

УДК 550.814, 004.9

МОНИТОРИНГ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ РАДАРНЫХ СЪЕМОК

© 2012 И.Ю.Чернова, И.И. Нугманов, О.В. Лунева, А.Н. Даутов, О.С. Чернова

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Поступила в редакцию 14.05.2012

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 заключении результаты интерферометрической обработки радарных съемок были сопоставлены с данными геодезических наблюдений.

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

В статье приводятся результаты космического мониторинга смещений земной поверхности на территории юго-востока Республики Татарстан, выполненного по данным радарных съемок 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 развита долгосрочная программа природоохранных мероприятий, направленных на рациональное освоение и использование углеводородных ресурсов недр, и 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 SAR-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 др. 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 радарной дифференциальной интерферометрии (DInSAR) для оценки современных движений земной коры в районах интенсивной добычи нефти Республики Татарстан (РТ).

Характеристика входных данных. Изображения, используемые в данном проекте, являются результатом съемки с нисходящего витка (трека) 49 спутника ERS-1 (рис. 1). Для обработки была использована цепочка из 19 снимков, полученная в период с 1992 по 1995 гг. Съемка в пределах данного трека покрывает территорию объектов с развитыми нефтедобывающей и магистральной инфраструктурами (Альметьевский, Заинский, Сармановский, Лениногорский, Нижнекамский, Черемшанский, Новошешминский районы РТ).

Чернова Инна Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий. E-mail: inna.chernova@ksu.ru

Нугманов Ильмир Искандарович, ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий. E-mail: nismumrik@gmail.com

Лунева Ольга Викторовна, инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий. E-mail: olunjova@yandex.ru

Даутов Айрат Наильевич, инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий. E-mail: dizel07@yandex.ru
Чернова Ольга Сергеевна, студентка

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 6 интерферограмм. Более подробно была изучена территория вокруг города Альметьевск (рис. 1).

Интерферометрическая обработка. 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:

$$S = Ae^{i\varphi} e^{-i4\pi r/\lambda},$$

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

Интерферометрическая обработка основана на манипуляции с разностью фаз отраженных сигналов, в результате которой 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].

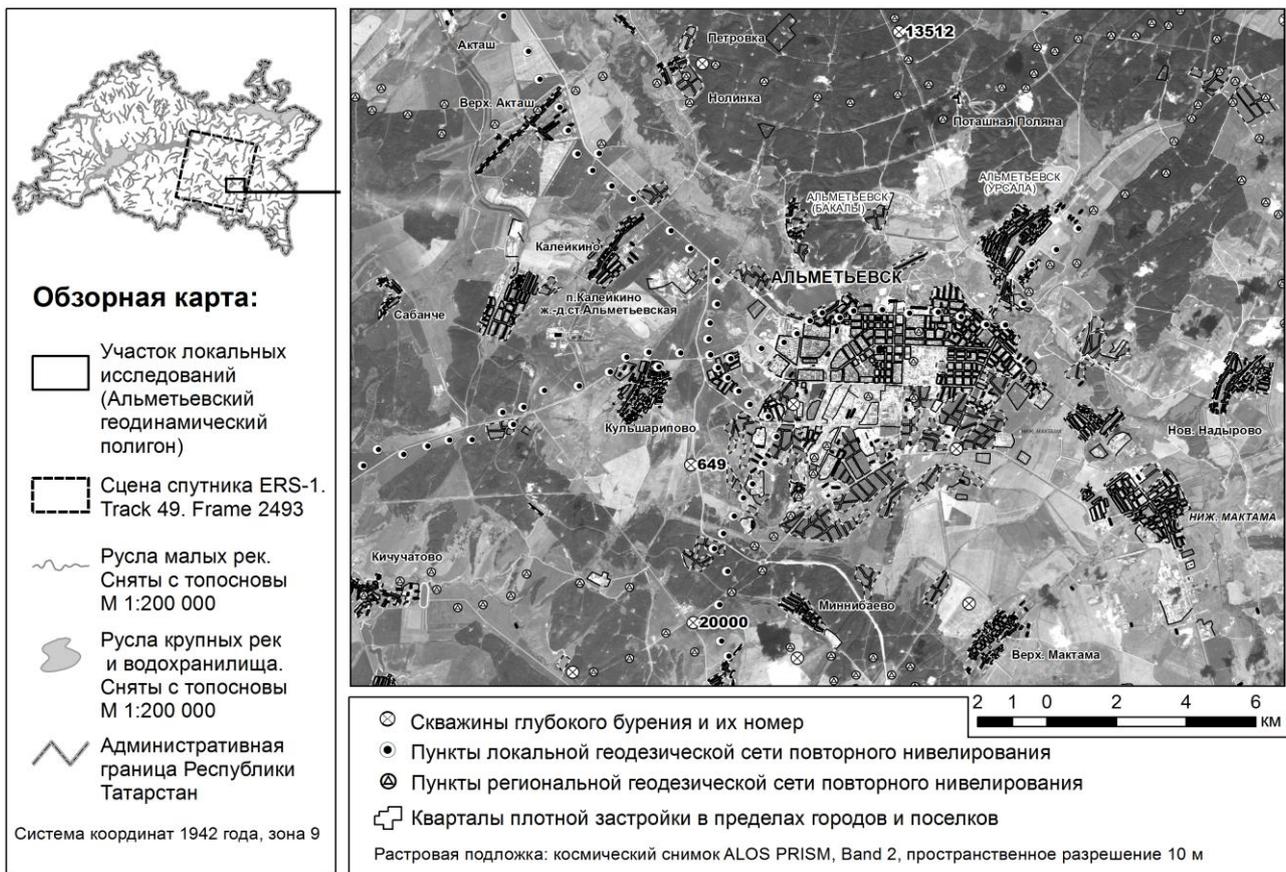


Рис. 1. Территория исследования

Составляющая φ 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 (φ) 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

интерферометрическим методом карты смещений земной поверхности возрастает с уменьшением длины перпендикулярной базовой линии. В случае базовой линии, равной 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 (табл.1).

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 увеличением длины зондирующей волны (что повышает «просвечивающую» способность радиоволн), либо сокращением временной базы (т.е. промежутка между съемками). Величины временных баз выбранных интерферометрических пар также приведены в таблице 1.

Таблица 1. Интерферометрические пары радиолокационных снимков ERS-1 на территорию Альметьевского геодинамического полигона

№	Идентификатор сцены	Дата съемки	Тип обработки	Длина нормальная 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		

Величина когерентности (от 0 до 100) 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 [11].

Изучение карт когерентности (рис. 2) показало значительное нарушение фазы интерферограмм в виду пространственной и временной декорреляции. На рис. 2а, 2б, 2в черным цветом показаны только те пиксели, для которых значение когерентности ≥ 80 , на рис. 2г – порог отображения пикселей существенно ниже – 40. Также для каждой пары приведены средние значения когерентности по всей площади кадра. 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 (рис. 3). На урбанизированных территориях мы наблюдаем наивысшую плотность пикселей с высокими значениями когерентности. Следовательно, именно для этих территорий мы можем построить наиболее достоверные карты смещений. Также высокими значениями когерентности характеризуются некоторые типы сельскохозяйственных полей. Наименьшие значения когерентности соответствуют лесным массивам. Из-за высокого уровня шума исследуемые интерферограммы не могут быть использованы для мониторинга обширных территорий, но могут быть использованы локально в пределах урбанизированных и непокрытых растительностью площадей. С этой точки зрения наиболее интересным объектом является территория г.Альметьевска – самого крупного населенного пункта на площади кадра. Жители города неоднократно испытывали на себе воздействие землетрясений, вокруг города расположены сотни добывающих скважин. Казалось бы, для территории города должны наблюдаться систематические просадки. Тем не менее, анализ серии интерферограмм показал результаты, отличные от ожидаемых.

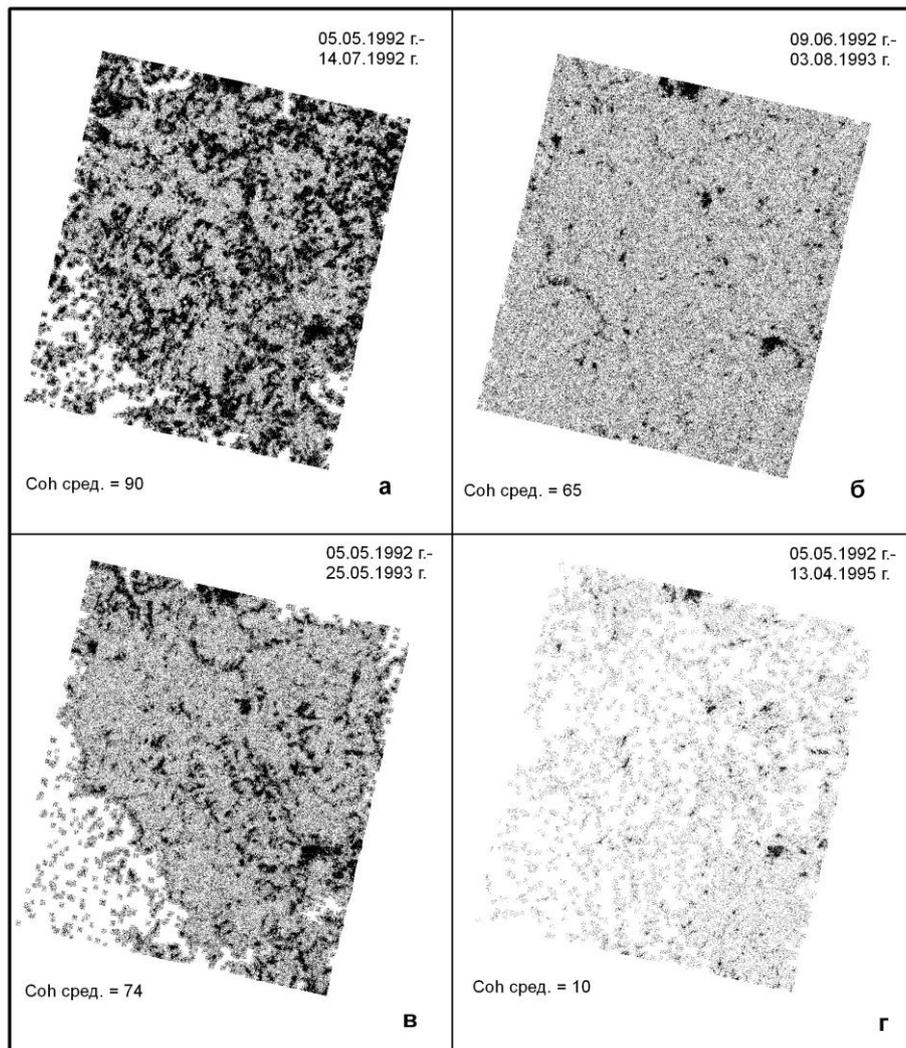


Рис. 2. Схемы когерентности интерферометрических пар ERS-1 с различной временной базой. Трек 49

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, представленные на рисунках 4а и 4б, показывают, что территория г. Альметьевска в период наблюдений с мая 1992 г. по май 1993 г. испытывала преимущественно восходящие движения, причем наиболее интенсивный подъем наблюдается вдоль линейной зоны шириной $\approx 1,5$ км, пересекающей городскую территорию с северо-запада на юго-восток. Схема смещений для пары 09.06.1992-03.08.1993 (рис. 4в) показывает опускание северной части города по отношению к южной, а восходящие движения

линейной зоны нивелируются. Далее мы наблюдаем опускание и северной, и южной частей города (рис. 4д) 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 ≈ 5 мм/год.

Достоверность данных, полученных методом DInSAR, как правило, подтверждается [5, 8] данными повторного высокоточного нивелирования, либо результатами GPS мониторинга. В данном проекте для верификации полученных результатов мы использовали результаты наблюдений методом повторного нивелирования, которые проводились на территории Альметьевского геодинимического полигона в 1992-1995 гг. Нивелирная сеть состояла из региональных и локальных профилей (рис. 1). В пределах геодинимического

полигона проводилось нивелирование I и II классов со среднеквадратической ошибкой ≈ 3 мм на 1 км хода. Не имея таблиц фактических наблюдений, мы были вынуждены воспользоваться обобщенными результатами геодезических наблюдений за циклы наблюдений 1992-1993 гг. и 1993-1995 гг.

[1], представленные в виде карт вертикальных смещений (рис. 4г и 4е). Для сравнения величин смещений, полученных по данным DInSAR и данным повторного нивелирования, были построены графики величин вертикальных смещений вдоль профилей А-А и Б-Б (рис. 4а-4е).

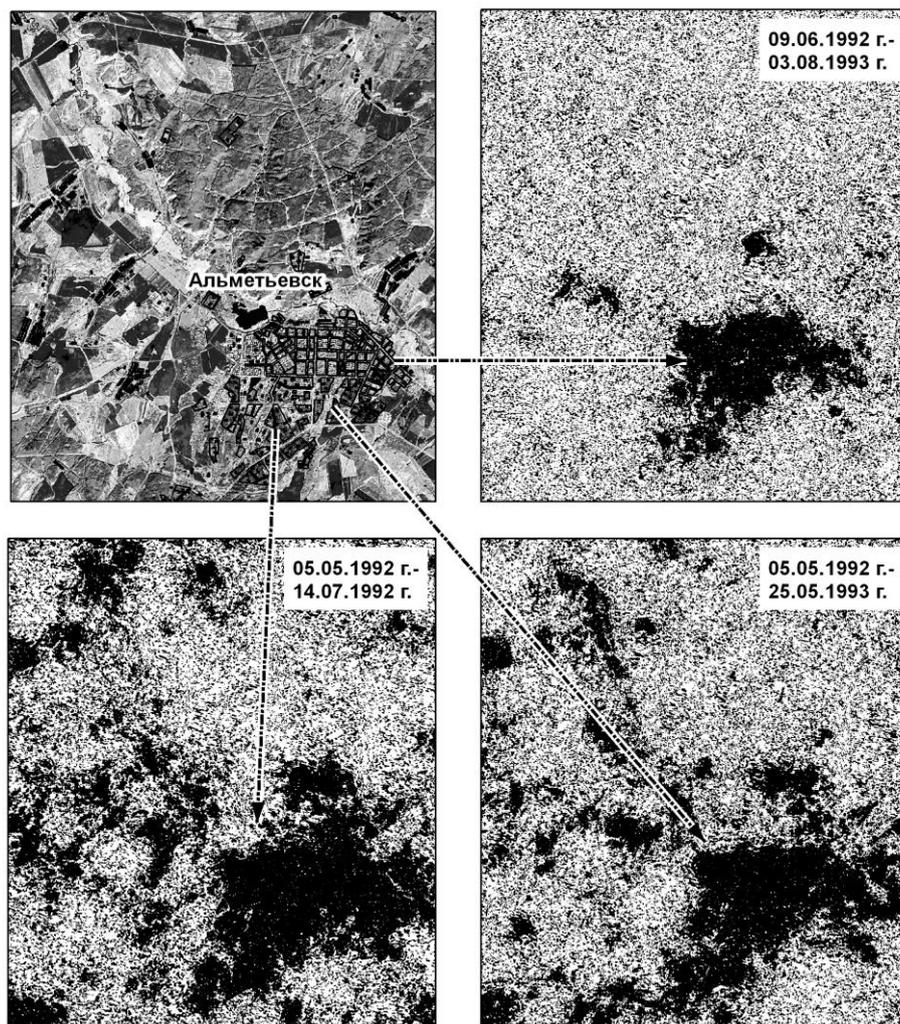


Рис. 3. Сравнение карт когерентности и географии местности: урбанизированные территории представляют собой наилучшие цели для радиолокационного зондирования со спутника ERS-1

Графики, представленные на рис. 5, показывают неплохую согласованность результатов измерений смещений, полученных разными методами. Очевидно, что разрешающая способность метода DInSAR несравнимо больше, чем разрешающая способность 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: наш первый опыт показал, что применение метода DInSAR с использованием архивных данных ERS-1 для территории РТ не гарантирует получение непрерывного площадного представления о смещениях земной поверхности при существенных затратах на покупку снимков, и любые исследования с использованием радарных

данных остаются экспериментальными. Причиной такого положения является слишком хорошо известная среди обработчиков радарных данных пространственная и временная декорреляция, и тот факт, что не существует универсальных способов ее снижения. Тем не менее, в нашем проекте 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-1, а также ERS-2, ENVISAT и других радарных систем среднего разрешения можно использовать в рекогносцировочных целях, а для более точных наблюдений использовать радарные данные более высокого разрешения (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed). Также временная декорреляция может быть снижена за счет использования радиолокаторов

с большей длиной волны. Учитывая тот факт, что данные радиолокационной съемки становятся все более доступными, их характеристики улучшаются, а методы интерферометрической обработки непрерывно совершенствуются, можно полагать, что мониторинг смещений земной поверхности по данным космических радарных съемок в ближайшее

время станет одной из основных технологий прогнозирования и предотвращения техногенно-природных ЧП.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, ГК № 14.740.11.1051, а также гранта РФФИ № 12-05-90701-моб_ст.

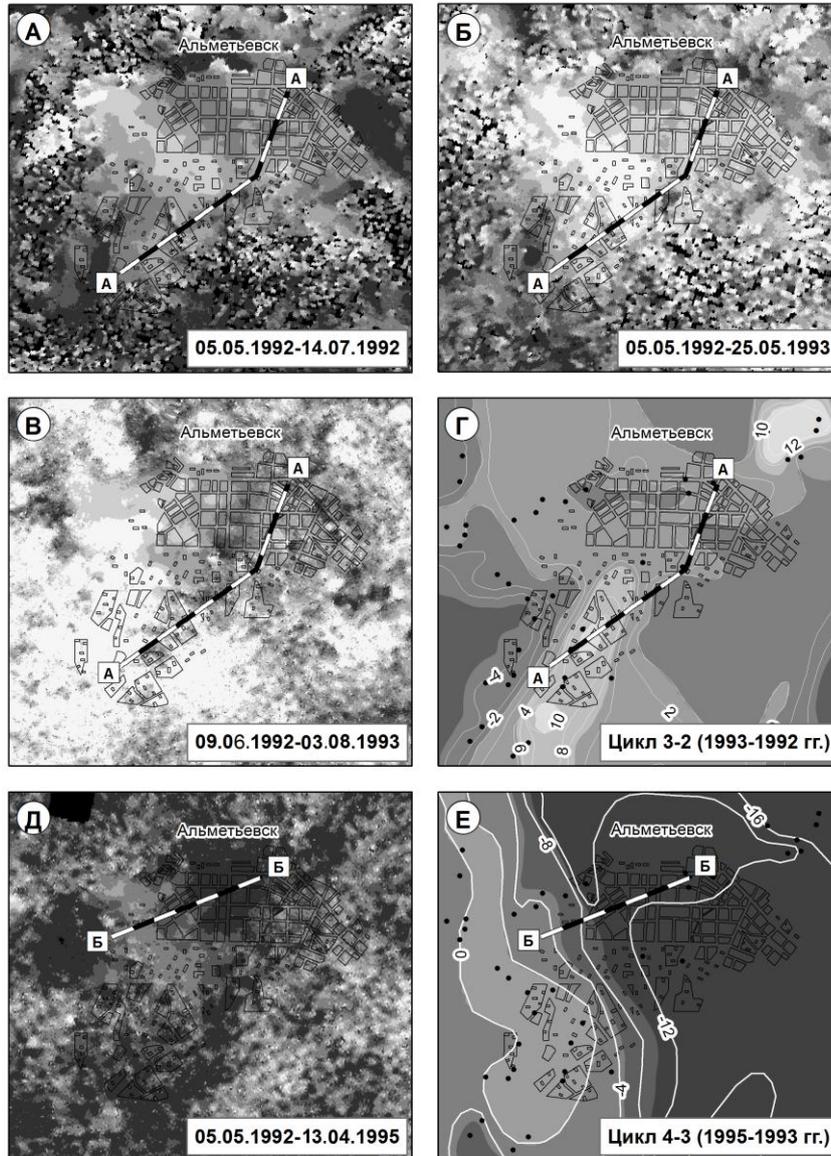


Рис .4. Фрагменты схем вертикальных смещений (в мм) по: а, б, в, д) данным DInSAR, г, е) данным повторного нивелирования

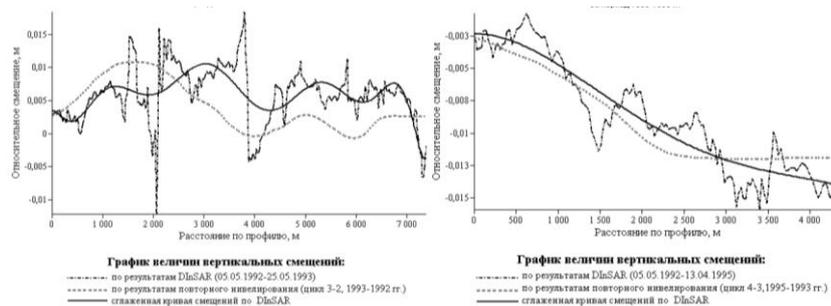


Рис. 5. Современные вертикальные движения земной поверхности по данным радиолокационной интерферометрии и повторного нивелирования: слева – по профилю А-А, справа – по профилю Б-Б (см. рис.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Гатиятуллин, Р.Н.* Изучение современных деформационных и сейсмических процессов на Ромашкинском геодинамическом полигоне / *Р.Н. Гатиятуллин, И.М. Залялов, П.И. Кошуркин* и др. // В кн. «Изменяющаяся геологическая среда: пространственно-временные взаимодействия экзогенных и эндогенных процессов» (Материалы Международной конференции, г. 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. Casu* et al. // *Journal of Geophysics 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 // *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. *Баранов, Ю.Б.* Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов / *Ю.Б. Баранов, Ю.Б. Кантемиров, Е.В. Киселевский, М.А. Болсуновский* // *Геоматика.* 2008. №1. С. 51-56.
9. *Филатов, А.В.* Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // *Вестник Югорского государственного университета.* 2006. № 4. С. 103-109.
10. *Rosen, P.A.* Synthetic aperture radar interferometry / *P.A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin* 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. IEEE Aerospace and Electronic. 2007. Vol. 22. No. 9. September.
12. Электронный ресурс <http://www.sarmap.ch/pdf/SAR-Guidebook.pdf>.

**MONITORING OF TERRESTRIAL SURFACE DISPLACEMENTS AT
TERRITORY OF SOUTHEAST OF TATASTAN REPUBLIC
ACCORDING TO SPACE RADAR SHOOTINGS**

© 2012 I.Yu. Chernova, I.I. Nugmanov, O.V. Luneva, A.N. Dautov, O.S. Chernova

Kazan (Volga) Federal University

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

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

Inna Chernova, Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor at the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies. E-mail: inna.chernova@ksu.ru

Ilmir Nugmanov, Assistant at the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies. E-mail: nusmumrik@gmail.com

Olga Luneva, Engineer at the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies. E-mail: olunjova@yandex.ru

Ayrat Dautov, Engineer at the Department of Geophysics and Geoinformation Technologies. E-mail: dizel07@yandex.ru

Olga Chernova, Student