

**И.А. Лысков, В.В. Мусихин, Ю.А. Кашников**

Пермский государственный технический университет

## **МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДАМИ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Для выявления и исследования оседаний земной поверхности используется радарная интерферометрия. Этот метод хорошо подходит для решения задач по определению небольших относительных смещений земной поверхности с применением радиоволн с короткой длиной волны (сантиметрового порядка). В настоящее время для выявления оседаний подработанных территорий используется техника интерферометрического анализа спутниковых съемок. В данной работе представлен анализ оседаний территории г. Березники методом площадной интерферометрии.

Интенсивная разработка рудных и нефтегазовых месторождений, промышленно-гражданская застройка территорий, наличие многочисленных оползнеопасных мест, наличие разломных тектонических структур и ряда отдельных геодинамических и геоморфологических факторов могут оказать негативное влияние на состояние горного массива и земной поверхности [8]. Антропогенное влияние на недра и земную поверхность может сопровождаться как обычными проседаниями земной поверхности, так и аномальными деформациями и проявлениями сейсмической активности, что может вызвать значительный экономический и экологический ущерб, особенно в районах промышленно-гражданской застроенной территории. В этой связи возникает необходимость проведения мониторинга за состоянием поверхности и горного массива. На сегодняшний день существуют несколько методов мониторинга для точного и достоверного выявления оседаний земной поверхности.

Традиционно для выполнения такого рода работ используется высокоточное нивелирование и GPS измерения. Данные технологии геодезических измерений позволяют проводить наблюдения на миллиметровом уровне точности. В последнее время все более широкое применение находит метод дифференциальной интерферометрии SAR [6], который также позволяет выявлять проседания на высоком – миллиметровом – уровне точности. Технология дифференциальной интерферометрии SAR использует методы радиолокационной съемки земной поверхности с космических спутников, на которых установлены антенны с синтезированной апертурой (SAR) [1, 2]. Основной информацией, получаемой в результате радарной съемки, являются интенсивность и фаза (временная задержка сигнала). Повторная радарная съемка позволяет определить разность фаз, обусловленную, например, сдвижением земной поверхности [5]. Такие смещения могут быть определены в результате обработки радарной съемки с высокой точностью.

Преимущество такого способа заключается в том, что можно вести наблюдение за всей площадью исследуемого участка (площадью до 3000 км<sup>2</sup>), а не за конкретными объектами или линиями. Экономически данный метод тоже эффективен, так как исключается непосредственное участие человека при выполнении дорогостоящих геодезических полевых работ. Получение радарных данных с космических спутников не занимает много времени (максимум 6 дней), что в свою очередь позволяет получать картину деформаций гораздо оперативнее [3]. Так как спутник вращается по повторяющимся орбитам, период наблюдений может колебаться от 11 до 45 дней, в зависимости от типа спутника.

В рамках Национального образовательного проекта (НОК) Пермским государственным техническим университетом (ПГТУ) был приобретен современный программный комплекс GAMMA (фирма «GAMMA REMOTE SENSING AG», Швейцария) для обработки данных радарной космической съемки. Специалисты ПГТУ в настоящее время полностью освоили навыки работы с данным комплексом. В качестве исследовательских проектов были обработаны спутниковые данные по территории г. Березники, а также на Астраханском и Оренбургском геодинамических полигонах. Полученные результаты свидетельствуют о полной работоспособности метода.

*Верхнекамское месторождение калийных солей (г. Березники).* В рамках научно-исследовательского проекта ПГТУ выполнил исследования по определению вертикальных смещений земной поверхности г. Березники дистанционным методом радарной интерферометрии. Как известно, в 2007 г. в результате прорыва воды был затоплен и первый рудник БКПРУ-1. В связи с разработкой и последующим затоплением первого рудника в некоторых частях города зафиксированы серьезные деформации земной поверхности и, соответственно, промышленных и жилых зданий. В связи с этим мониторинг развивающихся деформаций территории города стал чрезвычайно актуальной задачей.

В этом проекте были использованы данные со спутника ENVISAT, предоставленные Европейским космическим агентством ESA [4]. Данный спутник имеет радар с синтезированной апертурой (SAR). Средние значения деформаций земной поверхности и их история развития являлись основным интерферометрическим результатом.

Для исследования была использована серия повторных наблюдений со спутника ENVISAT. Общее количество сцен составило 28 шт. Они охватывали период времени с начала 2004 по конец 2008 г. В качестве дополнительной информации для подтверждения полученных интерферометрических результатов использовались данные нивелирования, предоставленные ОАО «Уралкалий», а также данные GPS измерений на Верхнекамском глобальном геодинамическом полигоне, созданном ПГТУ.

В результате сложнейшей обработки и интерпретации радарных снимков была получена деформационная картина территории г. Березники. Для

сравнительного анализа полученных интерферометрических данных был выбран небольшой участок, который охватывал центральную часть города, где были зафиксированы значительные смещения земной поверхности. На данном участке выполняются ежегодные инструментальные наблюдения за осадками силами маркшейдерской службы ОАО «Уралкалий». Высокоточное нивелирование выполняется по профильным линиям, которые представляют собой сеть грунтовых реперов и стенных марок. Всего для анализа было выбрано четыре профильные линии, лежащие в зоне деформаций. Помимо этого на каждой профильной линии было отмечено по одному реперу для изучения их истории развития смещений. Положение профильных линий и выбранных реперов показано на рис. 1. Здесь же показан фрагмент карты деформаций земной поверхности г. Березники.

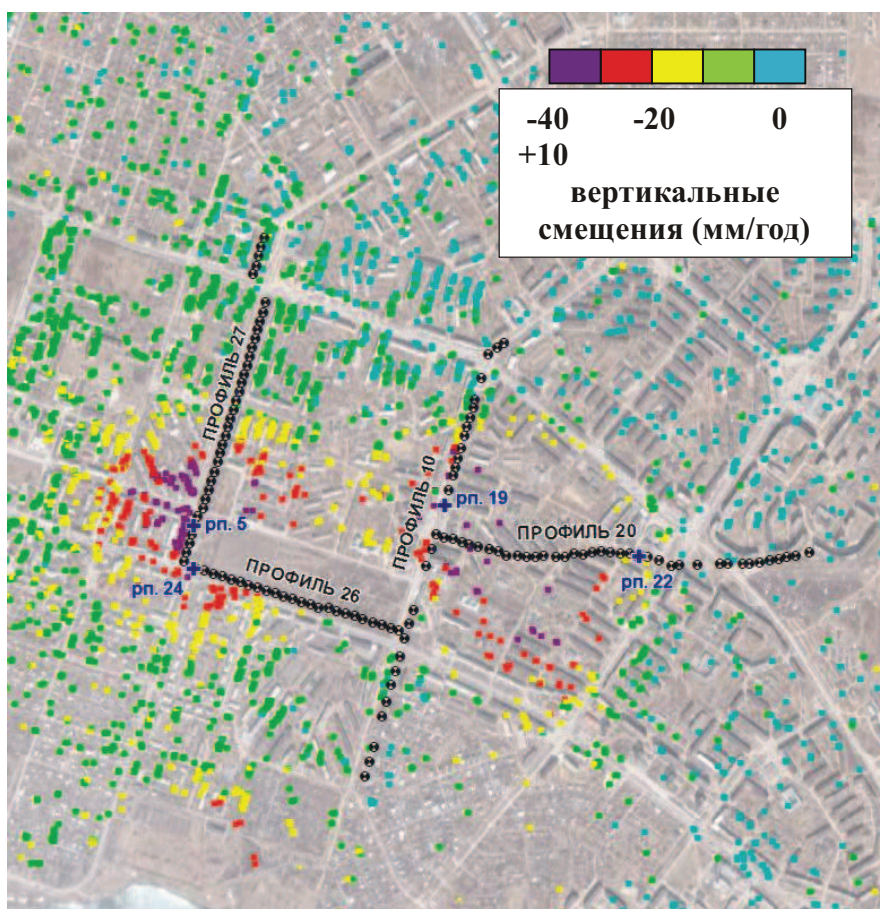


Рис. 1. Фрагмент карты вертикальных смещений земной поверхности г. Березники, расположение профильных линий нивелирования на участке исследований и выбранных для анализа реперов

Как видно на рис. 1, на участке сформировались две мульды оседаний, которые из-за близкого расположения слились в одну общую зону деформаций. За четыре года наблюдений максимальные оседания на этой территории достигли значений в 20–25 см.

Для сравнения данных нивелирования и результатов интерферометрического анализа по каждой профильной линии были построены графики вертикальных смещений (на рис. 2 приведен один график по профильной линии XXVII). Рассматриваемый период – четыре года: с июня 2004 по июль 2008 г. И как видно на графике, интерферометрические результаты практически полностью совпадают с инструментальными.

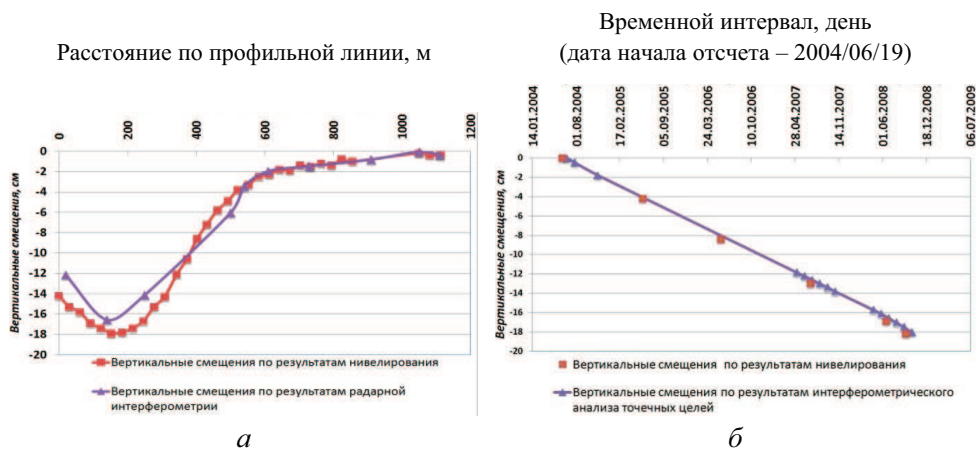


Рис. 2. Вертикальные смещения по профильной линии XXVII (а) и история развития деформаций репера 5 (б) за период с июня 2004 по октябрь 2008 г.

С помощью точечного интерферометрического анализа была также получена информация о том, как развивались деформационные процессы в каждой точке за наблюдаемый период времени. На рис. 2, а приведены данные о развитии смещений для одного из реперов (их местоположение представлено на рис. 1). Анализируя этот график (рис. 2, б), можно сделать вывод, что смещения реперов имеют линейную закономерность с незначительными отклонениями, соответственно и весь участок с 2004 по конец 2008 г. оседал равномерно без изменения скоростей деформаций, даже после полного затопления рудника в 2007 г. Незначительные расхождения интерферометрических результатов с данными нивелирования могут быть связаны с остаточным влиянием атмосферы или с ошибками развертывания фазы. В целом же полученные по результатам дистанционного зондирования данные о смещениях очень хорошо согласуются с результатами инструментальных наблюдений.



Полученная информация об оседаниях земной поверхности позволила восстановить историю развития деформаций не только в конкретной точке, но и всего участка. Так, на рис. 3 приведена пространственная информация о развитии деформаций на всем участке за период с мая 2007 по май 2008 г.

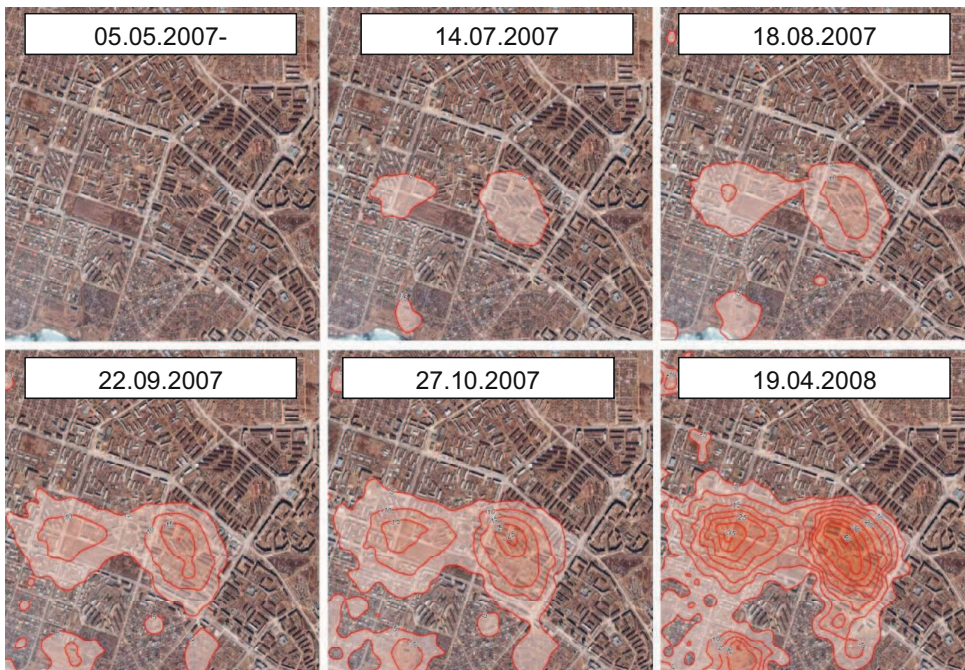


Рис. 3. Развитие мульды оседаний на участке исследований с мая 2007 по май 2008 г. (максимальные смещения на конец наблюдаемого периода составили 40–45 мм)

Интерферометрический анализ радарных сцен на территорию г. Березники дал очень интересные результаты об активности деформаций, связанных с разработкой первого рудника и дальнейшим его затоплением, и их пространственном распределении. Высокая корреляция результатов анализа с данными инструментальных наблюдений говорит о потенциальной возможности использования метода радарной интерферометрии для контроля смещений земной поверхности или хотя бы для прогнозирования деформаций и выявления потенциально опасных зон, в которых, в дальнейшем, необходимо заложить наблюдательные станции. Применение точечного анализа позволило получить информацию не только о пространственном распределении оседаний в городе, но и во времени. Анализ развития смещений во времени позволил судить о скоростях изменения деформаций на участке.

Представленная спутниковая техника особенно хорошо себя показала в застроенной части города, чего не скажешь о периферии, где степень декорреляции очень велика из-за наличия лесной растительности. Малое количество то-

чек-отражателей на участке промзоны первого рудника связано еще и с относительно высокими смещениями поверхности, возникшими после затопления рудника. Использование радаров с меньшим интервалом повторных съемок, например, TERRASAR-X, COSMO-SKYMED позволит осуществлять наблюдение даже за такими участками, где скорость оседаний превышает 50–70 см/год.

Таким образом, интерферометрический анализ радарных сцен техногенно нагруженных территорий, а также территорий с высокой плотностью застройки промышленными и гражданскими объектами дает очень важные и практические результаты об активности деформаций и их пространственном распределении. Применение точечного анализа позволяет получить информацию не только о пространственном распределении деформаций, но и во времени. Открывается возможность оперативного мониторинга деформационных процессов больших территорий. После выявления на основе спутниковой интерферометрии наиболее опасных мест для предупреждения возможных аварий можно выполнять локальный геодезический мониторинг данных участков традиционными геодезическими методами.

### **Список литературы**

1. Cumming I.G., Wong F.H. Digital processing of synthetic aperture radar data. – Norwood, MA: Artech House, Inc., 2005.
2. Curlander J.C., McDonough R.N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
3. Elachi C. Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques. – New York: IEEE Press, 255, 1987; Franceschetti G., Schirinzi G. A SAR Processor Based on Two-Dimensional FFT Codes // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1990. – Vol. 26, 2. – P. 356–365.
4. ESA TM-19, InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. – Noordwijk: ESTEC, 2007.
5. Rees W.G. Physical principles of Remote sensing / Cambridge University Press. – Cambridge, 2001.
6. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. – М.: Радиотехника, 2004.
7. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
8. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007.

Получено 27.04.2010