

УДК 629.78:528.854.4

А. А. ЗОЛОТОЙ, Д. И. НОВИКОВ

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ЭТАЛОНОМ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ

*Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларуси (УП «Геоинформационные системы»)*

В статье рассматриваются проблемы сопоставления космических снимков с эталоном цифровой карты местности для задач актуализации картографической информации и мониторинга территорий. Целью является разработка методики автоматизированного выявления совокупных изменений на космических снимках относительно эталона цифровой карты местности в опционально задаваемом окне анализа. Исследования и разработка методики производились путём математического моделирования задачи в среде MATLAB. В статье приводятся последние результаты исследований в виде разработанной методики выявления совокупных изменений объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках поверхности Земли относительно эталона векторной цифровой карты местности. Показаны основные результаты сопоставления космических снимков с цифровой картой местности, полученные при испытаниях разрабатываемой методики. Применение данной методики уже сейчас позволяет автоматизировать процесс и сократить время тематического анализа космической информации, получаемой средствами дистанционного зондирования Земли для топографического картографирования.

Ключевые слова: *методика, дистанционное зондирование Земли, космический снимок, растровое изображение, цифровая карта местности, векторная графика, сегмент, изменение объектного состава, метрика, близость, схожесть, эталон.*

Решения широкого круга практических задач связанных с актуализацией картографической информации и мониторингом местности в настоящее время строятся на сопоставлении цифровых изображений поверхностей территорий, полученных средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с цифровой картой местности (ЦКМ) [1]. Сложность сопоставления космических снимков и ЦКМ обусловлена различной формой их представления. Космические снимки это растровые изображения, а ЦКМ представляются в векторной форме с отрезками линий (далее сегментами) в качестве объектов векторной графики [2–4].

Авторами предлагается методика выявления совокупных изменений объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках поверхности Земли относительно эталона ЦКМ. Суть предлагаемой методики заключается в сопоставлении по степеням близости и схожести гештальта [5] сегментов, выделенных из космиче-

ского снимка с сегментами-центроидами (далее центроидами), полученными из ЦКМ. Под схожестью гештальта двух сегментов в статье понимается степень пространственно-наглядного восприятия их возможной принадлежности к одним и тем же пространственным представлениям или объектам.

Блок-схема основных этапов предлагаемой методики сопоставления космических снимков и цифровой карты местности приведена на рис. 1.

В блоке 1 выполняется загрузка изображения космического снимка, векторных слоёв ЦКМ в геодезических координатах и матрицы геопривязки космического снимка в виде RPC-коэффициентов (Rational Polynomial Coefficients) [6]. В блоке 2 осуществляется векторизация космического снимка с использованием любых, доступных канонических средств, например, алгоритмы на основе методов Собеля, Лапласа, Робертса, Превитта, Канни [7–9]. На рис. 2, а для фрагмента панхроматического

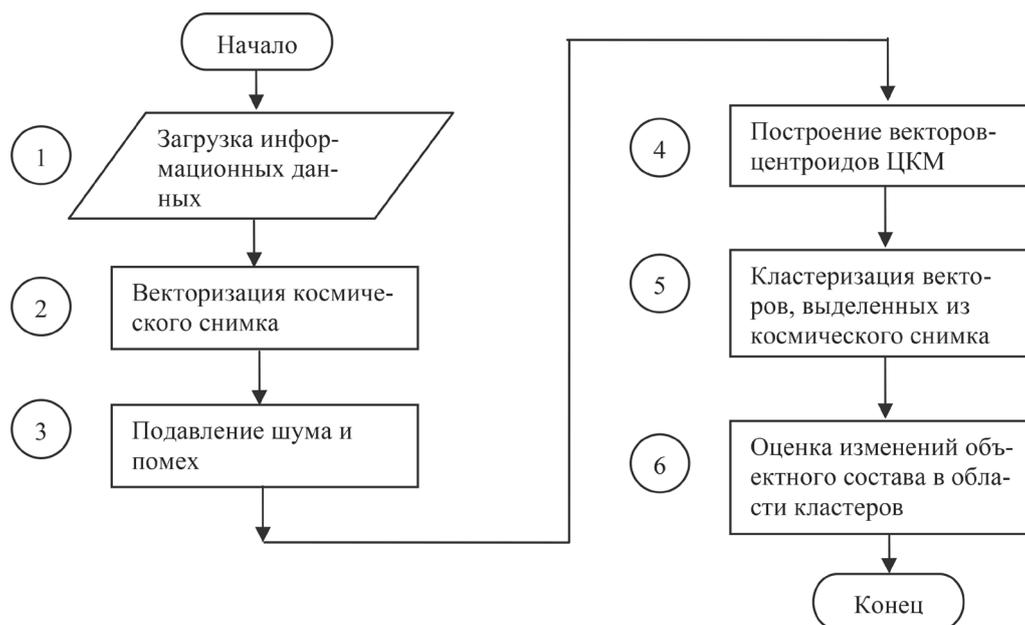


Рис. 1. Блок-схема методики оценки совокупных изменений объектного состава на космических снимках поверхности Земли

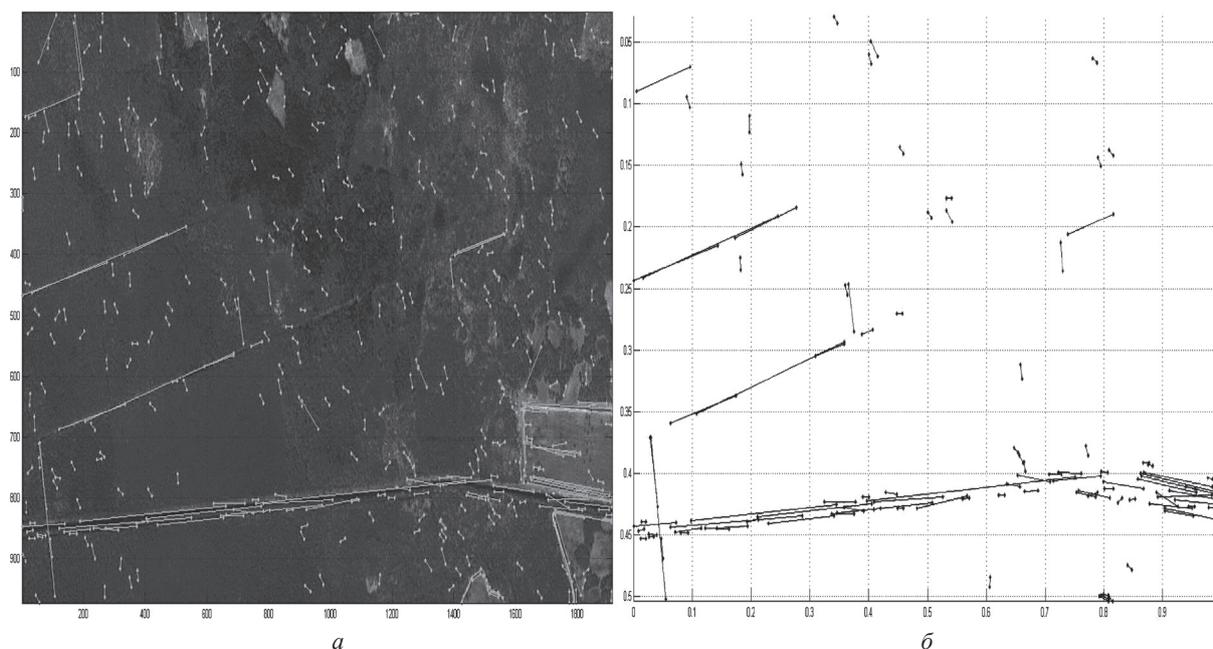


Рис. 2. Результат векторизации фрагмента космического снимка с подавлением шумов и помех

космического снимка, полученного с разрешением 2,1 м, показаны результаты векторизации, настроенной на определение протяжённых объектов, таких как дороги, реки, мелиоративные каналы и т. п.

В блоке 3 на рис. 1 устанавливается вероятная принадлежность выделенных из растрового изображения сегментов целевым пространственным объектам и производится подавление шума и помех. Для этого сегменты разделяются на три группы по длине: длинные, средние и ко-

роткие. В каждой группе, отдельные сегменты заменяются более протяжёнными сегментами. Для этого каждой группе назначаются индивидуальные значения критериев объединения сегментов. В результате формируется векторный слой, описывающий выделенные из космического снимка пространственные объекты.

На рис. 2, б показаны результаты подавления шумов и помех среди сегментов, выделенных из фрагмента космического снимка, представленного на рис. 2, а.

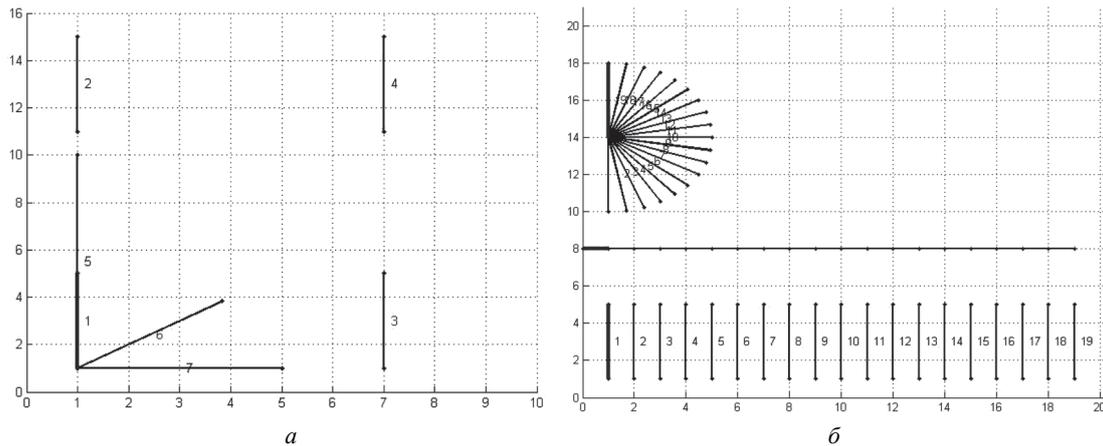


Рис. 3. Типовые сегменты для демонстрации метрик близости и схожести гештальта

В блоке 4 на рис. 1 из сегментов ЦКМ строятся центроиды. По своей природе ЦКМ часто обладают погрешностями и неточностями. Поэтому выделенные из них линейные части объектов в действительности могут представляться не одним, а группой последовательно расположенных сегментов, которые могут отличаться углами и иметь разрывы. Центроиды получаются сокращением подробности описания пространственных объектов ЦКМ алгоритмом Ramer-Douglas-Peucker [10].

В блоке 5 на рис. 1 выполняется распределение сегментов, выделенных из изображения космического снимка, среди центроидов ЦКМ как центров соответствующих кластеров. При этом сегменты проецируются в пространство единичного квадрата. Распределение сегментов среди кластеров производится на основании выбранных метрик близости и схожести гештальта сегментов как компонент целевой функции отбора.

Степень близости двух сегментов находится в виде кратчайшего расстояния между их частями по метрике Чебышева. Расстояние D_1 по метрике близости от сегмента A с координатами конечных точек $P_1^A(x_1^A, y_1^A)$, $P_2^A(x_2^A, y_2^A)$ до сегмента B с координатами конечных точек $P_1^B(x_1^B, y_1^B)$, $P_2^B(x_2^B, y_2^B)$ рассчитывается по формуле:

$$D_1 = \begin{cases} \min\{d_1, d_2, d_3, d_4, n_1^A, n_2^A, n_1^B, n_2^B\}; \\ 0, \text{ если } A \cap B, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$d_1 = \|P_1^A - P_1^B\|_2; \quad d_2 = \|P_1^A - P_2^B\|_2; \\ d_3 = \|P_2^A - P_1^B\|_2; \quad d_4 = \|P_2^A - P_2^B\|_2;$$

$$n_1^A = \|P_1^A - O_1^B\|_2; \quad n_2^A = \|P_2^A - O_2^B\|_2; \\ n_2^B = \|P_2^B - O_2^A\|_2; \quad n_1^B = \|P_1^B - O_1^A\|_2,$$

$O_1^A(x_1^A, y_1^A)$, $O_2^A(x_2^A, y_2^A)$, $O_1^B(x_1^B, y_1^B)$, $O_2^B(x_2^B, y_2^B)$ – основания перпендикуляров, опущенных соответственно из точек P_1^A , P_2^A , P_1^B , P_2^B на прямые, которым принадлежат сегменты A и B .

Расстояние D_2 по метрике схожести гештальта от сегмента A до сегмента B рассчитывается по формуле:

$$D_2 = \frac{\max\{d_1 + d_2, d_3 + d_4\}}{2(1 - |\sin \phi| + 10^{-6})} + 2 \frac{|L_A - L_B|}{L_A + L_B}, \quad (2)$$

где

$$d_1 = \left(\frac{a_B x_1^A + b_B y_1^A + c_B}{\sqrt{L_A}} \right)^2; \\ d_2 = \left(\frac{a_B x_2^A + b_B y_2^A + c_B}{\sqrt{L_A}} \right)^2; \\ d_3 = \left(\frac{a_A x_1^B + b_A y_1^B + c_A}{\sqrt{L_B}} \right)^2; \\ d_4 = \left(\frac{a_A x_2^B + b_A y_2^B + c_A}{\sqrt{L_B}} \right)^2;$$

$a_A, b_A, c_A, a_B, b_B, c_B$ – коэффициенты уравнений прямых, которым принадлежат сегменты A и B соответственно; L_A, L_B – длины сегментов A и B .

Поведение метрик близости и схожести гештальта сегментов демонстрируется на сопоставлении типовых сегментов, имеющих различные размеры и расположение относительно

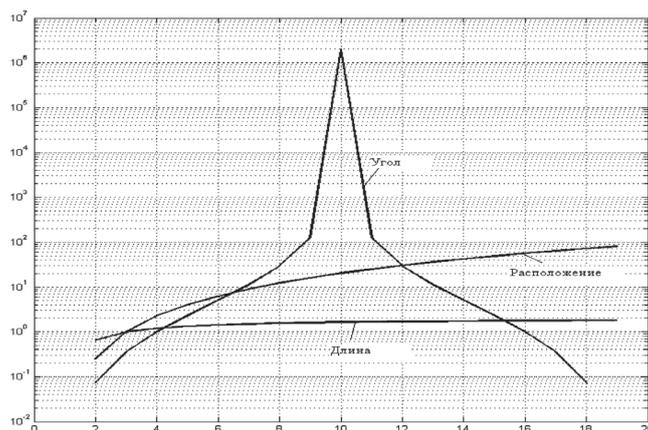


Рис. 4. Зависимости расстояния, вычисленного по метрике схожести гештальта сегментов от изменения расположения, длины и взаимного угла

некоторых базовых сегментов, обозначенных жирной линией (рис. 3).

Значения расстояний по метрикам для сегментов на рис. 3, а в пространстве единичного квадрата, приведены в таблице. Из таблицы видна инвариантность расстояния, вычисленного по метрике схожести гештальта к взаимному смещению сегментов вдоль прямой, коллинеарной обоим сегментам.

Расстояния, вычисленные по метрикам близости и схожести гештальта сегментов на рис. 3, а

| Сегмент | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|
| Близость | 0,00 | 6,00 | 6,00 | 8,49 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Схож. гешт. | 0,00 | 0,00 | 9,00 | 9,00 | 0,77 | 3,41 | $2,00 \cdot 10^6$ |

На рис. 4 показаны зависимости расстояний вычисленных по метрике схожести гештальта сегментов (рис. 3, б) от изменения расположения, длины и взаимного угла между сегментами.

По горизонтали на рис. 4 отложены номера сегментов от 1 до 19 приведенных в каждой из трёх групп на рис. 3, б. Сегменты первой группы имеют относительно базового вектора (который выделен жирным цветом) разные взаимные углы при прочих равных условиях. Во второй группе на рис. 3б сегменты отличаются длиной, в третьей – расположением.

Результаты сопоставления космического снимка и ЦКМ, приведены на рис. 5. Оценка совокупных изменений объектного состава космического снимка в области кластеров (блок б на рис. 1) выполнялась в следующей последовательности.

Среди сегментов, выделенных из космического снимка и сгруппированных в кластерах,

образованных центроидами ЦКМ, строятся вторые центроиды в каждом кластере (далее центроиды снимка). Центроиды снимка описывают линейные части пространственных объектов, которые предположительно находятся на снимке в областях кластеров. Вычисляются взвешенные значения метрики схожести гештальта центроидов снимка и центроидов ЦКМ, которые отражают изменения объектного состава снимка относительно ЦКМ в области кластеров.

Значение весового коэффициента, уменьшающего геометрическую длину проекции сегмента, в нормированном пространстве единичного квадрата вычисляется по формуле:

$$k_L = 1 - \frac{d}{0,04}, \quad (3)$$

где k_L – коэффициент уменьшения геометрической длины проекции сегмента на направление центроида снимка; d – расстояние от сегмента до его проекции, вычисленное по метрике близости.

Степени совокупных изменения объектного состава космического снимка относительно ЦКМ в области кластеров N нормируется в диапазон от 0 до 1, и оцениваются по формуле:

$$N = \frac{\sum k_L L_p}{(n-1)L_c}, \quad (4)$$

где k_L – весовой коэффициент уменьшения геометрической длины проекции сегмента на направление центроида снимка; L_p – геометрические длины проекций сегментов на направление центроида снимка в пространстве единичного квадрата; n – число проекций; L_c – геометрические длины центроидов снимка.

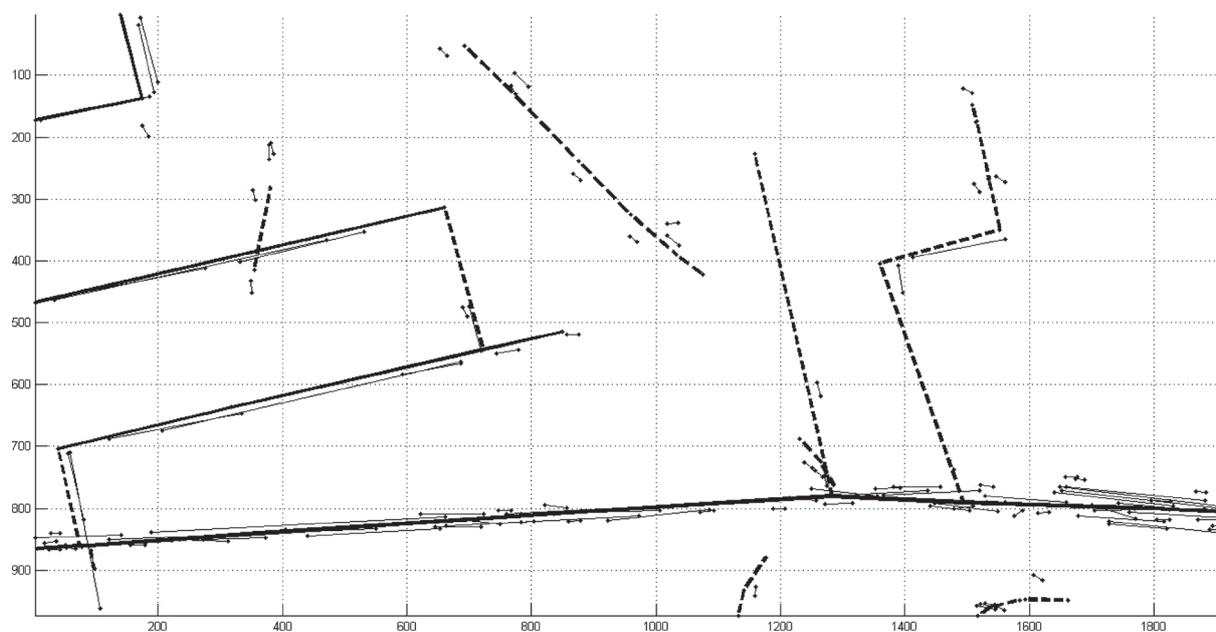


Рис. 5. Результаты выявления совокупных изменений объектного состава на фрагменте космического снимка относительно ЦКМ

Сегменты на рис. 5 спроецированы в пиксельное координатное пространство космического снимка. Сегменты, выделенные из космического снимка, обозначены на рис. 5 тонкими сплошными линиями. Толстыми сплошными линиями обозначены сегменты ЦКМ, в области которых на космическом снимке нет изменений объектного состава. Толстыми штриховыми линиями выделены сегменты ЦКМ, в области которых на космическом снимке есть изменения объектного состава. При этом было принято пороговое значение $N = 0,7$.

По результатам работы алгоритма внимание оператора привлекается к участкам космического снимка в областях сегментов ЦКМ, выделенных на рис. 5 толстыми штриховыми линиями.

Разработка и проверка алгоритма, реализующего предлагаемую в статье методику, производилась авторами в среде MATLAB по данным более 120 космических снимков, из ресурсов Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ). В настоящее время, космические снимки БКСДЗ, предоставляются Белорусским космическим аппаратом «БКА» и российским космическим аппаратом «Канопус-В № 1», входящими в состав российско-белорусской орбитальной группировки и имеющими схожие ха-

рактеристики. Слои ЦКМ были взяты из открытых интернет-источников. К настоящему времени удалось добиться гарантированного выявления в среднем до 71 % изменений на космических снимках, реально подтвержденных относительно ЦКМ.

Заключение

Предложена методика сопоставления космических снимков поверхности Земли и ЦКМ, позволяющий выявлять совокупные изменения объектного состава на ортотрансформированных и геопривязанных космических снимках относительно эталона ЦКМ. Областью применения разработанной методики являются задачи актуализации карт и мониторинга местности. Панхроматические космические снимки разрешением от 2 до 4 м могут использоваться для работы с ЦКМ масштабом до 1 : 25 000 при обновлении тематических карт и до 1 : 50 000 при обновлении государственных топографических и навигационных карт. Мультиспектральные космические снимки разрешением 10,5–11 м целесообразно использовать для работы с ЦКМ масштабом не более 1:100 000. Объективность выявления совокупных изменений объектного состава, определяется точностью геодезической привязки изображений космических снимков к ЦКМ.

Литература

1. **Замятин А. В., Марков Н. Г.** Анализ динамики земной поверхности по данным дистанционного зондирования Земли. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.
2. **Пытьев Ю. П., Чуличков А. И.** Методы морфологического анализа изображений. – М.: Физматлит, 2010. – 336 с.
3. **Huang C. P.** An Integrated Edge Detection Method Using Mathematical Morphology / C. P. Huang, R. Z. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 406–412.
4. Scalable Vector Graphics // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics. – Date of access: 10.12.2015.
5. Гештальт // Филосовская энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/2073/ГЕШТАЛЬТ. – Дата доступа: 10.12.2015.
6. Ортокоррекция космических снимков с использованием RPC // Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html>. – Дата доступа: 10.12.2015.
7. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1070 с.
8. **Анисимов Б. В.** Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. школа, 1983. – 295с.
9. **Canny John.** A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986, Vol. Pami-8, No. 6, P. 679–698.
10. Ramer-Douglas-Peucker algorithm // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Ramer-Douglas-Peucker_algorithm. – Date of access: 10.12.2015.

References

1. **Zamyatin A. V., Markov N. G.** The analysis of dynamics of an earth surface according to remote sensing of Earth. – M.: Fizmatlit, 2007. – 176 p.
2. **Pyt'ev Y. P., Chulichkov A. I.** Methods of the morphological analysis of images. – M.: Fizmatlit, 2010. – 336 p.
3. **Huang C. P.** An Integrated Edge Detection Method Using Mathematical Morphology / C. P. Huang, R. Z. Wang // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2006. – Vol. 16, № 3. – P. 406–412.
4. Scalable Vector Graphics // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Scalable_Vector_Graphics. – Date of access: 10.12.2015.
5. Gestalt // The Filosovsky Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/2073/ГЕШТАЛЬТ. – Date of access: 10.12.2015.
6. Orthocorrection of space pictures with use of RPC // Geographical information systems and remote sensing [An electronic resource]. – Access mode: <http://gis-lab.info/qa/ortho-rpc.html>. – Date of access: 10.12.2015.
7. **Gonsales R.** Digital image processing / R. Gonsales, R. Vuds. – M.: Technosphaera, 2005. – 1070 p.
8. **Anisimov B. V.** Recognition and digital image processing. – M.: Vysshaya Shkola, 1983. – 295 p.
9. **Canny John.** A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1986, Vol. Pami-8, No. 6, P. 679–698.
10. Ramer-Douglas-Peucker algorithm // The Free Encyclopedia [An electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Ramer-Douglas-Peucker_algorithm. – Date of access: 10.12.2015.

UDC 629.78:528.854.4

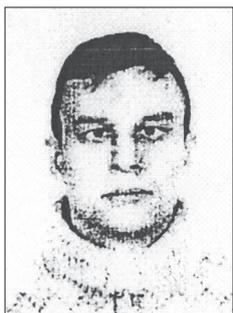
*Zalatoi Andrei, Novikau Dmitry***COMPARISON OF SPACE IMAGES OF A SURFACE OF EARTH
TO A STANDARD OF A DIGITAL DISTRICT MAP**

In article problems of comparison of space pictures with a standard of a digital district map for tasks of updating of cartographical information and monitoring of the territories are considered. The purpose is development of a technique of automated detection of cumulative changes in space pictures concerning a standard of a digital district map in optionally the set analysis window. Researches and development of a technique were made by mathematical simulation of the task in the environment of MATLAB. The last results of researches in the form of the developed technique of detection of cumulative changes of object composition in the orthotransformed and geobound space pictures of the Earth's surface concerning a standard of a vectorial digital district map are given in article. The main results of comparison of space pictures to a digital district map received in case of tests of the developed technique are shown. Application of this technique allows to automate process already now and to reduce time of the subject analysis of the space information obtained by Earth remote-sensing instruments for topographical mapping.

Keywords: technique, remote sensing of Earth, space picture, bitmap image, digital district map, vector graphics, segment, change of object composition, metrics, closeness, similarity, standard.



ЗОЛОТОЙ Андрей Анатольевич – к. т. н., доцент, ведущий научный сотрудник УП «Геоинформационные системы», e-mail: andrewgis@tut.by
ZALATOI Andrei – Candidate of Science (Engineering), Associate professor, Leading researcher at UE Geoinformation Systems



НОВИКОВ Дмитрий Игоревич – ведущий инженер-программист УП «Геоинформационные системы», e-mail: ndidima@tut.by
NOVIKAU Dmitry – Leading software engineer at UE Geoinformation Systems

Работа выполнена в рамках программы научных исследований Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли (Мониторинг-СГ)» по заданию мероприятия 2.5 «Создать экспериментальный образец программных средств тематической обработки для аппаратно-программного комплекса распределенной системы анализа и мониторинга космической информации с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях высокопроизводительных систем» № г. р. 20141528.