

**Нугманов Ильмир Искандарович**

кандидат геолого-минералогических наук,  
ассистент,  
Казанский (Приволжский) федеральный  
университет,  
Институт геологии и нефтегазовых технологий,  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5,  
e-mail: [Ilmir.Nugmanov@kpfu.ru](mailto:Ilmir.Nugmanov@kpfu.ru)

**Чернова Инна Юрьевна**

кандидат геолого-минералогических наук  
доцент,  
Казанский (Приволжский) федеральный  
университет,  
Институт геологии и нефтегазовых технологий,  
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5,  
e-mail: [Inna.Chernova@kpfu.ru](mailto:Inna.Chernova@kpfu.ru)

**ИНФОРМАТИВНОСТЬ МЕТОДОВ  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ  
КОРЫ В ПРЕДЕЛАХ  
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ  
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

*Аннотация:*

*Целью исследований являлось изучение информативности метода радарной дифференциальной интерферометрии (DInSAR) для оценки современных движений земной коры в пределах нефтедобывающих районов Республики Татарстан (РТ). Впервые для территории РТ построены карты смещений дневной поверхности за различные периоды наблюдений по данным, полученным со спутника ERS-1. Показана возможность использования данных радарной съемки для мониторинга урбанизированных территорий. В заключение результаты интерферометрической обработки радарных съемок были сопоставлены с данными геодезических наблюдений.*

*Ключевые слова:* мониторинг, деформация земной поверхности, дифференциальная интерферометрия (DInSAR)

**Nugmanov Ilmir I.**

Candidate of Geology and Mineralogy,  
Assistant of Geophysics and Geo-information  
Technology Department,  
The Institute of Geology and Petroleum  
Technologies, the Kazansky Federal University  
4/5, Kremlyovskaya st. Kazan, 420008,  
Republic of Tatarstan, Russia,  
e-mail: [Ilmir.Nugmanov@kpfu.ru](mailto:Ilmir.Nugmanov@kpfu.ru)

**Chernova, Inna Yu.**

Candidate of Geology and Mineralogy, Associated  
Professor of Geophysics and Geo-information  
Technology Department, the Institute of Geology  
and Petroleum Technologies,  
the Kazansky Federal University  
4/5, Kremlyovskaya st., Kazan, 420008,  
Republic of Tatarstan, Russia,  
e-mail: [Inna.Chernova@kpfu.ru](mailto:Inna.Chernova@kpfu.ru)

**SELF-DESCRIPTIVENESS OF RADAR  
INTERFEROMETRY FOR ESTIMATION  
UP-TO-DATE CRUSTAL MOVEMENTS  
WITHIN OIL PRODUCING AREAS OF THE  
TATARSTAN REPUBLIC.**

*Abstract:*

*The purpose of researches was studying the informativeness of radar differential interferometry (DInSAR) method for assessment up-to-date earth movements within oil-extracting regions of the Tatarstan Republic (RT). For the first time for RT territory maps of day surface displacement for different periods of observation according to the data received from the ERS-1 satellite are constructed. The possibility of using radar shooting data for monitoring the urbanized territories is shown. In the conclusion results of interferometry processing of radar shootings were compared with the data of geodetic observations.*

*Key words:* monitoring, deformation of earth surface, differential interferometry (DInSAR)

В статье приводятся результаты космического мониторинга смещений земной поверхности на территории юго-востока Республики Татарстан, выполненного по данным радарных съемок за период 1992 – 1995 гг. Перспективность подобного рода мониторинга очевидна. Интенсивная добыча нефти на юго-востоке Татарстана привела к возникновению техногенной сейсмичности, активным вертикальным деформационным процессам земной поверхности. В связи с этим в 80-е годы прошлого столетия была развернута долгосрочная программа природоохранных мероприятий, направленных на рациональное освоение и использование углеводородных ресурсов недр и на обеспечение

экологической и промышленной безопасности региона [1]. В 1991 г. были проведены первые исследования современных деформационных процессов в пределах северо-западной части Ромашкинского и Ново-Елховского месторождений (район повышенной сейсмической активности) методом повторного высокоточного нивелирования. В последующие годы геодинимическими исследованиями был охвачен весь нефтяной район юго-востока Татарстана [1].

Метод повторного нивелирования дает весьма ценную информацию [1], но требует значительных финансовых и трудовых затрат. Кроме того, такой подход позволяет получать величины смещений лишь в точках установки реперов, что недостаточно для получения целостной картины. В последние годы все большее признание получает альтернативный метод определения оценок смещения дневной поверхности, известный как DInSAR – дифференциальная интерферометрия изображений, полученных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны [2]. Эффективность нового метода обусловлена способностью получать площадные распределения оценок вертикальных и плановых смещений дневной поверхности, а также независимостью получения радиолокационных снимков от погодных условий. Известны успешные проекты с использованием интерферометрии для обнаружения просадок грунтов в районах угольных шахт [3], крупных мегаполисов Европы [4], на территориях нефтяных месторождений [5], мониторинга обширных оползней [6], зон землетрясений [7] и т. д. Несмотря на быстрое развитие и усовершенствование технологии DInSAR, для территории России подобные исследования все еще являются крайне редкими и в большинстве случаев носят экспериментальный характер [8, 9]. Поэтому основной целью нашего исследования являлось изучение информативности метода DInSAR для оценки современных движений земной коры в районах интенсивной добычи нефти в Республике Татарстан (РТ).

*Характеристика входных данных.* Радиолокационные изображения (SAR), используемые в данном проекте, являются результатом съемки с нисходящего витка (трека) 49 спутника ERS-1, ERS-2, а также данные радиолокатора ALOS PALSAR. Для обработки была использована цепочка из 19 снимков, полученная в период с 1992 по 1995 г., 4 снимка ERS-2 и 3 снимка ALOS PALSAR. Исходные данные радарной съемки покрывают территорию объектов с развитыми нефтедобывающей и магистральной инфраструктурами (Альметьевский, Заинский, Сармановский, Лениногорский, Нижнекамский, Черемшанский, Новошешминский районы РТ).

Вследствие временной и пространственной декорреляции радиолокационных кадров [2, 10], даже при незначительном интервале между повторными съемками для всей площади кадра, не удалось получить устойчивые интерферограммы. Как будет показано ниже, наиболее устойчивый сигнал мы можем наблюдать на урбанизированных территориях. Несмотря на внушительную коллекцию входных данных, было получено всего 7 интерферограмм для данных ERS-1/2, и 3 интерферометрические пары по данным радиолокатора ALOS PALSAR. Более подробно была изучена территория вокруг города Альметьевск (рис. 1).

*Методика интерферометрической обработки.* Для интерферометрической обработки используются 2 изображения, полученные радиолокатором при повторном пролете над одной и той же территорией. Каждый пиксель SAR-кадра представляет собой когерентную сумму отражений зондирующего сигнала от точечных целей, расположенных на поверхности в пределах элемента разрешения.

Радиолокатор регистрирует принимаемый сигнал  $S$  в комплексном виде, сохраняя фазу и амплитуду:

$$S = Ae^{j\varphi}e^{-j4\pi r/\lambda},$$

где  $A$  – амплитуда принимаемого сигнала,  $\varphi$  – изменение фазы радиосигнала при отражении от цели (фаза переотражения),  $r$  – расстояние между антенной радиолокатора и целью,  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения [10].

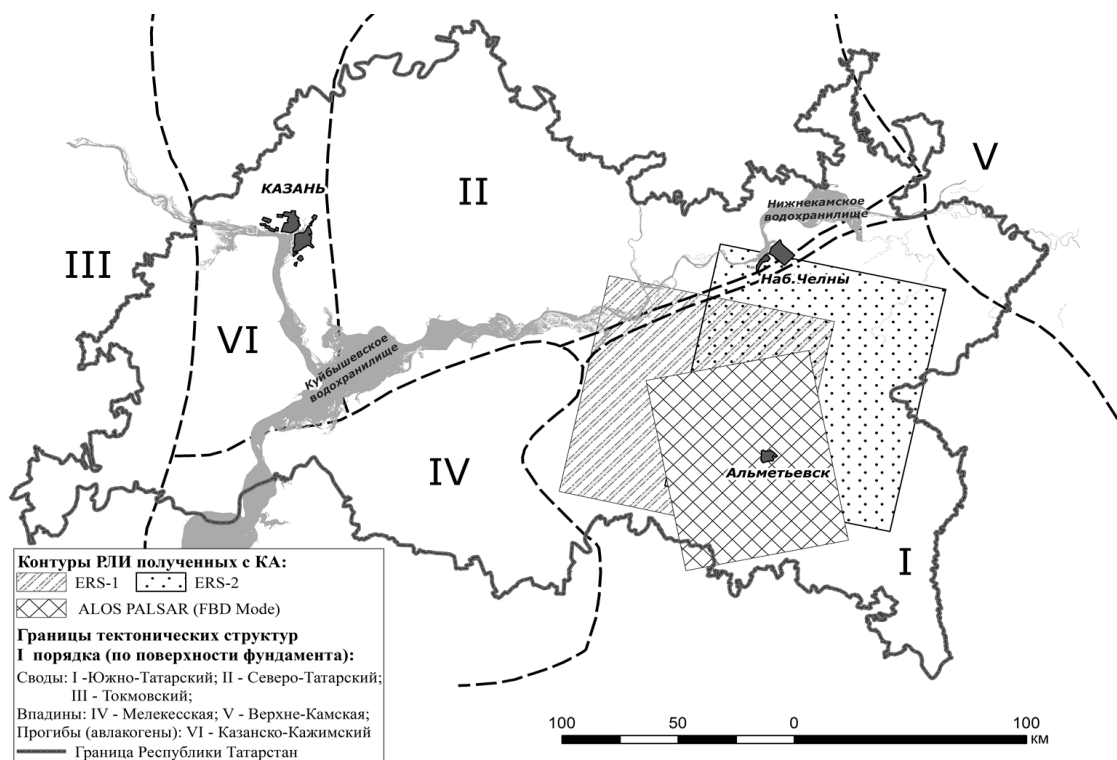


Рис. 1 – Покрытие территории исследования данными радиолокационной съемки

Интерферометрическая обработка основана на манипуляции с разностью фаз отраженных сигналов, в результате чего можно получить возвышение одного отражающего элемента поверхности относительно другого; из этого в дальнейшем можно построить цифровую модель рельефа (ЦМР), а также обнаружить смещения, произошедшие за время между съемками [10].

Составляющая  $\varphi$  случайна для участка поверхности внутри элемента разрешения, но при вычислении разности фаз для каждой пары пикселей совмещенных радиолокационных кадров исключается. Однако при большом временном промежутке между повторными пролетами спутника могут произойти значительные изменения земного покрова, и остаточная часть разности переотраженных фаз ( $\varphi$ ) становится шумом на интерферограмме. В случае, если расстояние между антенной радиолокатора при повторных пролетах (базовая линия) слишком большое, переотраженная фаза не исключается, что также приводит к разрушению интерферограммы. Ограничением для возможности интерферометрической обработки пары радарных снимков являются пространственная и временная базы [5]. Пространственная база (или базовая линия) представляет собой расстояние между орбитальными положениями радиолокатора при съемке изображений, составляющих интерферометрическую пару. Качество результатов интерферометрической обработки напрямую зависит от величины перпендикулярной составляющей базовой линии, в частности качество получаемой интерферометрической карты смещений земной поверхности возрастает с уменьшением длины перпендикулярной базовой линии. Если базовая линия равна нулю, интерферограмма, рассчитанная по такой паре снимков, содержит только фазу смещений. С другой стороны, при превышении некоторого критического значения базовой линии интерферометрическая обработка становится в принципе невозможной из-за пространственной декорреляции. Критическое значение перпендикулярной пространственной базы  $V_{n,cr}$  для каждой пары снимков может быть вычислено по формуле, представленной в [5]. В случае обработки данных ERS-1, подобранных для исследуемой территории,  $V_{n,cr} \approx 1000$  м. Для построения интерферограмм были выбраны пары снимков с базами, существенно меньшими, чем 1000 м (таблица).

### Интерферометрические пары радиолокационных снимков ERS-1

№	Идентификатор сцены	Дата съемки	Тип обработки	Длина базовой линии, м	Временная база, дни
1	ER1-92050507325080-1508.SE	05/05/1992	Master	45,776	70
	ER1-92071407330318-1508.SE	14/07/1992	Slave		
2	ER1-92120107325522-1508.SE	01/12/1992	Master	17,538	140
	ER1-93042007325101-1508.SE	20/04/1993	Slave		
3	ER1-92050507325080-1508.SE	05/05/1992	Master	21,918	385
	ER1-93052507325333-1508.SE	25/05/1993	Slave		
4	ER1-92060907325936-1508.SE	09/06/1992	Master	41,153	420
	ER1-93080307330398-1508.SE	03/08/1993	Slave		
5	ER1-92050507325080-1508.SE	05/05/1992	Master	8,513	1073
	ER1-95041307325980-1508.SE	13/04/1995	Slave		
6	ER1-95051807330337-1508.SE	18/05/1995	Master	35,611	1108
	ER1-92050507325080-1508.SE	05/05/1992	Slave		

Временной базой называют промежуток времени, прошедший между съемкой изображений, составляющих интерферометрическую пару. Понятие временной базы напрямую связано с такой важной проблемой, как временная декорреляция, возникающая за счет изменений рельефа, растительности, влажности, шероховатости и других свойств отражающей поверхности, произошедших за период между съемками. Проблема временной декорреляции может быть решена за счет увеличения длины зондирующей волны (что повышает «просвечивающую» способность радиоволн) или сокращения временной базы (т. е. промежутка между съемками). Величины временных баз выбранных интерферометрических пар также приведены в таблице.

Величина когерентности (от 0 до 1) отражает степень разрушения интерферограммы, вычисляется как корреляция двух сигналов в комплексном виде и является мерой пригодности пары снимков для дальнейшей обработки:

$$Coh = S_1 S_2^* / (S_1 S_1^* \cdot S_2 S_2^*)^{1/2},$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – комплексные значения отраженного сигнала для первого (master) и второго (slave) снимков, соответственно [11].

Изучение карт когерентности (рис. 2) показало значительное нарушение фазы интерферограмм ввиду пространственной и временной декорреляции. У пар снимков с большей пространственной базой когерентность снижается и в случае временной базы более 1 года становится слишком низкой для дальнейшей обработки пары.

Сравнение схем когерентности с географией исследуемой территории показало, что наилучшими целями мониторинга с использованием радиолокационного зондирования являются территории городов и других населенных пунктов. С этой точки зрения

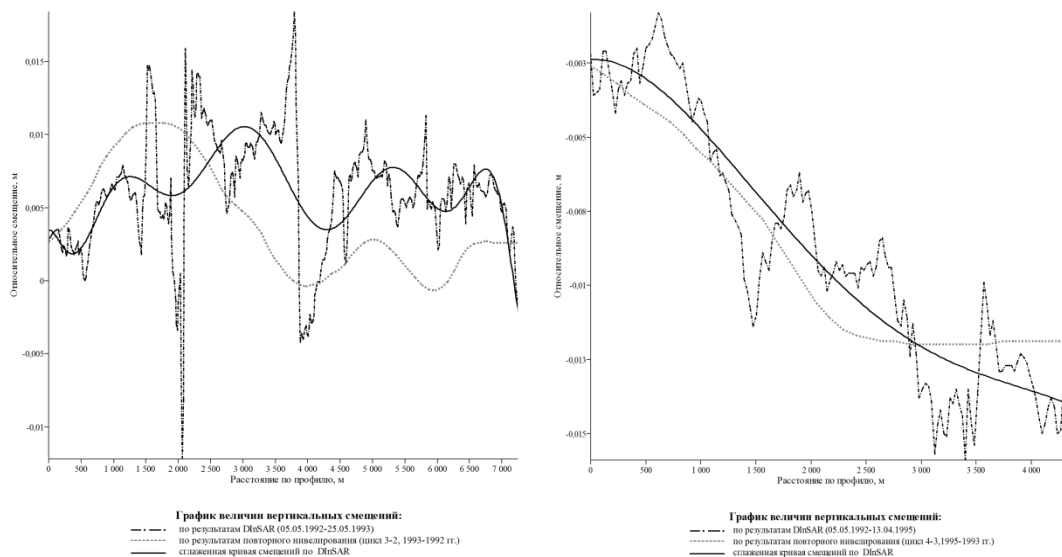


Рис. 2 – Современные вертикальные движения земной поверхности по данным радиолокационной интерферометрии и повторного нивелирования.  
 Слева – по профилю А-А, справа – по профилю Б-Б

наиболее интересным объектом является территория г. Альметьевск – самого крупного населенного пункта на площади кадра. Жители города неоднократно испытывали на себе воздействие землетрясений, вокруг города расположены сотни добывающих скважин. Казалось бы, должны наблюдаться систематические просадки. Тем не менее анализ серии интерферограмм дал результаты, отличные от ожидаемых.

*Результаты интерферометрической обработки.* На основе схем когерентности было выбрано 4 пары снимков, пригодных для расчета карт смещений: пары 05.05.1992 – 14.07.1992, 05.05.1992 – 25.05.1993, 09.06.1992 – 03.08.1993, 05.05.1992 – 13.04.1995. Полная цепочка интерферометрической обработки, а также многие другие дополнительные функции реализованы в использованном авторами программном комплексе SARscape, являющемся дополнительным модулем программы ENVI. Алгоритм обработки представляет набор стандартных процедур, описанных в соответствующих руководствах [12]. Схемы вертикальных смещений показывают, что территория г. Альметьевск в период наблюдений с мая 1992 по май 1993 г. испытывала преимущественно восходящие движения, причем наиболее интенсивный подъем наблюдается вдоль линейной зоны шириной примерно 1,5 км, пересекающей городскую территорию с северо-запада на юго-восток. Схема смещений для пары 09.06.1992 – 03.08.1993 показывает опускание северной части города по отношению к южной, а восходящие движения линейной зоны нивелируются. Далее наблюдается опускание и северной, и южной частей города за исключением уже упомянутой линейной зоны.

Таким образом, наблюдаемые смещения дневной поверхности в пределах городской территории не являются линейными. Возможно, движения имеют периодическую природу. К сожалению, недостаток данных не позволяет оценить период колебаний и дать обоснованную интерпретацию этому явлению. Если ориентироваться на интерферометрическую пару 05.05.1992 – 25.05.1993, то средняя скорость вертикальных движений составляет примерно 5 мм/год.

Достоверность данных, полученных методом DInSAR, как правило, подтверждается либо данными повторного высокоточного нивелирования, либо результатами GPS-мониторинга. В данной работе для верификации полученных результатов использованы результаты наблюдений методом повторного нивелирования, которые проводились на территории Альметьевского геодинамического полигона в 1992 – 1995 гг.

Нивелирная сеть состояла из региональных и локальных профилей. В пределах геодинамического полигона проводилось нивелирование I и II классов со среднеквадратической ошибкой примерно 3 мм на 1 км хода. Из-за отсутствия таблиц фактических наблюдений пришлось воспользоваться обобщенными результатами геодезических наблюдений за циклы наблюдений 1992 – 1993 и 1993 – 1995 гг. Для сравнения величин смещений, полученных по данным DInSAR и повторного нивелирования, были построены графики величин вертикальных смещений вдоль профилей А-А и Б-Б (см. рис. 2).

Графики показывают неплохую согласованность результатов измерений смещений, полученных разными методами. Очевидно, что разрешающая способность метода DInSAR несравнимо больше, чем традиционного метода наблюдения за смещениями земной поверхности. Расхождения в абсолютных значениях могут быть объяснены как погрешностями обоих методов, так и неточностью плановой привязки нивелировочных профилей по отношению к снимкам.

#### *Выводы*

Несмотря на то, что любые исследования с использованием радарных данных остаются экспериментальными, главным образом ввиду пространственной и временной декорреляции (универсальных способов снижения которых не существует), положительные результаты были достигнуты. Серия карт смещений, полученная для территории г. Альметьевск, показывает перспективность мониторинга населенных пунктов по данным радиолокационного зондирования, причем архивные данные ERS, ENVISAT и других радарных систем среднего разрешения можно применять в рекогносцировочных целях, для более точных наблюдений используя радарные данные более высокого разрешения (TerraSAR-X), а также снижать декорреляцию за счет применения радиолокаторов с большей длиной волны (ALOS PALSAR).

#### **Литература**

1. Изучение современных деформационных и сейсмических процессов на Ромашкинском геодинамическом полигоне / Р. Н. Гатиятуллин и др. // *Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия экзогенных и эндогенных процессов*: материалы Международной конференции, Казань, 13-16 ноября 2007 г. – Казань: Изд-во КГУ, 2007. - С. 222 - 226.
2. Gabriel A.K. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry / A.K. Gabriel, R.M. Goldstein, H.A. Zebker// *J. Geophys. Res.* - 1989. -№ 94. - P. 9183 - 9191.
3. Pei L. Study of monitoring mining subsidence in coal mining area by D-InSAR technology / L. Pei, J. Li W. Y. Tan // *Journal of Coal Science and Engineering.* - 2008. - № 14 (4). - P. 591 - 593.
4. Zeni G. Long-term deformation analysis of historical buildings through the advanced SBAS-DInSAR technique: The case study of the city of Rome, Italy. 2011 / G. Zeni, M. Bonano, F. Casuet al. // *Journal of Geo-physics and Engineering.* - 8 (3). - art. no. S01.
5. Кантемиров Ю. И. Космический мониторинг смещений земной поверхности на месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан по данным космических радарных съемок / Ю. И. Кантемиров // *Геоматика.* - 2001. - № 1. - С. 72 - 79.
6. Cascini L. Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales / L. Cascini, G. Fornaro, D. Peduto// *Engineering Geology.* - 2010. - № 112 (1 - 4). - P. 29 - 42.
7. Hu J. Two-dimensional co-seismic surface displacements field of the Chi-Chi earthquake inferred from SAR image matching / J. Hu, Z.-W. Li, X.-L. Ding, J.-J. Zhu // *Sensors.* - 2008. - № 8 (10). - P. 6484 - 6495.
8. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов / Ю.Б. Баранов и др. // *Геоматика.* - 2008. - № 1. - С. 51 - 56.

9. Филатов А. В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии / А. В. Филатов // Вестник Югорского государственного университета. - 2006. - № 4. - С. 103 -109.
10. Synthetic aperture radar interferometry / P.A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughinet et al. // Proceeding of IEEE. - 2000. - Vol. 88. - No. 3. - P. 333 - 380.
11. Richards M. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing / M. Richards // IEEE Aerospace and Electronic. - 2007. - Vol. 22. - No. 9. September.
12. Режим доступа: <http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>.