
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТА
В ДЕЛЬТЕ РЕКИ СЕЛЕНГА С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ
РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И НАЗЕМНОГО ГЕОРАДАРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ**

© 2011 г. Т. Н. Чимитдоржиев^{1*}, А. И. Захаров², Г. И. Татьков³, В. Б. Хаптанов¹,
А. В. Дмитриев¹, Р. Ц. Будаев³, Ю. Б. Цыбенков⁴

¹ Учреждение Российской академии наук Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

² Фрязинский филиал Учреждения Российской академии наук Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл.

³ Учреждение Российской академии наук Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

⁴ Учреждение Российской академии наук Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ

*E-mail: tchimit@pres.bscnet.ru

Поступила в редакцию 29.09.2010 г.

В работе рассмотрена возможность использования данных радиолокационной интерферометрии для оценки локальных деформаций грунта вследствие морозного пучения глинистых почв. Качественная валидация интерферометрических измерений была проведена при помощи георадарного исследования и лабораторного анализа гранулометрического состава и влажности почвы. Показано, что радарная интерферометрия позволяет оценить ареалы возникновения криогенных деформаций и амплитуду вертикальных смещений подстилающих покровов.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, георадарное зондирование, криогенные деформации, глинистые почвы

ВВЕДЕНИЕ

Методы радиолокационной (РЛ) интерферометрии развиваются в мире на протяжении последних 20 лет. Этот метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) использует информацию о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных в съемках одного и того же участка местности одноантенной РЛ-системой с повторяющихся орбит носителя (интерферометр с мягкой базой) (Rosen et al., 2000). Получаемый методом дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) измерительный материал, как правило, предоставляет детальную площадную картину радиальных перемещений отражающей поверхности в пределах РЛ-снимка, а не отдельные профили или точечные измерения. Измеряемые мелкомасштабные смещения имеют различную природу и могут быть следствием тектонической активности, оползневых и карстовых процессов, хозяйственной деятельности человека и др. Возможности ДРИ впервые продемонстрированы в (Gabriel et al., 1989) на примере просянок с.-х. полей. Яркие примеры деформации земной поверхности в результате землетрясений приведены в (Zebker et al., 1994; Xia Ye, 2005). Проседание участков

земной поверхности в районах нефтедобычи описано в (Fielding et al., 1998). Из отечественных работ можно упомянуть (Захаров, Тугаринов, 1998; Кучерявенкова, Захаров, 2002) с описанием наблюдений динамики водных поверхностей водоемов, проявлявшейся в колебаниях уровня ледовых и прибрежных почвенных покровов.

Несмотря на значительное количество работ по данной тематике в целом, в известной нам литературе нет сведений о применении радарных интерферометрических методов для изучения столь важного явления, как локальные деформации грунтов вследствие криогенных процессов, хотя напряжения, возникающие при морозном пучении почвы, способны вызвать разрыв корневой системы растений, деформацию и смещение оснований зданий и сооружений (Киселев, 1985). В настоящее время в связи с хозяйственным освоением слабообжитых районов Прибайкалья, Забайкалья, Якутии и других территорий, расположенных в зоне вечной мерзлоты, представляется актуальным использование этого метода для уточнения ареалов развития и оценки интенсивности криогенных деформаций.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой ДРИ при изучении и картировании криогенных процессов располагается в сухопутной части Байкальской рифтовой зоны – Усть-Селенгинской депрессии, отличающейся высокой динамикой подстилающей поверхности. При впадении в оз. Байкал р. Селенга сформировала одну из крупнейших озерных дельт площадью около 1120 км², состоящую из множества протоков и островов. Ежегодно р. Селенга сбрасывает в оз. Байкал в среднем 2.7 млн. тонн твердого стока, постоянно наращивая площадь дельты. В рельефе дельтового участка преобладают аккумулятивные террасы низкого и среднего высотных уровней, старичные озера, береговые валы и лагуны. Верхняя часть инженерно-геологического разреза, представленная рыхлыми четвертичными отложениями, характеризуется значительной изменчивостью мощности, состава, литологического строения, уровня грунтовых вод, что, несомненно, влияет на развитие сезонных криогенных процессов.

Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности в дельте р. Селенга использовались данные радара L-диапазона PALSAR (с длиной волны 23 см), установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство, JAXA). Радар предназначен для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли и позволяет в зависимости от режима сканирования (FBS, FBD, ScanSAR, PLR и режим прямой передачи данных) получать изображения с пространственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40–70 км до 250–350 км. Основным преимуществом радара PALSAR перед другими современными спутниковыми радарными (ERS-1, 2) является его функционирование в более длинноволновом диапазоне, что в большинстве случаев решает проблему временной декорреляции отраженных сигналов, вызванной изменениями растительного и снежного покровов, а также флуктуациями электрических свойств атмосферы. При этом режим съемки PALSAR PLR (поляриметрическая съемка) позволяет повысить уровень когерентности отраженных сигналов за счет подбора оптимальных видов поляризации сигнала. Данные режима FBS (однополяризационные – HH или VV-режимы съемки) характеризуются наиболее высоким пространственным разрешением (порядка 7 м), что обеспечивает наиболее детальную картину смещений участков поверхности. Можно утверждать, что данные ALOS PALSAR характеризуются наиболее высокой детальностью и большей интерферометрической когерентностью по сравнению с данными других спутниковых радаров, несмотря на то, что минимально возможный временной интервал

между двумя последовательными съемками равен 46 дням.

Для изучаемого участка (рис. 1а) была подобрана интерферометрическая пара (начало января и конец февраля 2009 г.) снимков ALOS PALSAR, полученная в режиме FBS на согласованной горизонтальной поляризации. Этот режим с высокой разрешающей способностью является основным рабочим режимом, в том числе и для интерферометрических наблюдений. Съемка выполнена в зимний период, характеризующийся наибольшей динамикой сезонно-мерзлого слоя на побережье оз. Байкал. Интерферометрическая база радара (с мягкой базой) составляла около 350 м.

При построении интерферограммы для участка Усть-Селегинской впадины в полосе размером 50 × 70 км (рис. 1б) выполнялись следующие стандартные этапы обработки сигнала: совмещение изображений; формирование интерферограммы; построение карты когерентности; вычитание фазового набега, характерного для гладкой Земли (выглаживание интерферограммы); фильтрация шумов интерферограммы; развертка фазы, необходимая для построения рельефа местности. При формировании дифференциальной интерферограммы использована модель SRTM, довольно точно характеризующая равнинный рельеф дельты Селенги.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В центральной части Усть-Селенгинской впадины на интерферограмме выделяются локальные поднятия линейной формы – предположительно ареалы морозного пучения грунта (указаны стрелками на рис. 1б). Один из таких участков линейного поднятия расположен в долине р. Шумиха – палеорусле р. Селенга. В ходе миграции основного русла Селенги к северо-востоку данная протока была “отшнурована” песчаной пересыпью в районе верхнего окончания и превратилась в старицу. Современное питание р. Шумиха происходит за счет атмосферных осадков и подземного стока по древнему руслу; большая часть современной поймы заболочена. Информация о вертикальных перемещениях земной поверхности за 46 дней между съемками кодирована на интерферограмме в градациях серого (рис. 1б). На представленной неразвернутой интерферограмме для участка горного обрамления Усть-Селенгинской впадины рельеф не скорректирован, поэтому при вариациях высот рельефа, превышающих 150 м, наблюдаются интерферометрические полосы из-за 2 π неоднозначности фазовых измерений.

При наземных геоморфологических обследованиях тестового участка предполагаемые ареалы распространения криогенных деформаций пучения

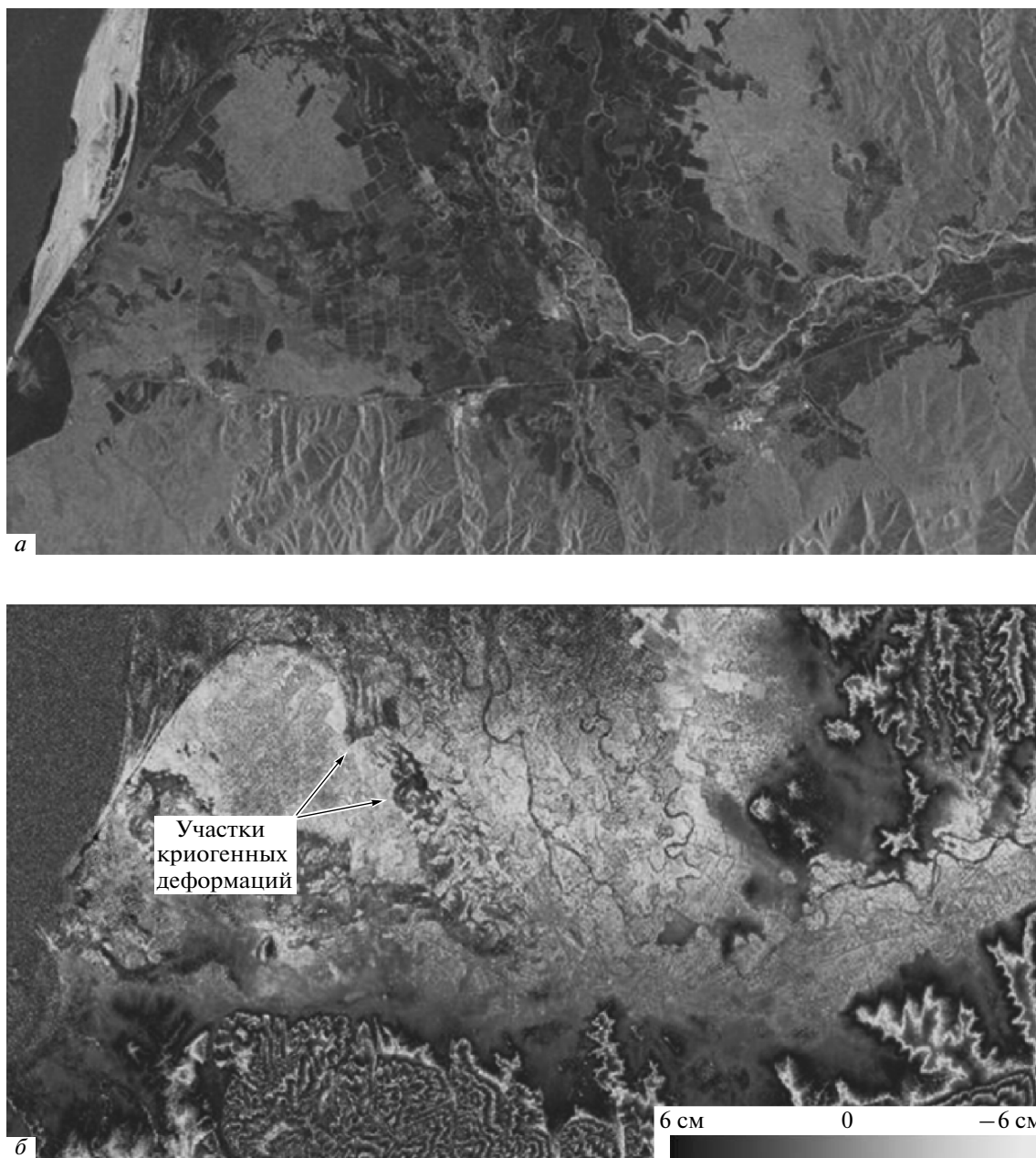


Рис. 1. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (б) для тестового полигона в дельте р. Селенга.

идентифицированы как локальные понижения местности – заболоченная пойма р. Шумиха. Для оценки уровня грунтовых вод на тестовом участке в феврале 2010 г. при мощности снежного покрова до 0.4 м проведены георадарные зондирования. Зондирование выполнено георадаром “Око-2” с антенным блоком АБ-400, имеющим центральную частоту спектра зондирующего импульса 400 МГц и глубину зондирования до 5 м (Радиотехнический прибор, 2009). Георадарный профиль длиной 220 м пересекает пойму и надпойменную террасу р. Шумиха, разность высот которых в среднем составляет

4 м. При выполнении георадарного зондирования использовалась навигационная спутниковая GPS система с точностью определения координат в плане ± 30 м, что вполне достаточно для позиционирования профиля и совмещения его с данными спутниковой интерферометрии, поскольку точность привязки последних несколько хуже. Профиль вертикальных смещений грунта, полученный по интерферограмме, представлен на рис. 2а.

По георадарным данным, мощность приповерхностного мерзлого грунта в пойменной части достигает 1 м; в террасовой – мощность слоя промерз-

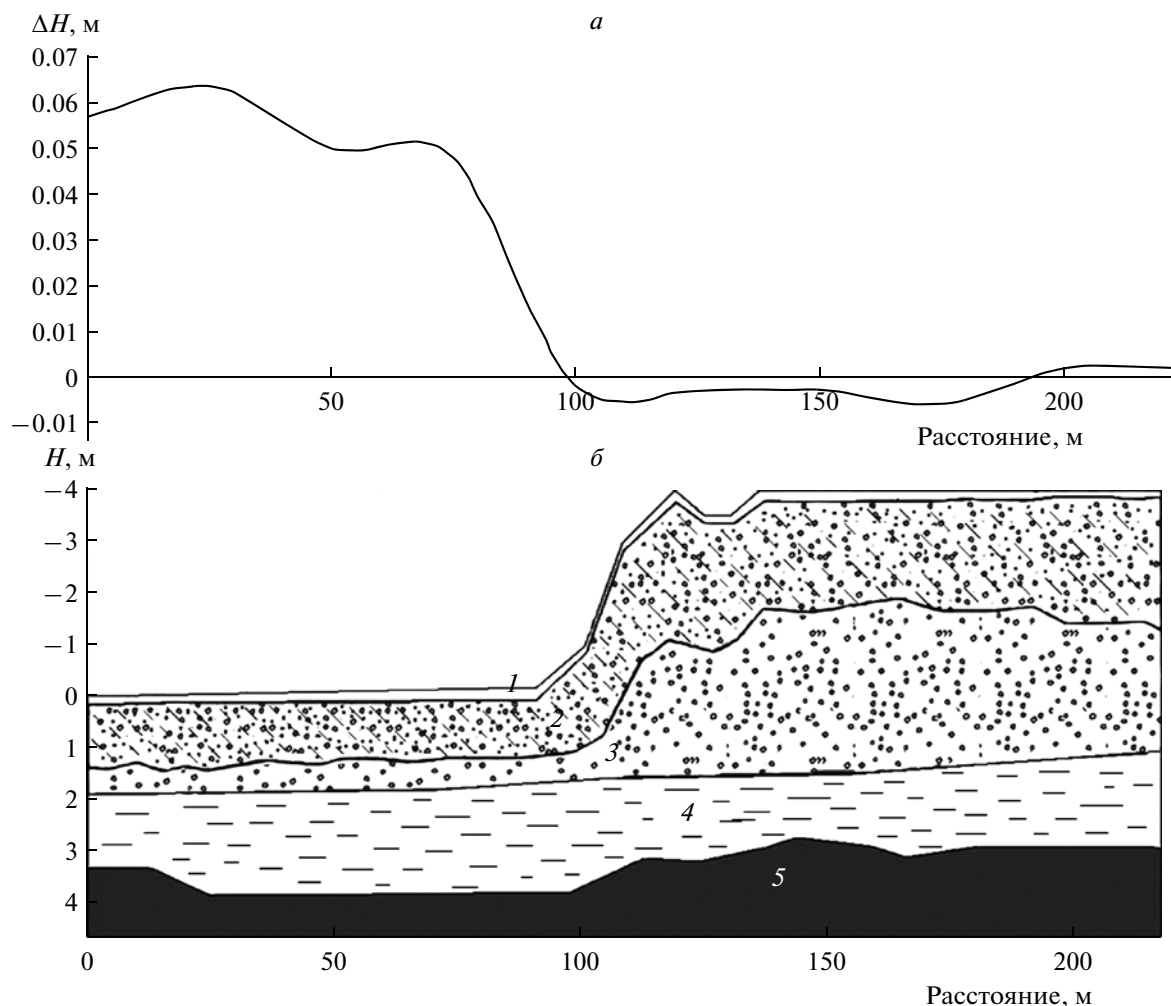


Рис. 2. Результаты измерений по данным спутниковой РЛ-интерферометрии (а) и интерпретационная модель (б) георадарного профиля “Колесово”.

шего грунта возрастает вдвое (рис. 2б). Значительные различия мощности слоя мерзлого грунта объясняются тепляющим влиянием обводненного горизонта, залегающего в пределах поймы на глубине 1.5 м от поверхности, в то время как на террасе водоносный горизонт залегаєт на глубине около 5 м от поверхности. Подошва водоносного слоя прослеживается не на всем протяжении профиля. Можно оценить мощность обводненного горизонта – до 4–5 м в масштабе глубин исходной георадарограммы (принятую для диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4$). Реальная толщина обводненного слоя с поправкой на диэлектрическую проницаемость воды составляет 1.5–2 м (рис. 2б).

Сопоставлением вертикальных смещений поверхности рельефа, вычисленных по данным спутниковой дифференциальной РЛ-интерферометрии за период 13 января – 28 февраля 2009 г., с интерпретационной моделью георадарного профиля “Колесово”

установлено, что максимальные значения криогенных деформаций поверхности рельефа достигают +6 см в пойменной части р. Шумиха (рис. 2а). На надпойменной террасе вертикальные смещения незначительны и находятся в пределах

Результаты анализа почвы на исследуемом профиле

Глубина, см	Удельный вес	Гигровлага, %	Влажность, %
0–10	2.03	5.25	100
10–20	1.79	6.76	65.5
20–30	2.06	4.23	74
30–35	То же	4.79	67.5
35–44	»	0.46	16
45–50	2.49	2.22	14
50–60	2.58	0.57	То же

погрешности интерферометрических измерений, которые оцениваются в ± 1 см.

Цифрами на рис. 2б обозначены: 1 – снег; 2 – мерзлый слой грунта; 3 – талый слой грунта; 4 – обводненный слой грунта; 5 – водоупорный горизонт.

Для определения гранулометрического состава и влажности почвы слоя 2 (см. рис. 2б), на исследуемом профиле были взяты почвенные пробы до глубины 60 см. В пойменной части слоя на глубинах 0–40 см характерно распространение тяжелосуглинистых и глинистых почв, с преобладанием пылеватой и илистой фракции, содержание физической глины достигает 45.8%. Высокая влагоемкость и низкая водопроницаемость затрудняют дренаж почвы и приводят к переувлажнению верхней части разреза (таблица). С увеличением глубины отмечается преобладание песков и супесей, и, как следствие, снижается влажность разреза.

Таким образом, сочетание глинистого и суглинистого состава почв с водным и термическим режимами создают наиболее благоприятные условия для развития процесса морозного пучения верхней части разреза пойменных отложений. Наблюдаемое на интерферограмме формирование криогенных деформаций следует рассматривать как следствие массивного распучивания увлажненных пойменных супесчано-песчаных отложений, суглинков и глины (Шерстнев, 2005).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наземная заверка ареалов короткопериодных (с начала января по конец февраля) деформаций поверхности рельефа Усть-Селенгинской депрессии подтвердила хорошее разрешение РЛ-интерферометрии при картировании областей распространения опасных инженерно-геологических – криогенных – процессов, в частности, деформаций пучения. Исходя из климатических особенностей района, где наибольшее сезонное промерзание грунтов наблюдается в феврале-начале марта, и наземных георадарных измерений, можно предположить, что в конце февраля 2009 г. завершилось промерзание грунтов на всю мощность (до 2.5–3.5 м). Переувлажненность исследуемых участков в пойме р. Шумиха, их удаленность от основного русла Селенги на 3–6 км способствовали формированию линейных зон криогенных деформаций – в основном за счет массивного распучивания пойменных отложений суглинистого и глинистого состава, а не в результате подъема поверхности рельефа при формировании сезонно-напорных вод.

Отсутствие аналогичных поднятий земной поверхности на более обводненных участках, в частности, в пределах рукавов современной дельты Селенги, связано, вероятно как с преобладанием в

сезонно-мерзлом слое хорошо дренируемых супесчано-песчаных отложений, так и с отепляющим действием водного потока и оз. Байкал.

Исследования криогенных деформаций увлажненных грунтов методом спутниковой дифференциальной радарной интерферометрии могут быть полезны при планировании строительства, оценки интенсивности и прогноза криогенных процессов на больших площадях, при составлении инженерно-геологических карт, зонировании территорий в целях землеустройства и земельного кадастра, составлении генпланов поселений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-05-98038, 08-02-98010-р) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров А.И., Тугаринов П.В. Исследование динамики ледовых покровов побережья Антарктиды по данным интерферометрической съемки РСА “Алмаз-1” // Радиотехника. 1998. № 12. С. 63–67.

Кучерявенкова И.Л., Захаров А.И. Применение радарной интерферометрии для исследования динамики земных покровов и тропосферы // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 3. С. 35–43.

Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) ОКО-2. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Версия 2.6. 2009 г. / <http://www.logsys.ru/>

Киселев М.Ф. Предупреждение деформации грунтов от морозного пучения. Л.: Стройиздат, 1985. 130 с.

Шестернев Д.М. Криогенные процессы Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 262 с.

Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. № 17. P. 3215–3218.

Gabriel A.K., Goldstein R.M., and Zebker H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 9183–9191.

Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodrigues E., Goldstein R.M. Synthetic aperture radar interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.

Xia Ye. Bam earthquake: Surface deformation measurement using radar interferometry // Acta Seismol. Sinica. 2005. V. 18. № 4. P. 451–459.

Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M., Gabriel A., Werner C.L. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 19617–19634.

Study of Soils Cryogenic Deformation in Selenga River Delta by Means of SAR Interferometry and Georadar Sounding

T. N. Chymitdorzhiev¹, A. I. Zakharov², G. I. Tatkov³, V. B. Haptanov¹, A. V. Dmitriev¹,
R. C. Budaev³, J. B. Cybenov⁴.

¹*Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

²*Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region*

³*Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

⁴*Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

An assessment of INSAR technique applicability for clayey soils local deformations because of frosts heave was made. Qualitative validation of radar interferometric measurements by means of soils georadar sounding and laboratory analysis of soil granulometric composition and moisture was carried out. It is shown that INSAR technique allows the detection of areas of cryogenic deformations and estimation of the deformations amplitude.

Keywords: radar interferometry, georadar sounding, cryogenic deformations, clayey soils