

ТАТЬКОВ Г.И.

Директор Геологического института
СО РАН, д.г.-м.н., г. Улан-Удэ,
tatkov@gin.bscnet.ru

ЧИМИТДОРЖИЕВ Т.Н.

Заместитель директора Института
физического материаловедения СО
РАН, д.т.н., г. Улан-Удэ,
evgomod@yahoo.com

БЫКОВ М.Е.

Младший научный сотрудник
Института физического
материаловедения СО РАН, г. Улан-
Удэ, evgomod@yahoo.com

ХАПТАНОВ В.Б.

Ведущий научный сотрудник
Института физического
материаловедения СО РАН, к.ф.-
м.н., г. Улан-Удэ,
evgomod@yahoo.com

ЗАХАРОВ А.И.

Заведующий лабораторией
радиолокационных систем и
методов Института радиотехники и

электроники им. В.А. Котельникова

РАН, к.ф.-м.н., г. Фрязино
Московской области

БАЛДАНОВ Н.Д.

Старший преподаватель Института
землеустройства, кадастров и
мелиорации Бурятской
государственной
сельскохозяйственной академии,
к.б.н., г. Улан-Удэ

МУХОРИН Е.А.

Старший преподаватель Института
землеустройства, кадастров и
мелиорации Бурятской
государственной
сельскохозяйственной академии, г.
Улан-Удэ

ЦЫБЕНОВ Ю.Б.

Научный сотрудник Института
общей и экспериментальной
биологии СО РАН, к.б.н., Улан-Удэ

TATKOV G.I.

The director of the Geological Institute
of the Siberian Branch (SB) of the
Russian Academy of Sciences (RAS),
doctor of geological-mineralogical
sciences, Ulan-Ude,
tatkov@gin.bscnet.ru

CHYMITDORZHIEV T.N.

The deputy director of the Institute of
Physical Materials Science of the SB
RAS, doctor of technical sciences,
Ulan-Ude, evgomod@yahoo.com

BYKOV M.E.

A research assistant of the Institute of
Physical Materials Science of the SB
RAS, Ulan-Ude, evgomod@yahoo.com

HAPTANOV V.B.

A leading researcher of the Institute of
Physical Materials Science of the SB
RAS, candidate of physical-
mathematical sciences, Ulan-Ude,
evgomod@yahoo.com

ZAKHAROV A.I.

The head of the Laboratory of
Radiolocation Systems and Methods
of the V.A. Kotelnikov Institute of
Radio Engineering and Electronics of
the RAS, candidate of physical-
mathematical sciences, Fryazino of the
Moscow Region

BALDANOV N.D.

A senior lecturer of the Institute of
Land Management, Cadastres and
Melioration of the Buryatian State
Agricultural Academy, candidate of
biological sciences, Ulan-Ude

MUHORIN E.A.

A senior lecturer of the Institute of
Land Management, Cadastres and
Melioration of the Buryatian State
Agricultural Academy, Ulan-Ude

TSIBENOV U.B.

A researcher of the Institute of General
and Experimental Biology of the SB
RAS, candidate of biological sciences,
Ulan-Ude

ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ АРЕАЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ

APPLICATION OF ALOS PALSAR SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY TO MAP AREAS AND MEASURE INTENSITY OF FROST HEAVING OF SOILS

Ключевые слова: спутниковая дифференциальная радарная интерферометрия; георадарное зондирование; повторное геодезическое нивелирование; морозное пучение.

Аннотация: на примере тестового полигона в дельте реки Селенги показана возможность использования данных спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии L-диапазона (при длине волны 23 см) для оконтуривания ареалов и оценки вертикальных амплитуд морозного пучения грунтов. На основе материалов многократной спутниковой съемки, полученных с японского спутника ALOS с помощью георадара PALSAR, для тестового полигона сформирован набор интерферометрических пар, характеризующих сезонную динамику вертикальных движений земной поверхности в период 2007–2010 годов. Для наземной проверки интерферометрических данных в период с января по октябрь 2011 года для данного участка проведена геодезическая нивелировка III–IV классов. Установлено хорошее совпадение сезонных трендов вертикальных деформаций, вычисленных по данным спутниковой интерферометрии и измеренных путем наземного нивелирования. Для проверки выделенных на радарных изображениях ареалов распространения криогенного пучения грунтов выполнено наземное профильное георадарное зондирование и определены гранулометрический состав и влажность грунтов из приповерхностного слоя.

Key words: satellite differential radar interferometry; georadar sensing; repeated geodetic leveling; frost heaving.

Abstract: the article shows possibility of using satellite differential radar interferometry of the L-band (the wavelength of 23 cm) to contour the areas and assess the vertical amplitudes of soil frost heaving on the example of a test site in the Selenga river delta. A set of interferometric pairs characterizing the seasonal dynamics of the earth surface vertical movements in 2007–2010 was obtained for the test site on the basis of repeated satellite images received from the Japanese ALOS satellite using the PALSAR georadar. Geodetic leveling of III–IV classes was carried out for ground-based control of the interferometric data in the period from January to October in 2011. Good agreement between the seasonal trends of the vertical deformations calculated using the satellite interferometry data and the results of ground-based leveling is revealed. Ground-based profile georadar sensing is carried out, the granulometric composition and humidity of the near-surface soils are determined to control the cryogenic soil heaving areas contoured in the radar images.

Введение

Отрицательный опыт строительства и эксплуатации автодорог, трубопроводов, аэродромов и других сооружений в районах криолитогеоза [1, 2, 11, 13, 14] убедительно доказывает необходимость не только картирования ареалов распространения, но и получения надежных количественных оценок гидротермических деформаций (морозного пучения) грунтов, в том числе на основе внедрения новых дистанционных технологий.

Криогенное пучение — сложный процесс объемного деформирования увлажненных дисперсных грунтов при промерзании. Морозное пучение в природных условиях подразделяется на сезонное и многолетнее. Криогенные деформации грунтов могут носить как площадной, так и локальный характер [2, 4–6, 11, 17]. Важнейшими физико-географическими факторами, влияющими на пучение, являются: климат, растительность, почвы, поверхностные и грунтовые воды.

Сезонное морозное пучение грунтов сопровождается возникновением различных форм мезо- и микрорельефа (площадного пучения, бугров пучения и др.) и изменениями растительного покрова, на выявление которых ориентированы дистанционные ландшафтно-индикационные методы [4–6, 10, 12, 15]. Масштаб исследований при использовании ландшафтно-индикационного подхода может меняться от мелкого (необходимого для составления обзорных геокриологических карт) до крупного (при изысканиях под конкретные сооружения). Многие факторы, определяющие величину морозного пучения, этим косвенным методом не учитываются, а потому зависимости «ландшафт — степень морозного пучения» могут существенно различаться для разных районов. В частности, минеральный состав глинистых фракций способен изменить величину морозного пучения в 4–8 раз, а состав обменных катионов — в 4–5 раз [11]. Поэтому наряду с ландшафтно-индикационным методом действующими нормативами допускается определение характеристик морозного пучения в лабораторных условиях по гранулометрическому составу и некоторым физическим показателям [13, 14]. Однако использование только лабораторных данных зачастую приводит к весьма грубым оценкам, а мониторинг деформаций *in situ* подразумевает длительные наблюдения на мерзлотных стационарах, что не всегда выполнимо.

Несмотря на значительное число публикаций по результатам дистанционного зондирования поверхности Земли в оптическом, инфракрасном, радиодиапазонах, на сегодняшний день практически нет методик и технологий, количественно характеризующих не только изменения ареалов распространения, но и интенсивность криогенных деформаций.

В связи с освоением труднодоступных территорий Крайнего Севера, Восточной Сибири и Якутии особую актуальность приобретает современная технология дистанционного зондирования методом радарной интерферометрии, учитывающая не только амплитуду отраженного сигнала (как при ландшафтно-индикационном подходе), но и его фазовые характеристики. Регистрация изменения фаз позволяет вычислять рельеф подстилающей поверхности, а при использовании нескольких пар изображений, приведенных к одной орбитальной точке, но разнесенных по времени, также определять скорости деформаций поверхностного рельефа. В перспективе применение радарной интерферометрии позволит перейти от индикационных подходов (основанных на использовании амплитудных изображений) к количественным характеристикам деформаций морозного пучения и сократить тем самым объем долговременных наблюдений на мерзлотных стационарах, повысить достоверность инженерных изысканий и мерзлотных карт нового поколения.

Исходя из этого цель настоящей статьи — оценить возможности спутниковой радарной интерферометрии ALOS PALSAR при картировании ареалов распространения и интенсивности (амплитуд, скорости) криогенного пучения грунтов.

Методика спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии

Метод спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) активно развивается на протяжении последних 20 лет и базируется на измерениях разностей фаз эхо-сигналов от пространственно разнесенных точек при съемках одного и того же участка местности одноантенной радиолокационной системой с повторяющихся орбит носителя (с помощью интерферометра с мягкой базой) [16, 18–22].

После повторной радарной съемки и уточнения орбитальных данных изображения попиксельно совмещаются. Перемножением двух комплексно сопря-

женных радарных снимков формируется интерферограмма. На ней полными циклами фазы (2π) кодируется информация обо всех вертикальных подвижках, произошедших между съемками. Относительная фаза двух соседних пикселей на интерферограмме $\Delta\psi_{\text{инт}}$ может быть представлена в виде суммы компонент:

$$\Delta\psi_{\text{инт}} = \Delta\psi_{\text{плоск}} + \Delta\psi_{\text{топо}} + \Delta\psi_{\text{смещ}} + \Delta\psi_{\text{атмосф}} + \Delta\psi_{\text{шум}}, \quad (1)$$

где $\Delta\psi_{\text{плоск}}$ — компонента плоской Земли, связанная с различиями при повторной съемке без учета рельефа; $\Delta\psi_{\text{топо}}$ — фазовый набег за счет обзора топографии под разными углами; $\Delta\psi_{\text{смещ}}$ — фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками; $\Delta\psi_{\text{атмосф}}$ — вклад, связанный с неоднородностями тропосферы; $\Delta\psi_{\text{шум}}$ — вклад от остальных источников электромагнитного шума.

Первые два слагаемых ($\Delta\psi_{\text{плоск}}$ и $\Delta\psi_{\text{топо}}$) могут быть аналитически рассчитаны с помощью уточнения орбит и использования внешних цифровых моделей рельефа (ЦМР).

В данной работе применялся метод дифференциальной интерферометрии, который заключается в обработке двух и более интерферограмм с целью учета различных компонент в формуле (1) [20]. Основным результатом использования метода ДРИ является интерферограмма, из которой удален набег фазы за счет топографии. Получаемый в результате обработки материал, как правило, описывает детальное площадное распределение радиальных перемещений отражающей поверхности в пределах радиолокационного снимка, а не отдельные профили или точечные измерения. Фиксируемые вертикальные и горизонтальные смещения могут иметь различную природу и быть следствием тектонической активности, криогенных, оползневых и карстовых процессов, хозяйственной деятельности человека и других факторов [7, 8, 16, 18–22].

Для картирования ареалов и оценки вертикальных деформаций морозного пучения в дельте реки Селенги были использованы данные радара PALSAR (при использовании длины волны 23 см), установленного на спутнике ALOS (Японского аэрокосмического агентства JAXA). Этот радар предназначен для круглосуточного и всепогодного наблюдения Земли. При его использовании в зависимости от режима сканирования (FBS, FBD, ScanSAR, PLR, прямой передачи данных) формируются изображения с простран-

ственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40–70 км до 250–350 км. Минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками одного и того же участка земной поверхности составлял 46 дней.

Основным преимуществом радара PALSAR по сравнению с другими современными спутниковыми радарными (ERS-1,2 и др.) 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 сигнала вследствие тропосферных неоднородностей. Для вычисления амплитуд и картирования ареалов были подобраны радарные изображения, полученные в режиме FBS (при горизонтальной поляризации на излучение и прием) с пространственным разрешением на местности порядка 7–10 м.

Для геокодирования, цветовой коррекции и составления ГИС-проектов использовались программные комплексы DORIS, NEST, RAT и MapInfo. Результирующие картографические продукты (карты смещений) представлялись как в растровых (GeoTIFF), так и в векторных (Shapefile) форматах.

Исходные данные и район исследований

Тестовый полигон, подобранный для оценки возможностей метода спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии при мониторинге и картировании опасных криогенных процессов, располагается в Усть-Селенгинской депрессии — сухопутной части дельты р. Селенги. В результате высокой сейсмотектонической активности и длительно развивающихся русловых процессов при впадении этой реки в озеро Байкал образовалась одна из крупнейших озерных дельт площадью около 1120 км², состоящая из множества протоков и островов. 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 дисперсных, преимущественно песчаных, глинистых и пылеватых супесчаных отложений, колебаниями уровня грунтовых вод, влияющими на развитие сезонных криогенных процессов. Достоверных сведений об обнаружении горизонтов многолетнемерзлых

пород и пучинистых грунтов в дельте нет, хотя известны многочисленные заболоченные пойменные участки (Калтусный прогиб, Посольское болото) с развитыми мощными торфяниками.

Многократная съемка Усть-Селенгинского тестового полигона радаром PALSAR со спутника ALOS позволила сформировать набор интерферометрических пар радиолокационных изображений для разных временных интервалов (сезонов) в 2007–2010 годах. Одна из таких пар (начало января и конец февраля 2009 года), полученная в режиме FBS-согласованной горизонтальной поляризации, показана на рис. 1. Пространственная интерферометрическая база радара составляла 350 м.

При построении интерферограммы Усть-Селенгинской впадины в полосе размером 50×70 км (см. рис. 1, б) выполнялся стандартный граф обработки: 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. Для получения дифференциальной интерферограммы была использована модель SRTM, довольно точно характеризующая равнинный рельеф дельты р. Селенги. Вычисленные деформации подспутниковой поверхности варьируют от плюс 6 до минус 6 см. Шкала деформаций представлена на рис. 1, б в градации оттенков синего и красного цветов.

Для оценки сезонной цикличности и повторяемости величин сезонных деформаций увлажненных дисперсных грунтов на тестовом полигоне в дельте р. Селенги были сопоставлены результаты радиолокационных интерферометрических измерений с данными наземного георадарного зондирования, лабораторного определения гранулометрического состава и влажности грунтов приповерхностного слоя и полевого геодезического нивелирования [16].

Георадарные наблюдения в сочетании с отбором образцов из верхней части разреза проводились по профилю западнее деревни Большое Колесово. Профилирование с использованием георадара «Око-2», оснащенного антенным блоком АБ-400, с центральной частотой спектра 400 МГц и глубиной зондирования до 5 м, выполнялось в феврале 2010 года при мощности снежного покрова до 0,4 м. Для топографической привязки георадарного зондирования использовалась навигационная

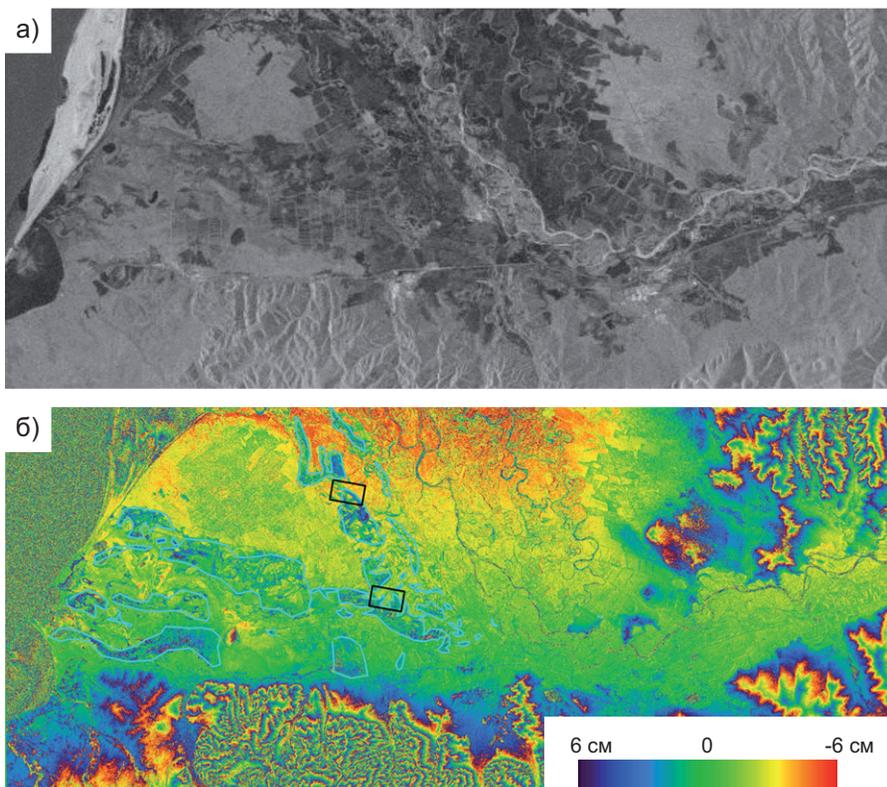


Рис. 1. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (б) дельты р. Селенги: прямоугольники черного цвета — заверочные участки; ломаные контурные линии голубого цвета — ареалы распространения криогенных деформаций

спутниковая GPS-система с точностью определения координат в плане ± 5 м, вполне достаточной для позиционирования профиля и совмещения его с данными спутниковой интерферометрии, поскольку точность привязки последних несколько ниже.

Для проверки достоверности интерферометрических измерений деформаций поверхности на заверочном участке с января по октябрь 2011 года ежемесячно проводились наземные измерения амплитуд вертикальных движений подспутниковой поверхности методом геометрического нивелирования «из середины» по заложенным реперным контрольным точкам. Для нивелирования III и IV классов со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км хода применялся нивелир НЗ и шашечные трехметровые рейки. Перед измерениями нивелир поверялся «на параллельность визирной оси и оси цилиндрического уровня». Высотные отметки рядовых точек на профилях вычислялись «от опорной точки» на надпойменной террасе, наименее подверженной сезонным колебаниям. Нивелировка выполнялась по девяти реперным точкам, и полученные значения затем усреднялись. Все рядовые точки нивелирования с близкими по интерферометрическим данным вертикальными деформациями располагались в пойменной части реки Шумихи.

Результаты и их обсуждение

В средней части дельты по интерферометрическим данным в период с начала января по конец февраля 2009 года было зафиксировано плавное понижение поверхности рельефа на 6 см (см. рис. 1, б). Область опускания подспутниковой поверхности пространственно совмещается с областью дренирования рек Селенга и Харауз, а по времени совпадает с сезонным понижением уровня грунтовых вод, залегающих на глубине 0,0–1,0 м. На фоне плавного опускания средней части депрессии в пойме р. Шумихи на площади Калтусного прогиба и Посольского болота выделяются локальные поднятия линейной формы, предположительно являющиеся ареалами распространения сезонных гидротермических деформаций пучения (см. рис. 1, б). Для более детальных наземных исследований и заверки линейных ареалов в районе д. Колесово (рис. 2, 3) исходная интерферограмма была приведена к картографической проекции.

На георадарном разрезе от 20 февраля 2010 года четко выделяется слой



Рис. 2. Геокодированная интерферограмма тестового участка в долине р. Шумихи, совмещенная с изображением из веб-портала Google: красный указатель с цифрой 1 — положение наземного георадарного профиля; контурные линии черного цвета — ареалы распространения криогенных деформаций

снега мощностью до 0,4 м (рис. 4). Под снежным покровом в пойменной части профиля прослеживается приповерхностный слой сезонномерзлого грунта мощностью до 1 м. На террасе мощность слоя промерзшего грунта возрастает вдвое. Столь значительные различия объясняются тепляющим влиянием обводненного горизонта, кровля которого залегает в пределах поймы на глубине 1,5 м, а на террасе — до 5 м от поверхности.

Выделенные на заверочном участке «Колесово» ареалы распространения

криогенных деформаций пучения приурочены к локальному понижению местности — заболоченной пойме р. Шумихи, идентифицируемой как палеоруслор. Селенги (см. рис. 2, 3). В ходе миграции основного русла р. Селенги к северо-востоку данная протока была «отшнурована» песчаной пересыпью в районе верхнего окончания и превратилась в старицу. Современное питание р. Шумихи происходит за счет атмосферных осадков и подземного стока по древнему руслу; большая часть современной поймы заболочена.



Рис. 3. Вид на пойму и надпойменную террасу р. Шумихи (палеоруслор. Селенги)

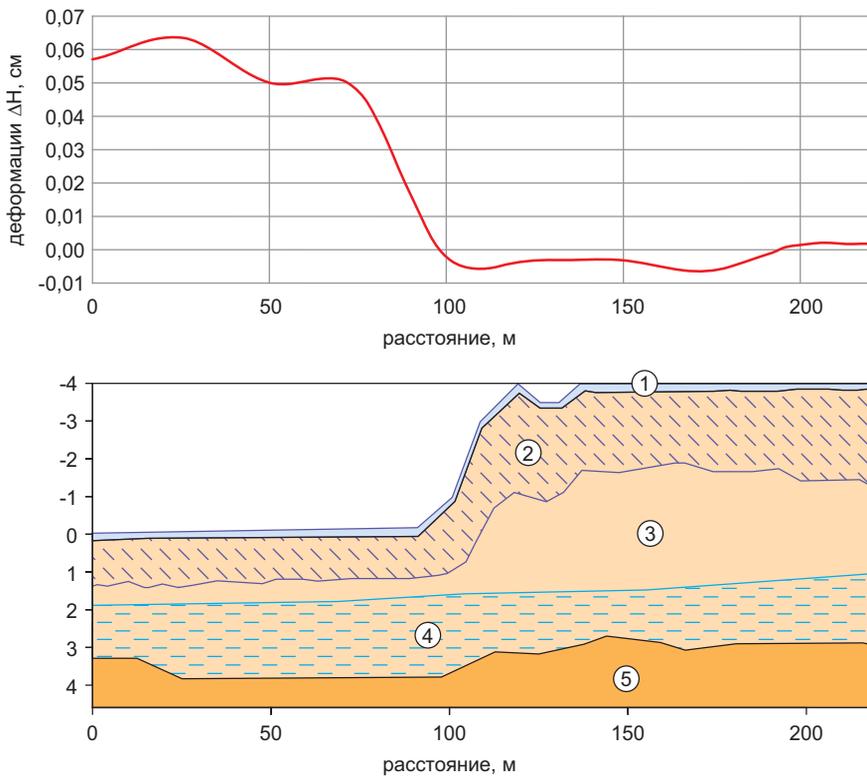


Рис. 4. Результаты измерений по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии (а) и интерпретационная модель (б) георадарного профиля «Колесово»: 1 — снег; 2 — мерзлый слой грунта; 3 — талый слой грунта; 4 — обводненный слой грунта; 5 — водоупорный горизонт; Н — приращение высот рельефа по интерферометрическим данным за период с 13 января по 28 февраля 2009 года

В сходных обстановках западного фланга дельты, где по радарным данным выделены ареалы криогенных деформаций на низких поймах Калтусного прогиба, Посольского болота, многочисленных проток, при наземной заверке также наблюдаются гидротермические деформации поверхности грунта (поднятия зимой и опускания летом с амплитудой в несколько сантиметров). Разрушение вновь обра-

зовавшихся сезонных форм рельефа происходит при летнем оттаивании грунтов и сопровождается выделением воды и (или) разжижением переувлажненного грунта.

Для определения гранулометрического состава и влажности на исследуемом профиле в районе «Колесово» были отобраны пробы мерзлого слоя грунта до глубины 60 см. В слое 0–35 см почва тяжелосуглинистая и глинистая с пре-

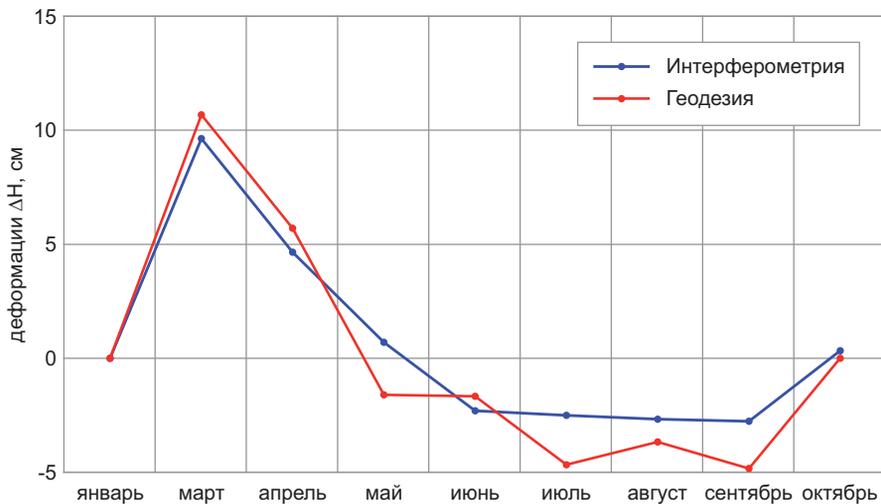


Рис. 5. Заверочный участок «Колесово». Вертикальные сезонные деформации дневной поверхности (ΔH) относительно уровня опорной точки (приведенного к уровню января 2011 г.)

обладанием пылевой и илистой фракции (см. таблицу) с содержанием глины до 45,8%. Высокая влагоемкость и низкая водопроницаемость затрудняют дренаж и приводят к переувлажнению верхней части разреза. Ниже по разрезу на глубине 35 см происходит облегчение гранулометрического состава почвы до песка и супеси. На отметке 45–50 см выделяется прослой с относительно повышенным содержанием гидровлаги — 2,22%. По гранулометрическому составу и характеристикам влажности грунты в пределах выделенных на радарных изображениях ареалов относятся к подверженным гидротермическим деформациям. При сезонном смещении фронта низких температур сверху вниз повышенное увлажнение тяжелосуглинистых и глинистых грунтов верхней части разреза приводит к тому, что при замерзании они увеличиваются в объеме намного больше, чем нижележащие грунты (пески и супеси) с меньшей влажностью.

Процесс пучения на рассматриваемой территории циклический — повторяется ежегодно. Это позволило по интерферометрическим парам 2007–2010 годов оценить амплитуды вертикальных деформаций подстилающей поверхности для различных времен года (рис. 5). Самые высокие уровни подспутниковой поверхности фиксируются в конце февраля — начале марта: ее подъем относительно реперной точки составлял 10 см, что связано с максимальным промерзанием почвы в данный период времени. Опускание поверхности до 3 см происходит вследствие оттаивания грунтов в летний период.

Выявленная при геометрическом нивелировании амплитуда деформаций поверхности заверочных участков достигает 16 см: изменения поверхности поймы р. Шумихи относительно реперной точки колеблется от плюс 11 см летом до минус 5 см зимой.

По данным интерферометрии и нивелирования вертикальные деформации с амплитудой до 16 см составляют 15% от мощности сезонномерзлого слоя (1 м), что превышает их расчетные величины при коэффициенте объемного расширения замерзающей свободной воды, равном 9%. По уровню объемных деформаций грунты в пойме р. Шумихи относятся к категории сильнопучинистых. Более значительные вертикальные деформации могут объясняться сочетанием сегрегационного выделения связанной воды и подъема промороженного приповерхностного слоя при формировании сезоннонапор-

Водно-физические свойства и гранулометрический состав грунтов приповерхностного слоя										
Водно-физические свойства				Содержание фракций, %, с размером частиц, мм						
Глубина, см	Плотность грунта, г/см ³	Гигроскопическая влажность, %	Естественная влажность, %	1,00–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,010–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01 физическая глина
				10–20	1,79	6,76	65,5	6,29	16,48	38,93
20–30	2,06	4,23	74,0	1,95	24,40	27,85	11,00	20,55	14,25	45,80
30–35	2,06	4,79	67,5	8,32	38,98	17,79	5,36	21,25	8,30	34,91
35–44	2,56	0,46	16,0	55,96	32,61	5,23	1,47	1,25	3,48	6,20
45–50	2,49	2,22	14,0	19,87	43,33	17,05	5,00	7,59	7,16	19,75
50–60	2,58	0,57	14,0	52,58	32,02	6,76	1,85	2,52	4,27	12,91

ных вод [17]. Таким образом, сочетание глинистого и суглинистого состава дисперсных грунтов с присутствующими водным и термическим режимами создают благоприятные условия для развития процесса морозного пучения верхней части разреза пойменных отложений р. Шумихи.

При сопоставлении вычисленных и измеренных вертикальных смещений поверхности рельефа было установлено, что максимальные значения криогенных деформаций поверхности рельефа в пойме р. Шумихи достигают плюс 15 см. На надпойменной террасе вертикальные смещения незначительны (± 1 см) и находятся в пределах погрешно-

сти интерферометрических измерений (см. рис. 4, 5). Результаты дистанционного зондирования и геодезического нивелирования лучше всего согласуются между собой в осенне-зимний период, когда сезонные вариации температур и влажности грунтов стабильно повторяются. Соответственно, в этот период влияние различий в отражениях радарных эхо-сигналов, связанных с неравномерностью увлажненности почв, минимально. Максимальное отклонение данных интерферометрии от результатов геодезических измерений фиксируется в июле и составляет порядка 2 см. Это связано со значительными различиями ежегодных колебаний уровня грунто-

вых вод, температур и влажности почв, с изменениями количества атмосферных осадков в 2007–2011 годах.

Таким образом, путем сопоставления результатов спутниковых радарных интерферометрических измерений с данными наземного геодезического нивелирования было показано, что погрешность дистанционного определения сезонных вертикальных деформаций земной поверхности в заболоченной нижней пойме р. Шумихи не превышает 2 см. В целом же измеренные сезонные тренды вертикальных деформаций поверхности этой части поймы, полученные с помощью интерферометрии и нивелирования, совпадают.

Выводы

Исходя из климатических особенностей Прибайкалья, где наибольшее сезонное промерзание грунтов (до 2,5-3,5 м) наблюдается в феврале — начале марта, можно предположить, что в конце февраля 2009 года завершилось промерзание грунтов на всю мощность сезонномерзлого слоя. Переувлажненность исследуемых участков в пойме р. Шумихи и их удаленность от основного русла р. Селенги на 3–6 км способствовали формированию линейных зон морозного пучения как за счет массивного распучивания пойменных увлажненных суглинков, глины, супесчано-песчаных отложений, так и в результате подъема поверхности рельефа при формировании сезоннонапорных вод. Отсутствие аналогичных поднятий земной поверхности на более обводненных участках, в частности в пределах рукавов современной дельты р. Селенги, связано, вероятно, как с утепляющим действием их водных потоков и озера Байкал, так и с более крупнозернистым составом грунтов в их пределах.

Сопоставление результатов спутниковых интерферометрических измерений вертикальных деформаций и геодезического нивелирования показало, что благодаря сезонной цикличности оба набора данных хорошо коррелируют между собой. При этом погрешность первых относительно вторых (III класса) не превышает 1,5–2,0 см. Наземная проверка выделяемых на радарных изображениях ареалов сезонных деформаций поверхности, приуроченных к заболоченным ландшафтам Усть-Селенгинской депрессии, подтвердила хорошее разрешение спутниковой радиолокационной интерферометрии при картировании областей распространения морозного пучения грунтов и оценке интенсивности криогенных процессов.

Наблюдаемые систематические погрешности нивелировки относительно интерферометрии (до 2 см в июле) обусловлены колебаниями уровня подземных вод и увлажненности почвенного слоя в 2007–2011 годах. В этой связи предложенная методика может быть использована для изучения динамики процессов заболачивания и подтопления, в том числе из-за повышения уровня озера Байкал, в результате сооружения плотины Иркутской ГЭС и наполнения Иркутского водохранилища в 60-х годах прошлого века.

В связи с проектированием и строительством линейных сооружений, хозяйственным освоением слабообжитых районов Прибайкалья, Забайкалья, Яку-

тии и других территорий северо-востока России представляется актуальным привлечение методов спутниковой дифференциальной радарной интерферометрии для уточнения ареалов развития и оценки интенсивности криогенных деформаций. ❄

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грантов № 08-05-98038, 08-02-98010-р), программы 7.1 фундаментальных исследований ОНЗ РАН, интеграционного проекта СО РАН № 72.

Список литературы

1. Абжалимов Р.Ш. К определению напряженно-деформированного состояния монолитных железобетонных плит под автомобильными дорогами и аэродромами при морозном пучении их оснований // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 20–24.
2. Алексеев С.И. Основания и фундаменты: учебное пособие для студентов вузов // СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. 111 с.
3. Быков М.Е., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И. О количественной оценке деформации грунта по данным радарной интерферометрии ALOS-PALSAR // International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON, 15–16 September 2011, Krasnoyarsk. P. 439–441.
4. Брыкина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири // Вестник ЮГУ. 2009. Вып. 3 (14). С. 3–12.
5. Днепровская В.П., Полищук Ю.М. Исследование взаимосвязи климатического состояния и пространственной структуры растительного покрова в Западной Сибири // Вестник ЮГУ. 2007. № 6. С. 31–38.
6. Еришов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра, 1990. 450 с.
7. Захаров А.И., Тугаринов П.В. Исследование динамики ледовых покровов побережья Антарктиды по данным интерферометрической съемки PCA «Алмаз-1» // Радиотехника. 1998. № 12. С. 63–67.
8. Кантемиров Ю.И. Радарный космический мониторинг смещений земной поверхности на нефтегазовых месторождениях Кандым и Гумбулак (Республика Узбекистан) // Инженерные изыскания. 2011. № 6. С. 26–31.
9. Кучерявенкова И.Л., Захаров А.И. Применение радарной интерферометрии для исследования динамики земных покровов и тропосферы // Исследование Земли из космоса. 2002. № 3. С. 35–43.
10. Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Крицук Л.Н. и др. Ландшафтные индикаторы инженерно-геокриологических условий севера Западной Сибири и их дешифровочные признаки. М.: Недра, 1974. 132 с.
11. Нерсесова З.А. Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М.: Транспорт, 1967. 187 с.
12. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Вопросы мониторинга изменений состояния многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления с использованием космических снимков // Вестник ЮГУ. 2006. № 3. С. 87–90.
13. СНиП 32-03-96. Аэродромы. М.: Минстрой России, 1996. 22 с.
14. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги. М.: Госстрой РФ, 2004. 54 с.
15. Тумель Н.В., Королева Н.А., Микляева Е.С. Мерзлотно-ландшафтный анализ криолитозоны России для предварительной оценки условий освоения территорий // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 24–30.
16. Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И. Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой PCA интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
17. Шестернев Д.М. Криогенные процессы Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 262 с.
18. Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // Geophysical research letters. 1998. V. 25. № 17. P. 3215–3218.
19. Gabriel A.K., Goldstein R.M., Zebker H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. P. 9183–9191.
20. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R. Synthetic aperture radar interferometry // Proceedings of the IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.
21. Xia Ye. Bam earthquake: surface deformation measurement using radar interferometry // Acta Seismologica Sinica. 2005. V. 18. № 4. P. 451–459.
22. Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 19617–19634.