УДК 528.88

В.В. Одабаи-Фард, М.Р. Пономаренко

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Представлены современные спутниковые радары и их основные характеристики. Описаны особенности метода радарной интерферометрии, рассмотрены преимущества и недостатки различных подходов к интерферометрической обработке радарных снимков и программное обеспечение для их реализации. Выявлены основные тенденции применения радарных технологий. Обозначены основные направления использования радарных технологий в горном деле и соответствующие им информационные продукты. Проанализирован опыт использования космической радиолокации в целях выполнения геодинамического мониторинга на российских месторождениях полезных ископаемых. Поднят вопрос о возможности интенсификации применения метода радарной интерферометрии в горнодобывающей области.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, радиолокационное зондирование Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой, методы интерферометрической обработки, радарные сенсоры, TerraSAR-X, TanDEM-X, деформации земной поверхности, горнодобывающая промышленность.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-59-67

Введение: актуальность и значимость радиолокационного зондирования Земли

К числу наиболее важных вопросов мониторинга земной поверхности на объектах горнодобывающей промышленности относятся площадные наблюдения труднодоступных и опасных участков с большим риском возникновения геодинамических явлений. В этой связи все более активное применение находят бесконтактные методы мониторинга, в частности космическое радиолокационное зондирование.

Радиолокационная съемка обладает преимуществами в сравнении с классическими методами наземных наблюдений, лазерным сканированием, аэрофотосъемкой, космическим зондированием в оптическом диапазоне. Ключевым моментом является возможность проведения систематических площадных наблюдений по всей площади объекта включая труднодоступные и опасные территории и вне зависимости от погодных условий.

Применение метода радарной интерферометрии позволяет с высокой точностью определять вертикальные смещения поверхности. При этом отсутствует транспортная составляющая, получение и обработка данных проводятся удален-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 59–67.
© В.В. Одабаи-Фард, М.Р. Пономаренко. 2017.

но и в общем случае не требуют присутствия на объекте.

В последние годы радиолокационное зондирование претерпевает интенсивное развитие: увеличивается число спутников, качество и разнообразие получаемых данных, совершенствуются технические характеристики съемочных систем и методики обработки получаемых данных, постоянно обновляется и разрабатывается новое прогрессивное программное обеспечение для обработки данных со спутниковых радаров. Кроме того, растет доля космических радарных данных, предоставляемых в свободном доступе, что расширяет возможности их использования в научных целях. Успешные научные исследования, расширение областей внедрения, совершенствование технологий обработки способствуют росту интереса к коммерческому использованию данных технологий [1].

Особенности современного космического радиолокационного зондирования

Радиолокационная съемка является активным методом зондирования: радарная антенна генерирует радиоизлучение, затем с помощью регистрирующей аппаратуры принимается отраженный от поверхности сигнал. Космическое радиолокационное (РЛ) зондирование ведется в L-, C- и X-диапазонах и обеспечивает получение необходимой информации вне зависимости от освещенности поверхности, состояния атмосферы, при любых погодных условиях. Радиолокационная съемка осуществляется с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Применение радиолокаторов с синтезированной апертурой позволяет добиться высокого пространственного разрешения в широкой полосе обзора [2, 3].

В настоящее время функционируют различные радарные сенсоры — проекты ведущих космических агентств, среди них: TerraSAR-X/TanDEM-X (DLR, Германия), Cosmo-SkyMED (ASI, Италия), Sentinel-1 (ESA, Европейское космическое агентство), Radarsat-2 (MDA/CSA, Канада), ALOS-2 (JAXA, Япония), Kompsat-5 (KARI, Республика Корея). Кроме того, существует большой объем архивных радарных данных со спутников, прекративших свое существование: ERS, JERS, ENVISAT, RADARSAT-1, ALOS и др. На данные момент также ведется разработка съемочных систем нового поколения, например, TanDEM-L.

РСА различаются по используемому диапазону радиоволн, пространственному разрешению, широте полосы обзора, периодичности съемки, набору режимов съемки (таблица). Эти особенности необходимо учитывать при планировании исследований и подборе исходных данных в соответствии с характеристиками изучаемого объекта.

Метод радарной интерферометрии

Радарная интерферометрия использует эффект интерференции электромагнитных волн для проведения измерений. Для этого осуществляется несколько когерентных измерений определенного участка земной поверхности с измене-

Основные характеристики современных радарных спутников

	TerraSAR-X TanDEM-X	Cosmo-SkyMED	Kompsat-5	Sentinel-1	Radarsat-2	ALOS-2
Диапазон радиоволн	X	X	X	C	C	L
Длина волны (см)	3,1	3,1	3,2	5,5	5,6	22,9
Пространственное разрешение (м)	0,25—40	1—100	0,85—20	5—40	1—100	1—100

нием положения радара в пространстве [4]. Интерферометрическая обработка включает совмещение 2-х разновременных РСА-изображений и построение интерферограммы, позволяющей измерить разность фаз двух снимков, на основе которой в дальнейшем выполняется расчет высотных отметок и смещений [1]. В качестве входных данных выступают интерферометрические пары радарных снимков. В обработке участвует фазовая составляющая, амплитуда радарных снимков находит использование при крупномасштабном картографировании [5].

Важную роль играют характеристики исходных снимков: пространственное разрешение, пространственный и временной базис, параметры орбиты, при которых получены данные. Эти параметры определяют возможности использования снимков, в частности — точность определения деформаций и масштаб получаемых карт смещений в случае геодинамического мониторинга.

Сегодня под термином радарной интерферометрии подразумевают различные подходы к обработке радарных снимков. При использовании классического метода дифференциальной интерферометрии (DInSAR) анализ поверхности выполняется по данным двух циклов съемки. Если целью является геодинамический мониторинг поверхности, то съемки выполняются, соответственно, до и после сдвижений, и анализ процессов ограничен периодом между двумя съемками. Более эффективным является совместный анализ серии радарных снимков. Для этого используются более совершенные методы обработки — метод малых базовых расстояний (Small Baseline — SBas) и метод стабильных отражателей (Persistent / Permanent Scatterers — PS). Метод SBas использует интерферограммы с минимальным пространственным базисом, что способствует уменьшению геометрической декорреляции. При использовании интерферометрия постоянных отражателей на снимках отбираются точки, являющиеся устойчивыми постоянные отражателями радарного сигнала, по которым в дальнейшем анализируется изменение фазы. В качестве постоянных рассеивателей чаще всего выступают антропогенные объекты: здания и сооружения, объекты дорожной сети, мосты и т.п. В связи с этим, данный метод более всего подходит для мониторинга на застроенных участках. Для мониторинга конкретных участков и объектов используются искусственные уголковые отражатели [1, 6].

Программное обеспечение для интерферометрической обработки радарных данных

Интерферометрическая обработка радарных снимков выполняется в специализированном программном обеспечении. На сегодняшний день лидерами в данной области являются программные продукты SARScape и Gamma. Эти полнофункциональные программные продукты, содержащие набор инструментов для выполнения всех основных этапов обработки радарных данных. Основная трудность связана с тем, что данное ПО является коммерческим, что ограничивает возможности его использования в малобюджетных проектах.

Альтернативным вариантом являются бесплатное программное обеспечение. К числу наиболее часто используемых относятся DORIS и SNAP (Sentinel-1 Toolbox). Данные программные продукты обладают базовыми возможностями обработки радарных снимков, при этом существуют определенные ограничения в наборе функций. Так, например, в случае использования SNAP развертка фазы выполняется в стороннем ПО Snaphu, а обработка по методу PS — в StamPS. Таким образом, применение бесплат-

ного программного обеспечения подразумевает, как правило, комплексное использование нескольких программных продуктов.

Обзор научных исследований, выполненных при помощи радарной интерферометрии и представленных на конференции «TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting»

Содержание докладов конференции «TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting», проходившей с 17 по 20 октября 2016 г. на базе Немецкого аэрокосмического центра (DLR) в Оберпфафенхофене, охватывает различные области исследований земной поверхности и Мирового океана с использованием современных радиолокационных технологий [7]. Основной интерес для горнодобывающей области представляют работы, посвященные определению деформации земной поверхности и анализу сопутствующих их рисков. Данные вопросы были рассмотрены на секциях «Деформации», «Цифровые модели рельефа», «Геориски», «Оползни», «Вулканы».

В большом количестве были представлены проекты, касающиеся применения интерферометрических технологий для измерения смещений земной поверхности. В данной области прослеживается тенденция совместного анализа радарных данных с различных спутников с целью увеличения объема анализируемых данных, получения более полной и точной картины деформаций, выполнения ретроспективного анализа [8—9]. Интерферометрическая обработка выполняется по методам SBas и PS при использовании программного обеспечения Gamma, Doris, SARScape, Stam PS, Sentinel-1 Toolbox. Контроль полученных результатов осуществляется по данным наземных наблюдений. Активно ведется разработка конструкций уголковых отражателей, наиболее оптимальных для выполнения наблюдений в X- и C-диапазонах [10].

Большое внимание уделяется технологиям и методам использования космических радиолокационных данных в системах мониторинга природных и антропогенных объектов, предупреждения и ликвидации последствий природных бедствий, сопровождаемых смещениями земной поверхности: оползней, извержений вулканов, землетрясений, наводнений. При исследовании геодинамических явлений и деформаций сооружений наибольшее применение находят методы радарной интерферометрии [12—13]. Поиск и картографирование изменений подстилающей поверхности выполняется на основе анализа как фазового, так и амплитудного слоя радарных данных [14].

К сожалению, вопросы применения радиолокации в горной промышленности в рамках данной конференции были обделены вниманием. Представленные проекты могут послужить примером и базой для выполнения последующих научных проектов широкого спектра, в том числе в горнодобывающей области. В частности, технологии и методики обработки данных могут быть адаптированы и использованы для решения задач мониторинга земной поверхности на объектах горного производства.

Возможности и особенности применения радарной интерферометрии в горнодобывающей области

Основными направлениями использования данного метода в горном деле является построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и расчет смещений земной поверхности. Задачи хранения и визуализации получаемых информационных продуктов решаются с помощью темпоральной модели данных и геоин-

формационных технологий, обеспечивающих корректное представление данных мониторинга, их эффективное использование, просмотр «исторических» данных [15].

Радарные снимки служат источником информации для решения следующих задач в горнодобывающей области:

- выявление зон деформаций на земной поверхности;
- наблюдения за оседаниями и смещениями земной поверхности на подрабатываемых территориях;
- наблюдения за деформациями зданий и сооружений;
- наблюдения за устойчивостью бортов карьеров, уступов и отвалов;
- наблюдения за состоянием гидроотвалов и хвостохранилищ, в том числе защитных сооружений;
- наблюдения за состоянием горнотранспортного оборудования на карьерах;
- экологический мониторинг рекультивируемых земель.

Интерферометрические технологии также, как и обработка амплитудной информации применяются для получения гидрогеологических характеристик территории месторождений, в частности оценки обводненности [16—17]. Актуальная информация о состоянии и уровне грунтовых вод позволяет вести более интенсивную и планомерную, равномерную разработку, исключающую внезапные простои процесса разработки в следствии непредвиденного поведения водного горизонта [18].

В России радарная интерферометрия в области горного дела используется со второй половины 2000-х гг. Исследования осуществляются в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», «Совзонд», на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета, Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербургского горного университета, а также с участием специалистов Института космических исследований РАН, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Института вычислительных технологий СО РАН, Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН и др. В целом, радарные технологии в России применяются по большей части в научно-исследовательских проектах.

Несмотря на ряд успешных проектов в области применения радарной интерферометрии [19—27], использование радарных технологий на российских месторождениях на данный момент ограничено. Это связано с целым рядом факторов. Для мониторинга горнотехнических сооружений и объектов инфраструктуры необходимы высокоточные измерения. Требуемая точность может быть обеспечена только с использованием большого объема данных высокого пространственного разрешения и специализированного программного обеспечения, стоимость которого значительно высока [22]. Кроме того, далеко не все радарные спутники обеспечивают необходимую для мониторинга поверхности периодичность съемки [23]. Анализ вертикальных и горизонтальных смещений возможен при наличии данных с разных орбит. Обработка больших серий радиолокационных изображений является продолжительным процессом и предъявляет требования к аппаратному обеспечению, необходимые вычислительные ресурсы не всегда доступны [24].

Значительная часть российских месторождений расположена в северных широтах, для которых характерна существенная неоднородность подстилающей поверхности: наличие снежного покрова, болотистая местность, сезонные изменения растительности отрицательно влияют на когерентность получаемых данных,

ограничивают период выполнения измерений и объем используемых снимков. Число глобальных ЦМР, покрывающих заполярные территории, ограничено [25—26].

Существуют различные взгляды на необходимость проведения дополнительных наземных измерений при выполнении радарного мониторинга земной поверхности. При использовании радарной интерферометрии на российских месторождениях, как правило, требуется также проведение подспутниковых наземных измерений: для предварительной оценки возможностей использования радарной съемки на конкретном объекте, контроля и верификации результатов, расчета абсолютных высотных значений. Применение метода рассеивателей для территорий открытых горных разработок подразумевает дополнительную установку и наблюдение искусственных уголковых отражателей.

Точность определения деформаций поверхности зависит от характера подстилающей поверхности, параметров съемки, характеристик исходных радарных данных, наличия дополнительных информационных продуктов (опорной ЦМР и др.). Корректная и достоверная оценка точности определения смещений до сих пор остается недостаточно проработанной областью. В связи со всем перечисленными факторами космическая радиолокация находит большее применение для получения площадного представления о динамике земной поверхности [27] и в качестве дополнения классических методов применяется для определения участков, где необходим высокоточный мониторинг.

Выводы

Радарные технологии обладают большим потенциалом, их использование в горнодобывающей области весьма перспективно. Этому способствует развитие и совершенствование технологий получения и обработки радиолокационных данных.

На данный момент применение радарных технологий в российской горнодобывающей промышленности ограничено. Это связано с высокой стоимостью данных и программного обеспечения, необходимого для их обработки с целью получения высокоточных результатов, трудоемким и длительным процессом обработки данных, неоднозначности оценки точности получаемых результатов, ограниченными возможностями представления данных конечному пользователю. Решению данной проблемы может поспособствовать развитие следующих направлений:

1. Совершенствование методик обработки и применения радарных данных, расширение области их использования.

2. Разработка технологий хранения и визуализации радарных данных и результатов их тематической обработки.

3. Развитие научных проектов международного сотрудничества.

4. Создание единой базы существующих радиолокационных данных для ускорения процесса поиска исходных данных.

5. Обеспечение научных центров при университетах России, занимающихся радарной интерферометрией, лицензиями на требуемое платное программное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knospe S. et al.* Die Anwendung der satellitengestützten Radarinterferometrie zur großräumigen Erfassung von Höhenänderungen // Tagungsband GeoMonitoring 2011, Clausthal-Zellerfeld, 3—4. März 2011.

2. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии / Пер. с нем. В. А. Буша, под ред. В. Г. Трифонова. — М.: Мир, 1988 — 343 с.

3. *Лаврова О.Ю.*, *Костяной А.Г.*, *Лебедев С.А.*, *Митягина М.И.*, *Гинзбург А.И.*, *Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. — М.: ИКИ РАН, 2011. — 480 с.

4. *Никольский Д.Б.* Уровни обработки радиолокационных данных // Геоматика. — 2008. — № 1. — С. 25—36.

5. *Ponomarenko M.R.*, *Pimanov I.Yu.* Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server // J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(7), 994—1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.

6. *Кантемиров Ю.И.* Краткие теоретические основы радарной интерферометрии и ее многопроходных вариаций Ps и SBas // Геоматика. — 2012. — № 1. — С. 22—26.

7. *TerraSAR-X/TanDEM-X* Science Team Meeting 2016. URL: http://sss.terrasar-x.dlr.de.

8. *Chen M., Tomás R., Li Z., Motagh M., Li T., Hu L., Gong H., Li X., Yu J., Gong X.* Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry // Remote Sensing, 2016, 8, 6, 468.

9. *Haghshenas Haghighi M., Motagh M.* Assessment of ground surface displacement in Taihape landslide, New Zealand, with C- and X-band SAR interferometry // New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 2016, 59, 1, pp. 136—146.

10. *Garthwaite M.C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J.H., Lawrie S.* The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. Record 2015/03. Geoscience Australia, Canberra. 2015.

11. *Milillo P., Perissin D., Salzer J.T. et al.* Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 52, pp. 221—229.

12. *Meyer F.J., McAlpin D.B., Gong W., Ajadi O., Arko S., Webley P.W, Dehn J.* Integrating SAR and derived products into operational volcano monitoring and decision support systems // ISPRS J. Photogramm Remote Sens. 2015, 100, pp. 106—117.

13. *Floyd A.L.*, Prakash A., *Meyer F.J.*, Gens R., Liljedahl A. Using synthetic aperture radar to define spring breakup on the Kuparuk river, Northern Alaska // Arctic, 2014, 67, pp. 462—471.

14. Ajadi O. A., Meyer F. J., *Webley P.W.* Change Detection in Synthetic Aperture Radar Images Using a Multiscale-Driven Approach // Remote Sens. 2016, 8, 482.

15. *Пиманов И.Ю.*, *Пономаренко М.Р.* Использование геоинфрмационных технологий и данных радиолокационной съемки для мониторинга объектов горного производства / Материалы 9-й конференции «Информационные технологии в управлении» ИТУ-2016. — 2016. — С. 435—439.

16. *Баранов Ю.Б.*, *Кожина Л.Ю.*, *Киселевская К.Е.* Опыт использования радиолокационных космических съемок при гидрологических исследованиях // Геоматика. — 2012. — № 4. — С. 76—81.

17. Zhou X, Chang N-B, Li S. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. Sensors 2009, 9(3), pp. 1876—1912.

18. Одабаи-*Фард В.В.*, *Буткевич Г.Р.* Проблемы разработки обводненных песчано-гравийных месторождений // Горная промышленность. — 2012. — № 4. — С. 112—113.

19. *Кашников Ю.А.*, *Мусихин В.В.*, *Лысков И.А.* Определение оседаний земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых по данным радарной интерферометрии // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 68—77.

20. *Эпов М.И.*, *Миронов В.Л.*, *Чимитдоржиев Т.Н.*, *Захаров А.И.*, *Захарова Л.Н.*, *Селезнев В.С.*, *Еманов А.Ф.*, *Еманов А.А.*, *Фатеев А.В.* Наблюдение просадок поверхности земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // Исследование Земли из Космоса. — 2012. — № 4. — С. 26—29.

21. *Кантемиров Ю.И., Камза А.Т., Бермуханова А.М., Тогайбеков А.Ж., Сапарбекова М.А., Никифоров С.Э.* Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности на примере одного из нефтяных месторождений Мангистауской области Республики Казахстан // Геоматика. — 2014. — № 4 (25). — С. 46—58.

22. *Мусихин В.В.*, *Лысков И.А.* Применение радарной интерферометрии для определения деформаций трубопроводных систем в условиях тундры // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2012. — № 4. — С. 103—110.

23. *Филатов А.В.* Применение многовременной радиолокационной съемки ALOS\PALSAR для обнаружения смещений земной поверхности в условиях Арктики // Журнал радиоэлектроники. — 2016. — № 2.

24. *Васильев Ю. В.*, *Филатов А. В.* Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне // Маркшейдерский вестник. — 2016. — № 3 (112). — С. 38—46.

25. *Баранов Ю. Б.*, *Кантемиров Ю. И.*, *Киселевский Е. В.*, *Болсуновский М. А.* Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR // Геоматика. — 2008. — № 1. — С. 37—45.

26. *Евтюшкин А. В.*, *Филатов А. В.* Технология построения цифровых моделей рельефа местности и оценки смещений методом радарной интерферометрии // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. — 2009. — Т. 7. — № 1. — С. 66—72.

27. *Евтюшкин А. В.*, *Филатов А. В.* Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2009. — Т. 6. — № 2. — С. 46—53. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Одабаи-Фард Вера Владимировна — кандидат экономических наук,
научный сотрудник, e-mail: vera.odabai-fard@thga.de,
Высшее техническое учебное заведение «Технише Хохшуле Георг Агрикола» Германия,
Пономаренко Мария Руслановна — аспирант, e-mail: pnmry@yandex.ru,
Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 59–67.

UDC 528.88

V.V. Odabai-Fard, M.R. Ponomarenko

GEODYNAMIC MONITORING OF THE GROUND SURFACE AND MINING INDUSTRY INFRASTRUCTURE USING RADAR INTERFEROMETRY

The article explains the significance of radar sensing and describes modern radar satellites and their technical characteristics. The attention is accented on the method of radar interferometry. The existing approaches of radar image interferometric processing and their software implementation were reviewed. The main trends in application of radar sensing for Earth surface monitoring were identified on the example of projects presented at «TerraSAR-X/ TanDEM-X Science Team Meeting 2016». The usage of synthetic aperture radar technologies in mining and corresponding data products were specified. The experience of radar interferometry for geodynamical monitoring of Russian mineral deposits and the problems of this research area were analyzed. The question of intensification of radar monitoring was raised. According to this information, recommendations can be prepared to enhance the use of radar methods for solving the problems of surface and infrastructure monitoring in mining areas.

Key words: radar interferometry, radar sensing, synthetic aperture radar, interferometric processing, radar sensors, TerraSAR-X, TanDEM-X, earth surface deformations, mining industry.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-59-67

AUTHORS

Odabai-Fard V.V., Doctor of Economical Sciences, Researcher, e-mail: vera.odabai-fard@thga.de,
Technische Hochschule Georg Agricola, Germany, 44787, Bochum,
Ponomarenko M.R., Graduate Student, e-mail: pnmry@yandex.ru,
Scientific Center for Geomechanics and Mining Problems,
Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Knospe S. et al. Die Anwendung der satellitengestützten Radarinterferometrie zur großräumigen Erfassung von Höhenänderungen. *Tagungsband GeoMonitoring 2011*, Clausthal-Zellerfeld, 3—4. März 2011.

2. Kronberg P. *Distantsionnoe izuchenie Zemli: Osnovy i metody distantsionnykh issledovaniy v geologii*. Per. s nem. V. A. Busha, pod red. V. G. Trifonova (Remote study of the Earth: Foundations and methods remote sensing methods in Geology. English–German translation of Bush V. A., Trifonov V. G. (Ed.)), Moscow, Mir, 1988, 343 p.

3. Lavrova O. Yu., Kostyanoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A. *Kompleksnyy sputnikovyy monitoring morey Rossii* (Complex satellite monitoring of the Russian seas), Moscow, IKI RAN, 2011, 480 p.

4. Nikol'skiy D. B. *Geomatika*. 2008, no 1, pp. 25—36.

5. Ponomarenko M. R., Pimanov I. Yu. Processing of SAR amplitude images with posting the results on web server. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, 9(7), 994—1000. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-994-1000.

6. Kantemirov Yu. I. *Geomatika*. 2012, no 1, pp. 22—26.

7. *TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting 2016*. URL: http://sss.terrasar-x.dlr.de.

8. Chen M., Tomás R., Li Z., Motagh M., Li T., Hu L., Gong H., Li X., Yu J., Gong X. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry. *Remote Sensing*, 2016, 8, 6, 468.

9. Haghshenas Haghighi M., Motagh M. Assessment of ground surface displacement in Taihape landslide, New Zealand, with C- and X-band SAR interferometry. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2016, 59, 1, pp. 136—146.

10. Garthwaite M. C., Nancarrow S., Hislop A., Thankappan M., Dawson J. H., Lawrie S. The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System: a single design suitable for InSAR deformation monitoring and SAR calibration at multiple microwave frequency bands. Record 2015/03. *Geoscience Australia*, Canberra. 2015.

11. Milillo P., Perissin D., Salzer J. T. et al. Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 52, pp. 221—229.

12. Meyer F. J., McAlpin D. B., Gong W., Ajadi O., Arko S., Webley P. W, Dehn J. Integrating SAR and derived products into operational volcano monitoring and decision support systems. ISPRS *J. Photogramm Remote Sens*. 2015, 100, pp. 106—117.

13. Floyd A. L., Prakash A., Meyer F. J., Gens R., Liljedahl A. Using synthetic aperture radar to define spring breakup on the Kuparuk river, Northern Alaska. *Arctic*, 2014, 67, pp. 462—471.

14. Ajadi O. A., Meyer F. J., Webley P. W. Change Detection in Synthetic Aperture Radar Images Using a Multiscale-Driven Approach. *Remote Sens*. 2016, 8, 482.

15. Pimanov I. Yu., Ponomarenko M. R. *Materialy 9-y konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2016)* (Proceedings of 9-th conference «Information technologies in management» (ITU-2016)), 2016, pp. 435—439.

16. Baranov Yu. B., Kozhina L. Yu., Kiselevskaya K. E. *Geomatika*. 2012, no 4, pp. 76—81.

17. Zhou X, Chang N-B, Li S. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors* 2009, 9(3), pp. 1876—1912.

18. Odabai-Fard V. V., Butkevich G. R. *Gornaya promyshlennost'*. 2012, no 4, pp. 112—113.

19. Kashnikov Yu. A., Musikhin V. V., Lyskov I. A. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 4, pp. 68—77.

20. Epov M. I., Mironov V. L., Chimitdorzhiev T. N., Zakharov A. I., Zakharova L. N., Seleznev V. S., Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2012, no 4, pp. 26—29.

21. Kantemirov Yu. I., Kamza A. T., Bermukhanova A. M., Togaybekov A. Zh., Saparbekova M. A., Nikiforov S. E. *Geomatika*. 2014, no 4 (25), pp. 46—58.

22. Musikhin V. V., Lyskov I. A. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2012, no 4, pp. 103—110.

23. Filatov A. V. *Zhurnal radioelektroniki*. 2016, no 2.

24. Vasil'ev Yu. V., Filatov A. V. *Marksheyderskiy vestnik*. 2016, no 3 (112), pp. 38—46.

25. Baranov Yu. B., Kantemirov Yu. I., Kiselevskiy E. V., Bolsunovskiy M. A. *Geomatika*. 2008, no 1, pp. 37—45.

26. Evtyushkin A. V., Filatov A. V. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii*. 2009. vol. 7, no 1, pp. 66—72.

27. Evtyushkin A. V., Filatov A. V. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2009. vol. 6, no 2, pp. 46—53.