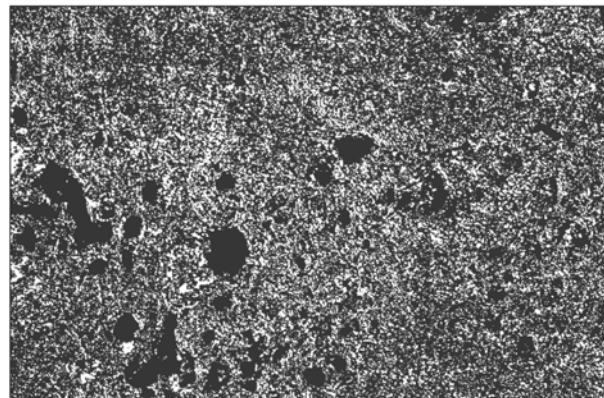
## Результаты текстурного анализа

Для обнаружения масштабных изменений земной поверхности проведен сравнительный анализ сезонных и двухгодичных изменений текстуры радарных изображений серии из четырех снимков в  $L$ -диапазоне ( $hh$ ), полученных ALOS PALSAR в 2007–2009 гг. с разрешением 15 м/пиксель.

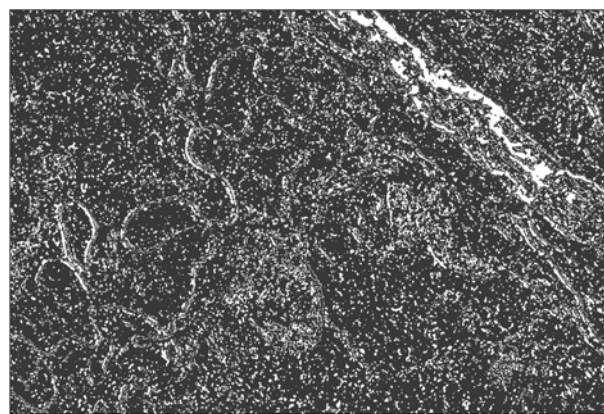
Текстурные характеристики зависят от размеров скользящего окна обработки  $w$ , но при  $w > 9$  стабилизируются. Распределение значений интенсивности радарного отклика при малых значениях  $w < 9$  обладает сильной положительной асимметрией, при увеличении  $w$  распределение нормализуется. Текстурные показатели, соответствующие середине зимнего сезона, немного отличаются друг от друга, в то время как показатели, соответствующие началу зимнего сезона, обособлены, что свидетельствует о преобладании абсолютных сезонных изменений на радарных изображениях.

Для оценки относительных вариаций были сформированы растры средних интенсивностей – средняя сезонная по трем снимкам 2008–2009 гг. и средняя по двум январским снимкам 2007 и 2009 гг. Сравнительный анализ показал, что относительные двухгодичные изменения с 2007 по 2009 гг. по исследуемым сценам почти того же порядка, что и сезонные вариации 2008–2009 гг. [19, 20]. Разница годичных и сезонных изменений носит случайный характер, а наиболее вероятные зоны долговременных вариаций связаны с показателями, выходящими за рамки статистических вариаций  $1-2-3\sigma$  с известной вероятностью. На рис. 4 представлены бинарные изображения распределения областей с преобладанием сезонных (черный цвет) и двухгодичных (белый цвет) изменений с вероятностью, соответствующей интервалу  $1\sigma$ .

Сухой снежный покров толщиной в несколько десятков сантиметров «прозрачен» для радиоволн дециметрового диапазона, которые при отражении и рассеянии от нижележащего слоя почвы дают информацию об ее физическом состоянии и соответствующих изменениях. Очевидно, что на определенной



*a*



*b*

Рис. 4. Бинарные изображения распределения зон с преобладанием сезонных (черные) и долговременных изменений (белые) на основе радиолокационных изображений ALOS PALSAR 2007–2009 гг. по полигонам: *a* – Васькины Дачи; *b* – Надым

части исследуемой территории при высокой влажности снежного покрова, большей толщине (более 1 м), при образовании ледовых торосов и заторов проницаемость резко ухудшается и отраженный радарный сигнал в основном дает информацию о поверхностных слоях.

Таким образом, по двум тестовым полигонам были сформированы карты распределения зон наиболее вероятных долговременных изменений, дифференцированных по степени вероятности. В период 2007–2009 гг. масштабные оползневые процессы на тестовых участках не наблюдались, а выявленные зоны  $2-3\sigma$  более соответствуют территории с повышенной антропогенной нагрузкой и расположены в основном вдоль трасс движения транспорта.

## Заключение

Результаты обработки радиолокационных изображений тестовых участков п-ова Ямал методами дифференциальной интерферометрии и текстурного анализа позволили:

– синтезировать RGB-компонитные изображения на основе разновременных данных для проведения качественного анализа и локализации сезонных и долговременных изменений;

– получить одновременно ЦМР высокого разрешения и пространственное распределение вертикальных смещений земной поверхности с миллиметровой точностью на различных временных интервалах, от кратковременных в 10–15 дней до сезонных и долговременных с разницей в несколько лет;

– выявить на основе статистического анализа сезонных и двухлетних изменений текстуры радиолокационных изображений участки арктической тундры, с высокой степенью вероятности подверженные деформации.

1. *Игловский С.А.* Антропогенные изменения мерзлотных условий европейского севера России и их последствия // Геокол. Инж. геол. Гидрогеол. Геокриол. 2013. № 1. С. 53–60.
2. *Губарьков А.А.* Мониторинг криогенных процессов на объектах инфраструктуры магистрального газопровода Бованенково–Ухта // Изв. вузов. Нефть и газ. 2013. № 4(100). С. 6–11.
3. *Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* / Под ред. Е.С. Мельникова (Ч. I, III) и С.Е. Гречищева (Ч. II, III, IV). М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
4. *Молов И.И.* Результаты российских исследований климата в 2007–2010 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49, № 1. С. 3–18.
5. *Караханян А.А.* Долговременные изменения атмосферной циркуляции и климата на территории Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 12. С. 1104–1106.
6. *Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Горев Е.В.* Долговременные изменения среднегодовой и среднесезонной температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири. Часть 1. Изменения среднегодовой температуры // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 684–690.
7. *Перельштейн Г.З., Павлов А.В., Буйских А.А.* Изменения криолитозоны в условиях современного климата // Геоэкология. 2006. № 4. С. 305–312.
8. *Павлов А.В., Малкова Г.В.* Динамика криолитозоны России в условиях современных изменений климата XX–XXI веков // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 44–51.
9. *Leibman M.O., Kizyakov A.I., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaya N.E.* Dynamics of the landslide slopes and mechanism of their development on Yamal peninsula, Russia. Permafrost (M. Phillips, S.M. Springman, L.U. Aronson eds.) // Proc. 8th Int. Conf. Zurich 21–25 July 2003. Lisse: A.A. Balkema, 2003. V. I. P. 651–656.
10. *Лейбман М.О., Кизяков А.И.* Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы Земли СО РАН, 2007. 206 с.
11. *Арманд Н.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли – современные системы и перспективные проекты // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 3–13.
12. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
13. *Неронский Л.Б.* Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования // Журн. радиоэлектроники. 2011. № 11. С. 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov11/14/text.html>
14. *Кантемиров Ю.И.* Обзор современных радарных данных ДЗЗ // Изв. вузов. Геод. и аэрофотосъемка. 2013. № 2. С. 69–72.
15. *Миронов В.Л., Музалевский К.В.* Космический радиолокационный мониторинг процессов замерзания и оттаивания почвы арктической тундры // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 8. С. 40–43.
16. *Евтюшкин А.В., Филатов А.В., Васильев Ю.В., Мартынов О.С., Радченко А.В.* Использование данных PALSAR при выполнении геодинимического мониторинга нефтегазовых месторождений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 2. С. 122–128.
17. *Брыксин В.М., Филатов А.В., Евтюшкин А.В.* Использование радарных изображений и DINSAR-PSINSAR технологии для мониторинга Западной Сибири и Арктики // Журн. радиоэлектроники. 2012. № 6. С. 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/text.html>
18. *Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татков Г.И., Хантапов В.Б., Дмитриев А.В., Будаев Р.Ц., Цыбенков Ю.Б.* Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
19. *Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е., Лейбман М.О., Дагуров П.Н., Кирбижекова И.И., Дворников Ю.А., Бердников Н.М.* Исследование микродеформаций и оползневых процессов северных территорий Западной Сибири на основе интерферометрических данных // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 65–68.
20. *Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Быков М.Е.* Оценка ландшафтных изменений северных территорий на основе текстуры радарных изображений // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 196–197.

*T.N. Chimitdorzhiev, I.I. Kirbizheikova, M.E. Bykov. Study of landslide processes and deformations of the landscape of the Yamal peninsula by radar interferometry and texture analysis.*

This report presents the results of a study of micro-deformation of soil and landslides on the Yamal Peninsula by the methods of differential interferometry and analysis of seasonal and long-term changes in the texture of radar images.