

- перспективи його розвитку // Нові методи в аерокосмічному землезнавстві. — Київ: НАН України, 1999.— С. 6—18.
8. Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. — М.: Мир, 1980.—662 с.
 9. Патент RU № 2075780, МПК G 06 K 9/56. Способ тематического дешифрирования изображений и устройство для его осуществления / М. А. Попов, Ю. И. Гунько, С. А. Станкевич. — Оpubл. 20.03.97.
 10. Патент RU № 2144654, МПК G 01C 11/00. Способ измерения разрешения на местности оптико-электронной системы дистанционного зондирования / М. А. Попов, С. Ю. Марков, С. В. Балашов. — Оpubл. 19.07.99.
 11. Попов М. А. Формирование псевдоцветного изображения при комплексном дешифрировании аэроснимков // Тр. КВВАИУ.—1989.—Дып. 8.—С. 24—28.
 12. Попов М. А., Моисеев В. Л. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. — М.: МО СССР, 1991.—Ч. 1.—248 с.
 13. Попов М. О. Системологія інтерактивної обробки та розпізнавання зображень, здобутих при дистанційному зондуванні // Пр. 1-ї Всеукраїнської конф. «УкрОБРАЗ-92», Київ, 17—21 листопада 1992 р.
 14. Хакен Г. Информация и организация: Макроскопический подход к сложным системам. — М.: Мир, 1991.—240 с.
 15. Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Сов. радио, 1979.—312 с.
 16. Clement V., Giraudon G., Houzelle S., Sandakly F. Interpretation of Remotely Sensed Images in a Context of Multisensor Fusion using a Multi-specialist Architecture. — <http://iris.usc.edu/vision-notes/bibliography/match-pl1457.html>.
 17. Dasarathy B. V. Sensor Fusion Potential Exploitation — Innovative Architectures and Illustrative Applications // Proc. IEEE Special Issue on Sensor Fusion.—1997.—85, N 1.— P. 24—38.
 18. Duvoisin H. A., III, et al. Multi-sensor system for mine detection // Proc. SPIE.—1998.—3436.—P. 705—716.
 19. Future Trends in Remote Sensing // Proc. of 17th EARSeL Symp. on Future Trends in Remote Sensing, Lyngby, Denmark, 17—19 June 1997 / Ed. by P. Gudmansen. — Rotterdam, Blookfield, 1998.—477 p.
 20. Lillesand T. M., Kiefler R. W. Remote Sensing and image interpretation. N. Y. John Wiley&Sons, Inc., 3^{ed}, P. 51—87.
 21. Lozano-Garsia D. F., Hoffer R. M. Sinenergetic effects of combined Landsat-TM and SIR-B data for forest assesment // Remote Sensing.—1993.—14, N 5.—P. 2677—2694.
 22. Lyalko V. I., et al. Assesment of the development of the enviroment using multi-temporal satellite data for Chernobil disaster area // EARSeL Symp. Operation Remote Sensing for Sustainable Development, Enschede, Netherlands, 11—14 May, 1998.
 23. McDaniel R. V., et. al. Image fusion for tactical applications // Proc. SPIE.—1998.—3436.—P. 685—695.
 24. Pinz A., Prantl M., Ganster H. Active Fusion — A New Method Applied to Remote Sensing Image Interpretation. — <http://citeseer.nj.nec.com/20999.html>.
 25. Pohl C., van Genderen J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // Remote Sensing.—1998.—19, N 5.—P. 823—854.
 26. Geoinformation Technologies for Territorial Development Management: Proc. IV Internat. Conf., Yalta, Ukraine, May 28—June 1, 2001.
 27. Space imagine Europe <http://.www.si — eu.com>.
 28. Wald L. A European proposal for terms of reference in data fusion // Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.—1998.—32.—P. 651—654.

Опыт применения спутниковой интерферометрии в комплексе методов ДЗЗ

Ю. В. Костюченко

Центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины, Киев

ВВЕДЕНИЕ

История развития методов ДЗЗ последнего десятилетия позволяет утверждать, что спутниковая интерферометрия является одной из наиболее высокотехнологичных отраслей дистанционного зондирования. Радиолокаторы бокового обзора, установленные на спутниках серии ERS, JERS и RADARSAT, позволяют записывать не только амплитуду, но и фазу отраженного поверхностью радиосигнала. Анализ этой характеристики при совместной обработке двух радиолокационных изображений, полученных при соответствующих условиях (в зависимости от типа решаемой задачи выбирается опти-

мальный временной интервал между съемками и базовая линия — расположение сенсоров), позволяет получать информацию о высоте подстилающей поверхности.

Таким образом, эта технология дает возможность получать цифровые модели рельефа и данные о вертикальных движениях земной поверхности. Описанный подход нашел самое широкое применение при решении мониторинговых задач. В частности, цифровые модели рельефа с успехом применяются в рамках ГИС-технологий, а оперативный мониторинг малых вертикальных движений земной поверхности является ключевым элементом методик оценки природных и техногенных рисков.

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Радарная интерферометрия — это специальная технология, которая предназначена для получения информации о состоянии земной поверхности по фазовому сдвигу между сигналами, получаемыми при разных пространственных или временных положениях спутника. Фазовый сдвиг напрямую зависит от разницы положений соседних точек (элементов разрешения) на местности и разницы положений спутников или антенн в пространстве. Если позиции антенн известны точно, то разница фаз, соответствующая разному положению двух точек на местности, может быть определена с точностью, которая будет зависеть от характера рельефа и от взаимного положения антенн в пространстве.

Радиолокаторы бокового обзора с синтезированной апертурой (SAR — Synthetic Aperture Radar) позволяют картировать протяженные полосы на земной поверхности шириной в несколько десятков километров, производя измерения амплитуды и фазы отраженного сигнала от элементов поверхности с разрешением около 10 метров.

Такие системы, установленные на спутниках серии ERS, JERS и RADARSAT, позволяют записывать не только амплитуду, но и фазу отраженного поверхностью радиосигнала. Фаза одного комплексного SAR-снимка, который называется SLCI (Single Look Complex Image) не имеет практическо-

го применения. Только два SAR-SLCI-снимка полученные с разных точек в пространстве и их взаимный фазовый сдвиг могут быть использованы для построения цифровых моделей рельефа (Digital Elevation Model — DEM) и мониторинга малых вертикальных движений земной поверхности [1—16]. Цветокодированное изображение разницы фаз двух SLCI-снимков, которое называется интерферограммой, рассчитывается как произведение комплексного значения пикселя одного снимка на комплексно сопряженное значение другого снимка, при этом оба снимка предварительно очень точно привязываются друг к другу по специальному алгоритму [20].

Рассмотрим в несколько упрощенном виде схему получения SLCI-изображения. Пусть две радарные системы наблюдают некоторый участок земной поверхности с двух позиций A1 и A2 (рис. 1).

Радиолокационный сигнал посылается от A1 и принимается одновременно на A1 и A2. Разница фаз двух принимаемых сигналов пропорциональна разнице пройденного ими пути длиной δ , которое зависит от длины базы B , базового угла α , угла обзора θ , полной длины пути ρ , высоты h и высоты положения (топографии) точки $z(y)$. Расстояние δ может быть выражено, по простым геометрическим соображениям, следующим образом [1—4]:

$$\delta = \lambda\varphi / (2\pi), \quad (1)$$

где φ — измеренная фаза, а λ — длина волны.

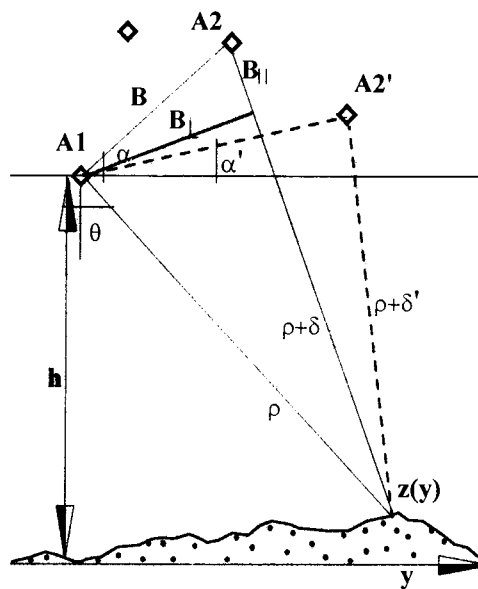
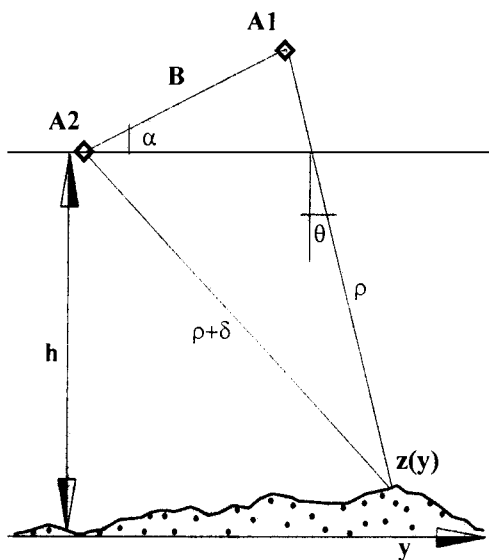


Рис. 1. Схема получения SLCI-изображения радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой спутникового базирования

Рис. 2. Схема получения SLCI-изображения радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой спутникового базирования для измерения полей малых вертикальных смещения земной поверхности

Закон косинусов позволяет получить соотношение

$$\sin(\alpha - \theta) = -\frac{(\rho + \delta)^2 - \rho^2 - B^2}{2\rho B}, \quad (2)$$

$$z(y) = h - \rho \cos \alpha \cos(\alpha - \theta) - \rho \sin \alpha \sin(\alpha - \theta). \quad (3)$$

Таким образом, фиксируя фазы пришедших сигналов в каждой точке изображения и используя приведенные уравнения, можно получить топографическую высоту (рельеф) для каждой точки. Ошибка при определении рельефа по такой схеме оказывается лежащей в пределах 5—12 % от измеренного значения и в основном зависит от точности измерения базовых параметров: угла обзора θ и высоты ρ [1—6].

Описанная схема является классической и широко используется для получения рельефа местности — построения DEM. Рассмотрим теперь принципы детектирования малых вертикальных движений земной поверхности.

Так называемая «повторная» интерферометрия, когда между получаемыми данными (SLCI) проходит какое-то время, имеет большое значение для измерения земных просадок и других возможных изменений земной поверхности. Если SAR-SLCI-данные получены не одновременно, то фазовый сдвиг или интерферограмма будет нести в себе информацию не только о рельефе, но также о возможных изменениях земной поверхности за время между получением SAR-SLCI-данных. Изменение земной поверхности во времени может привести к потере когерентности на интерферограмме при случайном характере изменения поверхности или к дополнительному фазовому сдвигу при наличии просадок поверхности вследствие шахтных выработок. Схема наблюдения для нашего случая представлена на рис. 2.

Выражение для интерферометрического сдвига фазы можно записать в виде [2—18]

$$\Delta\varphi_T = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta(\Delta r_0) = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r_0}. \quad (4)$$

Здесь λ — длина волны, r_0 — расстояние от антенны до элемента разрешения на земной поверхности, B_n — перпендикулярная базовая линия; n_p — разница по высоте между соседними элементами разрешения на поверхности (относительное смещение в вертикальной плоскости).

Случайное изменение положения или физических свойств (влажность в почве) элементов на местности определяется как область когерентности и исключается из рассмотрения. В формуле (4) $\Delta\varphi_T$ представляет собой фазовый сдвиг между соседними пикселями вследствие разницы их положения по высоте. Если же между получени-

ем SAR-SLCI-данных прошло время, и в течение этого времени положение земной поверхности изменялось последовательно (не случайным образом), то к фазовому сдвигу $\Delta\varphi_T$ добавится фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$, который и будет обусловлен этими подвижками земной поверхности. Относительное небольшое, порядка сантиметра, изменение положения точки относительно наклонной дальности приводит к существенному изменению фазы на интерферограмме. Фазовый сдвиг $\Delta\varphi_s$ пропорционален отношению между относительным смещением элемента разрешения Δs и длиной волны радиолокационного сигнала λ .

Таким образом, если мы имеем не одновременную интерферометрическую пару с заданной базовой линией B_n и небольшими подвижками земной поверхности между датами получения данных, то уравнение (4) можно переписать в виде [2—6]:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_T + \Delta\varphi_s = \frac{4\pi B_n n_p}{\lambda r_0} + \frac{2\Delta s}{\lambda}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно что, $\Delta\varphi_T$ и $\Delta\varphi_s$ нужно разделить с целью выявления подвижек земной поверхности. Для того чтобы исключить влияние топографии, можно сравнивать две интерферограммы одного и того же участка местности, которые были получены в разное время с помощью «тандем-пар». При этом разница фаз этих двух интерферограмм будет иметь вклад, обусловленный только составляющей $\Delta\varphi_s$, поскольку вклад от $\Delta\varphi_T$ будет компенсирован [14—18]. Более легкий путь для оценки подвижек состоит в выборе таких интерферометрических пар, базовая линия которых будет очень мала, порядка нескольких метров, или равна нулю в идеале [2—7, 15—18]. Такие малые базовые линии позволяют пренебречь влиянием рельефа местности. На таких интерферограммах изменение фазы на один полный период будет соответствовать сдвигу элемента разрешения земной поверхности на половину длины волны зондирующего радарного сигнала в направлении наклонной дальности [6—8]. Для спутников ERS эта величина соответствует изменению положения поверхности на 3 см в направлении, перпендикулярном линии обзора [9—8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

На протяжении 1998—2001 гг. Центром аэрокосмических исследований Земли совместно с Европейским космическим агентством были реализованы

два проекта, направленных на использование данных спутниковой радиоинтерферометрии для детектирования малых вертикальных движений земной поверхности. Первый проект был посвящен проблемам экологической безопасности: были оценены движения поверхности в районе Чернобыльской АЭС, в частности защитных сооружений над разрушенным реактором, по данным многолетних наблюдений. Второй проект имел своей целью оценку техногенных рисков в угледобывающих регионах Украины, а именно — была оценена величина проседания поверхности над угольными шахтами.

Если первый проект, посвященный исследованию зоны Чернобыльской АЭС, носил в большей степени учебный характер, и результаты, полученные по его итогам не выявили сколько-нибудь значительных изменений земной поверхности, то исследование поверхности над шахтными выработками позволило получить важные и интересные результаты. Рассмотрим их подробно.

Для обработки по описанному выше алгоритму было использовано 14 изображений со спутника ERS-1 и ERS-2 в течение 1991—1999 гг. Из этих изображений было составлено 12 пар, из которых 4 оказались пригодными для обработки с учетом природных, технологических и метеорологических условий. Для интерферометрической обработки использовалась специально разработанная программа EarthView InSAR версии 1.2 [20]. В дополнение к этому для обработки многозональных снимков видимого диапазона и создания трехмерной модели местности на основе комбинации результатов InSAR-обработки со снимками видимого диапазона использовались программы Atlantis EarthView версии 4.4.1 и «ERDAS Imagine» версии 8.4.

Для выбранного района была построена цифровая модель местности (DEM). DEM была необходима для того, чтобы убрать влияние топографии на фазу при разностной интерферометрической обработке. Полученное изображение когерентности дало некоторые положительные результаты на определенной области вне лесных массивов с влажностью в почве меньше 10 %. На рис. 3—5 представлены результаты создания DEM.

Также для изучаемого района была проведена разностная InSAR-обработка. Ввиду низкой когерентности лесных массивов и заболоченных земель разностная обработка была проведена только по двум парам. Полученное изображение когерентности дало хороший результат только в областях без плотного растительного покрова.

Некоторые цветовые признаки на этом изображении могут быть распознаны как относящиеся к просадкам земной поверхности в области угольных шахт. Рис. 7, 8 показывают часть интерферограм-

мы, соответствующую области угольных шахт (область шахт выделена прямоугольными областями на карте региона и на интерферограмме). Выделенная область на карте и на интерферограмме соответствует городам Стаханов, Брянка и Алчевск.

Часть интерферограммы, на которой наблюдаются участки сплошного цвета, была проанализирована и охарактеризована как территория с просадками от 1.5 до 2.5 см. Эти участки совпадают с расположением угольных шахт. Центральная часть участков угольных шахт имеет низкую когерентность (сказывается влияние промышленных и жилых строений), и поэтому на интерферограмме сплошные участки определенного цвета прерываются точечно-зашумленными участками разных цветов.

В настоящем исследовании для подтверждения полученных результатов используются материалы работ по определению величины просадки поверхности над шахтными выработками, выполненные в период с 1990 по 2000 гг. на базе Украинского государственного геолого-разведочного института Департамента геологии Министерства экологии и минеральных ресурсов Украины. Специалисты ЦАКИЗ провели калибровку этих данных в 2000 г. на основе результатов полевых исследований и геологического моделирования.

Анализируя результаты проведенных наземных исследований, был оценен коэффициент просадок поверхности (отношение величины просадок к общей извлекаемой мощности разрабатываемых угольных пластов), который варьировался от 0.5 до 0.9, при среднем значении 0.7. По результатам интерферометрической обработки, а также, принимая во внимание сложность геологического строения исследуемой территории и техногенные факторы, коэффициент просадок составил 0.55—0.65 (за 1995—1998 гг.).

Результаты этих исследований показали широкие возможности применения спутниковой интерферометрии для решения таких задач, позволили адаптировать применяемые методики к условиям Украины, получить заключения об экологической безопасности исследуемых территорий, дали возможность прогнозировать развитие опасных ситуаций.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ: ПОТЕНЦИАЛ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ ДЗЗ

Результаты этой работы показали, что ERS-SAR-данные могут быть успешно использованы для определения небольших подвижек земной поверхности вокруг и внутри промышленных районов, в частности Донбасса.

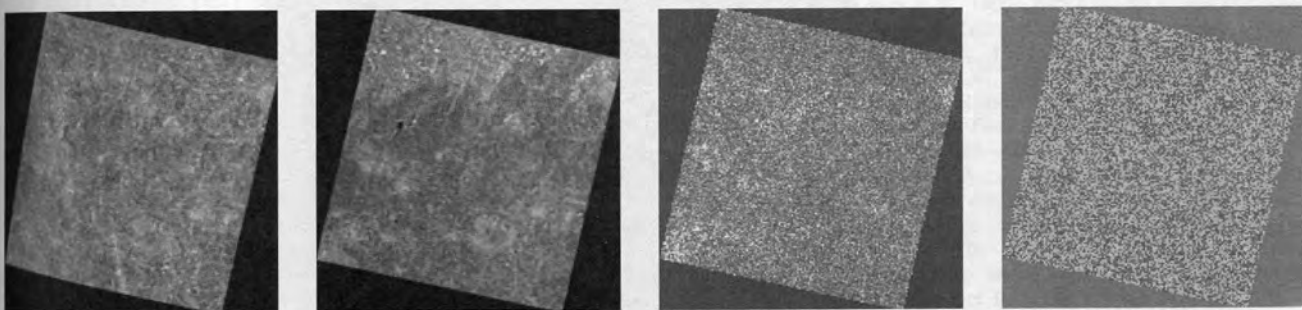


Рис. 3. Изображение ERS-1, 27.06.95; изображение ERS-2, 23.05.95; изображение когерентности; интерферограмма

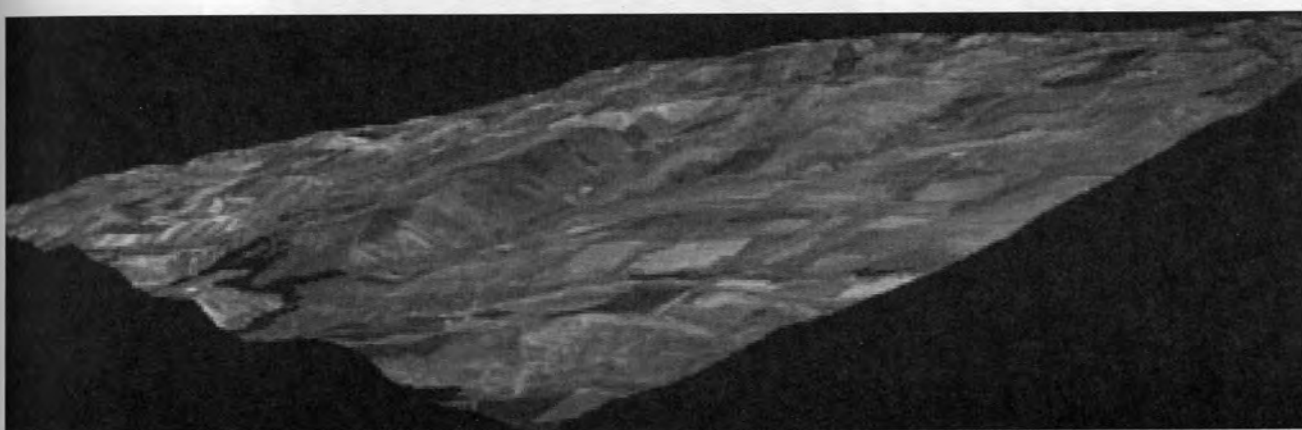


Рис. 4. Изображение DEM, текстурированное снимком

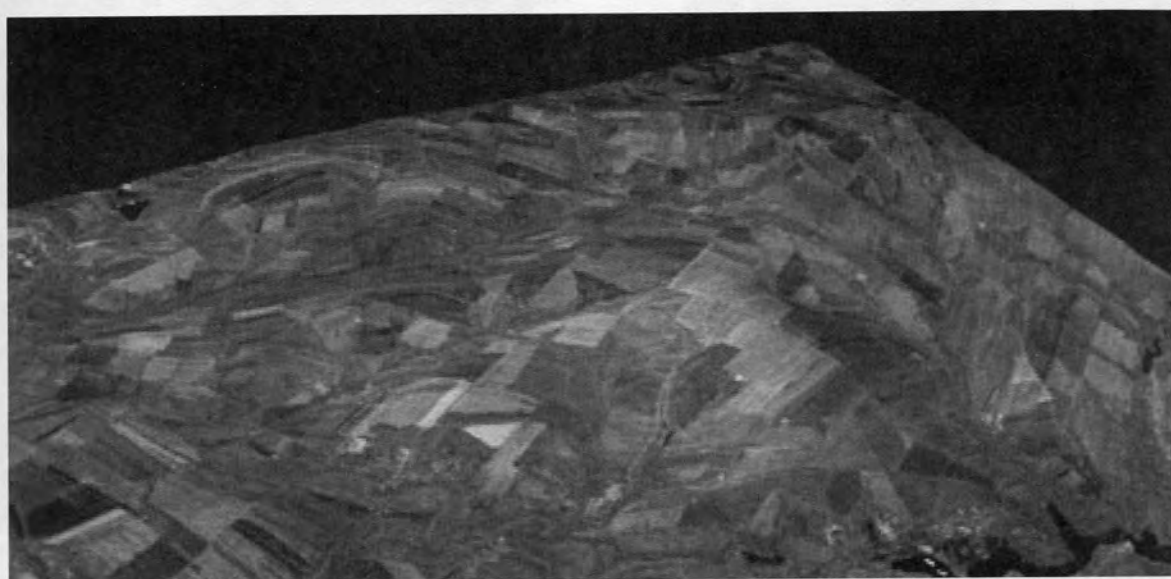


Рис. 5. Другой вид DEM в композиции с «Landsat TM» (10.09.86)

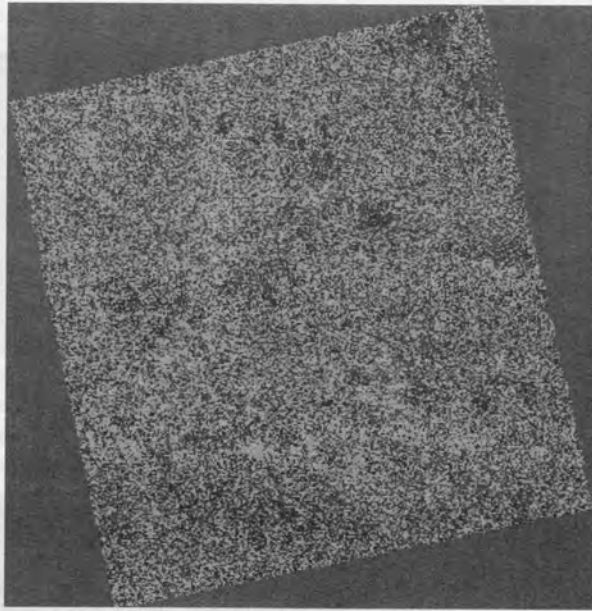


Рис. 6. Изображение разностной (DIFF) интерферограммы

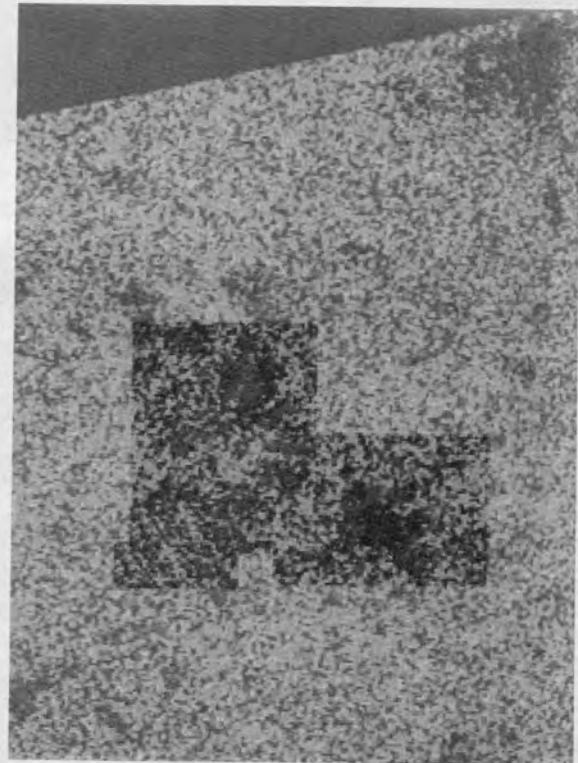


Рис. 7. Карта региона с указанием участков угольных шахт

Рис. 8. Участок на интерферограмме, который соответствует областям угольных шахт

Для того чтобы получить более достоверные результаты, необходимо продолжить исследования. Все полученные результаты необходимо в дальнейшем подтвердить и проверить с использованием информации о тектонике, геоморфологии, а также с привлечением тематических карт, воздушных фотографических методов и более детальных наземных данных.

Кроме того, приведенные результаты указывают на возможность повышения эффективности решения ряда задач при комплексной интерпретации результатов спутниковых интерферометрических исследований с данными, полученными в других областях спектра, например, с данными спутника «Landsat» видимого диапазона. Один из первых экспериментов Европейского космического агентства «Tandem mission», проведенный в 1992—1996 гг. с использованием спутников ERS-1 и ERS-2, доказал возможность самого широкого применения данных SAR-интерферометрии. За последние 10 лет были доказаны возможности применения интерферометрии в исследованиях по гляциологии, геологии, при мониторинге земных покровов, контроле наводнений и подтоплений, в лесном хозяйстве, распознавании растительности и для дистанционного определения влажности почв. Как показывает опыт [8—11, 16—19], интерферометрические методы могут значительно повысить эффективность традиционных методов, применяемых в этих областях. Весьма перспективными представляются ассемблирование данных радиолокации и тепловой съемки при исследовании морских акваторий и побережий.

Исследования последних лет показали широкие перспективы такого подхода при решении задач землепользования и ландшафтного управления, особенно в экологически чувствительных районах и областях с высокой техногенной нагрузкой.

Автор благодарен Европейскому космическому агентству (ESA) и Европейскому институту космических исследований (ESRIN) за поддержку и спонсорство этих исследований, а также за предоставление ERS-SAR-данных и специального программного продукта для их обработки. Отдельно благодарю др. Йорга Лихтенегера за его руководство и заботу во время пребывания в ESRIN. Также, выражаю искреннюю благодарность сотрудникам института: Массимо Барбьери, Симоне Паолони и Нику Уолкеру за их помощь в технических проблемах, связанных с обработкой данных и интерпретацией результатов. Выражаю отдельную благодарность Алин Сайнот (Vrije Universiteit, Amsterdam), Александру Кичке и всей группе проекта INTAS за предоставленные данные: геологические карты и «Landsat TM» снимки по исследуемому региону.

1. Rocca F., Prati C., Ferretti A. 1997: An overview of ERS — SAR Interferometry // ERS Symp. — Florence, Italy, 1997.— P. XXVII—XXXVI.
2. Raymond D., Rudant J. P. 1997: ERS1 — SAR Interferometry: potential and limits for mining subsidence detection // ERS Symp. — Florence, Italy, 1997.—P. 541—544.
3. Zebker H. A., Madsen S. N., Martin J., et al. The TOPSAR Interferometric Radar Topographic Mapping Instrument // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1992.—30, N 5.—P. 933—939.
4. Zebker H. A., Rosen P. A., Goldstein R. M., et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake // J. Geophys. Res.—1994.—99, N B10.—P. 19617—19634.
5. ERS SAR Interferometry Workshop // Earth Observation Quarterly. An Overview of FRINGE.—1996.—N 12.
6. Massonnet D., Rabaut T. Radar Interferometry: Limits and Potential // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1993.—31, N 2.—P. 455—464.
7. Wegmuller U. The potential of SAR interferometry for hydrology // Progress in Environmental Remote Sensing Research and Application / Ed. Parlow. — Balkema, Rotterdam, 1996.—P. 319—323.—ISBN 90 5410 598 4.
8. Duchossois G., Martin P. ERS1 and ERS2 Tandem Operations // IEEE Bulletin.—1995.—N 83.—P. 54—60.
9. Zebker H. A., Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1992.—30, N 5.—P. 950—959.
10. Johannessen J. A., Digranes G., Espedal H., et al. SAR ocean feature catalogue. — European Space Agency, 1994.— P. 1—106.—(Preprint).
11. Wooding M. G., Attema E., Aschbacher J., et al. Satellite Radar in Agriculture. Experience with ERS1 — European Space Agency, 1995.—P. 1—67.—(Preprint).
12. Carnec C., Massonnet D., King C. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent // Geophys. Res. Lett.—1996.—23, N 24.
13. Wagner W., Borgeaud M., Noll J. Soil Moisture Mapping with the ERC Scatterometer // Earth Observation Quarterly.—1996.—N 54.
14. Nell R., Perlinski, Fawwaz T. Ulaby Dielectric Properties of Soils on the 0.3—1.3 Ghz Range // Transactions on Geoscience and Remote sensing.—1995.—33.
15. Kostyuchenko Yu., Kotlyar A. SAR Data Applications in the Area of the Chernobyl Nuclear Power Plant Shelter. — ESA/ESRIN, 2000.—32 p.—(Preprint).
16. Kostyuchenko Yu., Kotlyar A. The Determination of the Rate of Subsidence of the Surface over a Site in the Coal Mining Area of Ukraine. — ESA/ESRIN 2000.—28 p.—(Preprint).
17. Massonnet D. Satellite Radar Interferometry // Scientific American.—1997.—P. 46—53.
18. Perski Z. Applicability of InSAR for Land Subsidence: Monitoring of the coal mining region, Upper Silisia, Poland // Fellowship Report, ESA/ESRIN.—1998.—22 p.—Frascati, (unpublished).
19. Prati C., Rocca F., Monti Guarnieri A., Pasquali P. Report on ERS-1 SAR interferometric techniques and applications // ESA rep. 10179/93/YT/1/SC.—1994.—122 p.—Frascati, (unpublished).
20. Atlantis 1999: EarthView version 1.2. Users Guide. — Atlantis Scientific Inc.—1999.—203 p.—Ontario.