2. Выделение и сопоставление наборов устойчивых отражателей

Базовый алгоритм выделения устойчивых отражателей. Считаем, что точки изображения, соответствующие устойчивым отражателям, имеют большую интенсивность. Считаем, что за время наблюдения устойчивый отражатель не мог переместиться в соседнюю точку снимка [9]. Выделим на первом снимке набор точек-кандидатов в устойчивые отражатели по следующему правилу. Установим границу $\gamma \geq 1$. Считаем точку (i,k) изображения с номером q кандидатом в устойчивые отражатели, если $z_{ik} \geq \gamma z_q$, где z_q - среднее значение яркости на q-ом изображении. После выделения кандидатов в устойчивые отражатели на первом снимке проверяем, какие из них являются кандидатами в устойчивые отражатели для второго снимка и т.д. В конце получим пересечение наборов кандидатов в устойчивые отражатели для всех $K+1$ снимков. Их и объявим устойчивыми отражателями. Количество выделенных устойчивых отражателей снижается с увеличением γ.

Алгоритм выделения устойчивых отражателей, основанный на дисперсии амплитуды сигнала. Пусть $\overline{\mathbf{Z}}$ есть осреднённое изображение, то есть

$$\overline{\mathbf{Z}} = \frac{1}{K+1}\sum_{q=1}^{K+1} \mathbf{Z}_q / z_q .$$

Для каждой точки снимков вычислим оценку дисперсии амплитуды

$$\mathbf{D} = \frac{1}{K}\sum_{q=1}^{K+1}\left[\left(\mathbf{Z}_q/z_q - \overline{\mathbf{Z}}\right)\times\left(\mathbf{Z}_q/z_q - \overline{\mathbf{Z}}\right)\right],$$

где $\times$ означает поэлементное умножение. Установим два граничных значения $\gamma_1 \geq 1$ и $\gamma_2 > 0$. Точку (i,k) будем считать устойчивым отражателем, если

$$\bar{z}_{ik} \geq \gamma_1, \frac{\sqrt{d_{ik}}}{\bar{z}_{ik}} \leq \gamma_2 .$$

Количество выделяемых таким образом устойчивых отражателей снижается при увеличении γ_1 и уменьшении γ_2. При известных матрицах $\mathbf{V}$ и $\Delta\mathbf{H}$ при одинаковом количестве выделенных устойчивых отражателей описанные методы будем сравнивать по средней когерентности (6) этих отражателей. Опишем далее метод оценки матриц $\mathbf{V}$ и $\Delta\mathbf{H}$.

Метод оценки скоростей движения точек и ошибок по высоте без развертки фазы. Будем оценивать матрицы $\mathbf{V}$ и $\Delta\mathbf{H}$ поэлементно, без учёта зависимостей между точками снимков. Такой подход соответствует стандартному методу устойчивых отражателей. Для точки (i,k) снимков величины v_{ik} и Δh_{ik} найдем из задачи максимизации временной когерентности (6) для этой точки

$$[v_{ik}, \Delta h_{ik}] = \operatorname{argmax} c_{ik}(v_{ik}, \Delta h_{ik}).$$

3. Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте описанные методы сравнивались на примере обработки набора из 35 SAR-снимков территории в Хостинском районе г. Сочи размером 5 км х 5 км в режиме STRIPMAP. Исходная интерферометрическая цепочка снимков с 22.08.2010 по 3.04.2011 получена спутниковой радиолокационной системой COSMO-SkyMed (© ASI, 2010-2011. All rights reserved. Distributed by e-GEOS) в ходе работ по мониторингу потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры. Данный проект выполняется на участке Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги компанией e-GEOS и ОАО «НИИАС» в рамках программы международного научно-технического сотрудничества ОАО «РЖД» и корпорации «Финмекканика». На рис. 1 приведен пример сопоставления точек амплитудных компонент двух снимков исходного набора для их совмещения. На фоне амплитудных компонентов радиолокационных снимков показаны выделенные соответствующие точки (соединены линиями). На рис. 2 приведены примеры амплитудной и фазовой компонент радиолокационного снимка (а и б, соответственно), приведена использовавшаяся цифровая модель рельефа соответствующего участка местности (в) и пример разности фаз одного из снимков и опорного снимка после учёта рельефа и положения спутников в момент съемки (г). Отметим, что используемая модель рельефа SRTM [16] имеет разрешение 3"x3" по широте и долготе, что соответствует для рассматриваемого участка местности 67,60 м по широте и 92,43 м по долготе. При этом геометрическое разрешение снимков в наборе составляет 3 м. Так как разрешение модели рельефа на порядок ниже, чем пространственное разрешение радиолокационных снимков, привязка модели рельефа к снимкам осуществлялась по орбитальным данным. Точность привязки в таком случае составляет 2-3 элемента разрешения радиолокационных снимков, что гораздо меньше разрешения цифровой модели рельефа.

Произведем теперь сравнение систем устойчивых отражателей, построенных с помощью двух рассматриваемых методов. Считаем, что устойчивый отражатель задается своими координатами на снимке. Пусть A и B две системы устойчивых отражателей, где система A построена базовым методом, а система B построена с учётом дисперсии амплитуды. Назовём мерой их схожести величину

$$S(A,B) = 1 - \frac{|(A \setminus B) \cup (B \setminus A)|}{|A| + |B|}. \qquad (7)$$

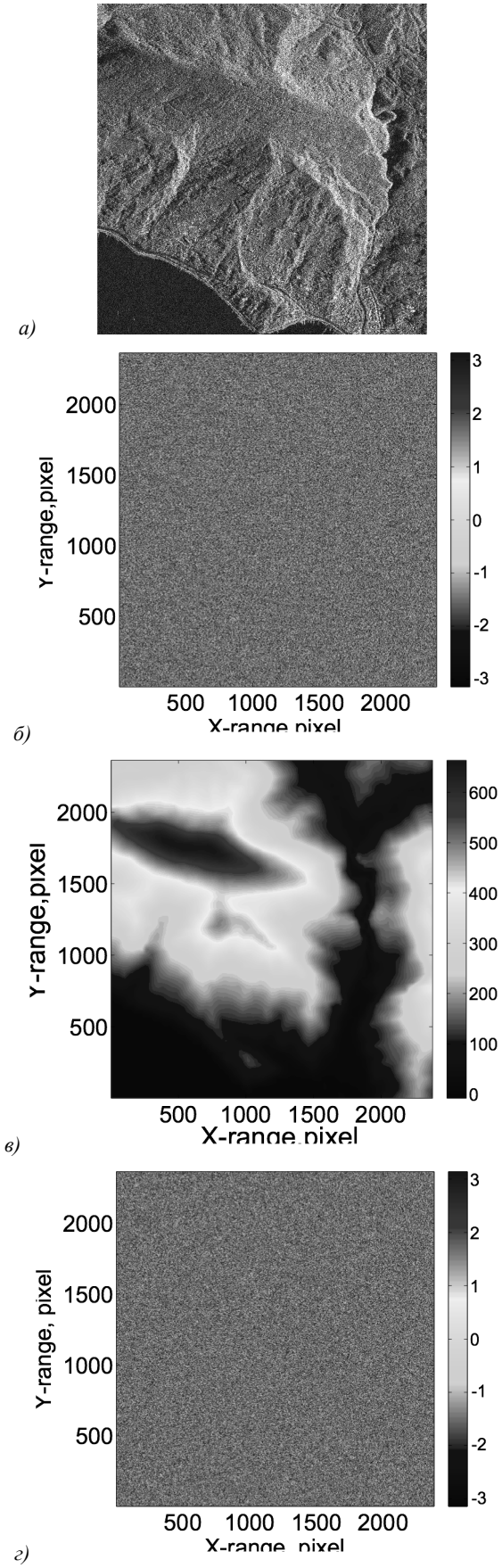
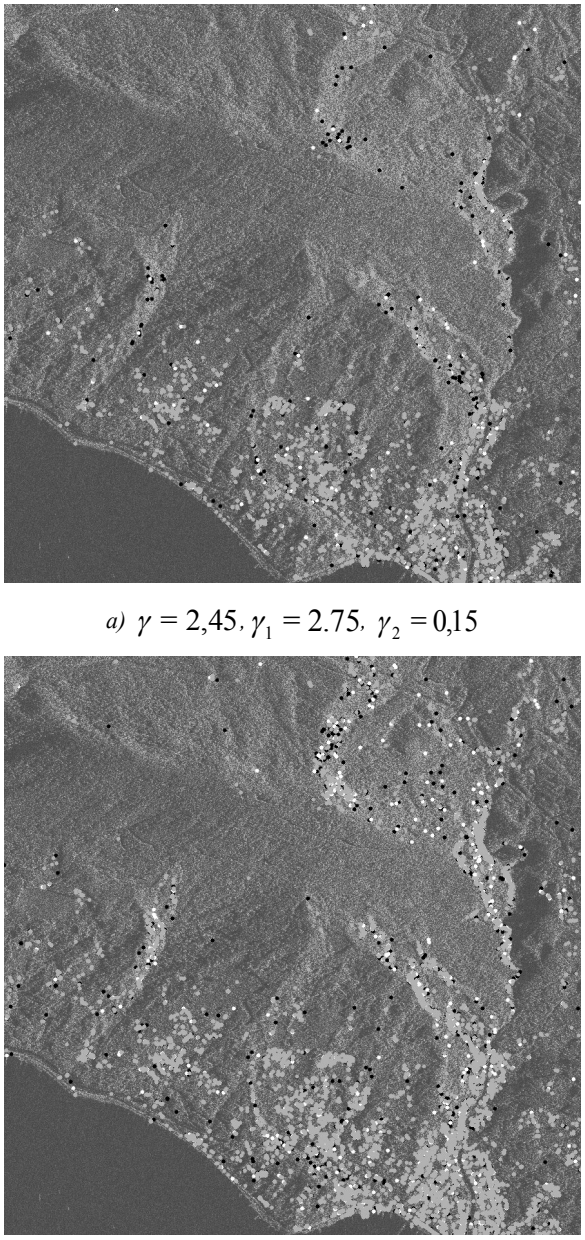


Рис. 2. Пример снимка, модель рельефа и пример разности фаз после учёта модели рельефа и положения спутника

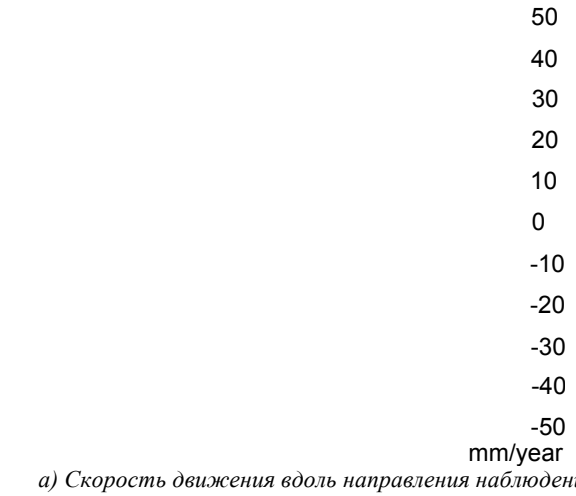


а) $\gamma = 2{,}45,\ \gamma_1 = 2.75,\ \gamma_2 = 0{,}15$

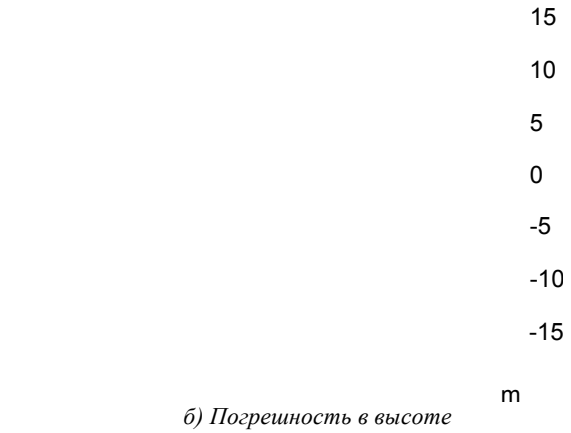
б) $\gamma = 1{,}9,\ \gamma_1 = 2{,}55,\ \gamma_2 = 0{,}2$

Рис. 3. Сравнение наборов отражателей, выделенных разными методами

Ясно, что $0 \le S(A,B) \le 1$, $S(A,B) = 1$ тогда и только тогда, когда $A = B$, и $S(A,B) = 0$ тогда и только тогда, когда A и B не пересекаются. Из таблицы 1 можно заключить, что два рассматриваемых метода дают близкие наборы устойчивых отражателей, одинаковые в терминах средней временной когерентности (6). На рис. 3 для первой и третьей строки таблицы 1 приведены наборы найденных устойчивых отражателей. Серым цветом выделены совпавшие отражатели, черным отмечены точки, выделенные как устойчивые отражатели дисперсным методом и не выделенные базовым, а белым - точки, выделенные базовым методом, но не дисперсным.



а) Скорость движения вдоль направления наблюдения



б) Погрешность в высоте

Рис. 4. Результаты, полученные методом устойчивых отражателей без развертки фазы

Приведем далее оценки скоростей смещения отражателей вдоль направления наблюдения (см. рис. 4а) и оценки погрешностей в цифровой модели рельефа для точек, соответствующих устойчивым отражателям (см. рис. 4б) для системы отражателей, полученной дисперсным методом при $\gamma_1 = 2{,}5$, $\gamma_2 = 0{,}2$. Результаты показывают, что ошибка по высоте имеет порядок 10 м, а большая часть устойчивых отражателей имеет небольшую скорость смещения. Среднее значение скорости смещения, равное 0,3 мм/год, показывает, что рассматриваемая территория испытывает медленный подъем.

Заключение

В данной работе приведено сравнение двух методов выбора устойчивых отражателей по амплитудной части сигнала. Результаты сравнения показывают, что метод, использующий оценку дисперсии амплитуды сигнала по совокупности снимков и метод, использующий лишь амплитуду каждого из снимков в отдельности, выделяют схожие наборы устойчивых отражателей. Поэтому возможно применять любой из них. Полученный набор устойчивых отражателей использован для определения скоростей смещения устойчивых отражателей и ошибок в цифровой модели рельефа с помощью стандартного метода устойчивых отражателей [8], но без развертки фазы. Для рассматривавшейся территории ошибка по высоте в цифровой модели рельефа имеет порядок 10 м, а средняя скорость смещения 0.3 мм/год, что представляется разумным.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Программа повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 гг.) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 13-07-13136, 14-07-31045).

Табл. 1. Сравнение двух методов выделения устойчивых отражателей

$\lvert A \rvert$	$\lvert B \rvert$	$S(A,B)$	γ	γ_1	γ_2	$\bar{c}(A)$	$\bar{c}(B)$
5283	5302	0,903	2,45	2,75	0,15	0,557	0,557
7557	7595	0,895	2,125	2,65	0,175	0,556	0,556
10578	10585	0,876	1,9	2,55	0,2	0,555	0,555

Литература

1. **Василейский, А.С.** Алгоритм выделения устойчивых отражателей на спутниковых радиолокационных снимках земной поверхности / А.С. Василейский, Е.А. Карацуба, А.И. Карелов, М.П. Кузнецов, И.А. Рейер // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т. 1, № 4. – С. 473-484.
2. **Василейский, А.С.** Обнаружение движения устойчивых отражателей по серии спутниковых радиолокационных снимков земной поверхности / А.С. Василейский, Е.А. Карацуба, А.И. Карелов, М.П. Кузнецов, И.А. Рейер // Машинное обучение и анализ данных. –2013. – Т. 1, № 5. – С. 489-504.
3. **Хашин, С.И.** Динамическая сегментация последовательности кадров // Машинное обучение и анализ данных. –2013. – Т. 1, № 6. – С. 787-795.
4. **Harris, C.** A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // Alvey vision conference. – 1988. – V. 15. – P. 147-151.
5. **Lowe, D.** Distinctive image features from scale invariant keypoints // IJCV. – 2004. – V. 60(2). – P. 91-110.

6. **Muja, M.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration / M. Muja, D.G. Lowe // International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09). – 2009. – P. 331-340.
7. **Ferretti, A.** Permanent scatterers in SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – V. 39(1). – P. 8-20.
8. **Ferretti, A.** Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2000. – V. 38(5). – P. 2202-2212.
9. **Prati, C.** Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations / C. Prati, A. Ferretti, D. Perissin // Journal of Geodynamics. – 2010. – V. 49(3). – P. 161-170.
10. **Hetland, E.A.** Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation / E.A. Hetland, P. Musé, M. Simons, Y.N. Lin, P.S. Agram, C.J. DiCaprio // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 2012. – V. 117(B2).
11. **Nitti, D.O.** On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation / D.O. Nitti, F. Bovenga, R. Nutricato, F. Intini, M.T. Chiaradia // European Journal of Remote Sensing. – 2013. – V. 46. – P. 250-271.
12. **Bamler, R.** Synthetic aperture radar interferometry / R. Bamler, P. Hartl // Inverse problems. – 1998. – V. 14(4). – P. 1-54.
13. **Balzter, H.** Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry / H. Balzter, C.S. Rowland, P. Saich // Remote Sensing of Environment. – 2007. – V. 108(3). – P. 224-239.
14. Digital elevation data [Электронный ресурс] - URL: http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html#3dem (дата обращения: 23.01.2014).
15. **Vorontsov, K.V.** Computable Combinatorial Overfitting Bounds / K.V. Vorontsov, A.I. Frey, E.A. Sokolov // Machine Learning and Data Analysis. – 2013. – V. 1(6). – P. 734--743. – ISSN 2223-3792.
16. **Farr, T.G.** The Shuttle Radar Topography Mission / T.G. Farr, P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Butbank, D. Alsdorf // Reviews of Geophysics. – 2007. – V. 45.

References

[1] Vasileisky AS, Karatsuba EA, Karelov AI, Kuznetsov MP, Reyer IA. The algorithm of persistent scatterers detection on the satellite radar images of the earth surface [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2012; 1(4): 473-484.
[2] Vasileisky AS, Karatsuba EA, Karelov AI, Kuznetsov MP, Reyer IA. The algorithm of persistent scatterers movement detection on the satellite radar images of the Earth surface [In Russian]. Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(5): 489-504.
[3] Khashin SI. Dynamic segmentation of frames sequences [In Russian] Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(6): 787-795.
[4] Harris C. A combined corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens. Alvey vision conference 1988; 15: 147-151.
[5] Lowe D. Distinctive image features from scale invariant keypoints. IJCV 2004; 60(2); 91-110.
[6] Muja M, Lowe DG. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration. International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09) 2009; 331-340.
[7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2001; 39(1); 8-20.
[8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2000; 38(5): 2202-2212.
[9] Prati C, Ferretti A, Perissin D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. Journal of Geodynamics 2010; 49(3): 161-170.
[10] Hetland EA, Musé P, Simons M, Lin YN, Agram PS, DiCaprio CJ. Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 2012; 117(B2).
[11] Nitti DO**,** Bovenga F, Nutricato R, Intini F, Chiaradia MT. On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation. European Journal of Remote Sensing 2013; 46: 250-271.
[12] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems 1998; 14(4): 1-54.
[13] Balzter H, Rowland CS, Saich P. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. Remote Sensing of Environment 2007; 108(3): 224-239.
[14] Digital elevation data. Source: <http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html#3dem>. Access date: 23.01.2014.
[15] Vorontsov KV, Frey AI, Sokolov EA. Computable Combinatorial Overfitting Bounds. Machine Learning and Data Analysis 2013; 1(6): 734-743.
[16] Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Butbank D, Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics 2007; 45.

ALGORITHMS OF DETECTION AND REGISTRATION OF PERSISTENT SCATTERERS ON SATELLITE RADAR IMAGES

A.A. Aduenko [1,2], A.S. Vasileisky [3], A.I. Karelov [3], I.A. Reyer [1], K.V. Rudakov [1,2], V.V. Strijov [1,2]
[1] Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences,
[2] Moscow Institute of Physics and Technology,
[3] JSC «NIIAS» (Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications on railway transport)

Abstract

To detect small movements of Earth surface (with a velocity less than several centimeters per year) with use of SAR-interferometry methods it is necessary to find a number of surface areas remaining coherent on radar images over a long period. These areas and corresponding image points are called persistent scatterers. Two methods of persistent scatterers detection are considered in the paper. The methods are compared by the number of detected points and their average time coherence. The algorithms considered are illustrated with an example of processing of a set containing 35 radar images.

Key words: SAR interferometry, persistent scatterers, SAR image registration, Harris detector, coherence map.

Citation: Aduenko AA, Vasileisky IS, Karelov AI, Reyer IA, Rudakov KV, Strijov VV. Algorithms of detection and registration of persistent scatterers on satellite radar images. Computer Optics 2015; 39(2): xxx-x. DOI: 10.18287/2015-39-3-xxx-xxx/

Acknowledgements: The work was partially funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science and Russian Foundation of Basic Research Grants No. 13-07-13136 and 14-07-31205.

Сведения об авторах

Адуенко Александр Александрович, 1992 года рождения, студент Московского физико-технического института. Область научных интересов: анализ данных, вычислительная химия.

E-mail: *aduenko@phystech.edu* .

Почтовый адрес: 141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 28а, кв.45.

Alexander Alexandrovich Aduenko (b. 1992) is a student at Moscow Institute of Physics and Technology. Research interests are data analysis and computational chemistry.

Василейский Александр Сергеевич, 1970 года рождения, кандидат физико-математических наук, руководитель Центра внедрения космических технологий ОАО «НИИАС» (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте). Область научных интересов: спутниковое дистанционное зондирование Земли, мониторинг опасных экзогенных процессов, методы обработки изображений, радиолокационная интерферометрия.

E-mail: *A.Vasileisky@vniias.ru* .

Почтовый адрес: 109029 Москва, Нижегородская ул., 27 стр. 1.

Alexander Sergeevich Vasileisky (b. 1970), candidate of physical and mathematical sciences, head of Space Technology Application Center JSC «NIIAS» (Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications on railway transport). Research interests are Earth remote sensing from space, dangerous exogenous processes' monitoring, image processing techniques, SAR interferometry.

Карелов Алексей Игоревич, 1984 года рождения, начальник отдела спутникового мониторинга ОАО «НИИАС» (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте). Область научных интересов: спутниковое дистанционное зондирование Земли, применение методов радиолокационной интерферометрии для мониторинга геодинамических процессов.

E-mail: *a.karelov@vniias.ru* .

Почтовый адрес: 109029 Москва, Нижегородская ул., 27 стр. 1.

Alexey Igorevich Karelov (b. 1984), head of Satellite Monitoring Division JSC «NIIAS» (Research and design institute for information technology, signaling and telecommunications on railway transport). His research interests are currently focused on Earth remote sensing from space, SAR interferometry application on monitoring of geodynamic processes.

Рейер Иван Александрович, 1976 года рождения, кандидат технических наук, научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: обработка и распознавание изображений, морфологический анализ изображений, языки описания данных.

E-mail: *reyer@forecsys.ru* .

Почтовый адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, 40.

Ivan Aleksandrovich Reyer (b. 1976), candidate of technical sciences, investigator of the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests are image processing and recognition, morphological image analysis, data description languages.

Рудаков Константин Владимирович, 1954 года рождения, член-корреспондент РАН, заведующий отделом Интеллектуальных систем Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: распознавание образов, математические методы прогнозирования, алгебраические системы, прикладная алгебра.

E-mail: *rudakov@ccas.ru* .

Почтовый адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, 40.

Konstantin Vladimirovich Rudakov (b. 1954), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of Intelligent Systems Department at the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests include pattern recognition, mathematical methods of forecasting, algebraic systems, applied algebra.

Стрижов Вадим Викторович, 1967 года рождения, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук. Область научных интересов: машинное обучение, анализ данных, прогнозирование, классификация, выбор моделей.

E-mail: *strijov@ccas.ru* .

Почтовый адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, 40.

Vadim Viktorovich Strijov (b. 1967), doctor of sciences in physics and mathematics, principal investigator of the Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests are machine learning, data analysis, forecasting, classification, model selection.

Поступила в редакцию 29 марта 2014 г.

Почтовый адрес для рассылки (в журнале не печатается):
Россия, 443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 151, офис 404.