КОНТРОЛЬ ОСЕДАНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ МЕТОДАМИ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

CONTROL OF UNDERWORKED AREAS SUBSIDENCE USING THE RADAR INTERFEROMETRY METHODS

V. Bush,
principal of the university, professor;
H.-P. Hebel,
degreed engineer;
M. Schaffer,
degreed geologist;
D. Walter,
degreed engineer,
Institute of geotechnics and mine surveying,
Technical university Clausthal, Germany.
A. Baryakh,
Deputy Director of the Institute of mining engineering, Urals branch of the Russian Academy of Science,
doctor of engineering science, professor,
Perm

Based on the research of the quick land subsidence caused by the grave accident at the First Berenzikovsky mine, the authors consider the opportunities for using the satellite radar interferometry techniques for monitoring of the deformations of the underworked areas. They demonstrate the effectiveness of the radar interferometry control of the land subsidence and the limitations of the technique due to the presence of snow cover during winter and the forest cover.

В. Буш,
директор института, профессор,
Х.-П. Хебель,
дипломированный инженер,
М. Шаффер,
дипломированный геолог,
Д. Вальтер,
дипломированный инженер,
Институт геотехники и маркшейдерского дела,
Технический университет Клаусталь, ФРГ.
А.А. Барях,
заместитель директора Горного института УрО РАН,
доктор технических наук, профессор,
г. Пермь, Россия

В октябре 2006 г. произошел аварийный прорыв пресных вод в выработанное пространство Первого Березниковсковского рудника, отрабатывающий участок Верхнекамского месторождения калийных солей, который расположен в пределах города Березники Пермского края с населением порядка 180 тыс. чел.

Одним из основных негативных последствий аварии является интенсификация деформаций земной поверхности вследствие растворения соляных пород. Данные процессы представляют угрозу для нормального функционирования гражданских и промышленных объектов, магистральных и внутригородских коммуникаций, находящихся на подработанной территории г. Березники и прилегающих районов.

Для обеспечения безопасной жизнедеятельности территории г. Березники, своевременного принятия превентивных управленческих технических решений необходима организация комплексного мониторинга за развитием аварийной ситуации, важнейшим элементом которой является контроль за оседаниями земной поверхности. В этой связи для получения содержательной информации о деформациях земной поверхности, наряду с традиционными методиками маркшейдерских наблюдений по профильным линиям, впервые в российской горной практике использовались и современные спутниковые радарные интерферометрические технологии, позволяющие получать данные по всей контролируемой площади.

Принцип измерения оседания земной поверхности. Дистанционное изучение Земли с использованием спутниковых радаров позволяет проводить площадные исследования относительных изменений высотных отметок земной поверхности, состоявшихся между двумя пролетами спутника. Данные методики, начиная с 90-х годов прошлого века, широко применяются за рубежом для мониторинга оседания земной поверхности, обусловленного добычей твердых и жидких полезных ископаемых [1-4]. Российский опыт является весьма ограниченным и включает малочисленные исследования оседаний земной поверхности в районах месторождений нефти и газа [5,6], контроль деформаций газопроводов [7].

Принцип радарной интерферометрии заключается в записи и обработке двух разновременных спутниковых снимков одного и того же участка земной поверхности из разных перспектив. Запись обоих сцен спутниковыми радарами осуществляется не синхронно. При каждом новом пролете радарный сенсор излучает сверхкороткий сильно когерентный электромагнитный импульс с определенной длиной волны по наклонной траектории вниз, вертикально к движению спутника. Сенсор работает вне зависимости от времени суток. Радарное излучение относительно легко и без помех проходит через облачность. Принципиально сенсоры могут функционировать в любых погодных условиях. Используемая длина волны радарного импульса позволяет оценивать изменения земной поверхности по высоте с точностью до первых миллиметров.

Радарная система регистрирует время прохождения и интенсивность отраженного от поверхности земли сигнала. Фазовая характеристика принятого сигнала является основной измеряемой величиной при обработке данных методом интерферометрии, поскольку она пропорциональна двукратной длине пройденного радарным импульсом пути между сенсором и поверхностью земли.

Так называемая SAR-интерферометрия, представляет собой метод, который может использоваться для однозначно-

го определения положения точек на земной поверхности. Для этого необходимо комбинированно изучить два спутниковых снимка (*рис. 1*), записанных из разных положений по аналогии с фотограмметрией при стереоанализе.

Фазовое отличие по двум снимкам включает две составляющие, характеризующие топографию местности и движение (оседание) земной поверхности между двумя периодами записи. Кроме этого, возникают фазовые компоненты, обусловленные атмосферными явлениями, различием траекторий орбит и шумами. В этой связи важным элементом радарно-интерферометрического анализа является определение этих фазовых компонент в составе уже измеренной общей фазы.

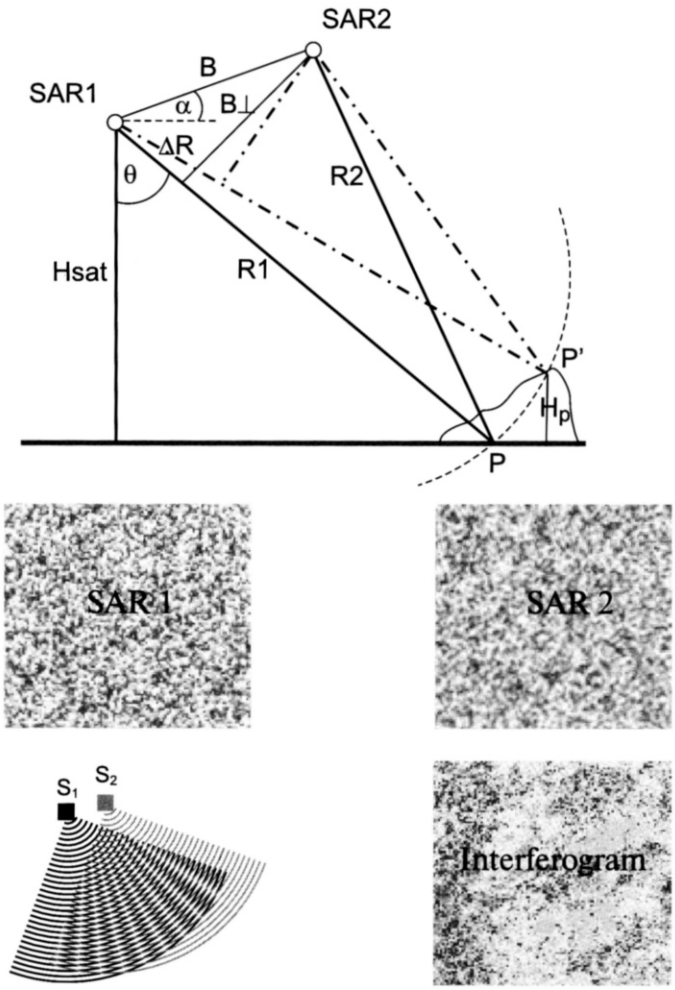

Рис.1. Интерферометрический принцип определения оседаний земной поверхности

На основе фазового отличия двух спутниковых снимков осуществляется построение интерферограммы (*рис. 1*). Для лучшей визуализации интерферограммы обычно кодируются в цвете. Один цветовой цикл соответствует фазовому циклу $-\pi$ до $+\pi$.

Наличие хорошей когерентности между корреспондирующими пикселями является важнейшим условием для успешной обработки данных методом интерферометрии. Когерентность связана с изменением фазовой и амплитудной информации каждого отдельного пикселя. Потеря когерентности, так называемая декорреляция, влечет появление в интерферограмме фазовых шумов, что затрудняет обработку и последующую интерпретацию интерферограмм. Существуют различные факторы, которые ведут к временным изменениям свойств отраженного от объектов сигнала, и тем самым обуславливают декорреляции. В соответствующих регионах решающее влияние оказывают растительность и снежный покров. Чем больше интервал времени между двумя радарными снимками, тем незначительнее когерентность.

Следующим условием установления стабильного фазового отношения является в каждом случае расстояние между отличными орбитами спутников во время записи обоих снимков, так называемая геометрическая базисная линия. Чем больше базисная линия B (*рис. 1*), тем выше степень декорреляции. При величине базисной линии примерно в 1100 м может иметь место тотальная декорреляция. Другими причинами декорреляции могут быть термические шумы, вызываемые спутником, а также доплеровское смещение и факторы, связанные непосредственно с обработкой.

Одним из основных способов определения оседания земной поверхности с помощью радарных данных является метод диффиренциальной спутниковой интерферометрии (dinSAR). Существуют различные приемы практической реализации метода dinSAR. Самым распространенным способом построения дифференциальных интерферограмм является так называемый метод двойного прохода (two-pass-methode). При его использовании из каждых двух радарных сцен вычисляется портрет с фазовыми отличиями (интерферограмма), из которого вычитается внешняя цифровая высотная модель, которая предварительно переведена в систему координат радара. Без учета вторичных фазовых составляющих, таких как атмосферные явления, орбита и шумы, получаемые дифференциальные фазовые портреты могут интерпретироваться как картины вертикальных деформаций земной поверхности.

Поскольку интерферометрическая фаза прописана только для области параметров $[-\pi,+\pi]$, то фазовый портрет является неоднозначным. В зависимости от длины волны радарного сенсора каждый фазовый параметр соответствует определенным оседаниям земной поверхности. Если оседания больше, чем половина длины волны, то измерение является многозначным. В этом случае интерпретация осуществляется посредством пространственной развертки фазы, что иногда является затруднительным вследствие декорреляции. Если пространственная взаимосвязь просматривается, то появляется возможность дифференцировать деформации земной поверхности.

Другую возможность для анализа радарных данных представляет точечная методика интерферометрии PSI (Persistent Scatterer Interferometry). В этом случае исследуются исключительно отраженные точечные импульсы, для которых характерно наличие стабильной во времени фазы. Для этого на начальном этапе составляется перечень возможных точек-кандидатов на земной поверхности по принципу временной стабильности отдельных отраженных сигналов. Затем с использованием регрессионного анализа производится отбор точек по качеству. По мере накопления информации из первоначального перечня отбраковываются точки, которые не отвечают требованиям стабильности во времени. В конечном итоге для каждого отраженного точечного сигнала получают информацию об абсолютных высотах опорных точек, их изменению во времени, о негативном влиянии атмосферных явлений. Для достоверного ана-

лиза радарных данных по методике PSI требуется не менее 30 спутниковых сцен. Преимущество метода PSI по сравнению с методом dinSAR заключается в том, что при точечной методике устраняется пространственная декорреляция. Это позволяет изучать интерферограммы с длинными пространственными базисными линиями.

Исходные данные. Исследование процесса сдвижения земной поверхности в пределах г.Березники базируются на данных спутников ERS -1, ERS-2, ENVISAT и TerraSAR-X. Первые три спутника используют длину волны 5,6 см (сантиметровый диапазон) и при проведении спутниковой съемки покрывают площадь примерно 100×100 км. Участок местности записывается каждые 35 дней с однотипными параметрами съемки. Геометрическое разрешение составляет порядка 25×25 м.

Новый спутник TerraSAR-X (запущен в июле 2007 года Немецким центром воздухоплавания и аэрокосмонавтики) имеет более короткую длину волны порядка 3,1 см и работает в рентгеновском диапазоне излучения импульса. Его данные, записанные в режиме stripMAP, обладают существенно лучшим разрешением (2×2 м) и при съемке покрывают территорию площадью примерно 30×50 км. Временной период облета орбиты и записи сцен, необходимых для построения комбинаций интерферограмм, составляет 11 дней. Таким образом, этот радарный сенсор, априори, представляется более предпочтительным для изучения относительно больших и малоплощадных оседаний земной поверхности, характерных для шахтного поля Первого Березниковского рудника.

Данные двух спутников ERS по территории г. Березники, имеющиеся в архиве Европейского Аэрокосмического Общества (ESA), ограничены и охватывают период только с 1992 по 1997 год (всего 30 снимков: 21 – спутника ERS-1; 9 – спутника ERS-2). Спутники ERS -1 и ERS-2 имеют одинаковую конструкцию, что позволяет изучать их снимки интерферометрическим методом совместно. Информация спутников ERS использовалась для ретроспективного анализа оседаний земной поверхности, обусловленных ведением горных работ на Первом Березниковском руднике.

Архивные снимки спутника ENVISAT по территории исследования доступны с 2003 года. Их общее количество незначительно (9 снимков). В связи с большим временным диапазоном между снимками их радарная интерферометрическая оценка является затруднительной. В актуальный анализ процесса сдвижения земной поверхности включены лишь имеющиеся сцены 2006 года (2 снимка). Начиная с декабря 2006 г. осуществлено программирование спутника ENVISAT на регулярную запись снимков территории г.Березники с периодичностью в 35 дней. Данные спутника TerraSAR-X в регулярном режиме стали доступны с мая 2008 года. Запись территории г.Березники производится каждые 11 дней.

Для радарной интерферометрической обработки космических снимков требуются дополнительная специальная информация о спутниковом сенсоре (инструментальные свойства, орбитальное положение и траектория, внешние калибровочные данные). Кроме того, необходима содержательная цифровая высотная модель района исследований. Для ее построения использовались данные программы «Shuttle Radar Topography Mission», безвозмездно предоставленные Немецким центром воздухоплавания и космонавтики. Эта высотная модель характеризуется геометрическим разрешением в одну угловую секунду, что соответствует приблизительно 15 м. Высотное разрешение составляет 1 м. Такая точность является достаточной для проведения радарного интерферометрического анализа снимков спутника ENVISAT. Для спутника TerraSAR-X, как показали проведенные исследования, применение данной цифровой высотной модели полностью не обеспечивает адекватные оценки оседаний земной поверхности. В этой связи сейчас проводится уточнение цифровой высотной модели территории шахтного поля Первого Березниковского рудника.

Обработка информации осуществляется с использованием компьютерных программ для интерферометрического анализа производства фирмы «Gamma Remote Sensing AG», Швейцария. Все результаты исследований представлены в географической информационной системе ArcGIS фирмы «ESRI», США.

Ограничения метода dinSAR. Ретроспективный анализ данных спутников ERS позволил установить основные ограничения метода dinSAR при контроле оседания земной поверхности в районе г.Березники радарными сенсорами, работающими в сантиметровом диапазоне.

Пространственная базисная линия между двумя положениями записи спутника должна быть по возможности не менее 300 м. Временная базисная линия (длина интервала времени между двумя периодами записи) оказывает влияние на декорреляцию интерферограммы. С увеличением временной разницы, прежде всего в связи влиянием растительного покрова, потеря когерентности становиться всё более значительней.

Наличие снежного покрова в течение зимних месяцев ведет к тому, что метод dinSAR в районе г. Березников с ноября по март практически не может быть надежно использован. Исключением из этого являются интерферограммы, имеющие очень короткую пространственную базисную линию (менее 100 м).

Решающим условием для безошибочного проведения этапа исследования по изучению фазового сдвига, является выбор опорной точки на исследуемой площади, которая должна располагаться на участке отсутствия деформаций и обладать высокой когерентностью.

На дифференциальные интерферограммы оказывают регулярное влияние атмосферные явления. Для коротких интервалов времени между двумя спутниковыми записями (например, 35 суток), оседания малого масштаба трудно отличимы от атмосферных воздействий. И, напротив, при больших временных интервалах и значительных абсолютных оседаниях гораздо легче отличить оседания от атмосферных искажений. Порядок атмосферных помех колеблется в зависимости от временного периода съемки.

Как показали ретроспективные исследования, для территории г.Березники, с учетом атмосферных помех и размеров мульд оседания, спутниками ERS-1, ERS-2 и ENVISAT могут регистрироваться оседания от 5 до 70 мм в каждом отдельном временном интервале. Большие величины оседания ведут к появлению многозначности и потери когерентности. В этом случае, надежное построение изолиний оседания уже не представляется возможным.

Следует отметить, что увеличение количества имеющихся разновременных снимков повышает комбинационные возможности радарных сцен, на основе которых рассчитыва-

ются интерферограммы. Это, в свою очередь, увеличивает число пригодных результатов, которые могут использоваться для построения изолиний оседания земной поверхности.

Полученный на основе ретроспективного анализа опыт позволяет утверждать, что все вышеперечисленные ограничения, по-видимому, имеют меньшее значение для данных спутника TerraSAR-X. Благодаря более короткому интервалу времени облета (11 дней), эффект временной декорреляции будет существенно ниже, чем на радарных спутниках с периодом орбитального обращения в 35 дней. Кроме того, влияние вертикальной базисной линии будет уменьшаться при использовании волн с меньшей длиной в рентгеновском диапазоне. Наблюдавшиеся до сих пор базисные линии спутника TerraSAR-X значительно меньше (порядка 300 м), чем например у спутника ENVISAT. Положительным моментом нового спутникового сенсора является и существенно лучшее разрешение земной поверхности, что позволяет определять малоразмерные участки оседаний и регистрировать значительные скорости оседания земной поверхности с высоким пространственным градиентом.

Результаты актуальных исследований. Актуальный анализ данных спутника ENVISAT по оценке сдвижения земной поверхности на территории г.Березники проводился поэтапно по мере накопления снимков.

На начальном этапе после приобретения 4 сцен спутника ENVISAT выполнены первые радарно-интерферометрические исследования этих сцен с использованием предоставленных данных. В связи с недостаточным на тот момент объемом информации в этих исследованиях использовались также имеющиеся сцены спутника ENVISAT за 2006 год.

Таким образом, на первом этапе проводилась обработка данных 6 информационных пакетов. Радарные записи переводились в комплектный формат данных, который кроме фазовых значений содержал параметры интенсивности, отражающие силу обратного рассеянного сигнала (*рис.2*).

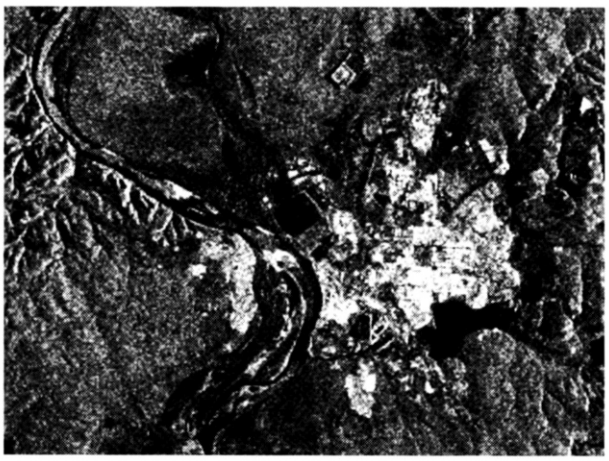

Рис.2. Фрагмент из портрета интенсивности сцены сенсора ASAR спутника ENVISAT от 11.03.2006 с центром г. Березники

Для первых выводов о пригодности тех или иных радарных сцен для проведения радарно-интерферометрических исследований составлена диаграмма базисной линии (*рис.3*). Диаграмма отражает временной интервал между отдельными радарными записями и пространственный интервал между тем или иным положением спутника по отношению к времени записи. Чем ближе к друг другу в этой диаграмме лежат две радарные сцены, тем выше вероятность получить хорошую интерферограмму.

В дальнейшем, по мере накопления актуальных снимков, производилась их текущая обработка и построение дифференциальных интерферограмм в виде комбинации тех или иных двух пакетов радарных данных, записанных в разные периоды времени.

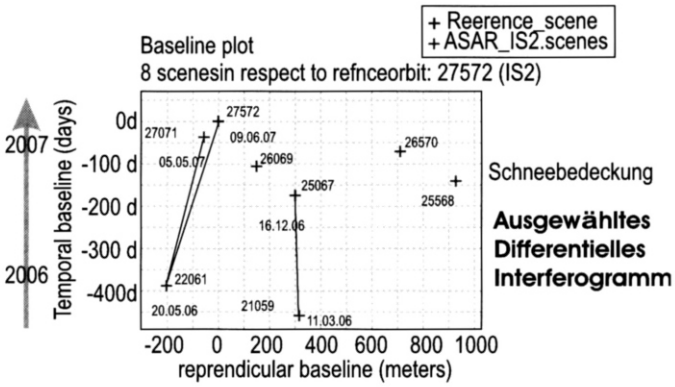

Рис.3. Диаграмма базисной линии

На *рис.4* в качестве примера иллюстрируются полученные по результатам радарной интерферометрической съемки спутника ENVISAT оседания земной поверхности в пределах шахтного поля Первого Березниковского рудника за период с декабря 2006 по август 2007 года (8 месяцев).

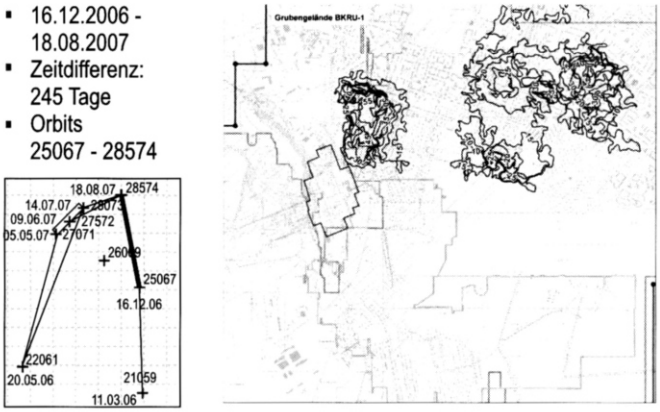

Рис.4. Изолинии оседания (в мм) земной поверхности за период с 16.12.2006 по 18.08.2007

Сопоставление результатов определения оседаний земной поверхности методом dinSAR с данными интерполяции маркшейдерских измерений за период 2006-2007 гг. по профильным линиям, заложенным в черте г.Березники, показало их приемлемое согласование для районов городской застройки. На участках с выраженным растительным покровом информация спутника ENVISAT не обеспечила достоверное определение деформаций земной поверхности, регистрируемых инструментальными методами.

Сложности оценки оседания земной поверхности начали возникать и в зимний для района Урала период (с ноября 2007 по март 2008 года). Наличие в это время снежного покрова и плохих метеоусловий (снегопада) в сочетании с не очень оптимальной геометрией съемки не позволили дать количественное выражение оседаний даже в пределах застроенных подработанных территорий. На качественном

уровне лишь сделаны выводы об изменении скоростей оседания земной поверхности (увеличение – уменьшение).

Весной 2008 г. отмечено резкое увеличение скоростей оседания земной поверхности (до 100 мм/мес. и более) на некоторых участках шахтного поля Первого Березниковского рудника, обусловленное растворением соляных пород вследствие поступления пресных вод в горные выработки. Вместе с тем такие изменения состояния земной поверхности не получили достоверного количественного отражения в данных интерпретации снимков спутника ENVISAT. Более эффективными в этом отношении оказались результаты определения оседаний методом dinSAR по снимкам спутника TerraSAR-X. Благодаря высокому геометрическому разрешению и малому периоду облета, по данным спутника TerraSAR-X достаточно четко регистрируются значительные скорости оседания земной поверхности (*рис.5,а*). При этом адекватные результаты получаются даже на участках с преимущественно растительным покровом (*рис.5,б*). Вместе с тем следует также отметить, что интерпретация данных спутника TerraSAR-X по участкам с относительно низкими скоростями оседания земной поверхности является, зачастую, затруднительной.

а)

б)

Рис.5. Оседания земной поверхности (мм) в районе ул. Ленина, г. Березники (а) и пос. Зырянка (б) за период с 8.07.2008 по 19.07.2008 (11 дней)

Таким образом, одновременный dinSAR анализ снимков спутников ENVISAT и TerraSAR-X позволяет оптимально контролировать деформации подработанных территорий в широком диапазоне изменения скоростей оседания земной поверхности.

Перспективы использования методики PSI. Анализ деформаций земной поверхности территории г.Березники методом PSI проводился с использованием ретроспективных данных спутников ERS-1, ERS-2. Оптимистические надежды на высокую плотность опорных точек, к сожалению, не подтвердилась. Более 50% точек-кандидатов в процессе анализа PSI были отклонены (*рис.6*) Причиной этому стал сильно выраженный растительный покров на участке исследования. Как было установлено, его наличие в зависимости от времени года очень сильно изменяет характеристики рассеивания. На данном этапе относительно надежные результаты удалось получить лишь по участкам городской застройки.

а)

б)

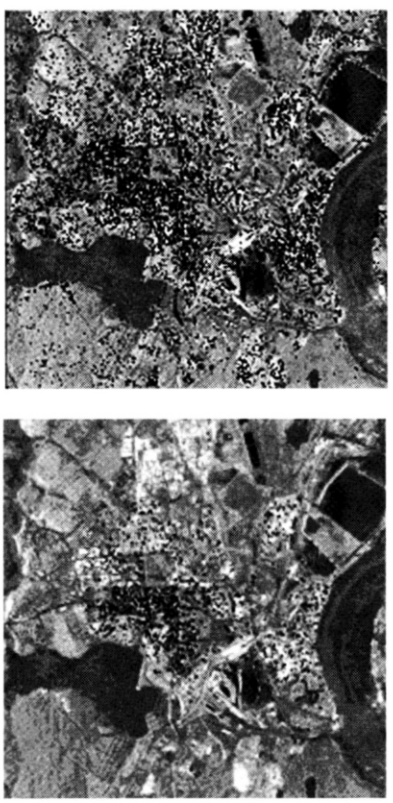

Рис.6. Предварительные точки-кандидаты, принятые для обработки методом PSI (а), и отобранные по результатам анализа опорные точки (б)

В качестве примера на *рис.7* во временной последовательности иллюстрируются результаты определения оседаний земной поверхности по одной из точек на территории г. Березники методом PSI. Площадная картина оседаний складывается из оценок, полученных по всем опорным точкам. Как показал выполненный анализ, в качественном и количественном выражении результаты метода PSI, хорошо согласуются с соответствующими данными методики dinSAR.

Перспективы применения PSI подхода непосредственно связаны с проблемами, возникающие при использовании метода dinSAR. Эти проблемы могут быть частично устранены за счет реализации точечной методики PSI.

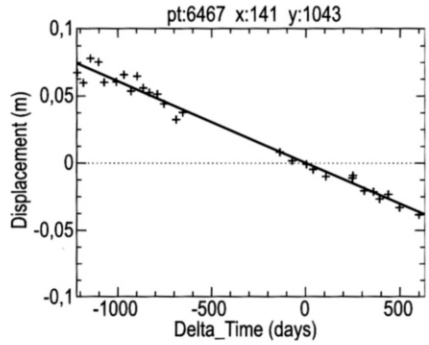

Рис.7. Оседания в характерной точке района городской застройки

Так, например, на некоррелируемых участках содержательные результаты могут быть получены в проверенных опорных точках. Также существуют подходы к решению проблемы влияния атмосферных факторов за счет использования методики PSI. Вместе с тем, выводы по площадной протяженности оседаний, сделанные на основе точечного анализа, являются менее достоверными. В ходе дальнейших работ предполагается использовать оба метода в комбинированной форме (dinSAR – площадной анализ, PSI – точечный анализ). Это позволит существенно улучшить качество оценки оседаний, а также даст возможность расширить территорию уверенного прогноза. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Spreckels V., Walter D., Wegmüller U., Deutschmann J., Busch W. Nutzung der Radarinterferometrie im Steinkohlenbergbau // Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 2008, №7, p. 253-261.
2. Wegmüller U., Strozzi T., Werner C., Wiesmann A., Spreckels V., Benecke N., Walter D. Monitoring of mining induced surface deformation // Proceedings of The First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Programm 2007, Kyoto, Japan, Nov 19-23, 2007.
3. Carnec C., Delacourt C. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France // Journal of Applied Geophysics. 2000, V.43, № 1, p. 43-54.
4. Wegmüller U., Strozzi T., Benecke N., Schäfer M., Busch W. Monitoring mining induced ground-movements using SAR interferometric techniques // ESA European Space Agency (Hrsg.): Proceedings of ENVISAT Symposium 2007, Montreux, Schweiz, 23.-27. April 2007, 3F4- EOMD.
5. Филатов А.В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // Вестник Югорского гос. Университета, 2006, №4, с.103-109.
6. Баранов Ю.Б., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Никифоров С.Э. Применение метода радиолокационной интерферометрии при маркшейдерском контроле смещений земной поверхности, вызванных разработкой месторождений нефти и газа // Горный журнал. Изв.ВУЗов, 2008, №2, с.45-53.
7. Захаров И.А., Хренов Н.Н. Радиолокационные интерферометрические методы наблюдения Земли в задаче мониторинга подвижек газопроводов // Газовая промышленность, 2004, №3, с.44-48