

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.341

ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БОЛОТИСТЫХ ПОЧВ
МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
И ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ

Т.Н. Чимитдоржиев¹, П.Н. Дагуров¹, А.И. Захаров², Г.И. Татьков³, М.Е. Быков¹,
А.В. Дмитриев¹, Н.Д. Балданов⁴, Е.А. Мухорин⁴, Е.Ю. Мильхеев⁵

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия; tchimit@gmail.com

² Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН,
141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1, Россия

³ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия

⁴ Бурятская государственная сельскохозяйственная академия, 670024, Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, Россия

⁵ Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

На примере Усть-Селенгинского тестового полигона показана возможность использования данных спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии *L*-диапазона (длина волны 23 см) для оценки амплитуд вертикальных подвижек грунта вследствие сезонных деформаций. В предположении, что величины сезонных деформаций за различные годы соизмеримы в пределах погрешности геодезического нивелирования, сравниваются результаты сезонных радарных интерферометрических измерений за 2006–2010 гг. с полевыми геодезическими данными 2011 г. Показано, что в зимний период расхождение между интерферометрическими и геодезическими измерениями не превышает 1 см, а в летний период при изменении влажности верхнего слоя почв оно достигает 2,0–2,7 см. Сделан вывод о необходимости учета влажности и ее профиля в летний период или использования данных радарной интерферометрии зимнего периода.

Радиолокационная интерферометрия, геодезическое нивелирование, морозное пучение

ESTIMATION OF SEASONAL DEFORMATION OF MARSHY SOIL BY RADAR INTERFEROMETRY
AND GEODETIC LEVELING TECHNIQUES

T.N. Chymitdorzhiev¹, P.N. Dagurov¹, A.I. Zakharov², G.I. Tatkov³, M.E. Bykov¹,
A.V. Dmitriev¹, N.D. Baldanov⁴, E.A. Muhorin⁴, E.U. Milheev⁵

¹ Institute of Physical Material Science, SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6, Russia; tchimit@gmail.com

² Institute of Radioengineering and Electronics, RAS, 141190, Fryazino, Moscow region, Vvedensky sq., 1, Russia

³ Geological Institute, SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6a, Russia

⁴ Buryat State Academy of Agriculture, 670024, Ulan-Ude, Pushkin str., 8, Russia

⁵ Institute of General and Experimental Biology, SB RAS, 670047, Ulan-Ude, Sakhyanovoy str., 6, Russia

On the example of the Ust-Selenga test polygon the possibility of satellite data of differential radar interferometry in *L*-band (23 cm wavelength) for estimation of the amplitude of vertical ground movements due to seasonal strains has been demonstrated. Under the assumption that the values of the seasonal deformation in different years are comparable and are within the error of geodetic leveling, the results of the seasonal radar interferometric measurements for 2006–2010 have been compared with survey data for 2011. It has been revealed that during the winter months the difference between the interferometric and geodetic measurements is less than 1 cm, and in the summer (when the moisture content of the upper layer of soil changes) this discrepancy is 2.0–2.7 cm. The conclusion has been made about the necessity to consider the moisture content and its profile in the summer time or the selection of winter radar interferometry data.

Frost heave, repeated geodetic leveling, synthetic aperture radar interferometry

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большее применение находит космическая радиолокационная интерферометрия, которая позволяет выполнять про-

странственный мониторинг горизонтальных и вертикальных деформаций поверхности независимо от времени суток и при любой погоде.

© Т.Н. Чимитдоржиев, П.Н. Дагуров, А.И. Захаров, Г.И. Татьков, М.Е. Быков, А.В. Дмитриев, Н.Д. Балданов, Е.А. Мухорин, Е.Ю. Мильхеев, 2013

Наблюдение за динамикой поверхности особо актуально в районах распространения многолетнемерзлых пород, при этом наряду с геометрическими горизонтальными изменениями интерес представляют сезонные и долговременные вертикальные вариации земной поверхности. Помимо научной значимости данная проблема имеет и очевидный прикладной аспект – выявление участков морозного пучения для оценки возможных рисков и ущербов в ходе проектирования, строительства и последующей эксплуатации зданий, магистральных трубопроводов, дорог и других линейных сооружений.

В настоящей работе на примере Байкальского региона исследуется сезонная деформация болотистых почв на основе метода космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии и наземных измерений с помощью теодолитного нивелирования.

Метод дифференциальной радиолокационной интерферометрии развивается в мире на протяжении последних 20 лет. В этом методе дистанционного зондирования Земли используется информация о разности фаз сигналов, отраженных от одного и того же участка местности (пиксела) и полученных радиолокационной системой с повторяющихся орбит носителя в разное время [Rosen et al., 2000; Richards, 2009]. При этом разности фаз, равной 2π , соответствует изменение наклонных расстояний, равное $\lambda/2$ (λ – длина волны). Поскольку длина волны может составлять 3 см (радиолокатор Tandem-X), становится возможным обнаружение миллиметровых деформаций. Существенным преимуществом дифференциальной радиолокационной интерферометрии перед другими методами измерений смещений земной поверхности является то, что радиолокационные изображения, как правило, предоставляют детальную площадную картину смещений отражающей поверхности в пределах радиолокационного 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 т. д. Возможности дифференциальной интерферометрии впервые продемонстрированы в работе [Gabriel et al., 1989] на примере просадок сельскохозяйственных полей. В настоящее время радарная интерферометрия широко применяется в гляциологии [Jezek et al., 1993; Liu et al., 2007, 2008; Kaab, 2008; Erten et al., 2009; Kumar et al., 2011; Elske de Zeeuw-van Dalfsen et al., 2012; Hooper et al., 2012], для мониторинга деформаций земной поверхности в результате землетрясений [Zebker et al., 1994; Xia Ye, 2005], для оценки опускания участков земной поверхности в районах нефтедобычи [Fielding et al., 1998]. Из отечественных

исследований можно выделить работы [Захаров, Тугаринов, 1998; Кучерявенкова, Захаров, 2002], описывающие колебания уровня ледовых и прибрежных почвенных покровов.

Несмотря на значительное количество работ по данной тематике, в известной нам литературе нет сведений об использовании методов спутниковой радарной интерферометрии для изучения динамики сезонных и, в частности, криогенных деформаций увлажненных грунтов. Настоящая работа является продолжением исследований сезонных деформаций почвы [Быков и др., 2011; Чимитдоржиев и др., 2011].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) при изучении и картировании криогенных процессов располагается в Байкальской рифтовой зоне – Усть-Селенгинской депрессии, отличающейся высокой динамикой крупных геоблоков из-за повышенной сейсмичности. Ареалы наблюдаемых по спутниковым данным деформаций поверхностного рельефа несут локальный характер и приурочены исключительно к поймам рек, заболоченным торфяникам Калтусного прогиба, Посольского болота, тогда как сейсмогенные деформации связаны с эпицентрными областями землетрясений и различными активизированными элементами разломно-блоковой структуры. Кроме того, геодинамическая активность сухопутной части дельты Селенги в период наблюдений 2008–2011 гг. оставалась низкой. 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 Байкал в среднем 2,7 млн т твердого стока, постоянно наращивая площадь дельты [Галазий, 1993]. В рельефе дельтового участка преобладают аккумулятивные террасы низкого и среднего высотных уровней, старичные озера, береговые валы и лагуны. Верхняя часть геологического разреза, представленная рыхлыми четвертичными отложениями, характеризуется значительной изменчивостью мощности, состава, литологического строения, уровня грунтовых вод, что, несомненно, влияет на сезонную динамику процессов поднятия и опускания грунта.

Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности в дельте р. Селенга использовались данные радара PALSAR (длина волны 23 см), установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство JAXA). Минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками одного и того же участка

земной поверхности составлял 46 дней. Радар позволял в зависимости от режима сканирования (режимы передачи изображения с одиночной и двойной поляризацией, широкополосный и поляриметрический режимы передачи, режим прямой передачи данных) получать изображения с пространственным разрешением от 10 до 100 м в полосе съемки шириной от 40–70 до 250–350 км. Особенностью радара PALSAR по сравнению с другими современными спутниковыми радарными является его функционирование в более длинноволновом диапазоне (*L*-диапазоне), что в большинстве случаев решает проблему временной декорреляции отраженных сигналов, вызванной изменениями растительного и снежного покровов, а также флуктуациями сигнала вследствие тропосферных неоднородностей. В настоящем исследовании использованы радарные изображения, полученные в режиме FBS (горизонтальная поляризация на излучение и прием) с пространственным разрешением на местности порядка 7 м.

Суть метода радарной интерферометрии заключается в следующем: с двух пространственно разнесенных точек производится разновременная съемка одного и того же участка земной поверхности. Разница двух путей может быть измерена как разность фаз между двумя радиолокационными эхосигналами, на основе которой строятся цифровые модели рельефа. Выполнение повторной съемки через определенный промежуток времени позволяет с помощью дифференциальной интерферометрии формировать карты деформаций земной поверхности за время между съемками с сантиметровой и даже миллиметровой точностью [Ferretti *et al.*, 2007; Hooper *et al.*, 2012].

Съемки Усть-Селенгинского тестового полигона спутником ALOS PALSAR позволили сформировать набор из 14 интерферометрических пар радиолокационных изображений для разных временных интервалов за 2008–2010 гг. Интерферометрические измерения выполнялись по данным с высокими значениями когерентности – более 0,2.

По интерферометрическим парам изображений были рассчитаны значения вертикальных деформаций подстилающей поверхности за различные временные интервалы. На рис. 1, *а* показано радиолокационное изображение, спроецированное в географическую систему координат (долгота/широта), и увеличенный фрагмент (рис. 1, *б*) тестового участка, где выполнялись геодезические измерения. В градациях серого цвета на рис. 1 представлены участки с различными величинами обратного радарного рассеяния: яркие тона соответствуют объемным неоднородностям (лес, кочкарник и т. д.), темные тона – ровным участкам. Пространственное разрешение радарного изображения составляет 25 м. На рис. 1, *в* представлена

итоговая карта значений криогенного пучения почв за период с 13 января по 28 февраля 2009 г., где светлыми тонами, в соответствии со шкалой вертикальных деформаций, выделены участки поднятия почвы в зимний период. Аналогичные карты распределения участков локальных деформаций грунта получены также для других промежутков времени.

Для более детальных оценок и сравнения спутниковых радиолокационных и наземных геодезических измерений был выбран тестовый участок (52°05'57" с.ш., 106°31'14" в.д.), на котором располагались три контрольные площадки. На каждой из них находилось по три реперные точки, для которых измерялись амплитуды вертикальных деформаций (см. рис. 1, *б*). Расстояние между реперными точками составляло 3–5 м, площадки располагались на расстоянии 150–250 м друг от друга. Помимо реперных была определена опорная точка, которая находилась на стабильном участке надпойменной террасы и по результатам дифференциальной интерферометрии не была подвержена сезонным вертикальным деформациям.

Определение гранулометрического состава почвы тестового участка осуществлялось до глубины 60 см. На глубинах 0–40 см распространены тяжелосуглинистые и глинистые почвы с преобладанием пылеватой и илистой фракций, содержащей физической глины достигает 45,8 %. Высокая влагоемкость и низкая водопроницаемость затрудняют дренаж почвы и приводят к переувлажнению верхней части разреза. С увеличением глубины отмечается преобладание песков и супесей и, как следствие, снижается влажность разреза.

С октября 2010 г. по октябрь 2011 г. проводилось ежемесячное геодезическое нивелирование тестового участка. Для полевых геодезических измерений применялся нивелир НЗ, предназначенный для нивелирования III и IV классов со средней квадратической ошибкой не более 3 мм на 1 км хода, и шашечные трехметровые рейки. Средняя квадратическая ошибка геодезических измерений составляет 0,5 см [Инструкция..., 2003]. Амплитуды вертикальных движений поверхности измерялись по реперным контрольным точкам методом геометрического нивелирования “из середины” [Маслов, 2006]. Высотные отметки реперных точек на профилях вычислены от опорной точки. Результирующее значение поднятия или проседания тестового участка определялось как среднее значение поднятий или проседаний всех девяти реперных точек на трех контрольных площадках (см. рис. 1, *б*).

Такой же алгоритм измерений относительных деформаций от данной опорной точки использовался для определения значений поднятий или проседаний путем дифференциальной радиолокационной интерферометрии.

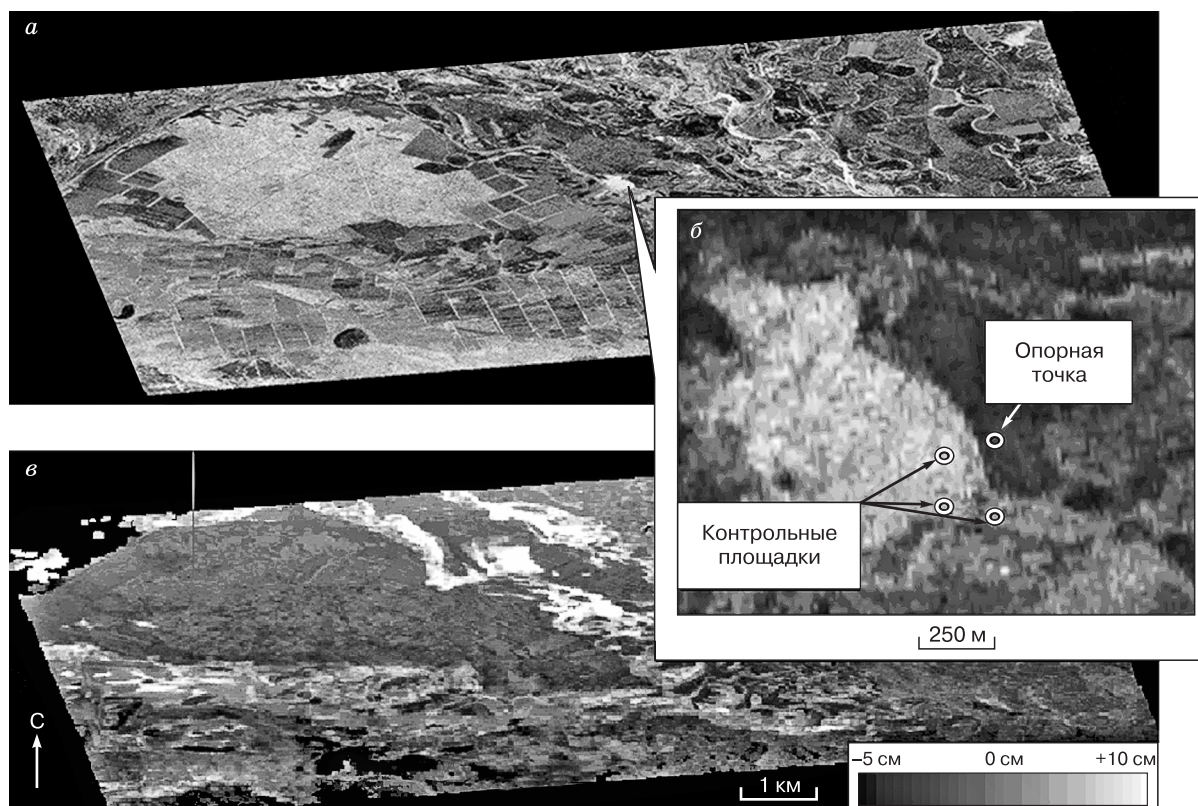


Рис. 1. Радиолокационное изображение (а), его увеличенный фрагмент (б) и карта морозного пучения почв (в) для тестового полигона в дельте р. Селенга в период промерзания с 13 января по 28 февраля 2009 г.

На рис. 2 приведены временные (сезонные) зависимости вертикальных деформаций тестового участка, полученные методами спутниковой дифференциальной интерферометрии и наземного геодезического нивелирования. Необходимо отметить, что результаты получены из измерений, проведенных в разные годы: спутниковые данные по месяцам 2008–2010 гг. (январь 2009, март 2010, апрель 2008, май 2008, июнь 2008, июль 2009, август 2009, сентябрь 2009, октябрь 2009), наземные – за 2011 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тестовый участок в дельте Селенги относится к аллювиальным лугово-болотным почвам, подверженным морозному пучению в зимний период и проседанию в летне-осеннюю межень. На рис. 2 видно, что наибольшие значения сезонных деформаций почвы от принятого нулевого уровня до 11 см наблюдаются в начале марта. Максимальное проседание поверхности происходило в летний период – до 5 см. Результаты, полученные спутниковым и наземным методами, хорошо согласуются

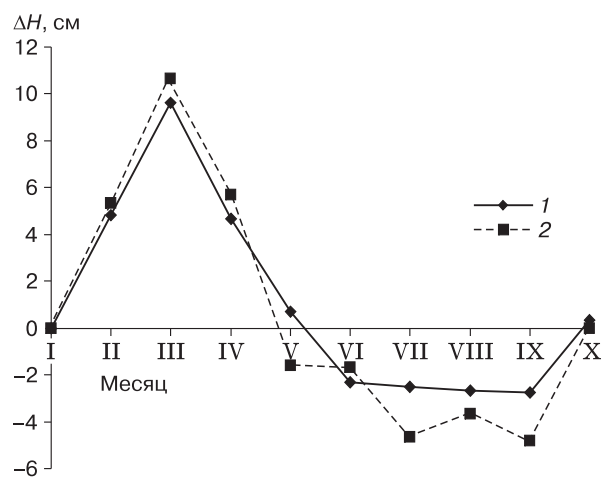


Рис. 2. Вертикальные сезонные деформации поверхности (ΔH) относительно уровня опорной точки в январе 2011 г.

1 – данные спутниковой интерферометрии (2008–2010 гг.);
2 – данные геодезического нивелирования (2011 г.).

между собой. Так, максимальное расхождение в величинах вертикальных деформаций составляет 2,3 см, т. е. 14 % от диапазона изменений деформаций, что подтверждает достаточно высокую точность метода дифференциальной радиолокационной интерферометрии.

Вообще говоря, точность метода определяется следующими факторами: погрешностью определения разности фаз, связанной с топографическими ошибками; погрешностью вследствие неточного определения геометрии орбит; влиянием атмосферных вариаций на распространение волны; погрешностью за счет аппаратного фазового шума; изменением отражательных свойств исследуемого участка поверхности за период между съемками, проявляющимся в изменении фазы коэффициента отражения [Richards, 2009].

Проведем качественный анализ указанных ошибок.

Топографические ошибки можно считать незначительными, так как топографическая фаза при обработке была вычтена благодаря использованию детальной цифровой модели рельефа SRTM.

Неточное определение орбит дает заметную ошибку в измерениях фазы на поверхности с характерными масштабами в сотни километров. В нашем случае при анализе смещений компактных участков поверхности размером 100–500 м по сравнению с окружающей стабильной поверхностью орбитальные ошибки проявляться не должны.

Аппаратурный фазовый шум – это белый шум, который оказывает влияние на величину интерферометрической когерентности. Судя по полученным выше оценкам ошибок фазовых измерений, он незначителен.

Наиболее непредсказуемыми по величине и положению на интерферограмме могут быть ошибки из-за атмосферных эффектов. Отметим, что тропосферные неоднородности имеют характерные размеры километр и более, они никак не увязаны с деталями рельефа, и вносимой ими фазовой

ошибкой можно пренебречь [Кучерявенкова, Захаров, 2002]. Ионосферные эффекты на интерферограмме также не имеют привязки к рельефу, они проявляются как фазовые аномалии в виде вытянутых вдоль строк изображения полос с характерными размерами десятки–сотни километров. Можно считать, что наблюдаемые нами смещения поверхности болотистых участков почв вызваны именно деформациями почвы, а не атмосферными эффектами.

При оценке ошибки измерений интерферометрической разности фаз σ_ϕ можно воспользоваться граничной оценкой Крамера–Пао [Rosen et al., 2000]:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{1}{2N} \frac{1-\gamma^2}{\gamma^2}},$$

где N – количество усредняемых на интерферограмме пикселей при измерении разности фаз; γ – интерферометрическая когерентность.

При $\gamma = 0,3–0,5$ и усреднении в окошке 10×10 пиксел ошибка $\sigma_\phi \approx 9^\circ$, что в пересчете в радиальное перемещение поверхности дает ошибку измерения смещения 0,3 см.

Возможной причиной расхождений между измерениями может являться неодновременность спутниковых и наземных измерений. Оценим качественно влияние этой неодновременности. На рис. 3 приведены кривые годового хода среднемесячных значений температуры в 2008–2011 гг. Из рис. 3 следует, что в летние месяцы, когда расхождения между данными ДРИ и геодезическими измерениями максимальны, наблюдается достаточно хорошая повторяемость поведения среднемесячных температур. Поэтому можно полагать, что максимальные межгодовые изменения величин вертикальных деформаций (в одни и те же месяцы) будут много меньше максимальных сезонных деформаций.

Оценка влияния влажности почвы и ее слоистой структуры на точность метода дифференциальной интерферометрии. На рис. 4 для наглядности представлено расхождение результатов геодезического нивелирования и радарной интерферометрии при измерении вертикальных сезонных деформаций поверхности (ΔH), полученных по данным рис. 2. На рис. 4 также приведены вариации влажности поверхностного слоя почвы (0–10 см), полученные одновременно с геодезическим нивелированием. Влажность определялась стандартным термостатно-весовым способом. На рис. 4 видно, что влажность хорошо коррелирует с измеренными значениями расхождений, максимальным значениям влажности соответствуют максимальные расхождения. Это может свидетельствовать о возможном влиянии влажности почвы на точность метода дифференциальной интерферометрии. Хотя расхождения результатов радиоло-

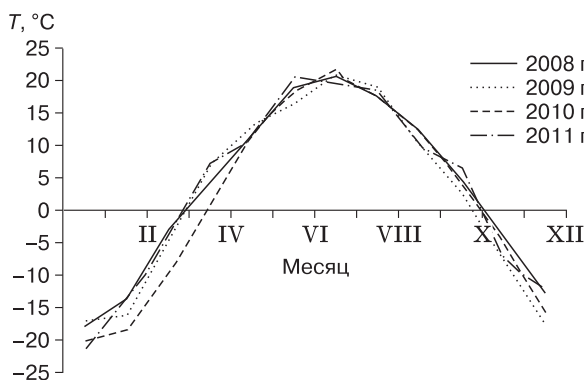


Рис. 3. Среднемесячные температурные тренды в 2008–2011 гг.

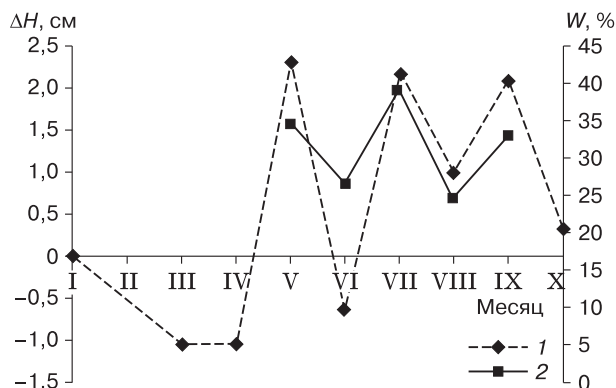


Рис. 4. Расхождение результатов радарной интерферометрии и геодезического нивелирования (1) и изменение влажности почвы (2) по месяцам.

кации и геодезии оказались сравнительно невелики, попробуем оценить возможное воздействие влажности почвы на данные измерений, полагая, что влияние неодновременности измерений мало.

Фаза радиолокационного сигнала, формируемого в результате отражения от земной поверхности, определяется не только длиной пройденного волной пути, но и аргументом комплексного коэффициента отражения волны. При интерферометрических методах зондирования используются не сами фазы, а их разность, полученная при различных пролетах. В случае, когда измерения выполняются одновременно, влияние аргумента коэффициента отражения отсутствует. Если радиолокационные изображения получены в разное время (на разных витках орбиты), то возможное различие между аргументами коэффициента отражения от одного и того же участка поверхности (пиксела изображения) будет трансформировано в изменение действительной разности длин путей волны, что приведет к ошибке в определении геометрической высоты участка, отображаемого соответствующим пикселем. Однако возможное влияние данного механизма изменения фазы радиолокационных сигналов в методе радиолокационной интерферометрии обычно не учитывается.

Электрические свойства почвы характеризуются комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП)

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 — действительная часть ε ; ε_2 — мнимая часть ε .

Коэффициенты отражения от поверхности раздела двух однородных сред определяются формулами Френеля [Борн, 1970; Бреховских, 1973]. Так, для горизонтальной поляризации излучения комплексный коэффициент отражения R при падении волны из воздуха на плоскую однородную почву под углом θ имеет вид

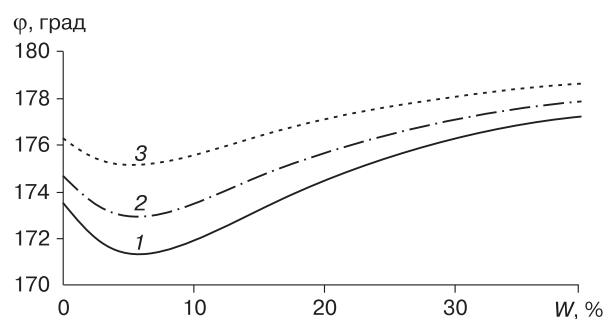


Рис. 5. Зависимости аргумента (φ) коэффициента отражения от объемной влажности (W) при различных углах падения:

Кривая 1 — $\theta = 0^\circ$; кривая 2 — $\theta = 40^\circ$; кривая 3 — $\theta = 60^\circ$.

$$R = \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon - (\sin\theta)^2}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - (\sin\theta)^2}}. \quad (2)$$

В общем случае КДП почвы является сложной функцией таких параметров, как влажность почвы, частота излучения, температура, состав почвы. Для аналитического описания КДП обычно используются эмпирические и полуэмпирические модели. Наиболее существенное влияние на КДП (значительно большее, чем другие параметры) оказывает влажность почвы, что связано с большим различием между диэлектрической проницаемостью сухой почвы ($\varepsilon_1 = 2-3$) и воды ($\varepsilon_2 = 80$). Для получения численных оценок влияния влажности на аргумент коэффициента отражения используем эмпирическую модель [Hallikainen et al., 1985]. На основе экспериментальных исследований в работе [Hallikainen et al., 1985] были получены следующие квадратичные зависимости для ε_1 и ε_2 от влажности почвы W (частота излучения 1,4 ГГц близка к центральной частоте радара ALOS PALSAR 1,27 ГГц, температура 22°C):

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = & (2,862 - 0,012S + 0,001C) + \\ & + (3,803 + 0,462S - 0,341C)W + \\ & + (119,006 - 0,500S + 0,633C)W^2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 = & (0,356 - 0,003S + 0,008C) + \\ & + (5,507 + 0,044S - 0,002C)W + \\ & + (17,753 - 0,313S + 0,206C)W^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где C — содержание глины, %; S — содержание песка, % (параметры, характеризующие состав почвы).

На рис. 5 приведены результаты расчетов аргумента φ комплексного коэффициента отражения

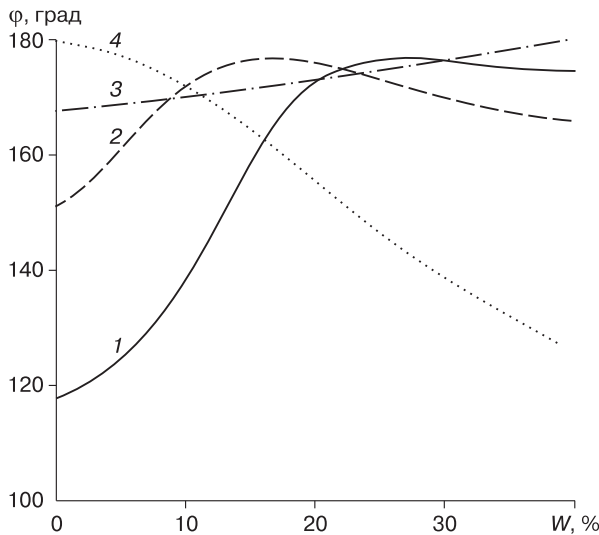


Рис. 6. Зависимости аргумента коэффициента отражения волны длиной 23 см от объемной влажности для слоистой почвы при $d = 2$ см.

Кривые 1, 2 – влажность нижнего полупространства равна 30 и 10 % соответственно, изменяется влажность слоя; кривые 3, 4 – влажность слоя равна 30 и 10 % соответственно, изменяется влажность нижнего полупространства.

по формуле (2) при подстановке в нее значения ϵ , определяемого формулами (1), (3), (4) при различных значениях угла падения волны. Значения C и S , как следует из анализа формул (3) и (4), слабо влияют на результаты расчетов. Кривые на рис. 5 получены при $C = 0,13$ и $S = 0,51$. В случае обычной моностатической радиолокации (передающая и приемная антенны совмещены) отраженной волне соответствует угол $\theta = 0^\circ$.

Приведенные зависимости показывают, что увеличение влажности почвы до значения порядка 5 % приводит к неглубокому минимуму аргумента коэффициента отражения и при дальнейшем увеличении влажности значение ϕ растет и стремится к 180° . Изменения аргумента в зависимости от влажности не превышают $4-6^\circ$.

В действительности случай однородной почвы является идеализацией. Более общей представляется ситуация, когда влажность изменяется по глубине и почва является слоисто-влажностной средой. Слоистость может иметь непрерывный или дискретный характер в зависимости от особенностей почвы. Для оценки влияния слоистости на аргумент коэффициента отражения рассмотрим наиболее простой случай двухслойной почвы. Пусть на почве, занимающей полупространство с одним значением влажности, лежит слой почвы толщиной d с другим значением влажности. Границы раздела между средами являются плоскими.

Коэффициент отражения такой двухслойной среды определяется формулой [Бреховских, 1973]

$$R = [(Z_3 + Z_2)(Z_2 - Z_1)\exp(ik_{2z}d) + (Z_3 - Z_1)(Z_2 + Z_1)\exp(-ik_{2z}d)] \times \\ \times [(Z_3 + Z_2)(Z_2 + Z_1)\exp(ik_{2z}d) + (Z_3 - Z_1)(Z_2 - Z_1)\exp(-ik_{2z}d)]^{-1}, \quad (5)$$

где Z_1 – импеданс среды (в рассматриваемом случае воздух), из которой падает волна; Z_2 – импеданс слоя; Z_3 – импеданс нижележащего полупространства; k_{2z} – проекция волнового вектора в слое на направление, перпендикулярное к плоским границам раздела.

На рис. 6 представлены рассчитанные по формуле (5) значения аргумента ϕ коэффициента отражения при нормальном падении волны длиной 23 см на слой толщиной 2 см. Эти данные показывают, что слоистость почвы приводит к заметным изменениям аргумента коэффициента отражения, достигающим 54° (кривая 4) в диапазоне изменений объемной влажности от 0 до 40 %. Отметим, что зависимости имеют достаточно сложный вид, аргумент коэффициента отражения может как возрастать с увеличением влажности, так и убывать или иметь немонотонный характер.

Таким образом, учитывая, что при радарной интерферометрии сдвиг поверхности на половину длины волны соответствует изменению разности фаз на 2π , ошибки в определении величины сдвига при изменении влажности от 0 до 40 % могут достигать 1,7 см. В рассматриваемом случае влажность изменялась от 25 до 40 % (см. рис. 4), что может привести к ошибке в определении величины деформации порядка 0,6 см. Это составляет примерно $1/38$ длины волны, и при проведении высокоточных измерений учет влияния слоистой влажности почвы представляется необходимым.

ВЫВОДЫ

Сопоставление спутниковых интерферометрических измерений разных лет с данными геодезического нивелирования на протяжении 2011 г. показало, что благодаря сезонной цикличности оба набора данных хорошо коррелируют, а погрешность интерферометрии в сравнении с наземными измерениями составляет менее 0,5 см. Отклонение на 2 см в июле связано с различием степени увлажненности почвы в разные годы, что может быть в дальнейшем использовано как некоторый косвенный индикатор при мониторинговых исследованиях влажности почвы.

Наземная проверка на тестовом полигоне, подверженном сезонным криогенным деформациям, подтвердила применимость и высокую информа-

тивность радиолокационной интерферометрии при изучении и картографировании болотистых почв.

Таким образом, в результате сочетания глинистого и суглинистого состава почв с водным и термическим режимами создаются наиболее благоприятные условия для развития процесса морозного пучения верхней части разреза пойменных отложений. Наблюдаемое на интерферограмме формирование криогенных деформаций необходимо рассматривать как следствие массивного распучивания увлажненных пойменных супесчано-песчаных отложений, суглинков и глины [Шерстнев, Шестернев, 2007].

Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарного интеграционного проекта № 144 СО РАН и РФФИ (проект 12-05-980622-р_сибирь_a).

Литература

- Борн М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. М., Наука, 1970, 720 с.
- Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. М., Наука, 1973, 343 с.
- Быков М.Е., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И.** О количественной оценке деформации грунта по данным радарной интерферометрии ALOS PALSAR // Материалы Междунар. Сиб. конф. по управлению и связи (IEEE Sibcon-2011), Красноярск, 2011, с. 439–441.
- Галазий Г.И.** Байкал: атлас. М., Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993, с. 46–47.
- 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.
- Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов.** ГКИНП (ГНТА)-03-010-02. М., Центр. науч.-исслед. ин-т геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 2003, 3 с.
- 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.
- Маслов А.В.** Геодезия / А.В. Маслов, А.В. Гордеев, Ю.Г. Батраков. М., Колос С, 2006, 157 с.
- Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И.** Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исследование Земли из космоса, 2011, № 5, с. 58–63.
- Шестернев Д.М., Шестернев Д.Д.** Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингодинской впадины в связи с потеплением климата // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 80–92.
- Elske de Zeeuw-van Dalfsen, Pedersen R., Hooper A., Sigmondsson F.** Subsidence of Askja caldera 2000–2009: modeling of deformation processes at an extensional plate boundary, constrained by time series InSAR analysis // J. Volcanol. and Geothermal Res., 2012, vol. 213–214, p. 72–82.
- Erten E., Reigber A., Hellwich O., Prats P.** Glacier velocity monitoring by maximum likelihood texture tracking // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2009, vol. 47, No. 2, p. 394–405.
- Ferretti A., Savio G., Barzaghi R., Borghi A.** Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 2007, vol. 45, No. 5, p. 1142–1153.
- Fielding E.J., Blom R.G., Goldstein R.M.** Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry // Geophys. Res. Lett., 1998, vol. 25, No. 17, p. 3215–3218.
- Jezeq K.C., Drinkwater M.R., Crawford J.P.** Analysis of synthetic aperture radar data collected over the southwestern Greenland ice sheet // J. Glaciol., 1993, vol. 39, No. 131, p. 119–132.
- Gabriel A.K., Goldstein R.M., Zebker H.A.** Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry // J. Geophys. Res., 1989, vol. 94, p. 9183–9191.
- Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C.** Microwave dielectric behavior of Wet Soil – Part I: Empirical models and experimental observations // IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 1985, vol. 23, p. 25–34.
- Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arikian M.** Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation // Tectonophysics, 2012, vol. 514–517, p. 1–13.
- Kaas A.** Remote sensing of permafrost-related problems and hazards // Permafrost and Periglacial Processes, 2008, vol. 19, p. 107–136.
- Kumar V., Venkataramana G., Hogda K.A.** Glacier surface velocity estimation using SAR interferometry technique applying ascending and descending passes in Himalayas // J. Appl. Earth Observ. and Geoinform., 2011, vol. 13, p. 545–551.
- Liu H., Zhao Z., Yu J., Jezeq K.** Synergistic fusion of interferometric and speckle-tracking methods for deriving surface velocity from interferometric SAR data // IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett., 2007, vol. 4, No. 1, p. 102–106.
- Liu H., Zhao Z., Yu J., Jezeq K.** Simultaneous least square adjustment of multiframe velocities derived from interferometric and speckle-tracking methods // IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett., 2008, vol. 5, No. 2, p. 289–293.
- Richards J.A.** Remote Sensing with Imaging Radar. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, 361 p.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R.** Synthetic aperture radar interferometry // Proc. of the IEEE, 2000, vol. 88, No. 3, p. 333–382.
- Xia Ye.** Bam earthquake: Surface deformation measurement using radar interferometry // Acta Seismol. Sinica, 2005, vol. 18, No. 4, p. 451–459.
- Zebker H.A., Rosen P.A., Goldstein R.M.** On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res., 1994, vol. 99, p. 19617–19634.

Поступила в редакцию
24 ноября 2011 г.