СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ РАДАРНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

В.В. Мусихин, Ю.С. Курков

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Задача создания точных цифровых моделей рельефа на территории горнодобывающих предприятий является наиболее важной и трудоемкой среди задач маркшейдерских отделов. Современные методы обработки данных космического радиолокационного зондирования позволяют получать не только сведения о сдвигениях земной поверхности, но и сведения о высотной составляющей рельефа при должной комплексной обработке интерферометрической пары. Использование материалов радарных снимков на сегодняшний день является наиболее целесообразным и экономически выгодным решением для создания цифровых моделей местности и рельефа. На кафедре МДГиГИС Пермского национального исследовательского политехнического университета было проведено исследование по вопросу создания цифровой модели рельефа промышленной территории третьего Соликамского калийного рудоуправления. В качестве исходных данных служили данные космического радиолокационного зондирования с космического аппарата TerraSAR-X, имеющиеся на кафедре для оценки деформационного состояния соликамских калийных рудников. Получение модели местности осуществлялось за счет анализа интерферограммы с большим базисом съемки и малым интервалом времени. Устранение шума данных осуществлялось при помощи трехпроходной фильтрации. Влияние базиса устранялось с помощью аффинного преобразования. Атмосферное влияние игнорировалось. Выявленные значения смещений фазы интерферограммы были пропорциональны высотному отклонению точек от средней плоскости. Полученная сетка точек подвергалась ортотрансформированию. Поскольку съемка велась в наклонном направлении, имелась зависимость планового положения точек на снимке от их высотного отклонения от средней плоскости. Точки смещались на вычисленную поправку за рельеф. Полученные результаты по созданию цифровой модели рельефа оказались достаточно точными, а сам метод построения модели, как выяснилось, имеет большой потенциал развития и распространения в маркшейдерской практике, учитывая доступность данных и алгоритм их обработки.

Ключевые слова: радиолокационная съемка, радарная интерферометрия, развертывание фазы, временная декорреляция, интерферометрическая пара, сглаживание фазы, ортотрансформирование снимка, электромагнитный шум.

GENERATION OF DIGITAL TERRAIN MODEL USING RADAR PHOTOGRAPHY

V.V. Musikhin, Iu.S. Kurkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A task of producing precise digital terrain models on the territory of mining enterprises is the most important and labor-intensive tasks of survey departments.

Modern methods of processing the data obtained by satellite radar sensing allow receiving information not only about strata movement, but also about relief elevation provided a proper interferometric pair analysis is performed. Radar image processing proves to be the most reasonable and economic solution for creation of digital terrain and relief models. At the Dept. of Mine Survey, Geodesy and Geoinformation Systems a research on producing a digital model of the relief of the industrial area of the third Solikamsk potassium mining department was conducted. The source data were provided by the TerraSAR-X satellite, available at the department for estimation of deformation conditions at Solikamsk potassium mines. The terrain model was constructed by means of an interferogram with a large observation base and short time intervals. Noise suppression was carried out by triple filtration. The base effects were eliminated by affine transformation, atmospheric influence ignored. The values of phase shift obtained were proportional to the point altitude declination from the mean plane. The point grid was then subjected to ortho-transformation. Since photography was performed from an oblique position, a dependence took place of reference points position on their altitude declination from the mean plane. The points were displaced using the calculated topographic correction. The results of producing a digital relief model were rather precise, and the method of a model design turned out to possess a great potential for development and application in mine surveying, in consideration of data availability and the algorithm of their processing.

Keywords: radar sensing, radar interferometry, phase unwrapping, time decorrelation, interferometric pair, phase smoothing, image ortho-transformation, electromagnetic noise.

Введение

В настоящее время на горнодобывающих предприятиях требуется внедрение новых технологий для создания цифровых моделей местности и рельефа. С учетом влияния ряда факторов возможно построение интерферометрической модели местности, которая будет обладать достаточной точностью и детальностью. Данная модель позволит решать ряд крупных маркшейдерских задач: определение объемов добытого полезного ископаемого, наблюдение за смещением земной поверхности [1], ортотрансформирование космоснимков на данную территорию, также решается ряд задач, касающихся использования инструментальных измерений, что позволит сэкономить время и затраты. Интерес к данной работе связан с подробным описанием алгоритма создания интерферометрической модели местности [2–4]. Для создания интерферометрической модели местности была использована одна пара снимков космического аппарата TerraSAR-X, имеющихся на кафедре МДГиГИС ПНИПУ. Выбранная интерферометрическая пара снимков обладала наилучшими показателями для создания трехмерной модели.

Особенности создания цифровой модели местности (рельефа)

Радиолокационная съемка широко применяется в решении прикладных задач: обновлении существующих топографических карт, проведении всепогодного мониторинга различного характера, наблюдении за смещением поверхности земли. При должной комплексной обработке материалы радиолокационной съемки на сегодняшний день могут являться наиболее целесообразным и экономически выгодным решением для создания цифровых моделей местности и рельефа.

Традиционно цифровые модели местности или рельефа создаются при помощи геодезических методов, лидарной

съемки, аэрофотограмметрии и векторизации карт.

Цифровая модель создается геодезическими методами, как правило, при помощи тахеометрической съемки, за счет которой составляются топографические планы. Полученные данные о топографии местности будут являться аналогом цифровой модели местности. Достоинства такого метода получения модели высот заключаются в высокой точности съемки. Недостатки связаны с высокими трудовыми затратами и длительностью процесса получения результатов.

К геодезическим методам также можно отнести наземное лазерное сканирование. Лазерное сканирование позволяет создать цифровую модель окружающего пространства, представив его набором точек с пространственными координатами. Преимущество лазерного сканирования перед тахеометрической съемкой заключается в более высокой скорости съемки (тысячи измерений в секунду), высокой плотности измерений (до нескольких десятков точек на 1 см^2) [5]. Недостаток заключается в сложности обработки больших массивов данных.

Аэрофотограмметрический метод основан на определении размеров, формы и положения объектов по их изображениям на фотоснимках с летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, аэростатов и т.д.). Для определения координат используют аналитический метод (прямая или обратная геодезические засечки), а также аналоговый метод (использование фотограмметрического прибора – стереографа). Достоинствами является высокая точность определения координат больших территорий местности, недостатком – большие материальные затраты на выполнение летно-съёмочных работ.

Лидарная съемка выполняется с летательных аппаратов. Принцип заключается в посылке импульса от лазерного передатчика к удаленным объектам, регистрации приемником и обработке отраженного сигнала. Достоинство – высокая сте-

пень четкости получаемых изображений в мелких масштабах. Недостаток тот же, что и при аэрофотосъемке, – большие материальные затраты на выполнение летно-съемочных работ.

Векторизацию существующих растровых карт можно использовать как метод для получения цифровых моделей рельефа. Так, например, продукт MapInfo позволяет создавать цифровую модель местности и рельефа путем оцифрованных изолиний из топографических карт. Недостатки заключаются в трудоемкости и недостаточной точности моделирования, а также в недостаточной актуальности получаемой модели. Достоинством является простота процесса получения модели.

Построение модели местности на основе данных радиолокационной съемки

Получение цифровой модели на основе радиолокационной съемки базируется на использовании фазовой компоненты радиолокационного сигнала, отраженного от поверхности Земли [6–8]. Точность выявления высотной компоненты может составлять меньше метра, причем в зависимости от характера местности и уровня шумов сигнала она может меняться. Для равнинной поверхности с использованием интерферограммы высокого разрешения точность может достигать несколько десятков сантиметров [9].

Для создания цифровой модели местности (ЦММ) были поставлены следующие задачи: выбор имеющихся сцен исходя из условий для создания моделей; построение интерферограммы на основе выбранных сцен; развертывание фазы интерферограммы; применение низкочастотных фильтров для сглаживания фазы; вычисление высотной составляющей точек; вычисление плановых поправок за рельеф; непосредственное построение ЦММ.

В качестве исходного материала для работы служили данные с космического

аппарата TerraSAR-X, имеющиеся на кафедре маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем ПНИПУ [10–12]. При получении сцен в ходе космического зондирования электромагнитные волны отражались от поверхности наземных объектов. Зондирование осуществлялось в наклонном правом боковом направлении. Базис между двумя изображениями и качество интерферометрической фазы являются определяющими для точности результирующей ЦММ. Основные технические характеристики орбиты спутника приведены ниже (табл. 1) [13]. Космический аппарат TerraSAR-X работает в диапазоне X с длиной волны 3,1 см.

Основные параметры КА TerraSAR-X:

скорость вращения на орбите...	7,5 км/с;
периодичность съемки.....	11 дней;
наклонение орбиты	97°44';
высота орбиты над	
экватором	514,8 км;
изменение высоты	
орбиты	505–533 км.

Съемка местности велась на промышленной площадке ОАО «Уралкалий» третьего Соликамского калийного рудоправления. ОАО «Уралкалий» является одним из крупнейших производителей калийного удобрения (22 % от запасов общемировых). Запасы калийной залежи рассчитаны на 197 лет отработки. Для выемки применяется закрытый способ разработки, а это значит, что проблема мониторинга деформаций земной поверхности является весьма актуальной для близлежащих промышленных и гражданских объектов.

Описание проделанной работы

Для создания более четкой модели выбралась пара снимков с наибольшей базовой линией и минимальным временным промежутком [14] (рис. 1).

Как видно на рис. 1, снимки от 01.09.2011 и 12.09.2011 (промежуток

Рис. 1. Выбор сцен из исходных снимков (отмечен красным цветом)

составил 11 дней) подходили под заданные условия, и данная пара снимков подлежала дальнейшему анализу.

Для определения дифференциальной интерферограммы необходимо было внести поправки на шум, атмосферу, базис, оседания, рельеф [3]:

$$\Phi_{\text{интерф}} = \Phi_{\text{рельеф}} + \Phi_{\text{осед}} + \Phi_{\text{базис}} + \Phi_{\text{атмосф}} + \Phi_{\text{шум}}. \quad (1)$$

Поправки на электромагнитный шум $\Phi_{\text{шум}}$ учитывались при производстве сглаживания фазы. В результате эта поправка имела минимальное значение и не влияла на дальнейший расчет. Поправка на атмосферу $\Phi_{\text{атмосф}}$ не учитывалась, однако исключить ее влияние полностью на основе двух сцен невозможно [15]. Поправка на базис $\Phi_{\text{базис}}$ устраняется путем «наклона» конечных интерферограмм. Поправки на оседание $\Phi_{\text{осед}}$ не принимались во внимание ввиду малого интервала времени съемки (11 дней), за который не произошли существенные подвижки земной поверхности. В результате была получена следующая формула поправок:

$$\Phi_{\text{интерф}} = \Phi_{\text{рельеф}}, \quad (2)$$

т.е. конечная интерферограмма содержала только рельефную составляющую.

Для построения интерферограммы необходимо было определить значение фазы в каждом пикселе. Например, в точке P (рис. 2) имеется значение фазы φ_1 и φ_2 в результате двух съемок. Их разность соответствует изменению фазы ($\Delta\varphi$), которая равна разности наклонной высоты зондирования (ΔR):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = R_1 - R_2 = \Delta R. \quad (3)$$

Следующий этап – развертывание фазы, т.е. определение смещения одной точки относительно другой в пределах

Рис. 2. Расположение КА в момент съемок: B – базис съемки; Q_1 и Q_2 – углы наклона зондирования, R_1 и R_2 – наклонная высота съемки

Рис. 3. Принцип развертывания фазы в точке.
Синяя линия – неразвернутая фаза,
красная – развернутая фаза

величины, превышающей длину волны. По имеющемуся чередованию фаз восстанавливаются порядки периодов относительно начала снимка (рис. 3), за счет чего определяются истинные величины смещений h в интерферограмме.

Следующим этапом устранялось влияние базиса съемки на интерферограм-

ме. Путем «наклона» конечных интерферограмм вводилась поправка на базис в каждой точке. Для этого вычислялось влияние базиса на концах снимка и рассчитывался коэффициент, который представлял собой уклон между исходными сценами в интерферограмме. Уклон принимался одинаковым для всего снимка. Конечное преобразование интерферограммы сводилось к аффинному преобразованию сетки интерферограммы (рис. 4).

Далее было необходимо определить высотные составляющие каждой точки. Поскольку съемка производилась с орбиты, то обрабатываемое изображение имело свойство перспективного изображения в направлении дальности, т.е. каждый пиксель изображения должен был быть смещен по дальности на величину, пропорциональную его высотному отклонению от нулевой опорной точки (рис. 5). Такая операция называется в фотограмметрии ортотрансформированием.

Рис. 4. Результат применения сглаживающих фильтров для участков солеотвала СКРУ-3 и городской территории Соликамска

Рис. 5. Ортотрансформирование снимка

И заключительным шагом являлось создание цифровой модели местности с помощью программы MapInfo.

Полученные результаты

Для сравнения интерферометрических снимков участка застроенной городской территории с участком промышленной площадки СКРУ-3 производился дополнительный анализ. На застроенной территории видно, что детальность изображения была потеряна вследствие применения сглаживающих фильтров. Немного лучше ситуация получилась на модели солеотвала, на которой контуры зданий и объекты на снимке отображались детальнее (рис. 6). Для таких объектов, как солеотвал, детальность получилась достаточной.

Построенная цифровая модель местности по данным радарной интерферометрической съемки сравнивается с моделью SRTM. SRTM – цифровая модель местности, которая имеется в свободном доступе [16, 17]. На рис. 7 видно, что детальность распознавания объектов на модели SRTM во много раз ниже, чем на полученной интерферометрической модели.

Заключение

Построенная модель местности на основе радиолокационной интерферометрической съемки промышленной площадки СКРУ-3 является полностью трехмерным изображением. Данный метод построения цифровой модели местности имеет большой потенциал в марк-

а

б

Рис. 6. Модель солеотвала: а – участок промышленной площадки СКРУ-3;
б – участок г. Соликамска

Рис. 7. Сравнение модели SRTM (вверху) с моделью на основе радиолокационной интерферометрической съемки (внизу)

шейдерской практике, так как имеет высокую точность, возможность определения любых геометрических параметров рельефа и может использоваться для определения объемов добытого полезного ископаемого, наблюдения за смещением земной поверхности, ор-

тотрансформирования космоснимков на данную территорию, а также уменьшить ряд задач, касающихся использования инструментальных измерений, что позволит сократить время и затраты на производство полевых маркшейдерских работ.

Список литературы

1. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry / U. Wegmuller, D. Walter, V. Spreckels, C. Werner // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 48, № 2. – P. 895–904.
2. Филатов А.В. Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Барнаул, 2009. – 180 с.
3. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry / T. Strozzi, U. Wegmuller, H.R. Keusen, K. Graf, A. Wiesmann // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2006. – Vol. 3, № 1. – P. 15–18.
4. Goldstein A.H., Werner C. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // Radio Sci. – 1988. – Vol. 23, № 4. – P. 713–720.
5. Кривенко А.А., Богданец Е.С., Мусихин В.В. Пример создания цифровой геометрической модели существующего архитектурного объекта методом лазерного сканирования // Геопрофи. – М., 2007. – № 8. – С. 30–32.
6. Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования: материалы конф. – 2006. – С. 179–183.
7. Кривенко А.А., Кашников Ю.А. Анализ оседаний подработанной территории г. Березники методом интерферометрии постоянных отражателей // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 8.
8. Кривенко А.А., Кашников Ю.А. Определение оседаний земной поверхности при разработке газоконденсатных месторождений по результатам интерферометрической обработки радарных съемок // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 3.
9. Hanssen R. Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis. – New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001. – Vol. 2. – P. 66–69.
10. Мусихин В.В. Принципы повышения надежности сведений об оседаниях земной поверхности при интерферометрической обработке радарных данных // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 1. – С. 53–58.
11. Мусихин В.В. Использование радарной интерферометрии для мониторинга процессов оседаний ВКМКС // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: сб. ст. по материалам регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2012. – С. 172–174.
12. Мусихин В.В. Подход к интерпретации результатов радиолокационной космической съемки со спутника TerraSAR-X при определении оседаний на месторождениях // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 4. – С. 40–44.
13. Александров М.Ю. Общие принципы и продукция радиолокационного комплекса TerraSAR-X // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 51–55.
14. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений AlosPalsar / Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, М.А. Болсуновский // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 31–34.
15. A review over the effects of atmosphere on InSAR products / S. Adham Khiabani, M.J. Valadan Zouj, M.R. Mobasheri, M. Dehghani, M. Varshosaz / Geodesy and Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University, № 1346.
16. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // Геоматика. – 2011. – № 3. – С. 40–46.

17. Мусихин В.В., Лысков И.А. Применение радарной интерферометрии для определения деформаций трубопроводных систем в условиях тундры // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 103–110.

References

1. Wegmuller U., Walter D., Spreckels V., Werner C. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, vol. 48, no. 2, pp. 895–904.

2. Filatov A.V. Metod obrabotki kompleksnykh radiolokatsionnykh interferogramm v usloviakh vysokoi vremennoi dekorrelatsii [Method of processing the complex radar interferograms in conditions of high time decorrelation]. Thesis of the candidate of physics and mathematics sciences. Barnaul, 2009.

3. Strozzi T., Wegmuller U., Keusen H.R., Graf K., Wiesmann A. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 15–18.

4. Goldstein A.H., Werner C. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping *Radio Sci.*, 1988, vol. 23, no. 4, pp. 713–720.

5. Krivenko A.A., Bogdanets E.S., Musikhin V.V. Primer sozdaniia tsifrovoy geometricheskoi modeli sushchestvuiushchego arkhitekturnogo ob"ekta metodom lazernogo skanirovaniia [Example of making digital geometric model of the real-world construction using laser scanning method]. *Geoprofi*, Moscow, 2007, no. 8, pp. 30–32.

6. Evtushkin A.V., Filatov A.V. Obnaruzhenie podvizhek zemnoi poverkhnosti v zone intensivnoi nefte dobychi metodami radarnoi interferometrii [Detection of earth surface movement in the area of intensive oil extraction using radar interferometry]. *Materialy konferentsii "Obratnye zadachi i informatsionnye tekhnologii ratsional'nogo prirodopol'zovaniia"*, 2006, pp. 179–183.

7. Krivenko A.A., Kashnikov Iu.A. Analiz osedanii podrabotannoi territorii goroda Berezniki metodom interferometrii postoiannykh otrazhatelei [Analysis of the subsided area in Berezniki by persistent scatterer interferometry]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2009, no. 8.

8. Krivenko A.A., Kashnikov Iu.A. Opredelenie osedanii zemnoi poverkhnosti pri razrabotke gazokondensatnykh mestorozhdenii po rezul'tatam interferometricheskoi obrabotki radarnykh s"emok [Estimation of surface subsidence in developing gas-condensate deposits using interferometric processing of radar sensing]. *Marksheiderskii vestnik*, 2009, no. 3.

9. Hanssen R. Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001, vol. 2, pp. 66–69.

10. Musikhin V.V. Printsipy povysheniia nadezhnosti svedenii ob osedaniakh zemnoi poverkhnosti pri interferometricheskoi obrabotke radarnykh dannykh [Principles of improving reliability of data on earth surface subsidence in interferometric processing of radar data]. *Marksheiderskii vestnik*, 2012, no. 1, pp. 53–58.

11. Musikhin V.V. Ispol'zovanie radarnoi interferometrii dlia monitoringa protsessov osedanii Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievyykh solei [Application of radar interferometry to monitor subsidence processes in the Verkhnekamskoye field of potassium and magnesium salts]. *Sbornik statei po materialam regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala"*. Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2012, pp. 172–174.

12. Musikhin V.V. Podkhod k interpretatsii rezul'tatov radiolokatsionnoi kosmicheskoi s"emki so sputnika TerraSAR-X pri opredelenii osedanii na mestorozhdeniiakh [Approach to interpreting results of radar imaging by TerraSAR-X satellite in evaluating subsidence at deposits]. *Marksheideriia i nedropol'zovanie*, 2012, no. 4, pp. 40–44.

13. Aleksandrov M.Iu. Obshchie printsipy i produktsiia radiolokatsionnogo kompleksa TerraSAR-X [General principles and output of radar system TerraSAR-X]. *Geoprofi*, 2008, no. 1, pp. 51–55.

14. Baranov Iu.B., Kantemirov Iu.I., Kiselevskii E.V., Bolsunovskii M.A. Postroenie TsMR po rezul'tatam interferometricheskoi obrabotki radiolokatsionnykh izobrazhenii AlosPalsar [Building digital relief models using results of interferometric processing of AlosPalsar radar images]. *Geoprofi*, 2008, no. 1, pp. 31–34.

15. Adham Khiabani S., Valadan Zouj M.J., Mobasheri M.R., Dehghani M., Varshosaz M. A Review Over The Effects Of Atmosphere On InSAR Products. Geodesy and Geomatics Engineering Faculty, K.N. Toosi University, no. 1346.

16. On'kov I.V. Otsenka tochnosti vysot SRTM dlia tselei ortotransformirovaniia kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniia [Assessment of SRTM altitude precision for ortho-transformation of high-resolution space images]. Geomatika, 2011, no. 3, pp. 40–46.

17. Musikhin V.V., Lyskov I.A. Primenenie radarnoi interferometrii dlia opredeleniia deformatsii truboprovodnykh sistem v usloviakh tundry [Application of the radar interferometer for detection of the pipe range straining systems in the fenland conditions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 4, pp. 103–110.

Об авторах

Мусихин Василий Владимирович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: basil2@list.ru).

Курков Юрий Сергеевич (Пермь, Россия) – Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: 89194963466@mail.ru).

About the authors

Vasilii V. Musikhin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mine Survey, Geodesy and Geoinformation Systems, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: basil2@list.ru).

Iurii S. Kurkov (Perm, Russian Federation) – Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: 89194963466@mail.ru).

Получено 6.11.2014