

### И.В. Гневанов (ЗАО «Мобиле»)

В 2004 г. окончил механико-математический факультет Пермского государственного университета по специальности «прикладная математика». В настоящее время — руководитель отдела ГИС проектов ЗАО «Мобиле». Кандидат физико-математических наук.

### П.В. Шамин (ОАО «Уралкалий»)

В 1980 г. окончил Пермский политехнический институт по специальности «маркшейдерское дело». В настоящее время — главный геомеханик отдела главного маркшейдера ОАО «Уралкалий».

# Оценка деформаций земной поверхности горных отводов ОАО «Уралкалий» в г. Березники методами радарной интерферометрии

## ВВЕДЕНИЕ

ЗАО «Мобиле» совместно с маркшейдерской службой ОАО «Уралкалий» был проведен интерферометрический анализ радарных снимков для выявления территорий с деформациями поверхности земли г. Березники. Анализ произведен на основе снимков с сенсоров ALOS/PALSAR и TerraSAR-X. Выбор сенсора PALSAR был сделан исходя из потребности получить оценку деформаций как для застроенной, так и для залесенной территории (основная часть поверхности горных отводов ОАО «Уралкалий» покрыта лесом), а также для демонстрации возможности получения результатов на зимних снимках для залесенной территории. Выбор сенсора TerraSAR-X был сделан для анализа применимости X-диапазона зимой и исходя из доступности архивных данных.

До недавнего времени в городе действовали три рудника по добыче калийных солей Верхнекамского месторождения шахтным способом. Широко известно, что в результате прорыва водозащитной толщи в октябре 2006 г. началось затопление рудника №1, в результате чего в июле 2007 г. образовался провал на территории промышленной площадки рудоуправления. По инструментальным наблюдениям, проводившимся маркшейдерской службой ОАО «Уралкалий», скорости оседаний по периметру образовавшегося провала составляли 10–15 мм в сутки [1]. Позже образовалось еще 2 провала, в ноябре

2010 г. и в декабре 2011 г. В 2008 г. был начат мониторинг деформаций поверхности города и жилой застройки на основе многопроходной съемки со спутника TerraSAR-X в летнее время года — с мая по октябрь. Наличие инструментальных измерений позволило выполнить контроль результатов расчетов в данной работе.

## АНАЛИЗ СЦЕН ALOS/PALSAR

Для анализа были использованы два зимних снимка в режиме FBS с HH-поляризацией, с временной базой чуть более двух лет (декабрь 2007 – февраль 2010 г.). Перпендикулярная база составила 560 м. Зимний период времени благоприятен для выполнения мониторинга оседаний, особенно территорий, покрытых лесом, потому что в это время минимизируется влияние растительности на декорреляцию сцен. В то же время сухой однородный снег не влияет на прохождение радиоволн.

Анализ сцен ALOS/PALSAR с временной базой 2 года упоминается в работах [2, 3]. В [2] анализировались летние снимки, в [3] — зимние. Однако даже в случае зимних снимков был получен результат при наблюдении за оползнями.

Большая длина волны сенсора L-диапазона (23,6 см) позволяет достигать практически непрерывной когерентности, хотя и не очень высокой. В результате получается картина изменений местности в целом, а

не отдельными участками. Невысокая когерентность связана с почти критической разницей во времени между сценами (780 дней).

В результате обработки были получены дифференциальная интерферограмма и карта когерентности, проведено выравнивание интерферограммы по опорным точкам. Для получения дифференциальной интерферограммы использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM. Развертка фазы также проводилась, однако в силу большой зашумленности интерферограммы получение карты смещений было нецелесообразно. Все выводы были сделаны на основе полученной интерферограммы и построенных профилей по выбранным линиям.

Сначала рассмотрим территорию города, расположенную над выработками затопленного рудника. Дифференциальная интерферограмма показана на рис. 1. Соответствующая карта когерентности показана на рисунке 2, а на рисунке 3 — фотоплан местности. Каждый фринг (цикл цветов синий–желтый–розовый–синий) соответствует вертикальным смещениям примерно в 15 см (угол наклона луча — 39 градусов). Сплошными белыми прямоугольниками показаны зоны с выявленными смещениями, пунктирными — подозрительные места, где четкая интерферограмма не получилась. Желтыми линия-

ми показаны построенные профили.

На рис. 1 видно, что территория города в целом стабильна, за исключением пронумерованных зон. Следует отметить зону 3, где обнаружены значительные оседания в зоне застройки в русле р. Зырянка, и прилегающую зону 4, где оседания обнаружены в лесу (рис. 4).

На рис. 5, 6 приведены профили оседаний по линиям 1 и 2. Профиль 1 примечателен тем, что был выбран на основе имеющихся инструментальных

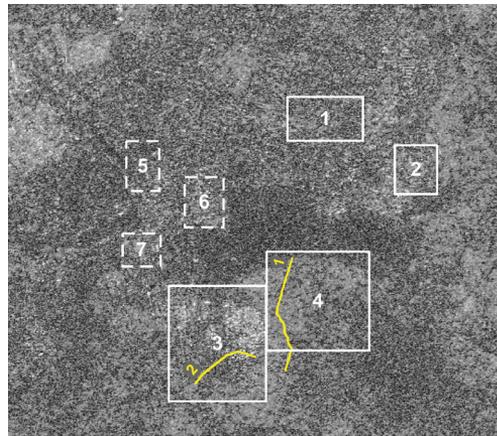


Рис. 2. Карта когерентности на территорию г. Березники по паре ALOS PALSAR 20.12.2007 г. – 09.02.2010 г.

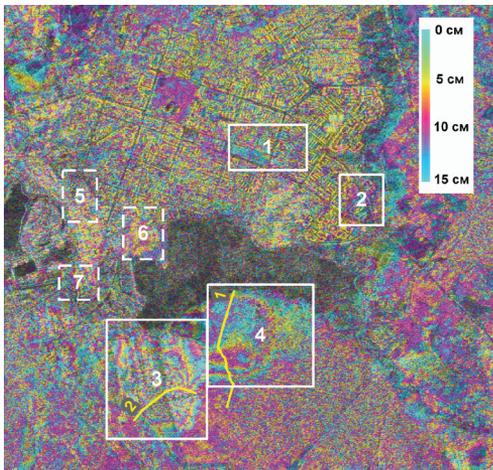


Рис. 1. Дифференциальная интерферограмма на территорию г. Березники по паре ALOS/PALSAR 20.12.2007 г. – 09.02.2010 г.



Рис. 3. Фотоплан территории г. Березники

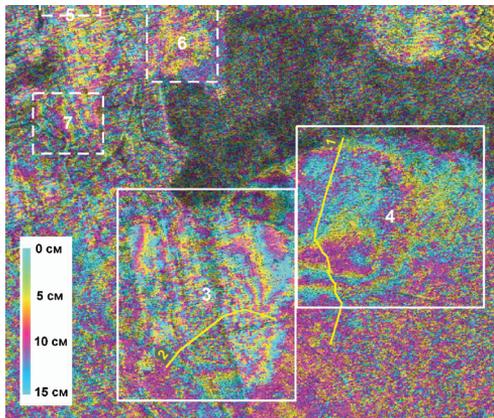


Рис. 4. Дифференциальная интерферограмма южной части г. Березники по паре ALOS/PALSAR

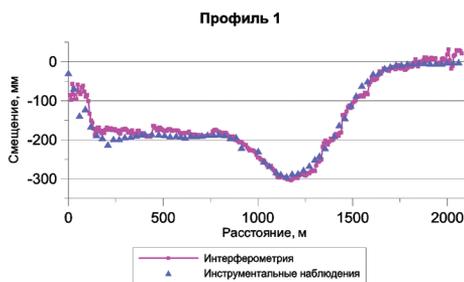


Рис. 5. График оседаний по профилю 1; сравнение с инструментальными наблюдениями

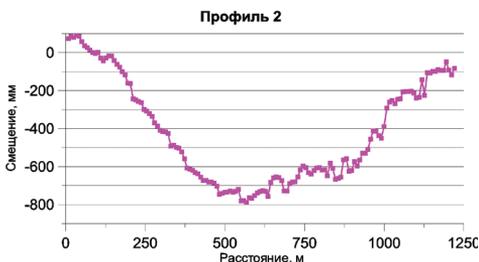


Рис. 6. График оседаний по профилю 2

наблюдений, и позволил выполнить сравнение и оценку точности метода. Как видно, графики хорошо согласуются. Разница между значениями составила от 5 до 10%, что позволяет говорить о сантиметровой

точности даже при такой большой временной базе и низкой когерентности, которая колебалась по профилю в пределах от 0,2 до 0,6. Максимальная скорость оседаний составила 140 мм/год.

По профилю 2 деформация оказалась выше и фринги уже практически сливаются, что неудивительно при такой большой временной базе. Здесь максимальные оседания составили около 800 мм, это 370 мм/год. Зоны 3 и 4 находятся над выработками пласта карналлита.

В зонах 5, 6, 7 видны изменения, но количественно отразить их не получилось предположительно из-за огромных скоростей деформаций: зона 7 близка к первому провалу, а в зоне 5 позже образуются 2-й и 3-й провалы.

Рассмотрим результат для территории над действующим рудником. Соответствующие интерферограмма, когерентность и фотоплан показаны на рис. 7, 8, 9. Здесь также были выявлены зоны с деформациями. Фринги отчетливо видны в зоне развязки дорог 11, небольшие изменения есть в зоне 10. На рис. 10 показан профиль 3, однако есть сомнения в правильности развертки в области минимума. В направлении северо-запада от профиля 3 фринги расположены чаще, что говорит о еще больших скоростях оседаний (рис. 11).

Анализ снимков с сенсора ALOS/PALSAR показал, что их можно использовать для оценки смещений поверхности в зимних условиях и даже на залесенной территории. Сравнение с результатами инструментальных наблюдений позволило оценить точность выполнения расчетов. Следует отметить, что если уменьшить временную базу, точность должна возрасти.

### АНАЛИЗ СЦЕН TERRASAR-X

Для оценки возможности использования зимних снимков X-диапазона было заказано три архивных снимка TerraSAR-X, выполненных в режиме StripMap с HH-поляризацией. Снимки датировались 29.12.2009 г., 20.01.2010 г. и 11.02.2010 г. — с разницей в 22 дня. Предварительный анализ показал, что снимок от 29.12.2009 г. не коррелирует с остальными. Скорее всего, это объясняется наличием осадков — в момент съемки шел снег.

Проведение анализа с использованием снимков TerraSAR-X в зимний период упоминается в работе [4], однако никаких результатов не было получено.

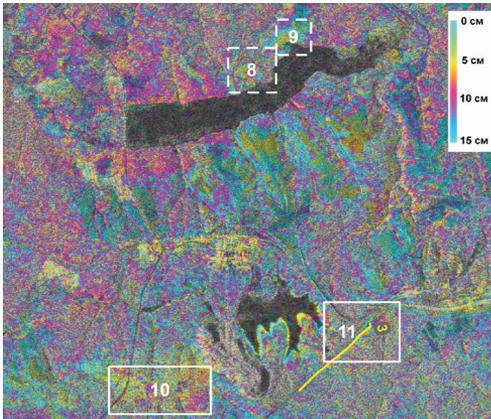


Рис. 7. Дифференциальная интерферограмма на территорию горного отвода БКПРУ-2 по паре ALOS/PALSAR 20.12.2007 г. – 09.02.2010 г.

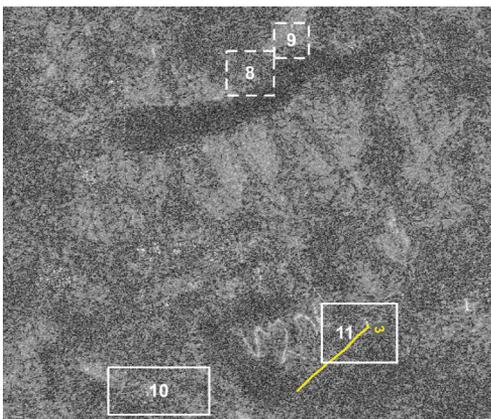


Рис. 8. Карта когерентности на территорию горного отвода БКПРУ-2 по паре ALOS/PALSAR 20.12.2007 г. – 09.02.2010 г.

Также снимки TerraSAR-X были использованы в работе А.И.Захарова и др. по мониторингу транспортной инфраструктуры, однако для получения результата использовались угловые отражатели.

В итоге были проанализированы второй и третий снимки. Перпендикулярная база составила 70 м. На рис. 12 показана дифференциальная интерферограмма, каждый фринг соответствует вертикальным смещениям примерно в 19 мм. На рис. 13 изображена карта когерентности. Видно, что зона 4, покрытая



Рис. 9. Фотоплан территории горного отвода БКПРУ-2



Рис. 10. График оседаний по профилю 3

лесом, имеет очень низкую когерентность. Зато получена картина в зонах 1, 3, 5: изменения в зоне 1 видны лучше, чем по паре ALOS/PALSAR, в зоне 3 за 22 дня произошли смещения с максимумом порядка 20 мм (330 мм/год), что соответствует смещению за 2010 г. Есть смещения в зоне 5, которая была неразличима на результатах предыдущего анализа. Максимальное смещение в зоне 5 составило 14 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ пары снимков с сенсора ALOS/PALSAR подтвердил тот факт, что такие данные можно использовать для анализа деформаций поверхности земли даже в условиях залесенной местности, однако

при выборе сцен следует учитывать возможные скорости деформаций поверхности.

Была получена оценка точности результатов, полученных методом дифференциальной интерферометрии, путем сравнения с данными инструментальных наблюдений, скорректированных по скоростям оседаний. Показано, что в областях с когерентностью, близкой к 0,6, разница значений достигает 5%.

Анализ пары снимков TerraSAR-X показал, что при отсутствии атмосферных помех и осадков данные X-диапазона могут использоваться для анализа смещений в зимний период. Как и было сказано в [4], когерентность для зимних пар выравнивается между техногенными сооружениями и открытой местностью (поля, улицы, сады). Это может быть вызвано отсутствием травянистой растительности и образованием хорошо отражающего слоя в связи с понижением температуры. Конечно, в таком случае когерентность, а следовательно, и точность будут ниже, чем для летних пар снимков.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В Березниках (Пермский край) продолжается мониторинг за состоянием провала в карналлитовой зоне. — <http://www.nr2.ru/perm/136730.html>.
2. Баранов Ю.Б., Горяинов М.С., Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Кулапов С.М., Нохрин В.А. Преимущество космических радарных систем при выполнении маркшейдерских работ на нефтегазовых месторождениях (на примере Южно-Русского месторождения) // Геоматика. – 2011. – №1. — С.12—14.
3. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Лебедева М.А.,

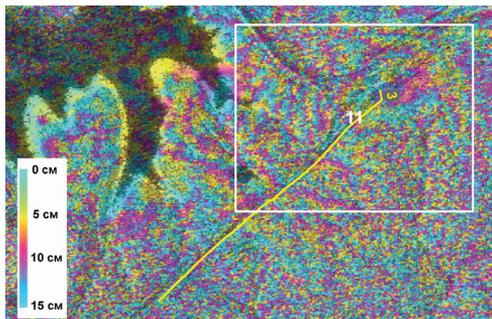


Рис. 11. Интерферограмма на область развязки дорог

Саньков В.А. Применимость радиолокационной интерферометрии к мониторингу деформаций земной поверхности в районе Северомуйского участка БАМ // Тр. конф. «Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Всероссийская научно-практическая конференция «Космическая радиолокация», Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г. — 2010. — Электронное издание (CD).

4. Кантемиров Ю.И., Киселевский Е.В., Баранов Ю.Б., Никифоров С.Э., Билянский В.В., Ланцл Р. Результаты мониторинга смещений земной поверхности и деформаций зданий и сооружений в г. Новый Уренгой по данным TerraSAR-X // Геоматика. – 2010. – №1. — С.73—79.

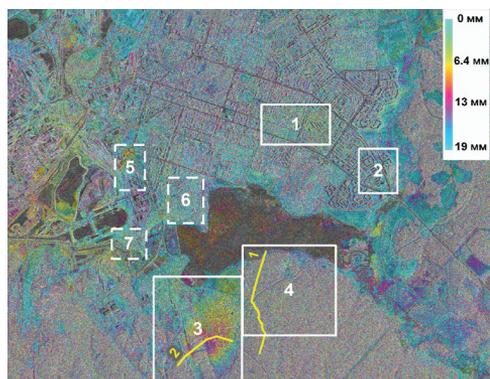


Рис. 12. Дифференциальная интерферограмма на территорию г. Березники по паре TerraSAR-X 20.01.2010 г. – 11.02.2010 г.

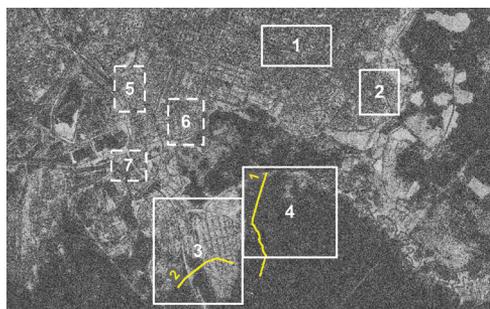


Рис. 13. Карта когерентности на территорию г. Березники по паре TerraSAR-X 20.01.2010 г. – 11.02.2010 г.