

ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 522.261

О СОСТОЯНИИ ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Д. В. Мозер, А. С. Туякбай, Ж. З. Толеубекова

*Карагандинский государственный технический университет,
E-mail: dmitri-moser@yandex.ru, Бульвар мира, 56, 100027, г. Караганда, Казахстан*

Приведены данные применения комплексного мониторинга сдвижений поверхности земли на примере Карагандинского угольного бассейна, включающего в себя геотехнические расчеты сдвижения массива горных пород, нивелирование профильных линий и спутниковую радарную интерферометрию. Полученные результаты исследований методами спутниковой радарной интерферометрии показали надежность измерения оседаний земной поверхности в результате воздействия подземных горных работ.

Спутниковая радарная интерферометрия, космический мониторинг, мульда сдвижений, подработанные территории, геомеханические расчеты, Карагандинский угольный бассейн

Подземная добыча твердых полезных ископаемых приводит к образованию в горном массиве подземных пустот, которые служат причиной сдвижения земной поверхности [1, 2]. Закладка пустот для предотвращения обрушений, вызванных сдвижением массива горных пород, в Казахстане по экономическим причинам применяется крайне редко [3]. В Карагандинском угольном бассейне шахты находятся на близком расстоянии друг от друга и от города, а ведущиеся горные работы сопровождаются опасными процессами оседания земной поверхности, мониторинг которых имеет важное значение для экономики региона.

Для контроля этих процессов в Карагандинском государственном техническом университете ведутся работы по применению данных космического мониторинга на основе спутниковой радарной интерферометрии [4], которая обладает рядом преимуществ. Среди них — возможность контроля значительных площадей в режиме реального времени с приемлемой для анализа протекающих процессов точностью и оперативностью [5–11].

В настоящее время метод радарной интерферометрии используется для мониторинга экзогенных и эндогенных процессов, протекающих в земной коре [12–19], на базе разработанных в течение последних лет алгоритмов обработки данных [19–22]. В этих работах представлены результаты исследований по улучшению показателей, связанных с ошибками измерений, однако не приводится анализ причин возникновения деформаций земной поверхности и движения оползней. Не делается сравнительный анализ данных спутниковой радарной интерферометрии с геотехническими расчетами и результатами традиционного наземного мониторинга геодезическими методами.

В настоящей работе дано сравнение результатов расчета сдвижений земной поверхности для подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна, данных нивелирования соответствующих профильных линий, а также данных, полученных с помощью спутниковой радарной интерферометрии, по величинам оседания земной поверхности.

ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ПОДРАБОТАННОЙ ГОРНЫМИ ВЫРАБОТКАМИ

Максимальная скорость оседания земной поверхности в районе шахты им. Т. Кузембаева (Карагандинская область) составила [2]:

$$v_0 = 12 \frac{mc \cos \alpha}{H} \left(1 + 0.3 \frac{H_1}{H} \right) = 0.29 \text{ м/мес}, \quad (1)$$

где H — глубина разработки, м; m — вынимаемая мощность пласта, м; α — угол падения пласта, град; c — скорость продвигания забоя лавы, м/мес; H_1 — мощность ранее подработанной толщи, м.

Общая продолжительность процесса сдвижения [2]:

$$T = 1.4 \frac{H}{c} \approx 8 \text{ мес.} \quad (2)$$

СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МЕТОДА НИВЕЛИРОВАНИЯ

Границы опасного участка, представленные кругом на рис. 1, нанесены на планы горных работ шахты им. Т. Кузембаева путем их наложения на карту, взятую из Google maps. В центре данного участка находится пересечение железнодорожного пути и автодороги А17.

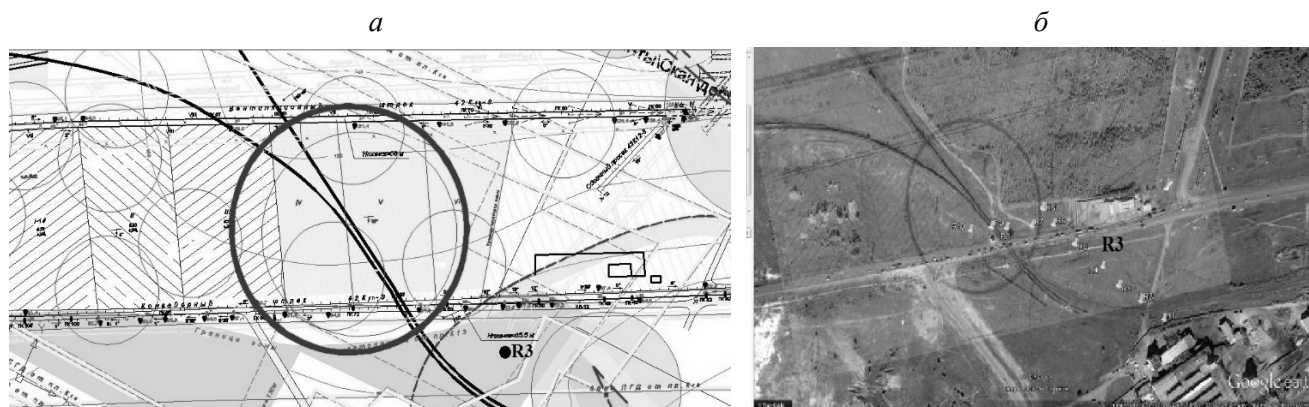


Рис. 1. Границы опасного участка (а) и трансформирование плана горных работ в Google maps (б)

В границах этого участка заложены две профильные линии, по которым проводилось повторное нивелирование. Согласно [1, 2], интервал времени между повторным нивелированием устанавливался исходя из ожидаемых скоростей современных вертикальных движений земной коры. Для получения детальных данных о процессе сдвижения, кроме начальных и конечных наблюдений, проводилось не менее трех серий наблюдений через интервал

$$t = \frac{H}{6c} = 36 \text{ сут}, \quad (3)$$

где H — глубина разработки у нижней границы выработки/почвы, м; c — скорость продвижения забоя, м/сут.

Сводные данные по пяти сериям нивелирования приведены на рис. 2.

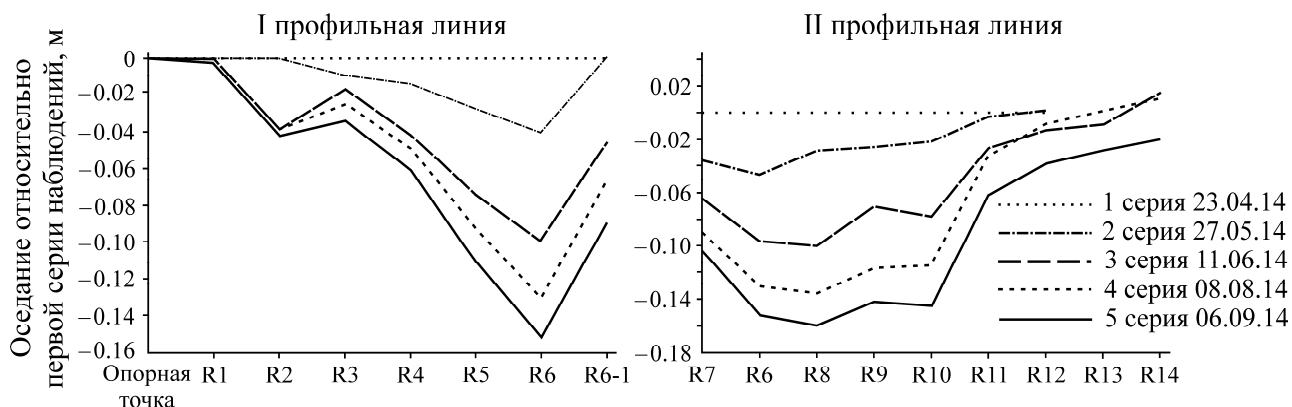


Рис. 2. Графики оседаний земной поверхности по данным нивелирования

Добыча угля в границах опасного участка проводилась с апреля по сентябрь 2014 г. (6 мес). Сравнение результатов нивелирования с данными теоретических расчетов позволило заключить, что величины этих оседаний за 6 мес различаются на 8%. Максимальные значения оседаний земной поверхности за этот период составили 0.16 и 0.2 м по данным нивелирования и теоретическим расчетам соответственно.

СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МЕТОДА СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В настоящее время имеются две архивные цепочки радарных снимков земной поверхности территории г. Караганда со спутников ENVISAT и ALOS. Обработанные космические снимки со спутника ENVISAT оказались недостаточно качественными, что связано с отсутствием полной цепочки снимков одной и той же полосы съемки. Недостатками данной серии космических снимков является длительный временной интервал и большая пространственная базовая линия. Среди космических снимков территории г. Караганда можно выделить снимки, полученные спутниковыми системами COSMO-SkyMed (Италия) и TerraSAR-X (Германия). С учетом рассматриваемой территории и времени съемки, для анализа выбраны снимки, полученные итальянским спутником. Точность некоторых спутниковых снимков одного участка г. Караганда демонстрирует рис. 3 [13 – 18].



Рис. 3. Примеры разрешающей способности космических снимков (районы г. Караганда)

Были использованы 28 радарных космических снимков территории г. Караганда. Радарные снимки режима Stripmap Himage имели пространственное разрешение 3 м и размеры сцены 40 × 40 км. Обработка космических снимков проводилась в программном комплексе ENVI модуль SarScape (США) [3 – 6]. Выбраны пары космических снимков для последующей обра-

ботки в автоматизированном режиме в инструменте “Connection Graph” программы ENVI. В результате получено два графика, которые отображают пары космических снимков, соединенных в сети, где каждое отдельное изображение соединено друг с другом (рис. 4). Обработка изображений позволила определить лучшие пары снимков с нормальной базовой линией длиной 1000 м и малой временной базой 10 дней. Для каждой из пар созданы соответствующие интерферограммы [7 – 10].

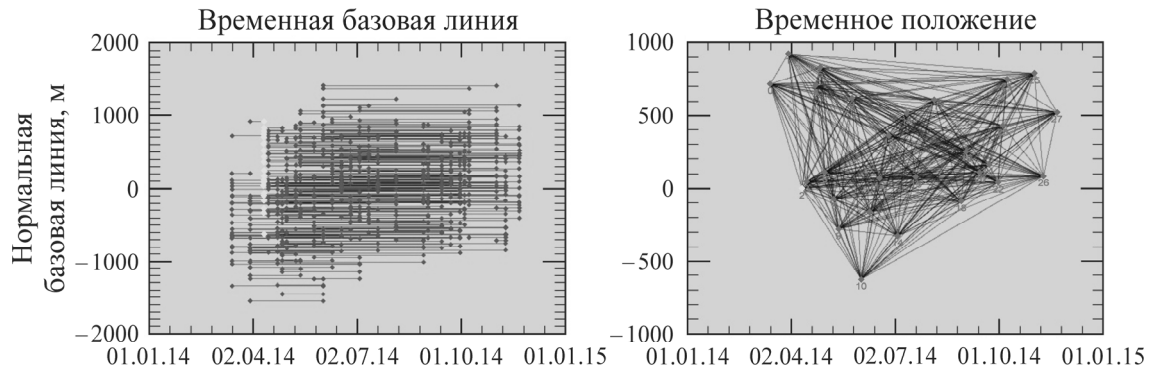


Рис. 4. Определение базовых линий космических снимков

Существуют два метода обработки данных спутниковой радарной интерферометрии: технология интерферометрии серий малых базовых линий и технология интерферометрии постоянных рассеивателей. При обработке снимков со спутника Cosmo-Sky-MED 1/4 территории г. Караганды (20 × 20 км) использовалась технология интерферометрии серий малых базовых линий в программном комплексе Sarscape Interferometry. Были выделены опасные по проседаниям поверхности участки Карагандинского угольного бассейна шахт им. Костенко, Абайской, им. Кузембаева и вдоль дороги между г. Актас и г. Сарань. По дифференциальной интерферограмме выявлены участки, в пределах которых образовались мульды оседания (рис. 5).

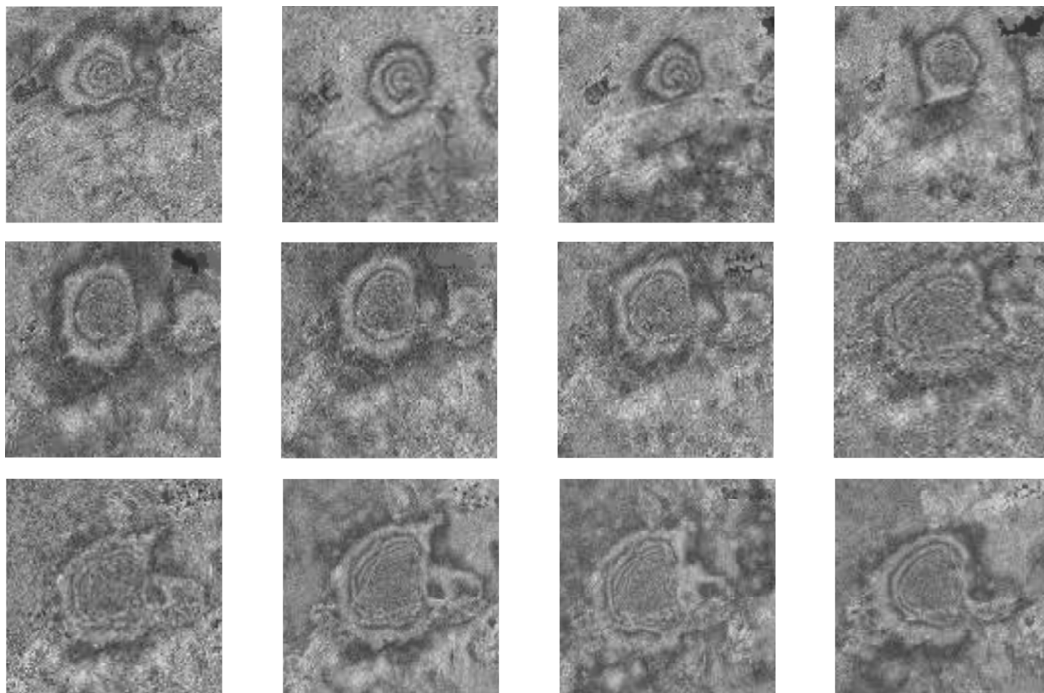


Рис. 5. Дифференцированные интерферограммы шахты имени Т. Кузембаева с мульдами оседаний земной поверхности

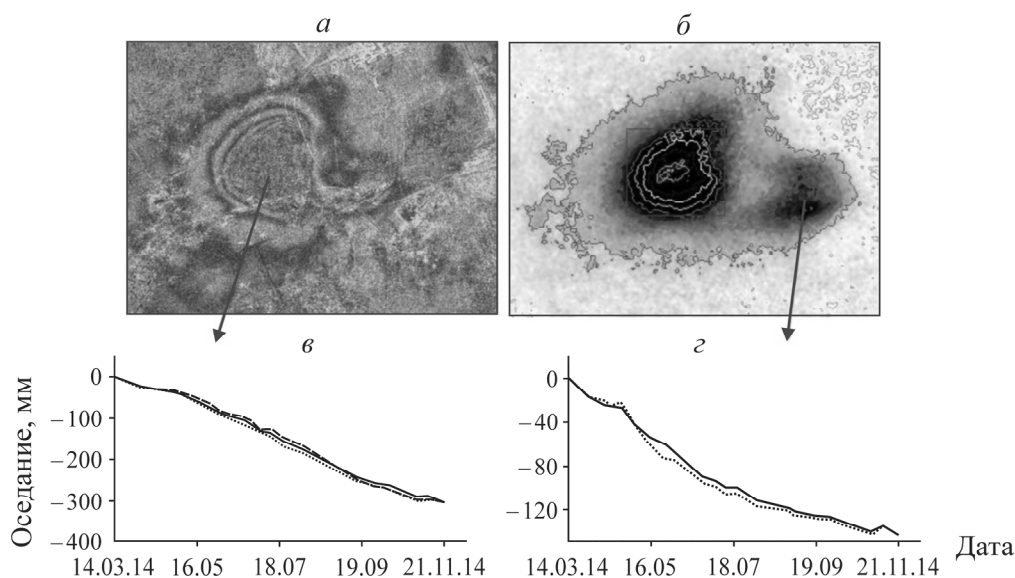


Рис. 6. Оседания земной поверхности в районе ведения горных работ на шахте им. Т. Кузембаева: *а* — интерферограмма оседаний шахты; *б* — построение горизонталей в районах мульд оседаний; *в, з* — графики сдвижения в точках максимального оседания первой (*в*) и второй (*з*) мульд для разных контрольных точек

Результаты обработки радарных снимков на территории шахты имени Т. Кузембаева показали, что с марта по ноябрь 2014 г. происходили интенсивные оседания в районе железнодорожного переезда и автодороги А17. По изолиниям оседаний земной поверхности установлено, что их максимальное значение за период наблюдений составило > 300 мм (рис. 6). При отработке угольного пласта К12 (пласт мощностью 5,5 м, глубина разработки > 500 м) появились две мульды оседания, соединившиеся в дальнейшем в единую мульду с размерами 700×500 м. Максимальные значения оседания земной поверхности в период наблюдения с марта по ноябрь 2014 г. составили: в мульде 1 — 320 мм, а в мульде 2 — 150 мм (рис. 6*в, з*).

Расширение зоны оседаний дневной поверхности на территории контролируемых шахт в дальнейшем может привести к разрушению автомобильной дороги, линии электропередач и технических построек.

Совмещение графиков нивелирования (рис. 7, линия 1) и полученного в результате обработки данных спутниковой радарной интерферометрии (линия 2), построенных для точки R3 профильной линии нивелирования за период наблюдения (с апреля по август 2014 г.), показало хорошую сходимость результатов измерений как во времени, так и по величинам смещений земной поверхности.

Таким образом, применение спутниковой радарной интерферометрии позволяет с достаточно высокой точностью и оперативностью предоставлять данные об оседаниях земной поверхности.

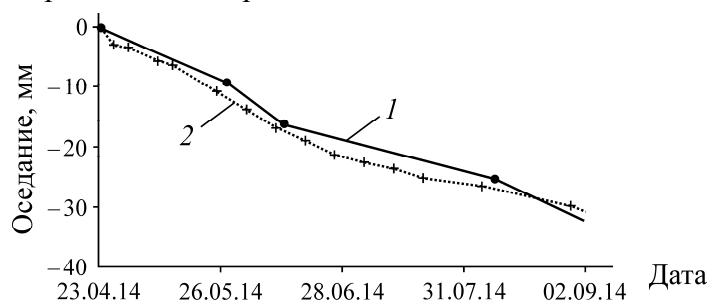


Рис. 7. Совмещенный график результатов нивелирования (1) и спутниковой радарной интерферометрии для точки R3 профильной линии нивелирования (2)

О СОЗДАНИИ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ МЕСТНОСТИ ПО СНИМКАМ COSMO-SKYMED

Чтобы проследить изменения поверхности исследуемой территории, проведено сравнение результатов радарной топографической съемки SRTM за 2000 г. с цифровой моделью местности (ЦММ), построенной на основе космоснимков за 2014 г., выполненных спутником COSMO-SkyMed в период с 15.04 по 24.11 [23]. С помощью программного комплекса ENVI построен разрез по мульде на SRTM и ЦММ. Все данные по высотам сохранены в отдельном текстовом документе и затем перенесены в Excel для построения графика (рис. 8).



Рис. 8. К построению цифровых моделей поверхности по состоянию на 2014 г. (ЦММ 2014) и ее рельефа в 2000 г. (SRTM 2000)

Приведенные на рис. 8 данные позволяют сделать вывод о том, что за последние 14 лет произошли существенные оседания земной поверхности, связанные с большим объемом добычи угля. На шахте им. Т. Куземабаева за проанализированный период времени проведена добыча угля по пласту К7 мощностью до 3.13 м и по пласту К10 мощностью до 4.5 м.

По результатам выполненного мониторинга в угольный департамент АО «АрселорМиттал Темиртау» (г. Караганда) переданы рекомендации о необходимости увеличения высоты мачты линии электропередач, которая располагалась на подработанной территории. Весной 2015 г. опоры ЛЭП были реконструированы, что позволило избежать обрыва высоковольтных проводов и предотвратить чрезвычайную ситуацию. При этом высота опоры ЛЭП, находящейся в центре мульды оседаний, увеличена на 210 см, а на границе мульды оседаний — соответственно на 70 см.

ВЫВОДЫ

В 2014 г. на подработанных территориях Карагандинского угольного бассейна реализован проект по применению спутниковой радарной интерферометрии для мониторинга деформаций земной поверхности на основе снимков, полученных с итальянского спутника COSMO-SkyMed. Для определения точности этого метода использовались соответствующие расчетные схемы и данные наземной геодезической съемки. Теоретические расчеты показали, что интенсивные оседания земной поверхности при отработке лавы 42К12-3 шахты им. Т. Куземабаева происходили в течение 8 мес с максимальным месячным оседанием до 290 мм. Прогнозное значение максимальных оседаний в мульде на период отработки по геомеханическим расчетам составляет 300 мм. Проведенная наземная геодезическая съемка по пяти сериям наблюдений зафиксировала максимальное значение оседания 360 мм, что коррелирует с результатом геотехнических расчетов. Применение спутниковой радарной интерферометрии при мониторинге сдвижения подработанных территорий земной поверхности, по сравнению с традиционными методами съемки и расчета оседаний, дает возможность осуществлять наблюдения на больших по площади территориях в реальном масштабе времени с получением наглядных результатов.

Результаты проведенной работы позволяют рекомендовать для мониторинга оседаний и деформаций земной поверхности, вызванных подземными горными работами, спутниковую радарную интерферометрию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фисенко Г. Л.** Предельные состояния горных пород вокруг выработок. — М.: Недра, 1976. — 272 с.
2. **Правила** охраны сооружения и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — Л.: ВНИМИ, 1986. — 74 с.
3. **Mozer D., Fofanov O., Yavorskiy V.** Space monitoring of man-made hazards in Central Kazakhstan, Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, International Conference, Tomsk, 2014. — 6 p.
4. **Мозер Д. В., Туякбай А. С., Гей Н. И., Нагибин А. А., Сатбергенова А. К.** Мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна с использованием спутниковой радарной интерферометрии // *Материалы науч. конгр. “Интерэкспо ГЕО-Сибирь”*. — Вып. 1. — Т. 4. — Новосибирск: СГГА, 2014. — С. 14–18.
5. **Ferretti A., Perissin D., Prati C. et al.** ERS-ENVISAT permanent scatterers geoscience and remote sensing symposium IGARSS, Proceedings Anchorage, Alaska, 2004, Vol. 2. — P. 985–988.
6. **Ferretti A., Prati C., Rocca F.** Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2000, Vol. 38, No. 5. — P. 2202–2212.
7. **Kumar V., Venkataraman G., Rao Y.** SAR interferometry and Speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009. — P. 332–335. doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417663.
8. **Hooper A., Segall P., Zebker H.** Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to volcan alcedo, Galapagos, *J. of Geophysical Research*, 2007, 112, B07407.
9. **Luzi G., Monserrat O., Moya J., Crosetto M., Gili J. A., Corominas J.** Non-interferometric GB-SAR measurement: application to the Vallcebre landslide (eastern Pyrenees, Spain), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 07/2013; 13(7). — P. 1873–1887. doi: 10.5194/nhess-13-1873-2013.
10. **Fielding E., Blom R., Goldstein R.** Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, No. 17. — P. 3215–3218.
11. **Sousa J. J., Hlavacovac I., Bakona M., Lazeckya M., Patriciof G., Guima-raesa P., Ruizi A. M., Bastosg L., Sousaa A., Benta R.** Potential of multi-temporal insar techniques for bridges and dams monitoring, *Procedia Technology*, 2014, Vol. 16. — P. 834–841.
12. **Busch W., Hebel H.-P., Schaefer M., Walter D., Baryakh A.** Control of underworked areas subsidence using the radar interferometry methods, *Mine Surveying and Subsurface Use*, 2009, No. 2(40). — P. 52–57.
13. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Гиниятуллина О. Л., Харлампенков И. Е.** Разработка сервиса облачных вычислений и обработки данных о сейсмособытиях в геомеханико-геодинамически активных угледобывающих районах Кузбасса // *ФТПРПИ*. — 2015. — № 3. — С. 162–169.
14. **Busch W.** Radarinterferometrische erfassung von Bodenbewegungen im Gebiet Berezniki (Perm, Russland). In: Meier, G.; Sroka, A.; u.a. (Hrsg.): 8. Altbergbaukolloquium, 6–8 November 2008, TU Clausthal, VGE Verlag GmbH, Essen. — P. 14–25.
15. **Ferretti A., Prati C., Rocca F.** Permanent scatterers in SARinterferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, Vol. 39, No. 1. — P. 8–20.
16. **Мансуров В. А., Сатов М. Ж., Жантуев Р. Т., Кантемиров Ю. И.** Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди (Республика Казахстан) // *Геоматика*. — 2012. — № 1. — С. 77–83.
17. **Кантемиров Ю. И.** Обзор возможностей новой версии SARscape 4.4 // *Геоматика*. — 2012. — № 1. — С. 44–45.
18. **Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю., Шутилов Р. А., Ковчавцев А. П., Танайно А. С., Ефимов В. П., Астраханцев И. Е., Гренев И. В.** О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // *ФТПРПИ*. — 2014. — № 2. — С. 3–31.
19. **Kashnikov Y. A., Musikhin V. V., Lyskov I. A.** Radar interferometry-based determination of ground surface subsidence under mineral mining, *J. of Mining Science*, 2012, Vol. 48, No. 4. — P. 649–655.
20. **Низаметдинов Ф. К., Мозер Д. В., Туякбай А. С., Гей Н. И., Каранеева А. Д.** Спутниковый радарный интерферометрический мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна // *Геоматика*. — 2014. — № 4. — С. 70–77.
21. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Счастливец Е. Л.** Исследование процессов зарастания отвалов предприятий горного производства по данным дистанционного зондирования // *ФТПРПИ*. — 2013. — № 6. — С. 3–30.
22. **Hanssen R. F.** Radar interferometry: Data interpretation and error analysis, Kluwer Academic Publish., Dordrecht, 2001. — 328 p.

Поступила в редакцию 15/III 2016