ПРИМЕНЕНИЕ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ТУНДРЫ

В.В. Мусихин, И.А. Лысков

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Изложены основные результаты опыта кафедры МДГиГИС в области мониторинга нефтепроводных систем и инженерных сооружений в условиях отсутствия естественных отражательных поверхностей. Дан ряд рекомендаций по производству мониторинга газопроводов в условиях Крайнего Севера.

Коротко описаны особенности производства интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования земли на примере трубопроводных систем ООО «Нарьянмарнефтегаз» Ненецкого автономного округа. Приведены особенности производства интерферометрической обработки данных, касающихся идентификации точек нефтепровода и интерпретации результатов. Для достижения высокостойких результатов был применен метод строго последовательной компоновки интерферограмм, позволяющий исключить ошибку развертывания фазы. Одним из результатов работы стало обоснование использования радарной интерферометрии для оценки геодинамически опасных районов.

Полученные результаты были оценены субъективно с помощью среднеквадратичного отклонения остатков фаз и невязок в решении интерферограмм. Благодаря данным высокого разрешения космического аппарата «TerraSAR-X» удалось выделить точки для анализа процессов оседаний на теле нефтепровода.

На основе полученных результатов изложены выводы для производства работ по радарной интерферометрии в условиях тундры. Главный вывод работы наряду с возможностью анализа деформаций трубопроводных систем – вывод о возможности идентификации мелких объектов нефтепромысла для анализа деформационных процессов. Также дан ряд рекомендаций, касающихся улучшения качества результатов интерферометрической обработки данных на аналогичных объектах, и на основе опыта работ предложено определять горизонтальные смещения наземных объектов с использованием данных космической радиолокационной съемки.

Ключевые слова: радиолокационная съемка, радарная интерферометрия, оседания, смещения, деформации, точечный анализ, развертывание фазы, точность определения оседаний, деформации нефтегазопровода, мониторинг деформационных процессов.

APPLICATION OF THE RADAR INTERFEROMETER FOR DETECTION OF THE PIPE RANGE STRAINING SYSTEMS IN THE FENLAND CONDITIONS

V.V. Musikhin, I.A. Lyskov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The main results of the mining surveying, geodesy and geoinformation systems department experience in monitoring oil pipeline systems and engineering structures in the absence of natural reflective surfaces. A number of recommendations for monitoring gas production in the Far North.

Briefly describes the features of the production of the interferometric data space radar sensing of the earth as an example of pipeline systems LLC "Naryanmarneftegaz" Nenets Autonomous District. Particularly given the production of the interferometric data relating to the identification of points of the pipeline and the interpretation of results. In order to achieve highly reliable results, the method has been rigorously consistent layout interference, allowing error to exclude the deployment phase. One of the results of the study was the use of radar interferometry to assess the geodynamic hazardous areas.

Instruction results were evaluated subjectively using the standard deviation of the residuals and the residual phase in the solution of the interferograms. Due to these high-resolution spacecraft «TerraSAR-X» it was possible to allocate points for the analysis of subsidence processes in the body of the pipeline. Based on the results presented findings for production work on radar interferometry in the tundra are given.

The main conclusion of the work along with the possibility of deformation analysis of pipeline systems is about the possibility of identifying small objects of the oil for analysis of deformation processes. Also, a number of recommendations for improving the quality of the results of interferometric data on similar objects is given, and based on the experience of work it is proposed to determine the horizontal displacement of surface facilities using data from space radar imagery.

Keywords: radar imagery, radar interferometry, subsidence, displacement, strain, pressure point analysis, the deployment phase, the accuracy of subsidence, deformation of the oil and gas pipeline, the monitoring of deformation processes.

Введение

В настоящее время интенсивное освоение месторождений северной части России требует применения новых технологий в обустройстве и добыче углеводородов из недр. Трубопроводные системы на данных территориях имеют надземное заложение, сконструированное на свайных опорах. Учитывая наличие на данных территориях подземного слоя вечной мерзлоты, при строительстве на такой поверхности применяют технологии, позволяющие обеспечивать надежное устойчивое состояние сооружений, к которым относятся и такие опасные, как нефтегазопроводы. Тем не менее, учитывая потенциальную опасность таких сооружений, эксплуатируемых порой в экстремальных погодных условиях, требуется постоянный мониторинг их положения для выявления незначительных вертикальных и горизонтальных смещений, которые в свою очередь могут повлечь опасные деформации сооружений и порывы трубопроводов.

Сотрудниками кафедры «Маркшейдерское дело, геодезия и геоинформационные системы» (МДГиГИС) в 2011 г. была выполнена работа по наблюдению за осадками и деформациями трубопроводных систем ООО «Нарьянмарнефтегаз» по данным интерферометрических радарных съемок. Целью данной работы являлось обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации напорного нефтепровода ООО «Нарьянмарнефтегаз» за счет применения дистанционного космического радиолокационного мониторинга смещений земной поверхности [1] и деформаций нефтепровода. Особый интерес к данной работе заключался, помимо прочего, в доказательстве возможности использования данных радиолокационного зондирования высокого разрешения для выделения оседаний на таких небольших объектах, как труба нефтепровода.

Для мониторинга участков нефтепровода к данному этапу была произведена радарная съемка двух зон интереса в количестве пяти сцен на каждую зону КА TerraSAR-X.

Идентификация точек нефтепровода

В работе по определению оседаний отдельных объектов использовался метод точечного анализа постоянных отражателей [2]. Суть данного метода заключалась в том, что анализу подвергался ограниченный набор точек на земной поверхности, где имелись наивысшая достоверность и надежность данных [3, 4]. Достоверность стабильности положения точек во времени оценивалась на корегистрированных сценах по трем показателям: изменение интенсивности отраженного сигнала на сценах, отношение шума к сигналу, минимальная абсолютная яркость точки [5, 6].

По предельным значениям вышеперечисленных показателей было набрано несколько тысяч субъективно достоверных точек вдоль трассы нефтепровода, в числе которых также присутствовали точки, определенные на опорах ЛЭП (рис. 1).

По вышеописанным критериям на захваченной съемкой территории ЦПС Южное-Хыльчую было выделено более 13 000 для оценки процессов оседаний (см. рис. 1).

Решение проблемы развертывания фазы. Точность расчетов

При производстве точечного интерферометрического анализа на сегодняшний день одной из важных проблем является проблема ошибки развертывания фазы [7], т.е. проблема правильного определения смещения одной точки относительно другой в пределах длины волны исходных данных. До сих пор такая проблема решалась путем создания избыточного количества интерферограмм [7–9], ошибка развертывания в этом случае не устранялась, а только снижалась, и значение ее было неопределимо. Кафедрой МДГиГИС разработан подход, позволяющий оценить и исключить ошибки развертывания фазы [10]. Точность полученных величин сме-

Рис. 1. Точки, отобранные для анализа

Рис. 2. Тренд оседаний (на примере одной точки):
— исходный график; — линейная регрессия

щений фаз при таком подходе может быть доведена до 1–2 мм для больших территорий и менее 1 мм для небольших территорий (например, ЦПС). Поскольку в данной работе использовалось всего пять сцен, ошибка развертывания фазы находилась в пределах 1–2 см.

Интерпретация результатов в точках

Для получения тренда оседаний в точках была использована аппроксимированная линейная функция, подобранная по методу наименьших квадратов. Использование данного вида аппроксимации результатов было продиктовано минимальным количеством исходных данных (по 5 сцен на каждый участок), что не позволило построить функцию оседаний земной поверхности более сложного вида и проследить историю оседаний точек во времени [11].

Результаты определения оседаний

Результатами проделанной работы по радарному интерферометрическому мониторингу являлись карты оседаний земной поверхности (может быть представ-

Рис. 3. Карта оседаний земной поверхности за период с 18.11.2010 по 16.11.2011 г. по результатам интерферометрической обработки радарных данных на территории 3а и 3б участков геодинамического риска

Рис. 4. Карта оседаний земной поверхности за период с 12.11.2010 по 10.11.2011 г. по результатам интерферометрической обработки радарных данных на территории участков ЦПС Южное-Хыльчуню

лена карта с указанием оседаний в точках (рис. 3, 4) либо может быть построена интерполированная карта оседаний в изолиниях) и профили оседаний, построенные по трассам нефтепровода с указанием точности выполненных расчетов (рис. 5).

Возможность применения радарной интерферометрии в условиях слабо застроенной тундры

Главный вывод проделанной работы заключался в том, что самый важный этап точечного анализа радарной интерферометрии по идентификации точек наземного нефтепровода прошел абсолютно успешно. Ранее попытки оценки оседаний на теле нефтепровода с использованием данных ENVISAT завершались неудачей после неуспешного выделения трубопровода на сценах. В нашей работе

Рис. 5. График вертикальных сдвижений земной поверхности на территории 1-й и 2-й зоны геодинамического риска

использовались данные с разрешением 1,2 м, поэтому можно подытожить, что выделение точек нефтепровода для точечного дистанционного интерферометрического анализа может быть осуществлено с использованием исходных данных высокого планового разрешения.

Цикличность радарной съемки и проблема декорреляции из-за снежного покрова

Как показал опыт проделанной работы, в которой использовались далеко не идеальные интервалы съемок (интервалы иногда равнялись 1 году, а иногда 11 дням), влияние проблемы утраты когерентных точек на сценах с увеличением интервала съемки для точечного подхода практически не проявилось. Действительно, когерентность точки означает ее стабильное положение на двух сценах (стабильность оценивается по интенсивности отраженного сигнала и по ее фазе), и если для расчетов принимались точки нефтепровода или опор ЛЭП, то когерентность в принципе не могла быть потеряна даже для очень большого интервала, что и было показано в описанной работе.

Перед обработкой данных описанной работы возникали опасения, что ноябрьские сцены не смогут объективно отражать состояние положения нефтепровода [12]. Однако результаты проделанной работы показали обратное. Отсутствие влияния снежного покрова на ноябрьских сценах было обусловлено скорее всего тем, что отображенные для интерферомет-

Рис. 6. Дифференциальная интерферограмма орбиты № 144 (участки За, 36) за период с 11.09.2011 по 03.10.2011 г. (линией показана примерная ось нефтепровода, отображены наклонные смещения, включающие атмосферное влияние на задержку фазы)

рического анализа точки находились на возвышении над землей, и снег на них, несмотря на установившийся покров, не задерживался (речь идет о точках на верхней части трубы нефтепровода, опорах ЛЭП). Поэтому для мониторинга подобных объектов сезон наблюдений может быть увеличен на 1–2 месяца относительно бесснежного времени года.

Декорреляция тундры и оценка зон геодинамического риска

При построении первичных интерферограмм по данной работе ожидалось, что изображение чередования разницы волны на них будет случайным, т.е. тундра как отражающая поверхность не способна будет отобразить вертикальные смещения земной поверхности [13]. Однако на ряде интерферограмм, которые были построены по малым интервалам (11, 22 дня) в бесснежное время года, были получены весьма интересные результаты (рис. 6).

На некоторых интерферограммах была зафиксирована исключительная корреляция. Оседания земной поверхности, полученные на данных интерферограммах, не могли быть отнесены к ошибкам в фазе, обусловленным атмосферным влиянием [14], так как зафиксированные зоны оседаний находились именно в местах, где они, исходя из гидрографической картины, должны находиться (рис. 6).

Установленная исключительная корреляция поверхности тундры может быть практически использована для предварительного выявления опасных мест по геодинамической активности. Результаты, полученные при таком обследовании территории, будут иметь высокую надежность относительно лениamentного анализа. Цикличность съемки для такой цели должна быть минимальной (11, 22 дня для данного КА), сезон съемки должен совпадать с бесснежным временем года, количество циклов съемки должно быть не менее 6–8 сцен.

Недостатки точечного подхода при анализе

Недостатком описанного подхода при обработке данных может являться неправильное или неточное определение базисов съемки на этапе их уточнения. В этом случае, как показал опыт использования данных TerraSAR-X, этап уточнения базисов может быть опущен, так как исходные данные о положении орбит съемок являются достаточно точными. Ошибка, возникающая в точке при определении ее вертикальных смещений, ликвидируется при последовательном решении, а ее одномоментное влияние устраняется с помощью сглаживания графика оседаний множества измерений.

Доведение качества определения оседаний до объективного предела

Недостаточное количество точек на нефтепроводе описанной работы не позволило выделить локальные оседания и выпучивания с дециметровыми величинами. Данный недостаток может быть устранен с помощью изменения предельных величин при отборе достоверных точек (в этом случае количество исходных сцен должно быть увеличено до 10–15), либо данный недостаток может быть устранен путем намеренного добавления точек. Разрешение данных КА TerraSAR-X позволяет отследить вертикальные смещения, определяемые как локальные. В результате опи-

санного улучшения точечного анализа достоверность определяемых величин вертикальных смещений может быть принципиально объективной.

Точность, оцениваемая объективно и субъективно, при помощи невязок интерферограмм или среднеквадратичных отклонений, при избыточном количестве исходных данных только увеличивается. Оптимальное количество исходных сцен для достижения упомянутых точностей на трассе нефтепровода – 15, минимальное – 10.

Рекомендации по производству работ, аналогичных описанной. Определение зон геодинамического риска

Перед строительством трасс трубопроводов в условиях тундры необходимо обследование территории на предмет выявления зон повышенной геодинамической активности. Методика радарной интерферометрии, как было описано выше, позволяет произвести данный вид работ на протяжении всей трассы газопровода.

Для производства данного обследования необходимо будет произвести съемку всех участков будущей трассы газопровода 6–7 раз в бесснежный период года с интервалом съемки в 22 дня.

Определение вертикальных и горизонтальных смещений газопровода

Мониторингу на предмет возникновения опасных деформаций будут подвержены зоны, определенные как геодинамически опасные. На данных зонах по трассе будущих трубопроводов, учитывая результаты работы ПНИПУ для ООО «Нарьянмарнефтегаз» по мониторингу трубопроводных систем методом радарной интерферометрии, возможно будет определить вертикальные оседания с точностью, превышающей точность наземных измерений.

Учитывая то, что изначально при помощи метода радарной интерферометрии измеряются наклонные смещения (относи-

тельно направления полета КА), отделить горизонтальную компоненту в зафиксированных смещениях практически возможно в случае использования дополнительной радиолокационной съемки с противоположной орбиты КА. Однозначное установление направленности вектора смещений тела трубопровода будет возможно при совместной обработке достаточного количества сцен разных орбит КА, покрывающих одну территорию. Так, разница в выявленных вертикальных смещениях двух орбит будет означать проявления горизонтальных смещений.

Заключение

Использование радарной интерферометрии в условиях тундры может иметь успех в случае правильного подхода к обработке данных. Преимущества данно-

го вида мониторинга процессов оседаний заключаются в возможности оценки деформаций дистанционными методами, не прибегая к полевым работам. Основные выводы из проделанной работы помогут усовершенствовать методику радарной интерферометрии, доведя ее результаты до объективного предела, и полностью использовать потенциал точности, заложенный в спутниковых данных. В работе использовался принцип, позволяющий оценивать и исключить ошибки развертывания фазы, которые до сих пор не оценивались, а лишь уменьшалась вероятность их возникновения.

Будущие результаты по определению оседаний земной поверхности земли с учетом указанных особенностей могут иметь миллиметровую точность и абсолютную достоверность.

Список литературы

1. Hanssen R. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow : Kluwer Academic Publishers, 2001. – Vol. 2. – С. 69–70.
2. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry / T. Strozzi, U. Wegmuller, H.R. Keusen, K. Graf, A. Wiesmann // *Geosci. Remote Sens. Lett: IEEE*. – 2006. – 1, Т. 3. – Р. 15–18.
3. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов / Ю.Б. Баранов, Ю.И. Кантемиров, Е.В. Киселевский, С.Э. Никифоров [и др.] // *Недропользование – XXI век*. – 2009. – № 1. – С. 60–64.
4. Кашников Ю.А., Мусихин В.В., Лысков И.А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии // *Вестник ПГТУ*. – 2010. – № 5. – С. 11–17.
5. Кривенко А.А., Кашников Ю.А. Определение оседаний земной поверхности при разработке газоконденсатных месторождений по результатам интерферометрической обработки радарных съемок // *Маркшейдерский вестник*. – 2009. – № 3. – С. 44–49.
6. Определение зон сдвижений на подработанной территории Верхне-Камского месторождения калийных солей (ВКМКС) по результатам интерферометрической обработки радарных данных / В.В. Мусихин, И.А. Лысков, Ю.А. Кашников, М.В. Гилев // *Маркшейдерский вестник*. – 2011. – № 3. – С. 34–39.
7. Кантемиров Ю.И. Космический мониторинг смещений земной поверхности на месторождениях Кандым и Гумбулак Республики Узбекистан по данным космических радарных съемок // *Геоматика*. – 2011. – № 10. – С. 72–80.
8. Елизаветин И.В., Шувалов Р.И., Буш В.А. Принципы и методы радиолокационной съемки для целей формирования цифровой модели местности // *Геодезия и картография*. – 2009. – № 1. – С. 39–45.
9. The displacement field of the Landers earthquake / D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, T. Rabaute // *Nature*. – 1993. – 364. – Р. 138–142.
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. Nonuniform ground motion monitoring with TerraSAR-X persistent scatter interferometry / U. Wegmuller, D. Walter, V. Spreckels, C. Werner // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. [s.l.]: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – 2, Vol. 48. – P. 895–904.
12. Goldstein A.H., Werner C. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // *Radio Sci.* – 1988. – 4, T. 23. – P. 713–720.
13. Филатов А.В. Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: дис. д-ра техн. наук. – Барнаул, 2009. – С. 13–15.
14. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration / Z. Li, E. Fielding, P. Cross, J. Muller // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – 110. – P. B03410.
15. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Сравнение некоторых современных методов разворота разности фаз в радиолокационной интерферометрии // *Радиотехника и электроника*. – 2003. – Т. 48, № 10. – С. 120–121.

References

1. Hanssen R. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2001, Vol. 2, pp. 69–70.
2. Strozzi T., Wegmuller U., Keusen H.R., Graf K., Wiesmann A. Analysis of the terrain displacement along a funicular by SAR interferometry. *Geosci. Remote Sens. Lett.: IEEE*, 2006, Vol. 3, pp. 15–18.
3. Baranov Iu.B., Kantemirov Iu.I., E Kiselevskii V., Nikiforov S.E. Monitoring smeshchenii zemnoï poverkhnosti na razrabatyvaemykh mestorozhdeniiakh uglevodorodov s pomoshch'iu kompleksa kosmicheskikh i geodezicheskikh metodov [Monitoring of the displacements at the surface of hydrocarbon producing fields through a set of space geodetic techniques]. *Nedropol'zovanie – XXI vek*, 2009, no. 1, pp. 60–64.
4. Kashnikov Iu.A., Musikhin V.V., Lyskov I.A. Monitoring deformatsionnykh protsessov zemnoï poverkhnosti metodami radarnoï interferometrii [Monitoring of deformation processes of the earth's surface radar interferometry techniques]. *Vestnik PGU*, 2010, no. 5, pp. 11–17.
5. Krivenko A.A., Kashnikov Iu.A. Opredelenie osedaniï zemnoï poverkhnosti pri razrabotkegazokondensatnykh mestorozhdenii po rezul'tatam interferometricheskoi obrabotki radarnykh s'emok [Determination of land surface subsidence in the development of gas-condensate fields on the results of interferometric processing of radar surveys]. *Marksheiderskii vestnik*, 2009, no. 3, pp. 44–49.
6. Musikhin V., Lyskov I.A., Kashnikov Iu.A., Gilev M.V. Opredelenie zon sdvizenii na podrabotannoï territorii Verkhne-Kamskogo mestorozhdeniakaliïnykh solei (VKMKS) po rezul'tatam interferometricheskoi obrabotki radarnykh dannykh [Determination of displacement in the area earn territory Upper Kama deposit of potassium salts (VKMKS) the results of interferometric radar data processing]. *Marksheiderskii vestnik*, 2011, no. 3. pp. 34–39.
7. Kantemirov Iu.I. Kosmicheskii monitoring smeshchenii zemnoï poverkhnosti na mestorozhdeniiakh Kandym i Gumbulak Respubliki Uzbekistan po dannym kosmicheskikh radarnykh radarnykh s'emok [Space monitoring of displacements of the earth's surface in the fields of Kandy and Gumbulak the Republic of Uzbekistan according to the space radar surveys]. *Geomatika*, 2011, no. 10, pp. 72–80.
8. Elizavetin I.V., Shuvalov R.I., Bush V.A. Printsipy i metody radiolokatsionnoi s'emki dlia tselei formirovaniia tsifrovoi modeli mestnosti [Principles and methods of radar imagery for the purpose of forming a digital terrain model]. *Geodeziia i kartografiia*, 2009, no. 1, pp. 39–45.
9. Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. The displacement field of the Landers earthquake. *Nature*, 1993, 364, pp. 138–142.
10. Musikhin V.V. Printsipy povysheniia nadezhnosti svedenii ob osedaniiax zemnoï poverkhnosti priinterferometricheskoi obrabotke radarnykh dannykh [The principles of reliability data on land surface subsidence in the interferometric processing of radar data]. *Marksheiderskii vestnik*, 2012, no. 1, pp. 53–58.
11. 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, 2, Vol. 48, pp. 895–904.

12. Goldstein A.H., Werner C. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 1988, 4, Vol. 23, pp. 713–720.

13. Filatov A.V. Metod obrabotki kompleksnykh radiolokatsionnykh interferogramm v usloviakh vysokoi vremennoi dekreliatsii: dis. d-ra tekhn. nauk. [Method of processing of complex radar interferograms in high temporal dekreliatsii: thesis. Dr technical. science]. Barnaul, 2009, pp. 13–15.

14. Li Z., Fielding E., Cross P., Muller J. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), and InSAR Integration. *Geophysical Research Letters*, 2005, 110, pp. B03410.

15. Zakharova L.N., Zakharov A.I. Sravnenie nekotorykh sovremennykh metodov razvorota raznosti faz v radiolokatsionnoi interferometrii [Comparison of some modern methods of reversal of the phase difference in radar interferometry]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2003, Vol. 4, no. 10, pp. 120–121.

Об авторах

Мусихин Василий Владимирович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: geotech@pstu.ru basil2@list.ru).

Лысков Илья Андреевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: geotech@pstu.ru).

About the authors

Musikhin Vasily V. (Perm, Russia) – senior lecturer of the mining surveying, geodesy and geoinformation systems department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: geotech@pstu.ru, basil2@list.ru).

Lyskov Ilya A. (Perm, Russia) – assistant lecturer of the mining surveying, geodesy and geoinformation systems department, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: geotech@pstu.ru).

Получено 12.05.2012