# Оценка вертикальных и горизонтальных смещений хвостохранилища Кольской ГМК по данным спутниковой радиолокационной съемки

# А.В. Филатов

#### Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта Калининград, 236041, Россия E-mail: anfilatov@kantiana.ru

Основная цель статьи — продемонстрировать эффективность спутниковой радиолокационной интерферометрии как самостоятельного инструмента для оценки локальных смещений земной поверхности на примере гидротехнических сооружений хвостохранилища Кольской горно-металлургической компании. Мониторинг промплощадок горно-обогатительных предприятий проводится регулярно и включает инженерно-геологические и инженерно-геодезические работы. Данные радиолокационного зондирования Земли имеют огромный потенциал для решения задач контроля динамики земной поверхности. Метод спутниковой интерферометрии основан на математической обработке массива разновременных радиолокационных снимков, полученных с повторных пролетов спутника над исследуемой территорией. В работе выполнена обработка 44 сцен, полученных с восходящих и нисходящих орбит спутникового радиолокатора Sentinel-1A за период 2015–2016 гг., по методу интерферометрии постоянных отражателей. Особенностью радиолокатора является режим TOPSAR, обеспечивающий съемку со средним пространственным разрешением и широкой полосой захвата. Результаты интерферометрической обработки радиолокационных снимков, полученных с двух направлений, и информация о геометрии съемки позволяют оценить вертикальные и горизонтальные (запад-восток) компоненты смещений. Проведенные исследования доказывают эффективность применения данных многопроходной радиолокационной съемки для мониторинга локальных смещений гидротехнических сооружений. Дальнейшее совместное использование радиолокаторов Sentinel-1A/B/C/D сократит период повторной съемки до двух суток, увеличит объем исходных данных и поспособствует получению более точных результатов, что указывает на перспективность применения методов дистанционного зондирования Земли.

**Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, смещения земной поверхности, интерферометрия постоянных отражателей, гидротехнические сооружения, хвостохранилище, Кольская ГМК

Одобрена к печати: 03.11.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85

#### Введение

Правилами безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) накопителей жидких промышленных отходов предписано проводить мониторинг хвостохранилищ горно-обогатительных предприятий на основе регулярных комплексных исследований их состояния (Правила..., 2003). Эти исследования включают в себя нормированные полевые комплексы инженерно-геологических и инженерно-геодезических работ и, соответственно, камеральную обработку, анализ и обобщение полученных данных (Калашник и др., 2016).

В настоящее время стремительное развитие получает интерферометрическая обработка материалов многопроходной радиолокационной съемки, материалы которой могут быть использованы как дополнение к проводимым инженерно-геодезическим работам. Область применения данных интерферометрических наблюдений распространяется на сферы хозяйственной деятельности, осуществляемой на больших площадных или протяженных линейных объектах, например — строительных площадках, объектах горнорудного, нефтегазового и энергетического комплекса, сооружениях транспорта. Автором накоплен богатый опыт проведения геодинамического мониторинга на нефтегазовых месторождениях Западной Сибири на основе интерферометрической обработки спутниковых радиолокационных данных Х-, С-, L-диапазонов длин волн (Васильев, Филатов, 2016; Филатов и др., 2013).

В данной работе ставится задача оценить величину вертикальных и горизонтальных смещений бортов дамбы хвостохранилища на территории добывающей деятельности Кольской горно-металлургической компании с использованием данных спутниковой радиолокационной съемки.

### Описание метода интерферометрии постоянных отражателей

Метод интерферометрии постоянных точечных отражателей (Persistent Scatterers Interferometry — PSI) разработан в 1999 г. в Политехническом университете Милана и достаточно хорошо описан в литературе. Преимущества метода основаны на особенных свойствах точечных объектов, которые сохраняют высокий уровень обратного отражения радиолокационного сигнала в течение множества последовательных съемок (Ferretti, Prati, Rocca, 2000, 2001). Зачастую размер такого отражающего объекта меньше элемента разрешения, поэтому когерентность достаточно высока (>0,5) даже для пар кадров с базовой линией, больше критической. При условии оценки и удаления атмосферной фазовой составляющей высота таких точек над опорной поверхностью может быть рассчитана с точностью, лучше 1 м, а смещения — лучше 1 см.

Для мониторинга объектов горнодобывающей деятельности, расположенных в западном секторе Российской Арктики, использован метод интерферометрии постоянных отражателей, реализованный в программном обеспечении ENVI\SARScape. Данный метод предусматривает алгоритмы составления интерферометрических пар кадров, выбора постоянных отражателей и расчета высоты и смещения. Выбор основной сцены, относительно которой рассчитываются интерферограммы, основан на минимизации влияния факторов, снижающих когерентность интерферограммы:

$$\gamma_m = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K} g(B_{k,m}, B_{cr}) \times g(T_{k,m}, T_{cr}) \times g(fdc_{k,m}, fdc_{cr})$$

где

$g(x,c) = \begin{cases} \\ \end{cases}$	$1 - \frac{ x }{c}$	npu  x  < c,
	0	$npu  x  \ge c,$

 $B_{k,m}$ ,  $T_{k,m}$ ,  $fdc_{k,m}$  — перпендикулярная пространственная база, временная база (интервал съемки) и разница доплеровских центроидов для каждой пары кадров;  $B_{cr}$ ,  $T_{cr}$ ,  $fdc_{cr}$  — критические значения данных параметров; K — количество интерферограмм. Постоянным отражателем считается объект, который дает высокий и стабильный уровень обратного отражения (амплитуда пиксела), тогда фаза сигнала, принятого от такого объекта, имеет низкую дисперсию. Для выбора на радиолокационных кадрах точек, соответствующих отражению сигнала от стабильных отражающих объектов, используется формула индекса дисперсии амплитуды:

$$\sigma_v \approx \frac{\sigma_A}{m_A} \equiv D_A,$$

где  $\sigma_v$  — дисперсия фазы;  $\sigma_A$  — дисперсия амплитуды;  $m_A$  — среднее значение амплитуды;  $D_A$  — индекс дисперсии.

Рассмотрим составляющие интерферометрической фазы при обработке двух разновременных радиолокационных изображений:

$$\phi_k(\mathbf{x}) = \phi_{rk}(\mathbf{x}) + \phi_{\mu k}(\mathbf{x}) + \phi_{ak}(\mathbf{x}) + \phi_{\sigma k}(\mathbf{x}) =$$
$$= \phi_{ak}(\mathbf{x}) + \phi_{sk}(\mathbf{x}) + \phi_{\mu k}(\mathbf{x}) + \phi_{ak}(\mathbf{x}) + \phi_{\sigma k}(\mathbf{x})$$

где каждая компонента представляется формулой:

$$\phi_{rk}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_k(\mathbf{x})$$

$$\phi_{\mu k}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \mu_k(\mathbf{x})$$

$$\phi_{ak}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (a_k(\mathbf{x}) - a_m(\mathbf{x}))$$

$$\phi_{\sigma k}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda} (\sigma_k(\mathbf{x}) - \sigma_m(\mathbf{x}))$$

$$\phi_{qk}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_k(\mathbf{x}) \frac{q(\mathbf{x})}{\sin \alpha}$$

$$\phi_{sk}(\mathbf{x}) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_k(\mathbf{x}) \frac{\eta}{\tan \alpha}$$

где: **х** =  $\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix}$  – координаты пиксела ( $\xi$  – азимут,  $\eta$  – наклонная дальность);  $\phi_{rk}$  – фазовая компонента (ФК) за счет разности расстояний, проходимых сигналом при разновременной съемке;  $\phi_{\mu k}$  – ФК за счет смещения объекта,  $\phi_{ak}$  – ФК за счет различия атмосферных условий;  $\phi_{ok}$  – разница фазы переотражения;  $\phi_{qk}$  – ФК, зависящая от высоты объекта над опорной поверхностью;  $\phi_{sk}$  – ФК, зависящая от наклонной дальности объекта;  $\Delta r_k$  – разность расстояний до объекта при разновременной съемке;  $\Delta \mu_k$  – смещение объекта в направлении линии визирования за время между съемками;  $a_m$ ,  $a_k$  – изменение дистанции сигнала вследствие влияния атмосферы при исходной (master) и повторной (slave) съемках соответственно;  $\sigma_m$ ,  $\sigma_k$  – фаза переотражения master и slave соответственно;  $\lambda$  – длина волны зондирующего сигнала; R – расстояние между антенной радара и объектом при master-съемке;  $B_k$  – перпендикулярная проекция базовой линии (расстояния между положениями радара); q – высота;  $\eta$  – наклонная дальность;  $\alpha$  – угол обзора.

На основе обработки вектора из K значений интерферометрической фазы для каждого постоянного отражателя разделяются топографическая и деформационная компоненты как пропорциональные длине перпендикулярной базовой линии и временной базе соответственно. При обработке каждой из K дифференциальных интерферограмм выделяются постоянная, линейная и нелинейная компоненты атмосферного сдвига. Математический аппарат метода PSInSAR подробно описан в работе (Ferretti, Prati, Rocca, 2001).

#### Используемые радиолокационные данные

3 апреля 2014 г. успешно запущен спутник Sentinel-1A — С-диапазон, длина волны 5,6 см, период повторной съемки след-в-след — 12 сут. Европейское космическое агентство ESA предоставляет свободный доступ к радарным данным Sentinel-1A с октября 2014 г. На спутнике впервые применена новая технология сканирования TOPSAR — Terrain Observation with Progressive ScanSAR. Съемка выполняется в интересах научных и прикладных задач Евросоюза. При этом приграничные с Евросоюзом территории России снимаются с максимальным разрешением, и кадры восстанавливаются до уровня SLC (Single Look Complex), необходимого для проведения интерферометрической обработки.

Из геометрии радиолокационной интерферометрической съемки следует, что смещения, получаемые в результате обработки разновременных кадров, являются проекцией истинных смещений на направление линии обзора (LOS — Line-Of-Sight). В связи с этим для оценки направления и величины истинных смещений выполняется съемка земной поверхности с двух сторон — при восходящем (с юга на север) и нисходящем (с севера на юг) пролетах радиолокационного спутника.



Puc. 1. Распределение радиолокационных съемок Sentinel-1А с восходящих и нисходящих орбит на временной шкале

Из всего архива радарных данных Sentinel-1А выбраны по 22 сцены для восходящих и нисходящих пролетов. Использованы только радиолокационные съемки в бесснежный период, так как для зондирующего сигнала С-диапазона (5,6 см) снег оказывает маскирующее влияние, и соотношение сигнал/шум оказывается низким. Использовано по 12 съемок за период май-сентябрь 2015 г. и по 10 съемок за период май—сентябрь 2016 г. При этом последовательная съемка с нисходящей орбиты выполнялась через трое суток после восходящей (*рис. 1*). Из покрытия всего радиолокационного кадра, выбрана область, соответствующая промышленной территории Кольской ГМК.

#### Оценка вертикальных и горизонтальных смещений

В соответствии с геометрией съемки земной поверхности спутниковым радиолокатором, смещения в направлении обзора  $d_{los}$  можно разложить на составляющие (Hanssen, 2001):

$$d_{los} = d_v \cos\theta - d_e \sin\theta - \sin\varphi - d_n \sin\theta \cos\varphi \,,$$

где:  $d_v$ ,  $d_e$ ,  $d_n$  — смещения в направлении вверх, на восток и на север соответственно;  $\theta$ ,  $\phi$  — углы направления обзора в вертикальной плоскости от надира и в горизонтальной плоскости от севера соответственно.

Отношения приращения смещения в направлении обзора от смещений в направлении вверх, на восток и на север выражаются как

$$\frac{\partial d_{los}}{\partial d_{v}} = |\cos \theta|, \quad \frac{\partial d_{los}}{\partial d_{e}} = |-\sin \theta \sin \phi|, \quad \frac{\partial d_{los}}{\partial d_{n}} = |-\sin \theta \cos \phi|.$$

Для данных Sentinel-1А при съемке территории Кольской ГМК угол обзора в вертикальной плоскости θ изменяется в интервале 40–42°, в горизонтальной φ — в интервале 80,8– 83,7°, следовательно:

$$\frac{\partial d_{los}}{\partial d_{v}} \in [0, 74; 0, 76],$$
$$\frac{\partial d_{los}}{\partial d_{e}} \in [0, 63; 0, 66],$$
$$\frac{\partial d_{los}}{\partial d_{n}} \in [0, 07; 0, 10].$$

При горизонтальном смещении отражающего объекта на север на 1 мм величина  $d_{los}$  изменяется только на 0,1 мм, т.е. реакция интерферометрической фазы на смещения в направлении юг-север значительно ниже, чем на вертикальные и на смещения запад-восток. В связи с этим при совместной обработке результатов интерферометрии с восходящих и нисходящих пролетов КА выполняется разложение на две составляющие: вертикальную  $d_v$  и горизонтальную в направлении запад-восток  $d_e$ , третья компонента  $d_n$  опускается (Dai et al., 2015).

В этом случае нет необходимости привлечения дополнительной информации, такой как опорная цифровая модель местности. В отличие от склонов карьера «Железный» Ковдорского ГОК (Филатов и др., 2017) цифровая модель местности ASTER GDEM V2 не отражает высоты дамбы хвостохранилища с требуемой точностью. Кроме того, в данном случае нельзя с уверенностью сказать, что вектор смещений направлен вдоль склона.

Для определения составляющих  $d_v$  и  $d_e$  решается система из двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{bmatrix} d_{los}^{ASC} \\ d_{los}^{DES} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} d_{\nu} \\ d_{e} \end{bmatrix},$$
$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta^{ASC}, & -\sin \theta^{ASC} \sin \phi^{ASC} \\ \cos \theta^{DES}, & -\sin \theta^{DES} \sin \phi^{DES} \end{bmatrix}$$



Рис. 2. Скорости смещений постоянных отражателей на территории хвостохранилища Кольской ГМК: а) в направлении обзора радара на восходящей орбите; б) на нисходящей орбите; в) вертикальные; г) горизонтальные в направлении запад-восток

На *puc*. 2 представлены результаты обработки данных многопроходной съемки Sentinel-1A с восходящих (*puc*. 2a) и нисходящих (*puc*. 2b) пролетов КА и разложения на

вертикальную (*puc. 2в*) и горизонтальную (*puc. 2г*) составляющие. Стрелки (*puc. 2a*, *б*) обозначают направление обзора LOS и движения спутника SAT. Гистограммы показывают распределение доли объектов в соответствии со скоростями смещений и интервалы значений: -16...+8 (*puc. 2a*), -18...+12 (*puc. 2b*), -16...+12 (*puc. 2в*), -14...+14 (*puc. 2г*). Для скоростей смещений в направлении обзора (*puc. 2a*, *б*) отрицательные значения соответствуют смещениям от радиолокатора и наоборот. Для вертикальных смещений (*puc. 2в*) отрицательные значения соответствуют просадкам, положительные — поднятиям, для горизонтальных (*puc. 2г*) синим цветом обозначены смещения на восток, красным — на запад.

Средняя точность оценки скоростей смещений, рассчитанная в процессе обработки данных на основе параметра интерферометрической когерентности, составляет ±2 мм/год.

Наибольшие просадки, до –16 мм/год, обнаружены в северо-восточной части дамбы (цифра 1 на *puc. 2в, г*), в горизонтальной плоскости данные смещения имеют амплитуду 12 мм/год и направлены на запад вдоль склона хвостохранилища. В этой же части смещения справа от гребня дамбы (цифра 2) с вертикальной составляющей –7 мм/год направлены на восток со значениями до 10 мм/год.

В юго-западной части дамбы локальные просадки незначительны, достигают значений –8 мм/год (*puc. 2в*) и направлены на восток вдоль склона (*puc. 2г*).

Обнаружено медленное смещение горных масс по склонам горных отвалов с постоянной скоростью, вертикальная компонента которой достигает —15 мм/год, горизонтальная — 14 мм/год на восток (цифра 3). Анализ временных рядов не дает дополнительной информации о смещениях постоянных отражателей в течение интервала наблюдений (май 2015 — сентябрь 2016 г.), вследствие использования в методе линейной модели все отметки выстраиваются вдоль прямой с незначительными отклонениями. Объекты, смещения которых значительно отклоняются от линейного тренда или превышают установленные пределы скорости, отсеиваются на этапе оценки параметра фазовой стабильности постоянных интерферометрических отражателей.

#### Заключение

Таким образом, проведенные исследования доказывают эффективность применения данных многопроходной радиолокационной съемки для мониторинга локальных смещений гидротехнических сооружений.

Оптимизация и частичное снижение общего объема финансового обеспечения работ по комплексным исследованиям состояния хвостохранилища горно-обогатительного предприятия, наряду с повышением информативности и эффективности получаемых результатов, могут быть достигнуты за счет интегрирования в стандартные системы наблюдения современных инновационных методов и технологий (Калашник и др., 2016). Учитывая пополнение группировки радиолокационных спутников Sentinel-1A/B/C/D (два на орбите, два в производстве) и срок активной эксплуатации каждого в семь лет, интегрирование радиолокационной

интерферометрии в системы наблюдения за ГТС хвостохранилища является перспективным.

Метод интерферометрии постоянных отражателей, реализованный в программном обеспечении ENVI\SARScape, подходит для картирования медленных смещений с постоянной скоростью. Для отслеживания формирования оползневых процессов целесообразна обработка данных оперативной съемки среднего (Sentinel-1A/B/C/D) и высокого (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed) пространственного разрешения с минимальной временной базой по методу классической дифференциальной интерферометрии (DInSAR).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-29-06037-офи-м.

# Литература

- Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02). Серия 03. Вып. 14. М.: Гос. унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. 71 с.
- 2. Васильев Ю.В., Филатов А.В. Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне // Маркшейдерский вестн. 2016. № 3. С. 38–46.
- 3. *Калашник А.И., Гилярова А.А., Калашник Н.А., Смирнова О.В.* Экономические аспекты мониторинга хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Экономика и бизнес: теория и практика. 2016. № 10. С. 55–58.
- 4. *Филатов А.В., Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В., Белоносов А.Ю.* Использование PSIn-SAR-технологии на кластере для геодинамического мониторинга нефтегазовых месторождений // Вестн. Сибирского гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2013. № 5. С. 49–51.
- 5. Филатов А.В., Калашник А.И, Максимов Д.А. Оценка горизонтальных смещений бортов карьера «Железный» Ковдорского ГОКа с использованием данных спутниковой радиолокационной съемки // Маркшейдерский вестн. 2017. № 1. С. 38–46.
- 6. *Dai K., Liu G., Li Z., Li T., Yu B., Wang X., Singleton A.* Extracting Vertical Displacement Rates in Shanghai (China) with Multi-Platform SAR Images // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. P. 9542–9562.
- 7. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. Issue 9. P. 2202–2212.
- 8. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. Issue 1. P. 8–20.
- 9. Hanssen R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p.

# Estimation of vertical and horizontal displacements at Kolskaya GMK tailing dam using SAR data

# A.V. Filatov

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad 236041, Russia E-mail: anfilatov@kantiana.ru

The main goal of the paper is to demonstrate effectiveness of SAR interferometry as an independent instrument for ground surface local displacements assessment by the example of the tailing dam of Kolskaya mining company. Monitoring of ore mining and processing enterprise areas is conducted regularly and includes engineering, geological and geodetic works. Earth radar sensing data have a huge potential for resolving tasks of ground surface dynamics control. Satellite interferometry method is based on mathematical processing of multi-temporal radar images obtained from repeat acquisitions of area of interest. The research work included processing of 44 scenes acquired from ascending and descending passes of Sentinel-1A for the period 2015–2016 using persistent scatterers interferometry technique.

TOPSAR mode is a feature of Sentinel-1A which provides medium spatial resolution data and wide swath. Results of interferometric processing of radar images acquired from two directions and information about sensing geometry make it possible to assess vertical and horizontal (west-east) displacements components. Results of post-processing permitted to extract vertical and horizontal displacement components. The conducted research work proves effectiveness of multi-temporal radar data for monitoring hydraulic structures local displacements. Further joint use of Sentinel-1A/B/C/D radars will decrease the repeat passes period down to 2 days, increase source data volume and help obtaining more precise results. That points out the potential of Earth remote sensing methods.

**Keywords:** synthetic aperture radar, radar interferometry, ground surface displacements, persistent scatterers interferometry, hydraulic structures, tailings dam, Kolskaya GMK

Accepted: 03.11.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85

#### References

- 1. *Pravila bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii nakopitelei zhidkikh promyshlennykh otkhodov PB 03-438-02* (The rules of safety of hydro-technical constructions and liquid industrial waste storages PB 03-438-02), Moscow: Gosgortekhnadzor Rossii, 2003, 71 p.
- 2. Vasil'ev Yu.V., Filatov A.V., Vyavlenie zon lokal'nykh deformatsii metodom radarnoi interferometrii po rezul'tatam monitoringa na Samotlorskom geodinamicheskom poligone (Identification of zones of local deformations by method of the radar interferometry by results of monitoring on the Samotlorsky geodynamic polygon), *Mark-sheiderskii vestnik*, 2016, No. 3, pp. 38–46.
- Kalashnik A.I., Gilyarova A.A., Kalashnik N.A., Smirnova O.V., Ekonomicheskie aspekty monitoringa khvostokhranilishcha gorno-obogatitel'nogo predpriyatiya (Economic aspects of monitoring of the tailings dam of the mining and processing entity), *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*, 2016, No. 10, pp. 55–58.
   Filatov A.V., Bryksin V.M., Evtyushkin A.V., Vasil'ev Yu.V., Belonosov A.Yu., Ispol'zovanie PSInSAR-tekhnologii
- Filatov A.V., Bryksin V.M., Evtyushkin A.V., Vasil'ev Yu.V., Belonosov A.Yu., Ispol'zovanie PSInSAR-tekhnologii na klastere dlya geodinamicheskogo monitoringa neftegazovykh mestorozhdenii (Use of PSInSAR technique on computing cluster for geodynamic monitoring of oil and gas fields), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2013, No. 5, pp. 49–51.
- Filatov A.V., Kalashnik A.I, Maksimov D.A., Otsenka gorizontal'nykh smeshchenii bortov kar'era «Zheleznyi» Kovdorskogo GOKa s ispol'zovaniem dannykh sputnikovoi radiolokatsionnoi s"emki (Horizontal displacements estimation of "Zheleznyi" open-pit walls of Kovdorskiy GOK using satellite radar acquisitions), *Marksheiderskii* vestnik, 2017, No. 1, pp. 38–46.
- 6. Dai K., Liu G., Li Z., Li T., Yu B., Wang X., Singleton A., Extracting Vertical Displacement Rates in Shanghai (China) with Multi-Platform SAR Images, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 9542–9562.
- 7. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, Issue 9, pp. 2202–2212.
- 8. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, Issue 1, pp. 8–20.
- 9. Hanssen R., *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, 308 p.