

# Применение интерферометрии для мониторинга районов добычи и транспортировки нефти и газа

Александр Захаров, Людмила Захарова  
Институт радиотехники и электроники Российской Академии наук

## Applications of satellite radar interferometry For monitoring of oil / gas production and transportation areas

Alexander Zakharov, Ludmila Zakharova  
Institute of Radioelectronics and Electronics of Russian Academy of Sciences

### Введение

Спутниковые данные дистанционного зондирования широко используются в последнее время для исследования земной поверхности. Радиолокаторы с синтезом апертуры (РСА) имеют целый ряд преимуществ для приложений: радиолокатор может «видеть» сквозь облачный покров и в тёмное время суток, формируемые изображения обладают высоким разрешением, имеется возможность подповерхностного зондирования.

Сравнительно недавно возникшая РСА-интерферометрия (InSAR, от SAR Interferometry) является современным средством анализа данных дистанционного зондирования, которое позволяет одновременно оценивать цифровые модели рельефа и осуществлять мониторинг динамики земных покровов за время между съёмками. Существует множество приложений InSAR в различных областях: лесном хозяйстве, землепользовании, геологии, археологии, исследованиях снега и льда, ледников, землетрясений, оползней и т.д.

В этой статье мы описываем возможные приложения InSAR в нефтегазовой отрасли. В первом разделе читатель найдёт краткое доступное введение в РСА-интерферометрию с её терминологией и основными понятиями. Вторая часть содержит обзор реально существующих приложений. Одно из приложений (мониторинг трубопроводов) приведено с подробным описанием в качестве примера. Авторы полагают, что обсуждение вопросов, возникающих при исследовании, будет полезным для лучшего понимания нюансов метода. Последний раздел содержит обсуждение свойств существующих и планируемых РСА в связи с задачами, которые могут решаться при использовании их данных.

### Основы РСА-интерферометрии

Интерферометрическая методика предполагает наличие пары РСА изображений, снятых с двух близких локально параллельных орбит космического аппарата. Существует несколько вариантов организации таких съёмок: однопроходная интерферометрия, когда одна антенна (работающая на передачу и приём сигнала) находится на борту, а вторая (только для приёма) помещена на конце длинной мачты, таким образом, расстояние между антеннами остаётся постоянным, и происходит одновременная съёмка двух изображений; в двухпроходной схеме съёмки, или съёмке с повторяющихся орбит, второе изображение снимается через некоторое время после первого с того же самого спутника, или, в tandemных миссиях, с другого. Более всего внимания в этом обзоре уделено именно интерферометрии с повторяющимися орбитами, поскольку такая схема позволяет распознавать динамику отражающей поверхности за время между съёмками.

РСА-изображение может быть представлено в виде двумерной матрицы комплексных отсчётов, координаты отсчётов называются азимутом (направлена вдоль траектории носителя) и наклонной дальностью (ориентирована поперёк трассы). Поскольку положение двух приёмных антенн в пространстве несколько различно, необходимо высокоточное совмещение двух изображений.

### Introduction

Satellite-based remote sensing data has become a commonly used technology for Earth surface studies. Synthetic Aperture Radar (SAR) has a number of advantages for oil and gas applications: radar can “see” through cloud cover and in darkness, it produces images of high resolution and its signal can penetrate deep in to the subsurface layers.

SAR interferometry (InSAR) has become a modern remote sensing technique [1, 2, 3], which allows users to compile digital terrain models and monitoring dynamics of the surface covers occurred between the observations. There are a great number of InSAR applications in different areas, for example, forestry, land-use, geology, archeology, snow/ice investigations, glaciers, earthquakes, landslides.

In this article we summarize InSAR applications for the oil and gas industry. The first section gives a brief, easy-to-understand introduction in SAR interferometry terms and concepts. The second section describes real oil-and-gas applications of InSAR. One of the applications (pipeline monitoring) is given in detail as an illustrative example. The authors believe that the discussion of questions arisen during the real investigation is helpful for better comprehension of details of the method. The last section gives a review of properties of current and future SAR missions with respect to tasks named in the previous section.

### Background of SAR Interferometry

Interferometric technique relates to a pair of SAR images of the same area on the Earth's surface taken from two locally parallel trajectories of the spacecraft close to each other. There are several ways to classify the observation: single-pass interferometry, when the first antenna (for signal transmitting and receiving) is onboard, and the second one (receiving only) is mounted on a long mast, so the distance between the antennas is constant, and we get two images simultaneously. In the “repeat-pass interferometric scheme” the second image is acquired by the same spacecraft or by a different one (in tandem missions). We mainly pay attention to repeat-pass interferometry as this particular method allows you to detect the scattered surface dynamics occurring between the SAR observations.

SAR images can be represented as a two-dimensional matrix of complex samples with co-ordinates named azimuth (along the spacecraft trajectory) and slant range (across the trajectory). As the location of the receivers is slightly different for the two images, accurate co-registration of the images is necessary.

After the co-registration procedure it is possible to calculate, pixel-by-pixel, the so-called “complex interferogram” with the following formula:

$$z_1^* z_2 \quad (1)$$

$z_1$  and  $z_2$  are the backscattered signals of the first and the second images, and the asterisk signifies a complex conjugation. An image of the phase of that complex value is called “fringe image” or “(SAR) interferogram”. Simple analysis of figure (1) makes clear that this value is equal to the phase difference for two images. In order to understand the sense of the phase difference we will examine geometry of interferometric observations.

После процедуры совмещения может быть построена «комплексная интерферограмма», в каждом элементе изображения вычисляемая по формуле

$$z_1 \diamond z_2 \quad (1)$$

где  $z_1$  and  $z_2$  — (обратно) рассеянный сигнал первого и второго изображения, звёздочка означает комплексное сопряжение. Изображение фазы полученной величины называется “fringe image” или «(PCA) интерферограммой». Из (1) следует, что эта величина равна разности фаз двух изображений. Для того чтобы понять смысл, который заключает в себе эта разность фаз, рассмотрим геометрию интерферометрической съёмки.

На рисунке 1 представлена двухпроходная схема интерферометрической съёмки. Для наглядности масштаб не соблюден. Расстояние  $B$  между положениями снимающего сенсора в первом проходе (помечено цифрой 1 на рисунке) и во втором (цифра 2) называется базой интерферометра. Высота орбиты над усреднённой земной поверхностью равна  $H$ . Рассеянный сигнал возвращается к первому космическому аппарату под углом  $\beta$  к горизонту, дважды пройдя расстояние  $r_1$ .

Разность фаз может быть выражена через разность наклонных дальностей:

$$\Delta \phi = 2(r_1 - r_2) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны, соответствующая несущей частоте радиолокатора. Множитель 2 в начале выражения отражает двойное прохождение пути сигналом (передатчик-рассеивающая поверхность-приёмник) при съёмке с повторяющихся орбит. Анализируя **рисунок 1**, можно заключить, что разность наклонных дальностей зависит от расстояния от наблюдаемого участка до подспутниковой точки (зависимость от дальности по эллипсоиду, «фаза плоской земли») и от высоты этого участка над средней поверхностью (зависимость от топографии). Первую зависимость обычно бывает легко компенсировать, используя информацию о положении орбит. Вторая зависимость лежит в основе построения цифровых моделей рельефа (DEM, Digital Elevation Model) при использовании PCA-интерферограмм. В обозначениях **рисунка 1** местная высота  $h$  может быть выражена как  $h = H - r_1 \sin \alpha$ .

Существуют дополнительные факторы, влияющие на разность фаз: возможные локальные смещения отражающей поверхности за время между съёмками, атмосферные неоднородности, а также шумы.

Таким образом, наиболее общее выражение для фазы комплексной интерферограммы выглядит следующим образом:

$$\Delta \phi = \phi_{\text{fl.earth}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (3)$$

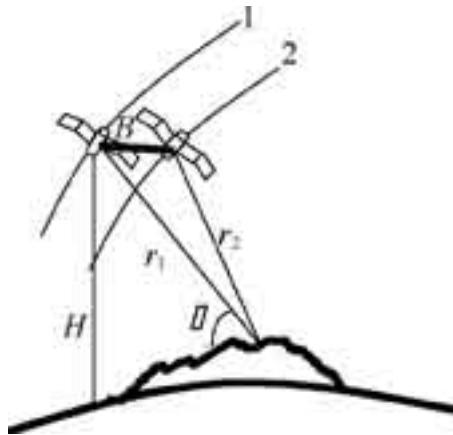
В противоположность первому и второму слагаемым в этом выражении, член, отвечающий за смещение, не зависит от орбитальных параметров, а только от длины волны и величины смещения  $\Delta s$  в направлении луча обзора:

$$\phi_{\text{disp}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta s \quad (4)$$

Это свойство интерферометрической разности фаз позволяет измерять подвижки на расстояния, сравнимые с длиной волны радиолокатора, т.е., на сантиметры или даже миллиметры, тогда как точность DEM исчисляется в самом лучшем случае в дециметрах. Из-за необходимости вычитания топографической компоненты из полной фазы интерферограммы для получения величины  $\phi_{\text{disp}}$  этот метод получил название дифференциальной интерферометрии.

На **рисунке 2** представлен пример применения дифференциальной интерферометрии для оценки смещения отражающей поверхности. Данные были сняты PCA ERS-1 и ERS-2 с интервалом 1 сутки в мае 1996 года. Один цветной («радужный») ➤

**Figure 1** gives a view of observation for repeat-pass scheme. For the purpose of better geometric visualization, the figure is not to scale. The distance between observation positions is called interferometric baseline. The orbit height above means that the earth's surface is equal to  $H$ . The backscattering signal gets to the first spacecraft from slant range  $r_1$  at angle  $\beta$  to the horizon.



**Fig. 1:** Geometry of interferometric observations

**Рисунок 1:** Геометрия интерферометрической съёмки.

Phase difference can be expressed via slant range difference:

$$\Delta \phi = 2(r_1 - r_2) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

where  $\lambda$  is a wavelength of the carrier frequency. The multiplier 2 at the beginning of the expression means round-trip propagation path (transmitter-scatterer-receiver) for the repeated-pass observation scheme. Analysis of **Figure 1** concludes that the slant range difference depends on the distance of the scatterer from the subsatellite point (“flat earth” dependence) and on the elevation of the scatterer above the mean Earth surface (topography dependence). The first dependence can usually be easily compensated, because we know the positions of both space crafts. The second dependence forms the foundation for calculation of the Digital Elevation Model (DEM) by using SAR interferograms. In terms of the **Fig. 1**, local elevation  $h$  can be calculated as  $h = H - r_1 \sin \alpha$ .

There are additional factors that influence on a phase difference value: possible local displacements of scattering surface in between the acquisitions of two images, atmospheric disturbances, and noise. So, the common expression for the phase of the complex interferogram is as follows:

$$\Delta \phi = \phi_{\text{fl.earth}} + \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (3)$$

In contrast to the first and the second terms, the displacement term depends not on the orbit parameters, but on the wavelength and on the range of displacement  $\Delta s$  in the line-of-sight direction:

$$\phi_{\text{disp}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta s \quad (4)$$

This property of the interferometric phase difference allows measuring displacements in the scale of radar wavelength, i.e., centimeters and even millimeters, whereas the DEM accuracy is at best decimeters. Because of the necessity of the topographic phase component subtraction from the total interferometric phase in order to get  $\phi_{\text{disp}}$  term, this method is called differential interferometry.

**Figure 2** gives an example of differential interferometry application for surface displacements evaluation. The data was obtained by ERS-1 and ERS-2 with a one-day time interval in May 1996. The rate of one rainbow color cycle on the interferogram corresponds to 2.8 cm of vertical motion, that means ~15 cm sinking of the scattering surface on the coast of flooded islands in the Volga river avan delta compared with island center. ➤

цикл соответствует смещению на 2.8 см, что означает  $\sim 15$  см оседания отражающей поверхности краёв затопленных островов в дельте Волги по сравнению с их серединой.

Природа атмосферной и шумовой компонент фазы случайна. Зависящая от состояния атмосферы атмосферная компонента может быть достаточно велика, чтобы перекрыть интересующие нас эффекты. Для коррекции влияния атмосферных неоднородностей (в случае её необходимости) существует несколько методов [4], однако чаще всего эта компонента, равно как и шумовая, полагается пренебрежимо малой.

Интерферометрическая когерентность — это ещё один продукт интерферометрической обработки. Её величина вычисляется по формуле

$$g = \frac{\langle z_1, z_2^* \rangle}{\langle z_1, z_1^* \rangle \langle z_2, z_2^* \rangle} \quad (5)$$

где угловые скобки означают усреднение по пространственному ансамблю. Интерферометрическая когерентность принимает действительные значения из отрезка [0, 1]. Её величина показывает уровень декорреляции двух изображений, и отражает степень достоверности информации о разности фаз. В случае низкой когерентности (околонулевые значения) декорреляция велика, при этом фазовая информация является недостоверной, и интерферограмма выглядит как случайное распределение тонов. Высокая когерентность (вплоть до единицы) свидетельствует о слабой декорреляции и, как следствие, о высоком качестве измерений, сделанных на основе интерферограммы. Главными источниками декорреляции являются: низкое соотношение сигнал/шум на изображениях, атмосферные помехи, а также пространственная и временная декорреляция.

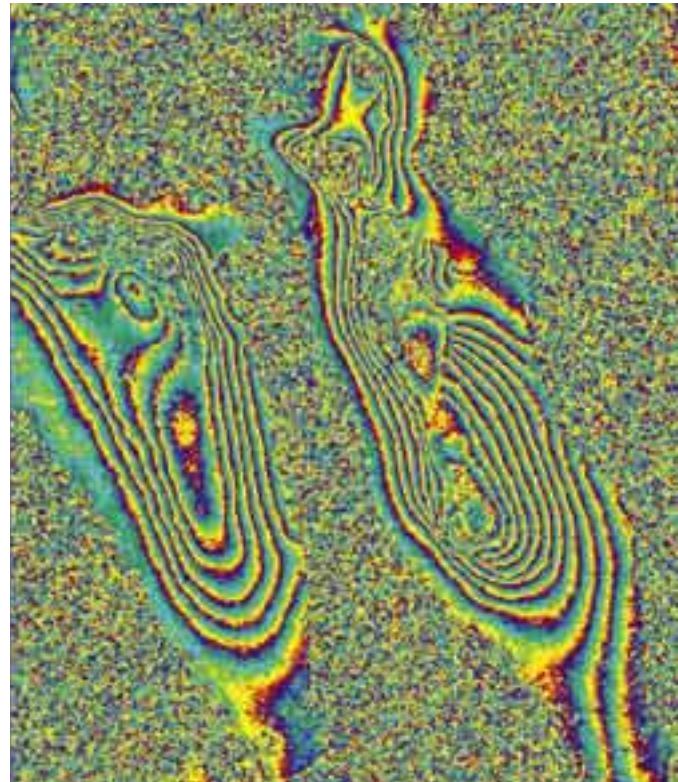
Пространственная декорреляция увеличивается с ростом базы интерферометра, а также при нарушении свойства локальной параллельности орбит. Временная декорреляция в случае повторяющихся орбит является главным фактором. К источникам временной декорреляции относятся нарушение микрорельефа, изменение диэлектрических свойств поверхности в связи с погодными условиями, сезонные изменения растительного покрова, пожары, затопления, замерзание-оттаивание снега и льда и т.д. Чем больше интервал между съёмками, тем сильнее эффект временной декорреляции и хуже качество интерферограммы.

Решением проблемы потери когерентности на большей части сцены является использование метода постоянных отражателей (в литературе permanent scatterers или persistent scatterers), которая позволяет выявить стабильные отражающие элементы естественной поверхности среди обилия естественных отражателей, порождающих шум. Метод основан на анализе статистики отражателей по ряду PCA изображений. Альтернативой этому методу является использование искусственных целей, таких как угловые отражатели или активные калибраторы (транспондеры), которые размещают в интересующем районе.

## Приложения

### 1. Оседание поверхности в результате откачки нефти

Извлечение нефти и газа из земных недр приводит к появлению пустот в горных породах и нарушению равновесия напряжений в пластах. Постепенное сжатие полости использованного месторождения вызывает оседание поверхности. Другим источником деформаций поверхности является циклическая паровая стимуляция при добыче нефти. Дифференциальная интерферометрия является инструментом, позволяющим измерить сдвиги, возникающие в результате этих явлений, с миллиметровой точностью. Типичный пример интерферометрического исследования оседания земной поверхности представлен в [5]. Тестовым участком в этой работе являются нефтяные месторождения в Белридже и Лост Хиллз (Калифорния), где глубина залегания невелика (около 700 м под поверхностью). Величина измеренного оседания составила до 400 мм/год. ►►



**Fig. 2:** Fragment of ERS-1/2 SAR interferogram for islands near the north Caspian coast

**Рисунок 2:** Фрагмент интерферограммы PCA ERA-1/2 с островами близ каспийского побережья.

Atmospheric and noise components of phase are random in nature. The atmospheric term, which depends on the state of the atmosphere, may be significant enough to mask the effects of interest. There are some methods of correcting the atmospheric irregularities, if needed [4], but in common situations this component and the noise term are considered negligible.

Interferometric coherence is an additional product of interferometric processing. It can be calculated by the following formula:

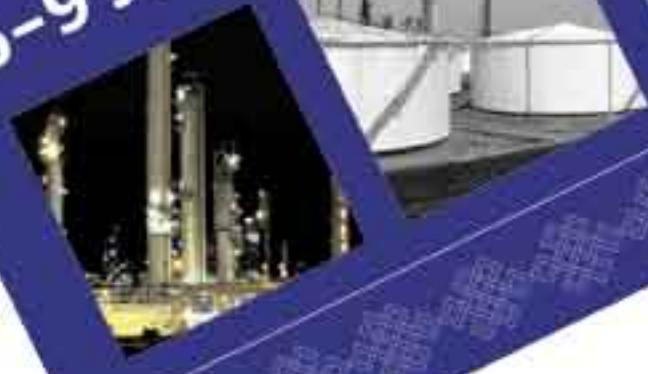
$$g = \frac{\langle z_1, z_2^* \rangle}{\langle z_1, z_1^* \rangle \langle z_2, z_2^* \rangle} \quad (5)$$

The broken brackets denote spatial average. Interferometric coherence takes a real value between 0 and 1. This value shows a level of decorrelation of two images, and it indicates a reliability of phase difference information. In the case of low coherence (about 0) decorrelation is strong, so the phase information is unreliable, and fringe images looks like random distribution. High coherence (up to 1) is evidence of low decorrelation that results in high quality measurements based on fringe images. The main sources of decorrelation are: low signal-to-noise ratio in image(s), atmospheric disturbances, spatial and temporal decorrelation.

Spatial decorrelation increases with an increase of interferometric baseline, it also appears in the case of non-parallelism of orbits. Temporal decorrelation in the repeat-pass scheme is the most important factor. Such types of scattering surface modification in between the acquisition as micro-relief modifications, change of dielectric properties of the scattering surface due to weather conditions, seasonal vegetation changes, fire, flood, freezing/melting of snow and ice, etc, cause temporal decorrelation. The longer the time interval between the SAR acquisitions, the larger the temporal decorrelation and the worse the interferogram quality.

To overcome the loss of coherence on the majority of the SAR scene, it is possible to use the Permanent Scatterers (PS) technique, which ►►

Baku, Azerbaijan  
6-9 June 2006



## CASPIAN OIL & GAS

### Exhibition & Conference

13th International Caspian Oil & Gas  
incorporating Refining and Petrochemicals

---

#### Official Support:



Ministry of Industry  
and Energy of the  
Republic of Azerbaijan



State Oil Company  
of the Republic  
of Azerbaijan

#### Organisers:



ITE  
Exhibitions



Iteca



Iteca



ITE  
London



GIMA



EUF



Gulf

ITE (London): Tel: +44 (0)20 7596 5016; Fax: +44 (0)20 7596 5106; E-mail: oilgas@ite-exhibitions.com  
Iteca Caspian (Baku): Tel: +994 12 447 47 74; Fax: +994 12 447 89 98; E-mail: oilgas@iteca.az  
Iteca (Almaty): Tel: +7 (3272) 58 34 34; Fax: +7 (3272) 58 34 44; E-mail: olesya.makarenko@iteca.kz  
ITE (Moscow): Tel: +7 095 9357350; Fax: +7 095 9357351; E-mail: luncov@ite-expo.ru  
GIMA (Hamburg): Tel: +49 (0) 40 235 24 201; Fax: +49 (0) 40 235 24 410; E-mail: freckmann@gima.de  
EUF (Istanbul): Tel: +90 212 291 83 10; Fax: +90 212 240 43 81; E-mail: ilker@ite-turkey.com

[www.ite-exhibitions.com/og](http://www.ite-exhibitions.com/og)

## 2. Вулканическая активность

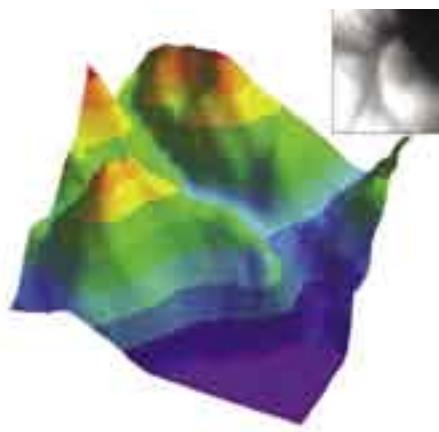
Некоторые нефтяные месторождения располагаются в районах активного грязевого вулканизма. Тектонические условия могут вызывать подъём нефти и газа к поверхности. Мониторинг «дыхания» поверхности интерферометрическими методами полезен для оценки вероятности извержения. Например, в Азербайджане (Южно-Каспийский бассейн) нефтяные и газовые месторождения тесно связаны с грязевыми вулканами [6].

Активность нефте-грязевого вулкана может быть оценена, исходя из подъёма поверхности по формуле (5), который свидетельствует о нарастании давления в глубине. Даже в отсутствие видимых признаков начала извержения деформация поверхности в положительном направлении (вверх) предупреждает о приближающейся опасности. При этом вершина вулкана может демонстрировать отрицательную деформацию в результате эрозии, однако поднимающиеся склоны вулкана доказывают его активность.

## 3. DEM для картирования и планирования трубопроводов

Невозможно представить себе геологическое картирование без точных данных о рельефе. Современная геологическая разведка объединяет данные различных типов, и рельеф поверхности является одним из ключей к их интерпретации и оценке положения горизонтов залегания полезных ископаемых, структурных деталей и литологии.

Как было сказано выше, РСА интерферометрия является средством получения цифровых моделей рельефа высокого разрешения. Однoproходная съёмка является наилучшей для построения DEM [7]. Компонента интерферометрической фазы  $Q_{topo}$  должна быть оценена, слажена в случае необходимости, подвергнута двумерному развертыванию (т.е., устранению  $2\pi$ -неоднозначностей), и пересчитана из радиан в метры высоты. После этих этапов обработки геокодированное изображение является картой высот. Существует несколько возможностей визуализации полученной модели рельефа. Две из них представлены на **рисунке 3**: цветная поверхность в трёх измерениях и полутоновое изображение для одного и то же прямоугольного участка поверхности.



**Рисунок 3:** Пример цифровой модели рельефа

**Figure 3:** Digital Elevation Model example

При разведке рудных и углеводородных месторождений часто используются косвенные признаки присутствия ресурса, например, специфические геологические структуры, ассоциируемые с залеганием нефти (газа). Таким образом, совместный анализ DEM, на которой присутствуют такие топографически выраженные детали, и дополнительной информации (например, оптические или РСА изображения) может быть полезен для выявления территорий с высоким потенциалом нефте-газодобычи.

Общее планирование трубопроводов также требует точного знания рельефа, особенно для горных районов. DEM помогают прокладывать маршруты дорог для обслуживания трубопровода в труднодоступных областях. При использовании DEM можно ➤

allows the detection of stable natural scattering targets among the multitude of noisy scatterers. This technique shows an analysis of the scattering targets statistics in a series of SAR images. An alternative to the PS technique is the use of artificial targets such as corner reflectors or active transponders placed across the area of interest.

## Applications

### 1. Subsidence due to oil extraction

Oil and gas extraction from the Earth's interior results in the appearance of interstices and in misbalance of pressure in the rock beds.

Progressive collapse of the depleted field causes surface subsidence. Another source of surface deformation is cyclic steam stimulation for oil recovery. Differential interferometry is a tool for measuring results of such phenomena with millimeter accuracy. A representative example of interferometric study of subsidence is described in figure [5]. The test site for this study is situated at the Belridge and Lost Hills oil fields in CA, where fluid was located at shallow depths of about 700 m below the surface. The rate of the measured subsidence is up to 400 mm/year.

### 2. Volcanoes activity

Some oil-producing regions are located in the areas of active mud volcanism. Tectonic conditions may induce the uplifting of oil and gas toward the surface. Monitoring of surface "breathing" by interferometric methods is useful for estimation and probability of eruption. For example, oil and gas fields in Azerbaijan in the South Caspian Basin are intimately associated with mud volcanism [6]. Mud oil volcanic activity can be estimated by uplifting of the surface by formula (5), that indicates the increase of pressure at depth. Even with no visual signs of eruption the deformation in the positive (up) direction gives notice of danger. The top of a volcano may show negative deformation due to erosion processes, but volcano flanks with uplifting prove that it is non-dormant.

### 3. DEM for mapping and pipeline planning

Geological mapping is impracticable without precise topographical data. Modern geological surveying combines different types of data, and surface relief is one of the keys for interpretation and inferring subsurface mineral horizons, structural features, or lithology.

As stated above, SAR interferometry is a tool for obtaining high-resolution Digital Elevation Models. One-way is the best interferometric scheme for DEM generation [7]. Interferometric phase component  $Q_{topo}$  should be estimated, smoothed (if necessary), unwrapped in two dimensions (i.e.,  $2\pi$ -ambiguity should be removed), and re-calculated from radians to meters of height. After this processing chain, a geocoded image shows an elevation map. There are different techniques to visualize DEMs. Two of them one can find in **Figure 3**: coloured 3D-surface and grayscale images for the same rectangular area.

Mineral and hydrocarbon exploration often uses some indirect signs of recourse presence, e.g., specific geological structures associated with oil/gas fields. Thus, joint analysis of DEM with such topographically expressed features and additional information (SAR or optical images) can assist in the identification of areas of high potential.

General pipeline planning also requires precise elevation maps, especially for mountainous regions. DEM aids in the design of routes for pipeline service companies in regions difficult to assess. Consulting with DEM, one can quickly determine the direction of outflow in the case of accidental oil spill.

### 4. Monitoring of the pipeline conservation zone:

#### oil / gas leaks and non-authorized/illegal tapping activity

For pipeline monitoring, SAR interferometry provides companies with a coherent image. In the case of the repeat-pass scheme, one of the main causes of decorrelation is usually a change of the earth surface between acquisitions, especially changes in microrelief within pixel size (about 5–20 meters for different sensors). For example, oil spills smooth the surface, and with the help of an SAR image one can localize a possible oil leak. Gas leaks may cause changes in vegetation, which also influence on the value of interferometric coherence.

Coherence decrease in the conservation zone of a pipeline might also mark earth excavation and transport movements. Using coherence maps, one can monitor service works or detect non-authorized activity. ➤



# Get it FURMANITED

FURMANITE предлагает следующие услуги

- Работы по герметизации и устранению утечек
- Специальные работы на действующем трубопроводе
- Время под давлением
- Установка центрифугальных турбин
- Жесткие турбодвигатели
- Испытания скрытых трубопроводов инкапсуляцией
- Техническая Ремонтная
- Симуляционные ремонтные контуры
- Консультативные изыскательские зондирования трубопроводов
- Механическая обработка металлических объектов
- Генерация заданий и время работы по методике ТехноТест
- Обучение

Высокая компетентность - залог эффективных технических решений на месте

Furmanite - компания с мировой репутацией в области технических услуг - обеспечивает своих заказчиков быстрыми и надежными техническими решениями на основе собственных передовых технологий, способствующими оптимизации производственного времени и повышению эффективности работы заказчика. Furmanite помогает заказчикам добиваться значительных преимуществ при разработке месторождений и эксплуатации трубопроводов в Каспийском регионе и на территории России.

Мы предлагаем уникальные инновационные методики сервисных и ремонтных работ на трубопроводах, не требующих их остановки, включая устранение утечек в трубопроводах под давлением, прокат под давлением, позволяющую избежать простой при ремонте или модификации трубопровода, а также специальные аварийные зажимы Furmanite для установки прокладки и восстановления целостности трубопровода. Добавьте к этому возможность качественной механической обработки с самыми строгими допусками, а также испытанием работающих задавлек по технологии Testtest, и вам станет понятно почему наши услуги так востребованы в этом регионе.

Кроме того, мы используем наш богатый опыт при разработке и внедрении эффективных технических решений в тесном сотрудничестве с местными партнерами, а также повышая квалификацию местных специалистов с помощью сертифицированных в отрасли программ обучения. Такой опыт совместной работы был нами успешно внедрен в баку. Все это позволяет нам добиваться успеха при создании и совершенствовании инфраструктуры обслуживания объектов нефтегазового комплекса в Центральной Европе.

Позвоните нам прямо сейчас, и мы используем весь наш богатый опыт для улучшения работы ваших объектов.



Furmanite International Limited  
Furman House, Sheep Road, Kendal, Cumbria  
LA9 6RU Tel: +44 (0)1539 729009 Fax: +44 (0)1539 729252  
E-mail: info@furmanite.com

**FURMANITE**

Межнациональный сервис

[www.furmanite.com](http://www.furmanite.com)

Альянс компаний

быстро определить направление вытекания нефти в результате случайных утечек.

#### 4. Мониторинг охранной зоны трубопроводов: утечки и незаконное проникновение

Для мониторинга состояния трубопроводов РСА интерферометрия предоставляет также карты когерентности. В случае схемы съёмки с повторяющихся орбит одним из главных источников декорреляции являются изменения земной поверхности за время, прошедшее между съёмками, особенно изменения микрорельефа в пределах размера элемента разрешения (около 5–25 м для разных инструментов). Например, вытекшая нефть сглаживает поверхность, и при помощи дополнительного анализа амплитудного изображения можно локализовать возможную утечку. Утечка газа может вызвать изменения в состоянии окружающей растительности, что также влияет на величину интерферометрической когерентности.

Снижение когерентности в районе охранной зоны трубопровода также может означать проведение там земляных работ или передвижения транспорта. При использовании карт когерентности возможно осуществлять наблюдение за обслуживающими работами или определять несанкционированное проникновение в охранную зону.

#### 5. Мониторинг состояния трубопроводов

Подвижки земной поверхности, имеющие различную природу, могут быть опасными для трубопроводов, и этот вопрос является предметом обсуждения ряда публикаций [8]. Одной из причин движения поверхности в районах с отсутствующей сейсмической активностью является вечная мерзлота. Из-за сезонного оттаивания-замерзания верхнего слоя вечной мерзлоты положение поверхности становится нестабильным. Применимость интерферометрических методов к мониторингу состояния трубопроводов в зоне вечной мерзлоты обсуждается в [9, 10].

Исследуемый район содержит около 200 км трубопровода, состоящего из девяти нитей диаметром 1.44 м, между Ямбургом и Ныдой. Самая северная часть трубопровода находится в наиболее сложной зоне из-за низкотемпературной вечной мерзлоты, а также оттаивающей/заболачиваемой почвы, которая изменяется при взаимодействии с трубой. Трубопровод проходит последовательно через территории низкотемпературной вечной мерзлоты, умеренной вечной мерзлоты и оттаивающие земли.

С целью исследования состояния трубопровода в рамках проекта категории 1 Европейского Космического Агентства было заказано 11 сцен РСА ERS-1 и ERS-2, снятых в 1993–1998 гг., на основе которых были скомпонованы интерферометрические пары и затем построены интерферограммы.

Пример фрагментов исходного изображения и интерферограммы для пары осень 1997 года – осень 1998 года, представленный на **рисунке 4**, показывает способность интерферометрической съёмки к обнаружению динамики трубопроводов.

Размер области на **рисунке 4** составляет 5 на 5 км. Фрагменты трубопровода различаются на амплитудном изображении как относительно яркие вертикальные детали. Тёмная относительно окружающего фона вертикальная полоса на интерферограмме соответствует локализации смещения трубопровода. На интерферограмме изменение яркости от белого к чёрному цвету соответствует изменению фазы на  $2\pi$ , или изменению наклонной дальности на половину рабочей длины волны РСА ERS (около 2.8 см).

Мы можем исключить рельеф из списка возможных причин изменения фазы, поскольку база интерферометра мала (22 м), а местность преимущественно плоская. Влияние атмосферных неоднородностей также можно исключить, поскольку интересующие нас детали интерферограммы слишком прямолинейны. Причиной смещения трубопровода в данном случае можно предположить морозное выпучивание, которое является типичным для исследуемой области с вечной мерзлотой.

Анализ tandemной интерферограммы 24–25 июня 1996 года выявляет не столь типичный результат. На изображении на **рисунке 5** трубопровод напоминает букву "У". На интерферограмме ➤

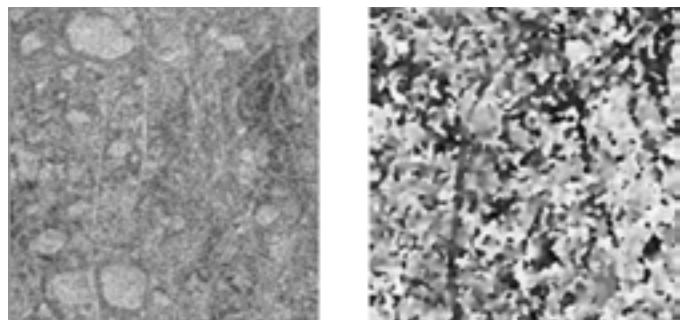
#### 5. Pipelines state monitoring

Surface displacements of different nature can be dangerous to pipelines, and this question is a subject of a number of investigations [8]. One of the origins of surface movements in non-seismic areas is permafrost. Seasonal thawing/freezing of the upper layer of permafrost makes the surface non-stationary. Applicability of interferometric methods for monitoring pipeline states in the permafrost area is discussed in [9, 10].

The area of interest contains ~200 km long gas pipeline consisting of 9 pipes 1.44 m in diameter between the Yamburg and Nyda settlements. The northernmost area of the pipeline location is a very complicated one because of the presence of low-temperature permafrost as well as thawed/waterlogged soils, whose state is changing due to thermal contact with the pipeline. Subsequently, the pipeline runs through low-temperature permafrost, moderate permafrost and thawed soils.

For the purpose of pipeline investigation eleven ERS-1 and ERS-2 SAR scenes were acquired in 1993–1998 and were ordered under ESA Cat-1 project, combined in interferometric pairs and interferograms were synthesized.

An example of image and interferogram fragment for a pair Autumn 1997–Autumn 1998, presented on a **Figure. 4**, brings out clearly the possibilities of interferometric observations for the detection of pipelines dynamics.



**Figure 4:** Amplitude image and one-year interferogram of pipeline.  
**Рисунок 4:** Амплитудное изображение и интерферограмма для промежутка 1 год.

Area size covered by the image presented on the **Figure. 4** is 5 by 5 km. Relatively bright vertical structures on the amplitude image are associated with gas pipes. Respective darker linear features on the interferogram correspond to the places of pipe displacement. Brightness variations here from black to white correspond to  $2\pi$  phase difference variations, or slant range difference variations at ERS half wavelength size (about 2.8 cm).

We can exclude an influence of topography on the phase as spatial baseline for this pair was short (22 m) and the relief is predominantly flat. An influence of atmospheric irregularities may be excluded from consideration because of the extreme linearity of the features on the interferogram. The displacement rate here reaches first centimeters level. The reason for the pipes displacements in this case is a frost heave, which is typical in any region with widespread permafrost.

Analysis from June 24–25, 1996, on a tandem interferogram gave us a more unusual result. On the image in **Figure. 5** (scene size is 3.2 by 4.8 km) we can clearly see 5 pipes constituting the letter "Y". On the interferogram we can clearly see displacements of pipes during one-day time frame! If the linear details detected on the interferogram are one-day dynamics, then the reason for the gas pipe subsidence at a fraction of centimeter here is the melting of frozen soil under the pipe. Other fragments of the full ERS scene for this 100x100 km area contain examples of transport road subsidence. We have to mention that not all of the infrastructure fragments demonstrate the dynamics because of permafrost heave/melting. The effect is specific and depends on the soil structure/type. ➤

# Это имя давно стало синонимом

**Прочности**  
**Выносливости**  
**Надежности**  
**Устойчивости в работе**  
**Экономичности**  
**Отличной техподдержки**  
**Низкого выброса вредных веществ и  
соответствия требованиям стандартов**



Репутация

## **ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА и НАДЕЖНОСТИ**

Наши двигатели подтверждают это каждый день!

## **Caterpillar® Engines**

Gas Engines from: 35 bkW / 47 bhp to 6100 bkW / 8180 bhp  
Diesel Engines from: 15 bkW / 20 bhp to 15,710 bkW / 21,067 bhp

Global Petroleum • 13105 Northwest Freeway  
Suite 1010 • Houston • Texas • 77040-6321  
Phone: 713-329-2207 • Fax: 713-895-4280  
[www.cat-oilandgas.com](http://www.cat-oilandgas.com)

© 2006 Caterpillar  
All rights reserved.

CAT, CATERPILLAR, their respective logos and "Caterpillar Yellow," as well as corporate and product identity used herein, are trademarks of Caterpillar and may not be used without permission.

**CATERPILLAR®**

же чётко видно смещение трубопровода, произошедшее всего за одни сутки! Если линейные детали интерферограммы действительно представляют собой суточную динамику, то причиной этого можно предположить оттаивание почвы под трубопроводом. Другие фрагменты этой же интерферограммы показывают опускание участков дорог. Следует отметить, что не все участки инфраструктуры демонстрируют динамику из-за морозного пучения вечной мерзлоты или оттаивания. Эффект в каждом случае зависит от типа и структуры почвы.

Уникальный шанс проверить достоверность заключений о наличии динамики газопровода на основе июньской tandemной пары изображений появляется благодаря существованию другой tandemной пары, 1–2 января 1996 года. База интерферометра в обоих парах практически одинакова, следовательно, проявления топографии на интерферограммах должны совпадать, а все различия следует отнести на счёт различий в летней и зимней динамике за промежуток 1 сутки.

На амплитудном изображении для того же участка (**рисунок 6**) так же видны линии газопровода. Анализ интерферограммы зимней tandemной пары не выявляет никаких линейных структур, в противоположность летней интерферограмме, кроме слабо заметного короткого участка. То же верно и для болот — не заметно никакого смещения поверхности на зимней интерферограмме. Единственная повторяющаяся на интерферограммах деталь — это криволинейная горизонтальная разветвляющаяся полоса, которая является очевидным проявлением рельефа. В итоге мы можем заключить, что отсутствие динамики на зимней интерферограмме в области газопровода является результатом промерзания почвы и стабилизации поверхности.

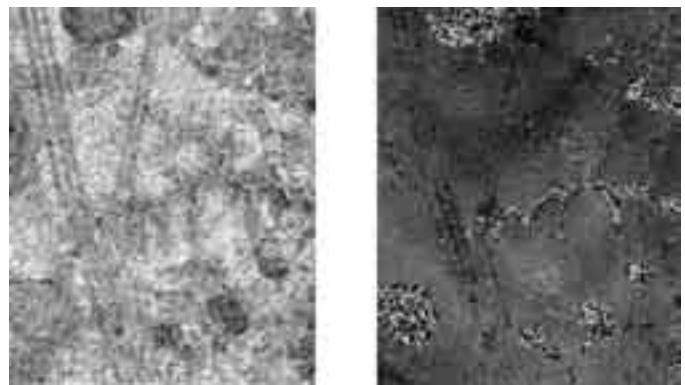
**Рисунок 6** Амплитудное изображение и зимняя интерферограмма для промежутка 1 день, показывающая отсутствие динамики

**6. Оценка движения нефтяных пятен при помощи интерферометрии с базой, ориентированной вдоль трассы полёта.** В первом разделе была обсуждена теоретическая основа интерферометрии с повторяющимися орбитами с базой интерферометра, ориентированной поперёк трассы полёта. Однако интерферометрия с базой интерферометра, ориентированной вдоль трассы (с двумя антennами на борту космического аппарата, разнесёнными по ходу движения) также является мощным инструментом. В частности, этот метод позволяет получать информацию о морских течениях [11], которая оказывается полезной для мониторинга морских нефтедобывающих платформ, а также для оценки дрейфа нефтяных пятен, возникающих в результате кораблекрушений.

## Заключение

В настоящей статье была исследована применимость PCA интерферометрии к вопросам, связанным с мониторингом районов нефте-газодобычи и транспортировки, и было выявлено 6 конкретных задач. Примеры из литературы и наши результаты показывают, что InSAR является многообещающей методикой. Успешность применения этой методики зависит от ряда факторов, среди которых есть и специфика планирования съёмок. Список текущих и планируемых к запуску PCA, а также их параметров, можно прочесть в других публикациях (например, [8]), здесь же мы уделим внимание выбору условий съёмок с целью снизить эффект декорреляции сигнала, поскольку это важно для получения интерферограмм, содержащих полезную информацию.

Как было отмечено выше, пространственная декорреляция уменьшается при сокращении базы интерферометра, а временная декорреляция уменьшается при сокращении интервала между съёмками (ценой уменьшения эффекта медленнотекущей динамики поверхности). Для одного и того же промежутка времени декорреляция тем меньше, чем больше длина волны PCA. В этом плане такие PCA L-диапазона как JERS-1 или PALSAR и планируемый к запуску TerraSAR-L являются наиболее подходящими, хотя более высокий уровень обратного рассеяния



**Figure 5:** Amplitude image and 1-day summer interferogram with pipes displacement.

**Рисунок 5:** Амплитудное изображение и летняя интерферограмма для промежутка 1 день.

A unique chance to check the reliability of the conclusions of the presence of gas pipe dynamics on the tandem pair from June 24–25 appeared because of availability of another tandem pair from January 1–2, 1996. Spatial baselines in these pairs were almost identical, consequently the manifestation of topography on the interferograms should be similar and all the distinctions might be explained by the surface dynamics on a one-day interval.

On the amplitude image covering just the same area and presented on **Figure. 6**, we can still see the pipes mentioned before. Analysis of interferogram from a winter tandem pair does not reveal any linear structures contrary to the summer interferogram except the subtle evidence of pipe displacement in the short section. The same is true for the swamps, where the displacement on the winter tandem interferogram are not seen. The only repeatable detail is curvilinear horizontal branchy feature in the middle of both tandem interferograms, which is a clear manifestation of topography. We can state at last that the absence of the dynamics on the winter tandem pair in the area of the pipeline (see the interferogram in the **Figure. 6**) is a result of the soil freezing and surface stabilization.



**Figure 6:** Amplitude image and 1-day winter interferogram without any dynamics.

**Рисунок 6:** Амплитудное изображение и зимняя интерферограмма для промежутка 1 день, показывающая отсутствие динамики

## 6. Slicks motion by along-track interferometry

In the first section we discussed repeat-pass interferometry with baseline transversal to the velocity vector. But along-track single-pass interferometry (with two antennas onboard the spacecraft located at distance from each other) is also a powerful tool. It provides information on current fields [11], which is useful for monitoring off-shore oil-field states. Another application is the estimation of oil slick drift in the case of tanker spillage.

от искусственных объектов, свойственный более коротким волнам, может оказаться предпочтительнее.

Резюмируем требования к PCA-системам по отношению к перечисленным задачам. Для выявления динамики поверхности в различных задачах (1, 2, 5) нужны малые значения базы интерферометра и схема съёмки с повторяющихся орбит. Построение цифровых моделей рельефа (задача 3) лучше выполнять для коротких интервалов между съёмками или при однопроходной схеме (это лучший вариант). При этом чем больше величина базы (в пределах допустимого из-за декорреляции порога), тем лучше разрешение DEM по высоте. Успех приложений, использующих карты когерентности (задача 4), зависит от описанной выше степени декорреляции сигнала. Наконец, морские приложения (задача 6) возможны исключительно при использовании систем, допускающих интерферометрию с базой, ориентированной вдоль трассы полёта, например, TerraSAR-X.

## Благодарность

Авторы выражают благодарность ЕКА за данные PCA ERS, предоставленные для выполнения проекта категории 1 «Оценка применимости ERS INSAR данных для мониторинга состояния газопровода Ямбург–Ныда» в рамках программы «AO Exploitation projects». ■

## Список использованной литературы

тот же, что и в английском тексте, за исключением публикации на русском языке, которое там переведено на английский:

## References

- [1] **H.A. Zebker and R.M. Goldstein**  
Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91(B5):4993-4999, April-10 1986.
- [2] **Massonnet, D. and K.L. Feigl**  
Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 1998, v. 36, p. 441-500.
- [3] **Gens, R. and J.L. Van Genderen**  
SAR interferometry - issues, techniques, applications, *International Journal of Remote Sensing*, 1996, v. 17, n. 10, p. 1803-1835.
- [4] **F.Sarti, H.Vadon, D.Massonnet**  
A method for the automatic characterization of atmospheric artifacts in SAR interferograms by correlation of multiple interferograms over the same site. *Second International Workshop on Retrieval of Bio- &Geo-physical Parameters from SAR Data for Land Application*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 21-23 October 1998.
- [5] **Fielding, E.J., R.G. Blom, and R.M. Goldstein**  
Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 1998, v. 25, p. 3215-3218.
- [6] **A.Hommels ,K.H.Scholte ,J.Munoz-Sabater,R.FHanssen, F.D.Van der Meer S.B.Kroonenberg E.Aliyeva, D.Huseynov, I.Guliev.**  
IGARSS 2003 Preliminary ASTER and INSAR imagery combination for mud volcano dynamics in Azerbaijan. *Proc.of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2003)*, July 21-25, 2003, Toulouse, France.
- [7] **B. Rabus, M. Eineder, A. Roth, R. Bamler**  
"The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, pp. 241-262.
- [8] **Riedmann M. and Haynes M**  
"Developments in satellite radar interferometry for monitoring pipelines and oil & gas infrastructure" *Russian oil & gas technologies*, July 2005, P. 78-83..
- [9] **Zakharov A.I. and Khrenov N.N.**  
Evaluation Of Applicability of ERS InSAR Data For Monitoring of Yamburg-Nyda Gas Pipelines State, *ERS-ENVISAT Symposium*, 2004.
- [10] **Zakharov A.I., Khrenov N.N.**  
"Radar interferometry techniques of Earth remote sensing in the monitoring of gas pipelines displacements", *Gas Industry*, 2004, no. 3, pp. 44-48, (in Russian).
- [11] **S. Lechner, J. Horstmann, J. Schulz-Stellenfleth**  
TerraSAR-X for Oceanography Mission Overview, *Proc.of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS-2004)*, 21-24 September, 2004, Anchorage, Alaska, USA

## Conclusion

In this article we have examined the applicability of SAR interferometry to the monitor oil/gas production and transportation. We pointed out 6 types of concrete problems. Literature examples and our original results show promising potential of the InSAR technique. The success of the interferometry application depends on a number of factors, among which is proper planning of the observations. List of current and planned SAR missions may be found elsewhere [8], here we will pay some attention to the selection of the observation conditions, which ensures lower signal decorrelation, because it is important for obtaining interferograms that carry useful information.

As stated above, spatial decorrelation is lower when the baseline is shorter, and temporal decorrelation is lower if the time interval between the orbits is lower (though at the cost of a decrease in the continuous surface dynamics to be discovered). For the same time interval the temporal decorrelation will be lower if we use longer wavelength SAR systems. For this reason such L-band missions such as historical JERS-1 or coming PALSAR and TerraSAR-L may be better from the point of view of temporal decorrelation, though higher backscatter from artificial objects at shorter wavelengths in some cases may be preferable.

Let us summarize the requirements of SAR systems with regards to the applications listed above. Surface dynamics detection (applications 1, 2, 5) needs smaller baselines and repeat-pass observation scheme. DEM generation (application 3) can be better performed by using short time interval or by the one-pass scheme (which will be the best case). The longer the interferometric baseline (under decorrelation limit), the better height resolution of DEM. Success of applications that use interferometric coherence images (number 4) strictly depends on the signal decorrelation discussed above. Lastly, sea applications (number 6) can not be performed by SAR systems, but one with the option of along-track interferometry, e.g., TerraSAR-X. ■

## Acknowledgement

Authors are grateful to ESA for ERS SAR data obtained under Cat-1 Project "Evaluation of applicability of ERS INSAR data for monitoring of Yamburg-Nyda gas pipeline state" in the framework of «AO Exploitation projects».