

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR И ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ.

**Чимитдоржиев¹ Т.Н., Хаптанов¹ В.Б., Захаров² А.И., Татьков³ Г.И., Будаев³ Р.Ц.,
Дмитриев¹ А.В., Цыбенков⁴ Ю.Б.**

¹Отдел физических проблем БНЦ СО РАН, г. Улан-Удэ,

²Фрязинский филиал института радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино, Моск. Обл.

³Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ

⁴Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационная интерферометрия широко применяется для измерения рельефа поверхности и выявления мелкомасштабных смещений/деформаций подспутниковой поверхности за время между последовательно проведенными радиолокационными съемками [1,2]. Этот метод дистанционного зондирования Земли использует информацию о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных в съемках одного и того же участка местности одноантенной радиолокационной системой с повторяющихся орбит носителя (интерферометр с мягкой базой) или двухантенной системой с одной орбиты (интерферометр с жесткой базой). Получаемый методом дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) измерительный материал, как правило, предоставляет детальную площадную картину радиальных перемещений отражающей поверхности в пределах радиолокационного снимка, а не отдельные профили или точечные измерения. Измеряемые мелкомасштабные смещения имеют различную природу и могут быть следствием землетрясений, тектонической активности, оползневых и карстовых процессов, хозяйственной деятельности человека и др.

В связи с хозяйственным освоением слабообжитых районов Прибайкалья, Забайкалья, Якутии и других территорий северо-востока России представляется актуальным привлечение методов спутниковой дифференциальной радарной интерферометрии для уточнения ареалов развития и оценки интенсивности криогенных деформаций рельефа.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой ДРИ при изучении и картировании криогенных процессов располагался в сухопутной части Байкальской рифтовой зоны – Усть-Селенгинской депрессии, характеризующейся высокой современной геодинамической активностью. 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. тонн твердого стока, постоянно наращивая площадь дельты. В рельефе

Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой

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, характеризуются значительной изменчивостью мощности, состава, литологического строения, уровня грунтовых вод, что, несомненно, влияет на развитие сезонных криогенных процессов.

Спутниковая радиолокационная съемка поверхности Земли выполняется обычно в X, C, L диапазонах, с длиной волны, соответственно, около 3 см, 6 см и 23 см. Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности в дельте р. Селенга использовались данные радара L-диапазона (PALSAR), 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, SkanSAR, 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 (поляризметрический режим съемки) позволяет повысить уровень когерентности отраженных сигналов за счет подбора оптимальных видов поляризации сигнала. Данные режима FBS (однополяризационный - HH или VV режим 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 минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками, равный 46 дням.

Для изучаемого участка выполнено дешифрирование амплитудного изображения и подобрана интерферометрическая пара (начало января и конец февраля 2009 года) снимков ALOS PALSAR, полученная в режиме FBS на согласованной горизонтальной поляризации (рис.1). 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.

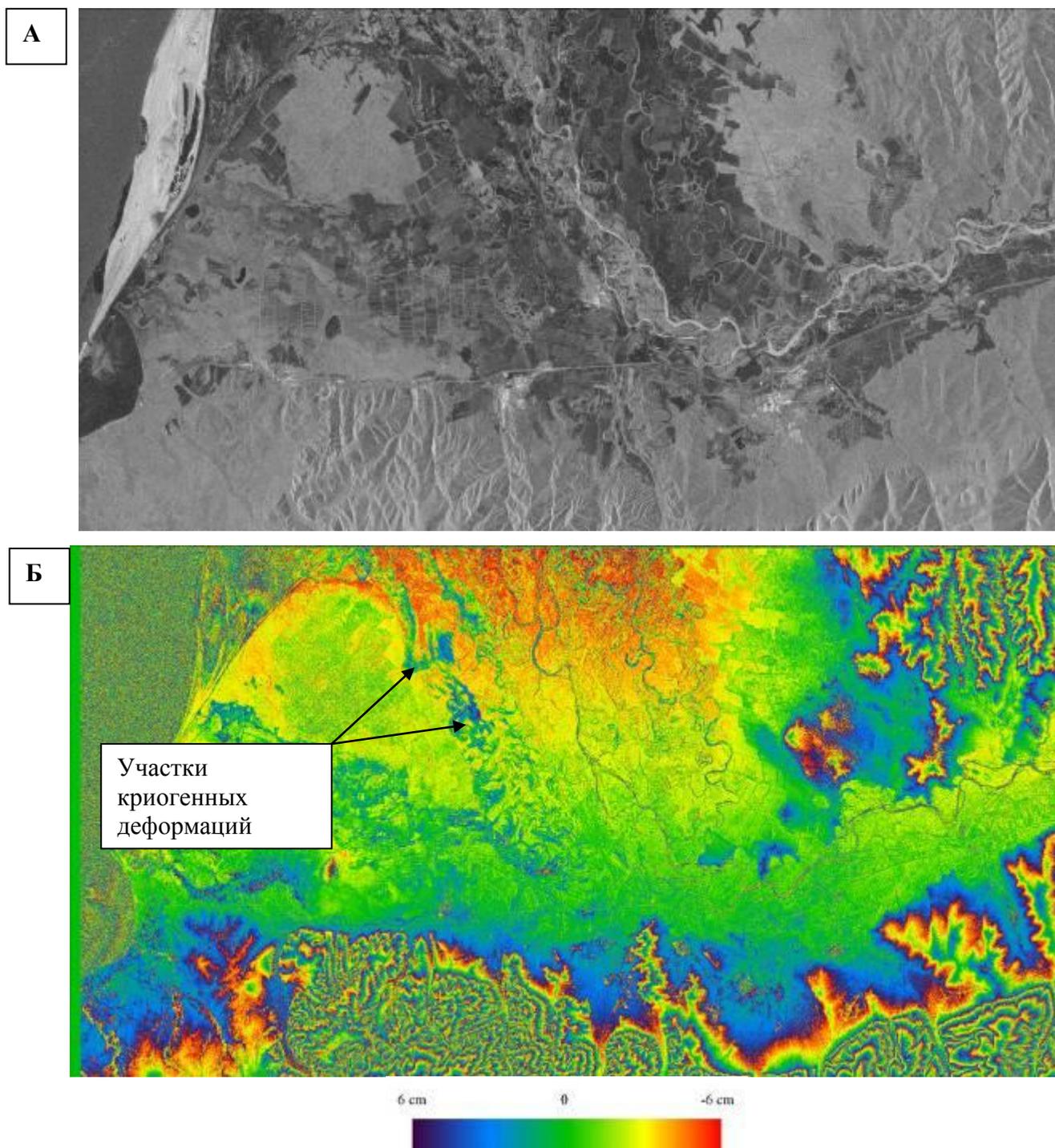


Рис.1. Амплитудное изображение (А) и цветное представление интерферограммы (Б) тестового полигона в дельте р. Селенга.

При построении интерферограммы Усть-Селегинской впадины в полосе размером 50 x 70 км (рис.1Б) выполнялись стандартные этапы обработки сигнала: совмещение изображений; формирование интерферограммы; построение карты когерентности; вычитание фазового набега, характерного для гладкой Земли (выглаживание интерферограммы); фильтрация шумов

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

интерферограммы; развертка фазы, необходимая для построения рельефа местности. Для получения дифференциальной интерферограммы использована модель SRTM, довольно точно характеризующая равнинный рельеф дельты Селенги.

Информация о вертикальных перемещениях земной поверхности, полученная в интервале 46 дней, кодирована на интерферограмме в соответствии с цветовой шкалой (рис. 1-Б). Крайние градации шкалы: красный цвет - соответствует смещению земной поверхности, за время между съемками, вниз на 6 см; фиолетовый – поднятию вверх на +6 см. 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 2π неоднозначности фазовых измерений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В центральной части Усть-Селенгинской впадины по интерферометрическим данным за период с начала января по конец февраля 2009 года фиксируется плавное понижение поверхности рельефа на 6 см. Общее опускание центральной части впадины сменяется поднятием до +6 см поверхности в краевых частях – в предгорьях хр. Хамар-Дабан и Морской. Наблюдаемое опускание поверхности может быть связано с сезонным понижением уровня грунтовых вод: область максимальных опусканий земной поверхности, пространственно совмещается с областью дренирования проток рек Селенга и Харауз, а по времени совпадает с сезонным понижением уровня грунтовых вод, залегающих на глубине 0,0-1,0 м. Обычно заметное снижение уровня подземных вод на побережье Байкала начинается только в декабре, когда прекращается поверхностное питание подземных вод, а также уменьшается их напор, вызванный внутригодовыми колебаниями оз. Байкал. До минимальных отметок уровень опускается в феврале-марте, когда поверхностное питание подземных вод практически отсутствует.

На фоне плавного опускания центральной части депрессии выделяются локальные поднятия линейной формы – предположительно ареалы распространения деформаций пучения. Один из таких участков линейного поднятия приурочен к долине р. Шумиха – палеоруслу 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.

Для более детального исследования линейного фрагмента с воздымающими движениями исходная интерферограмма была приведена к картографической проекции и совмещена с

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

изображением на геопортале Google (рис. 2). На рисунке белым тоном отображены ареалы, предположительно, криогенных деформаций – пучения поверхности.



Рис.2. Геокодированная интерферограмма тестового участка в долине р.Шумиха, совмещенная с изображением веб-портала Google. 1 – наземный георадарный профиль.

При наземных геоморфологических обследованиях тестового участка предполагаемые ареалы распространения криогенных деформаций пучения 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 по профилю западнее д. Большое Колесово на 2 км (рис.2). Зондирование выполнено георадаром «Око-2» с антенным блоком АБ-400, имеющим центральную частоту спектра зондирующего импульса 400 МГц и глубину зондирования до 5 м [3]. Георадарный профиль длиной 220 м пересекает пойму и надпойменную террасу р. Шумиха, разность высот, которых составляет примерно 4 м (рис. 3).



Рис. 3. Вид на пойму и надпойменную террасу р. Шумиха (палеоруло одной из проток р. Селенга).

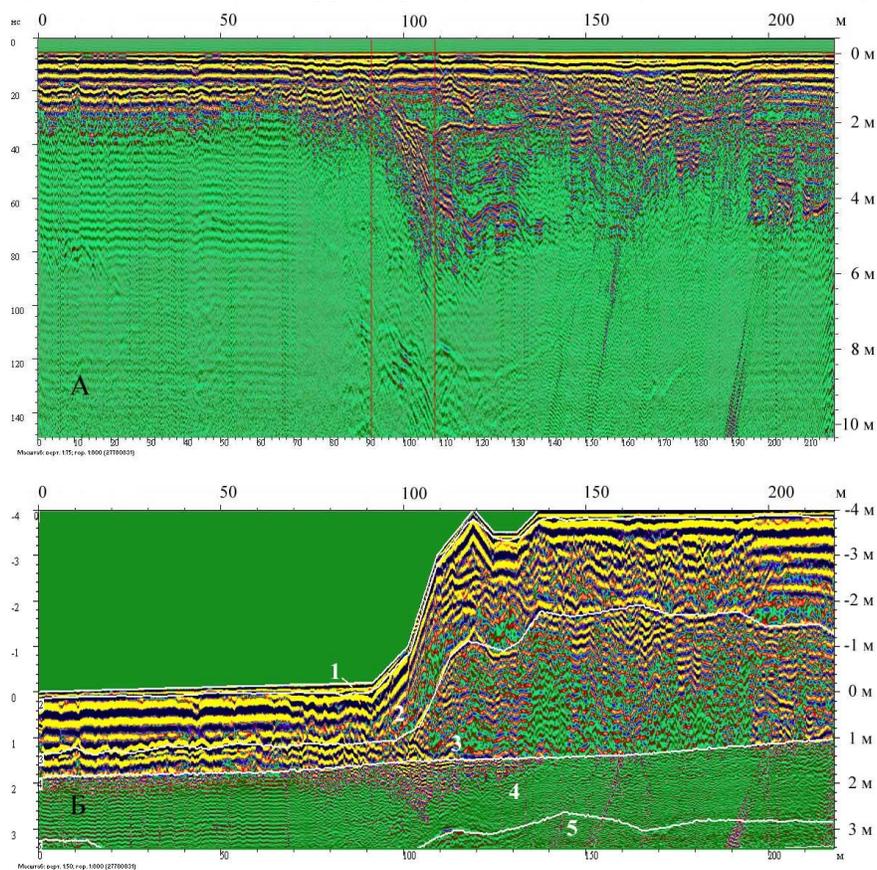


Рис.4. Радарограммы профиля «Колесово»: А- исходная; Б - с высотной коррекцией и послойной интерпретацией.

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

Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой

точность привязки последних несколько ниже. На рис. 4 приведены радарограммы профиля: исходная - А, с высотной коррекцией и послойной интерпретацией - Б.

На радарограмме четко выделяется слой снега мощностью до 0,4 м (рис.4). Из-за слабого затухания в снежном покрове формируется ряд переотражений и зондирование нижележащего грунта происходит образовавшимся цугом волн. По радарным данным в пойменной части под снежным покровом мощность приповерхностного мерзлого грунта достигает 1 м; в террасовой - мощность слоя промерзшего грунта возрастает вдвое (рис. 5Б). 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 залегает 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 радарограммы (принятую для диэлектрической проницаемости $\epsilon = 4$, рис. 4А). Реальная толщина обводненного слоя с поправкой на диэлектрическую проницаемость воды составляет 1,5-2 м (рис. 4Б, 5Б).

Сопоставлением вертикальных смещений поверхности рельефа, вычисленных по данным спутниковой дифференциальной радиолокационной интерферометрии за период 13 января и 28 февраля 2009 года с интерпретационной моделью георадарного профиля «Колесово» установлено, что максимальные значения криогенных деформаций поверхности рельефа достигают +6 см в пойменной части р. Шумиха (рис. 5А). На надпойменной террасе вертикальные смещения незначительны и находятся в пределах погрешности интерферометрических измерений, которые оцениваются в ± 1 см.

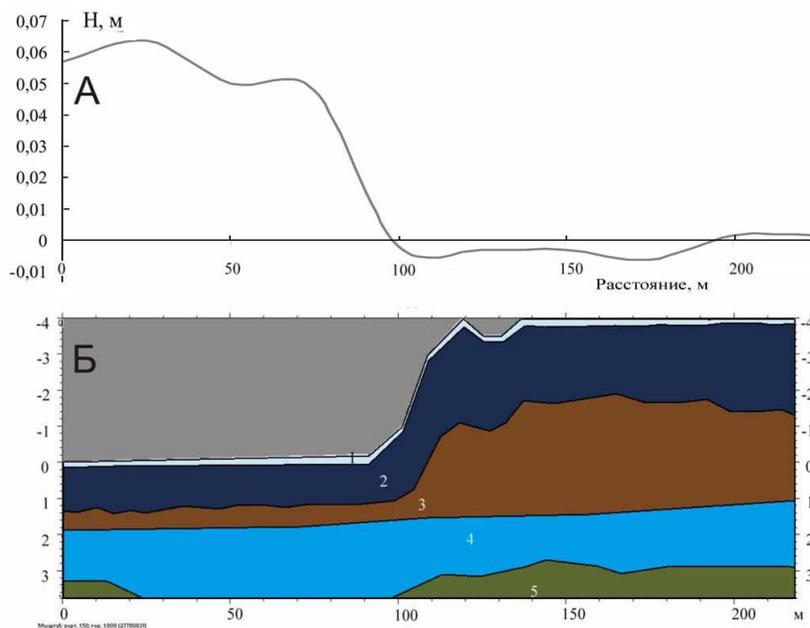


Рис.5. Вертикальные смещения поверхности, рассчитанные по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии (А) и интерпретационная модель георадарного профиля «Колесово».

Зондирование земных покровов радаром с синтезированной апертурой

Цифрами на рис. 5-Б 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. 5-Б), на исследуемом профиле были взяты почвенные пробы до глубины 60 см. В слое 0-40 см почва тяжелосуглинистая и глинистая, с преобладанием пылеватой и илистой фракции (рис. 6), содержание физической глины достигает 45,8 %. Высокая влагоемкость и низкая водопроницаемость в верхней части профиля затрудняют дренаж почвы и приводят к переувлажнению (табл. 1). С увеличением глубины отмечается преобладание песка и супеси.

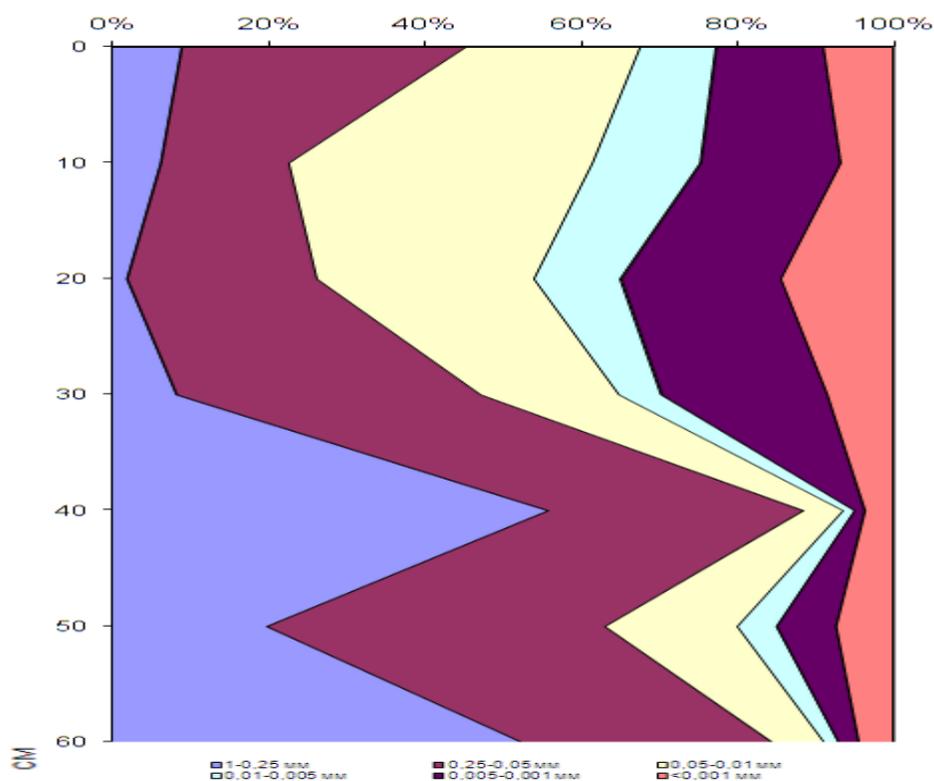


Рис. 6. Гранулометрический состав почвы

Таблица 1. Водно-физические свойства почвы

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

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

30-35	2,06	4,79	67,5
35-44	2,56	0,46	16
45-50	2,49	2,22	14
50-60	2,58	0,57	14

Таким образом, сочетание глинистого и суглинистого состава почв с водным и термическим режимами создают наиболее благоприятные условия для развития процесса морозного пучения. Напряжения, возникающие в грунтах при морозном пучении, способны вызвать разрыв корневой системы растений, деформации и смещения поверхности почв. Наблюдаемое на интерферограмме, формирование криогенных деформаций следует рассматривать как следствие массивного распучивания пойменных супесчано-песчаных отложений, суглинков и глины (см. рис. 6) [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наземная заверка ареалов короткопериодных (с начала января по конец февраля) деформаций поверхности рельефа Усть-Селенгинской депрессии подтвердила хорошее разрешение радиолокационной интерферометрии при оценке интенсивности и картировании областей распространения опасных инженерно геологических – криогенных процессов, в частности, линейных зон деформаций пучения.

Исходя из климатических особенностей района, где наибольшее сезонное промерзание грунтов наблюдается в феврале-начале марта, 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 их водного потока и озера 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,

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

составлении инженерно-геологических карт, зонировании территорий в целях землеустройства и земельного кадастра, создании генпланов поселений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 08-05-98038, 08-02-98010-р).

ЛИТЕРАТУРА

1. Takeuchi, S.; Suga, Y.; Yonezawa, C.; Chen, A.J. Detection of urban disaster using InSAR. A case study for the 1999 Great Taiwan Earthquake. Proceedings. IGARSS 2000. Volume 1, 2000 Page(s):339 – 341.
2. C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati et all. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. Engineering Geology 68 (2003), p. 3–14.
3. Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) ОКО-2. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. Версия 2.6. 2009 г. / <http://www.logsys.ru/>
4. Шестернев Д.М. Криогенные процессы Забайкалья / Д.М.Шестернев; отв.ред. В.Б. Спектор; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения, Ин-т природных ресурсов, экологии и криологии. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. — 262 с.