

7. ЭНДОГЕННЫЕ И ЭКЗОГЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНАХ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ВЕРХНЕАНГАРСКО-МУЙСКОЙ МЕЖДУВПАДИННОЙ ПЕРЕМЫЧКИ ПО ДАННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

М.А. Лебедева¹, В.А. Саньков¹

А.И. Захаров², Л.Н. Захарова²

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино

Аннотация. В статье обсуждаются данные, полученные методом дифференциальной РСА-интерферометрии при исследовании деформаций земной поверхности различной природы в пределах Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки. Обнаружены эндогенные линейно локализованные и площадные деформации в зоне динамического влияния активного Муяканского разлома. Также исследованы экзогенные оползневые деформации, затрагивающие сооружения трассы Байкало-Амурской железнодорожной магистрали.

МЕТОДИКА

Первые разработки принципов интерферометрии с применением радара с синтезированной апертурой (РСА), установленного на борту космических спутников, проводились в восьмидесятых годах прошлого столетия. С тех пор метод РСА-интерферометрии успешно используется во всем мире для исследований деформаций земной поверхности различного генезиса. Суть метода состоит в обработке пар радарных изображений, снятых в два разных момента времени, между которыми произошла деформация. Разность фаз сигналов, полученных при съемке, отображается с помощью монохромной или цветной шкалы на интерферограмме. Цветные полосы характеризуют величину, и направление сдвига, произошедшего при деформации. В нашем исследовании применялись данные со спутников ENVISAT (С-диапазон), запущенных европейским космическим агентством, и данные со спутников ALOS/PALSAR (L-диапазон), запущенных японским космическим агентством. При длине волны 5.6 см (С-диапазон) фазовый набег 2π на интерферограмме порождается изменением дальности по направлению к спутнику на 2.8 см; при длине волны 23.6 см (L-диапазон) на 11.8 см. Изменения по направлению к радару пересчитываются в истинные изменения земной поверхности с учетом дополнительной информации об объекте и понимании геодинамических процессов. При исследовании деформаций сигнал, обусловленный рельефом, вычитается посредством использования в обработке цифровых моделей рельефа.

С помощью метода РСА-интерферометрии возможно уловить сантиметровые смещения поверхности, причем размеры самого объекта исследования (например, сейсмогенного разрыва или активного разлома со значительным крипом) могут достигать нескольких десятков километров. Таким образом, преимуществом метода перед другими способами измерения деформаций является высокоточное измерение смещений земной поверхности по всей площади объекта. Существуют ограничения метода, такие, как временная декорреляция, происходящая из-за изменения характеристик поверхности, и влияние атмосферных и ионосферных явлений. Ограничения и методы их преодоления детально описаны [1].

Для уменьшения влияния рельефа на получаемый результат мы использованы пары снимков с маленькими перпендикулярными базами (B_{\perp}). Такой подход, при дополнительном вычитании цифровой модели рельефа, позволяет наблюдать деформации даже в гористой местности, при условии, что деформации не попадают в область радиолокационной тени. Для того чтобы уменьшить влияние временной декорреляции, обычно рекомендуется также использовать снимки с небольшой временной базой. Однако известны случаи, когда хорошая корреляция может наблюдаться на протяжении нескольких лет [2].

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Район наших исследований находится в пределах Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, в зоне динамического влияния Муяканского и Перевального разломов.

Генеральный Муяканский разлом протягивается в северо-восточном направлении от верховьев р. Баргузин до устья р. Муякан. По его кулисообразным уступам часто развиты треугольные базальные фасы и сейсмодислокации, свидетельствующие об активности разлома в позднем кайнозое и в голоцене. В этот период разлом представляет собой левосторонний сбросо-сдвиг с опущенным северо-западным крылом. Амплитуда горизонтального смещения оценивается в 1 км, вертикального – от 800 до 1300 м [3].

В зону динамического влияния разлома входит Муяканская впадина вместе со структурами ее северного борта. Ширина зоны влияния Муяканского разлома 7,5-10 км. В отличие от крутого южного борта впадины ее северный борт более пологий, ступенчатый. Амплитуда смещений по отдельным разломам постепенно затухает на север от оси впадины. Зона Муяканского разлома в северном борту впадины выражена комплексом разрывных нарушений северо-восточного и восток-северо-восточного

простираются, падающих чаще в северо-западном направлении реке – в юго-восточном. Исследователи отмечают в основном левосторонние, реке – правосторонние сдвиго-сбросы и сдвиги в северном борту Муяканской впадины [4].

По данным изучения Муяканской палеосейсмогенной структуры, амплитуды одноактных вертикальных сбросовых смещений по разлому достигали 6-7 м. Западное окончание сейсмодислокации располагается в 4-5 км от пос. Северомуйск и восточного портала тоннеля трассы БАМ. В исследуемом районе трасса БАМ проходит вдоль Муяканской структуры почти на всем ее протяжении и пересекает отдельные ее дислокации. Таким образом, инженерно-сейсмогеологические условия трассы на этом участке неблагоприятны [5].

Региональный Перевальный разлом простирается в северо-западном направлении. Линеамент, совпадающий в пределах Северо-Муйского хребта с Перевальным разломом, прослеживается от р. Витим на юго-востоке до р. Дзялокан на северо-западе. Выраженность и влияние разлома на геодинамическую обстановку на разных его отрезках различна. На исследуемом участке разлом проявлен в поле силы тяжести в виде гравитационной ступени небольшой интенсивности, протягивающейся из долины р. Муякан по долине руч. Безымянного. В рельефе эта ветвь разлома представлена серией уступов сбросовой кинематики. В период кайнозойской активизации по ним происходило опускание северо-восточного крыла разлома [4].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РСА- ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Нами произведена интерферометрическая обработка снимков ENVISAT и ALOS/PALSAR. Из-за сильной заболоченности долин и расчлененного рельефа на всех интерферограммах по снимкам ENVISAT велико влияние временной декорреляции. Однако, несмотря на это, на одних и тех же участках на трех парах снимков (13.01.2004-08.03.2005, 16.05.2004-18.09.2005 и 17.02.2004-17.01.2006) обнаружены четыре области высокой когерентности. Для анализа выбрана пара с перпендикулярной базой равной 3 м (13.01.2004-08.03.2005) Рис.1. При такой перпендикулярной базе влияние рельефа на интерферометрическую разность фаз исчезающе мало.

Линейно локализованные деформации приурочены непосредственно к зоне сместителя разлома Рис.1, прослеживающегося в основании уступа Муяканского

хребта. Рассмотрение размеров аномалий, их протяженности и характера пространственного распределения позволяет исключить экзогенную природу деформаций. Весьма незначительна сейсмическая активность зоны разлома в течение 2004-2006 гг. Следовательно, мы не можем отнести эти деформации за счет накопления и реализации упругих напряжений в виде сейсмических событий. Одним из видов деформаций фиксируемых геодезическими методами в зонах активных разломов, как в подвижных областях, так и на платформах, являются параметрические деформации, впервые выделенные и описанные Ю.О. Кузьминым и называемые им суперинтенсивными [6]. Скорости параметрических деформаций достигают больших величин – до 10^{-5} год. Чаще всего, они не сопровождаются сейсмичностью и локализуются непосредственно в зонах разломов. Автор связывает происхождение этих деформаций с изменениями параметров среды внутри зоны разлома.

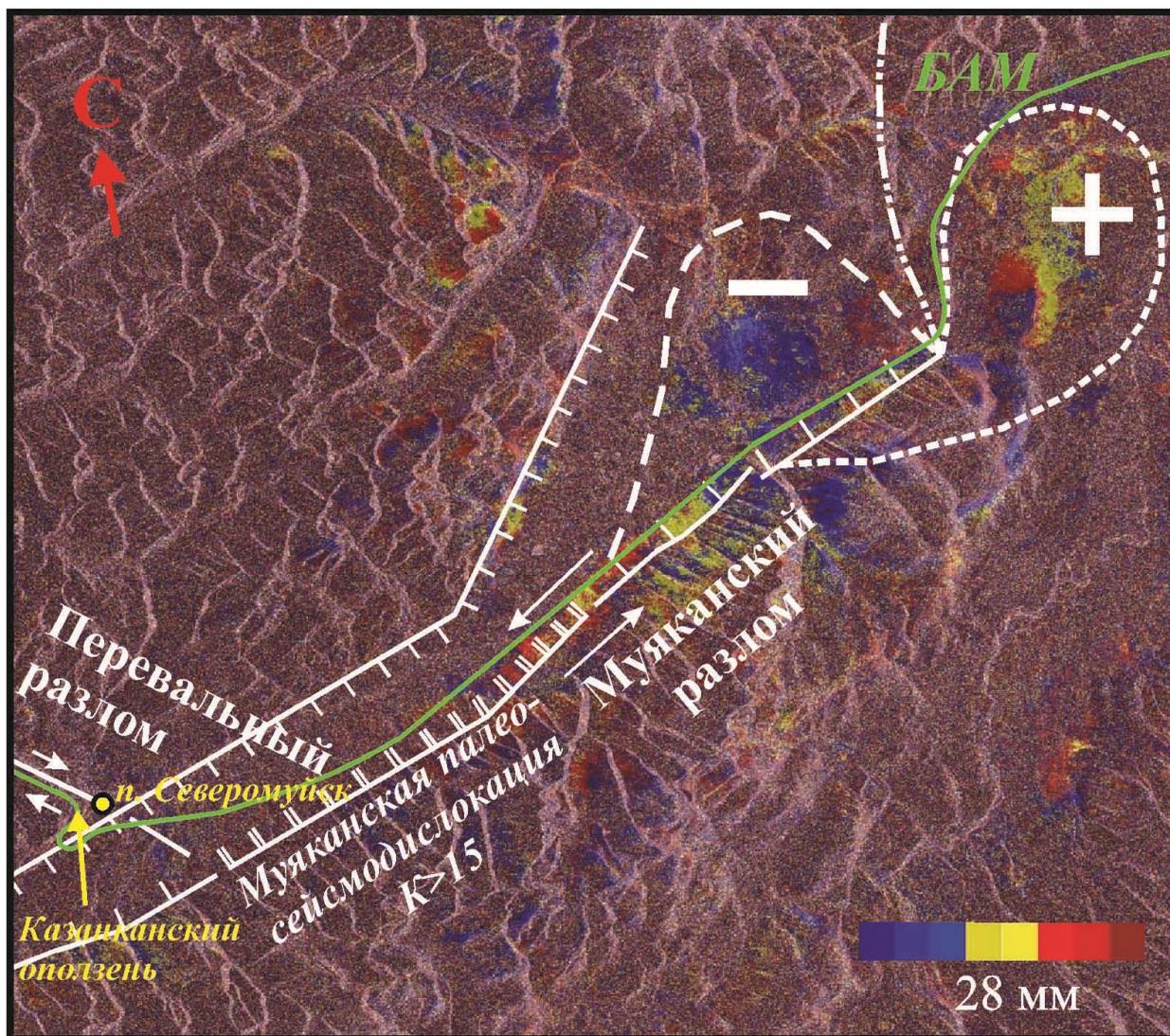


Рис. 1. Не развернутая интерферограмма, изготовленная из пары 13.01.2004-08.03.2005, наложенная на амплитудный снимок (пояснения в тексте).

В зоне динамического влияния Муяканского разлома по данным ENVISAT обнаружены два типа эндогенных деформаций, которые можно определить, как тектонические – линейно локализованные и площадные.

Площадные деформации, обнаруженные вблизи окончания Муяканского разлома Рис.1 на СВ замыкании Муяканской впадины и в западном борту Улан-Макиткской впадины, также не могут быть прямо объяснены за счет сейсмогенных движений. Картина распределения площадных деформаций соответствует распределению напряжений на окончании левостороннего сдвига в упругой среде. На восточном окончании северного крыла разлома располагается область растяжения и фиксируется относительное опускание земной поверхности. А на юго-восточной части разлома располагается область сжатия, где фиксируется относительное поднятие земной поверхности. Эти данные согласуются с данными геодинимических исследований [4], по которым Муяканский разлом наряду с вертикальной имеет левостороннюю сдвиговую компоненту смещений.

Наряду с деформациями эндогенной природы в зонах активных разломов Верхнеангарско-Муйской междувпадинной перемычки по данным дифференциальной РСА-интерферометрии нами были обнаружены экзогенные деформации. На участке Байкало-Амурской железнодорожной магистрали в нескольких километрах от Северо-Муйского тоннеля (ст. Казанкан, п. Северомуйск, координаты 56.1N 113.8E) с 90-х годов развивается оползневой процесс. Согласно данным нивелирования и геодезических GPS-измерений, проведенных на железной дороге в 2002-2003 годах “Иркутскжелдорпроект”, железнодорожное полотно сдвигалось в зоне действия оползня, вдоль склона со скоростью до 2 см/мес. Развитие оползня приводит к риску разрушения железнодорожного пути и крушения поездов. Происхождение оползня связывается исследователями с процессом деградации многолетнемерзлых пород и подрезанием склона дорогой, а также чрезмерной нагрузкой на склон [7]. Нельзя также недооценивать влияние уровня сейсмической и тектонической активности района на разрушение пород и развитие оползней. Казанканский оползень находится в зоне влияния Муяканского и Перевального разломов.

Для изучения оползневого процесса в районе ст. Казанкан мы использовали снимки с восходящего витка ALOS/PALSAR, поскольку при таком пролете спутников вектор смещения направлен навстречу движения спутника. При использовании нисходящего витка ENVISAT/ASAR вектор смещения оползня направлен

перпендикулярно движению антенны, поэтому большая часть информации о смещениях теряется. Таким образом, доступные данные ENVISAT не применимы для изучения Казанканского оползня.

Не смотря на зимнее время съемки и разницу между съемками в два года, хорошую корреляцию и результаты показала пара радарных снимков ALOS/PALSAR снятых 17.01.2009 и 12.01.2007. Местоположений деформаций, наблюдаемых на интерферограммах, точно совпадают с расположением мостов, где по данным предыдущих исследований [8] обнаружены значительные подвижки. Наибольшие изменения дальности наблюдаются у среднего моста Рис.2. У этого же моста, ниже железнодорожного полотна, обнаруживается область, испытывающая воздымание. Кроме того, вблизи мостов наблюдаются области с опусканием земной поверхности, связанные, по-видимому, с процессами солифлюкции. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что проведенные мероприятия по укреплению склона и железнодорожной насыпи не привели к остановке оползневого процесса, что говорит об острой необходимости продолжения укрепительных работ или принятию мер по изменению трассы на данном участке магистрали.

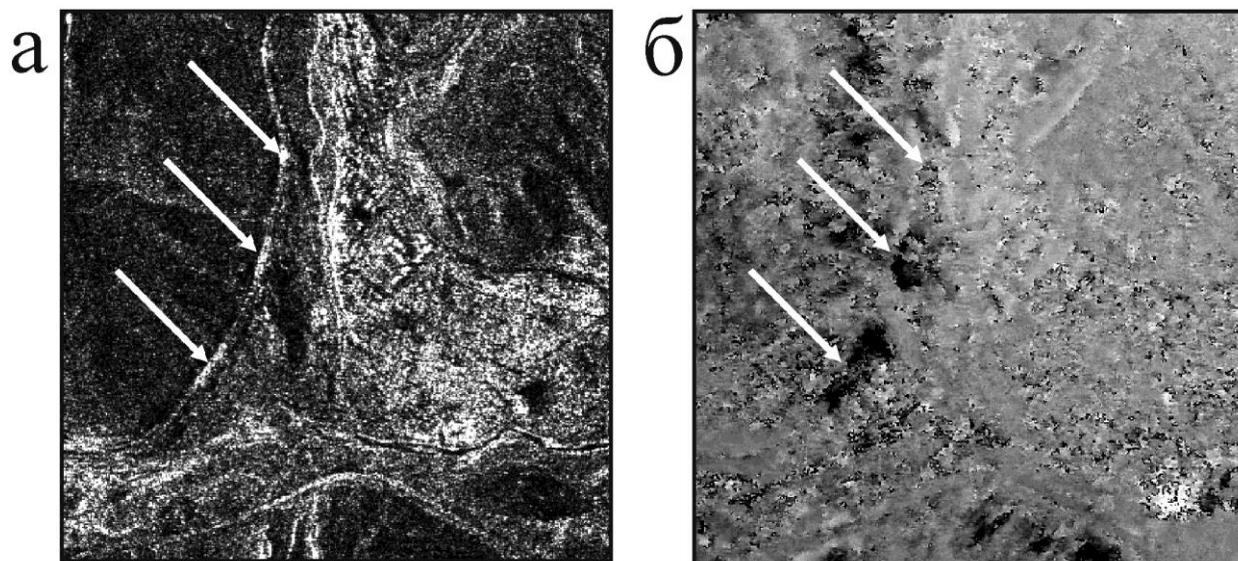


Рис. 2 а) Амплитудный снимок ALOS/PALSAR 17.01.2009. Стрелками показаны железнодорожные мосты, б) Развернутая интерферограмма, изготовленная из пары 17.01.2009-12.01.2007. Стрелками показаны оползневые деформации, наблюдаемые на интерферограмме в местах положения мостов (пояснения в тексте).

Таким образом, применение метода РСА-интерферометрии позволило обнаружить и оконтурить области подверженные линейно локализованным и

площадным тектоническим деформациям в зоне динамического влияния активного Муяканского разлома, а также оконтурить область повышенной экзогеодинамической опасности в районе ст. Казанкан на момент 2009 года. Метод РСА-интерферометрии имеет большой потенциал как для изучения уже произошедших событий в районе исследований, так и для мониторинга развивающихся процессов.

Авторы выражают благодарность компании ИТТ и ее Российскому дистрибьютору - компании СОВЗОНД за предоставление временной лицензии для программы SARscape, Европейскому космическому агентству (ЕКА) за радарные изображения ENVISAT/ASAR, полученные по проекту Cat-1 6320, а также Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за радарные изображения ALOS/PALSAR, предоставленные для данного исследования. При расчетах использовались данные об орбитах TU Delft и цифровые модели рельефа SRTM.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ (№08-05-08-05-00992) и проекта Программы РАН 16.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hanssen R.F. Radar Interferometry. Data interpretation and error analysis. Delft University of technology, the Netherlands, 2001. 308p.
2. Klees R. & Massonnet D. Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations// *Geologie en Mijnbouw*, 1999, 77. p. 161-176.
3. Шерман С.И., Леви К.Г., Борняков С.А. Блоковая тектоника Муякан-Ангараканского междуречья и некоторые вопросы сейсмичности // *Сейсмотектоника и сейсмичность района строительства БАМ.* - М.: Наука, 1980. - С. 43-56.
4. Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Коваленко С.Н., и др. Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона. Н: Наука, 1991. 111 с.
5. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование / Ред. В.П. Солоненко, М.М. Мандельбаум. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 19856. 190 с.
6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон // *Физика Земли.* – 2004. - № 10. – С. 95-112.
7. Козырева Е.А., Тржицинский Ю.Б., Труфанов А.В., Федоренко Е.В. Катастрофическая активизация оползней – результат техногенных воздействий на геологическую среду. // *Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии.* – 2006. –Вып. 5. С. 138-149.
8. Тржицинский Ю.Б., Козырева Е.А., Лапердин В.К., Залуцкий В.Т., Попов О.Ю. Инженерно-геологические особенности Казанканского участка БАМ. // *Сергеевские чтения* - М.: ГЕОС, 2004. -Вып. 6, С.438-442.