

УДК 681.3.063

ИВАЩУК О.А., ЩЕРБИНИНА Н.В., ФЕДОРОВ В.И.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ[‡]

Авторами представлены результаты разработки и применения метода и алгоритмов восстановления изображений земной поверхности по спутниковым снимкам высокого разрешения. Данный метод существенно повышает визуальные характеристики качества (резкость, четкость, контраст) спутниковых снимков, что расширяет спектр их применения при решении таких задач, как планирование застройки территории, возведение и реконструкция строительных объектов различного назначения, организация эффективного функционирования их инженерной инфраструктуры, решение вопросов земельного кадастра, обеспечение техносферной безопасности с одновременным повышением эффективности процесса принятия решений.

***Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, цифровое космическое изображение, пространственно-частотный спектр, функция рассеяния точки.*

Введение

Применение космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) не только обеспечивает возможность эффективного мониторинга окружающей среды и получения новых знаний о Земле. Сегодня спутниковые снимки оптического диапазона становятся незаменимым средством информационного обеспечения принятия управленческих решений при реализации широкого спектра практических задач, таких как планирование застройки территории, возведение и реконструкция строительных объектов различного назначения (промышленных, транспортных, жилых, военных, гидротехнических, сельскохозяйственных и др.), организация эффективного функционирования их инженерной инфраструктуры (энерго-, тепло-, водоснабжения и т.п.), решение вопросов земельного кадастра, обеспечение техносферной безопасности [1, 2, 3, 4, 5].

При этом повышение качества получаемых данных тракта ДЗЗ, определяющего степень их достоверности приобретает первостепенное значение и требует совершенствования методов формирования и обработки спутниковых изображений. Интерпретация спутниковых снимков, в связи с имеющимися частотно-шумовыми искажениями, вносимыми атмосферой (прежде всего ее аэрозольными составляющими), самой оптической системой, приемником изображения и др., сопровождается существенными проблемами, связанными с подавлением высокочастотных составляющих на изображениях [6,7,8]. В результате ухудшаются визуальные характеристики их качества: резкость, четкость, контраст.

Улучшение параметров спутниковых изображений было бы возможным путем изготовления ПЗС-матриц с большим числом фотоприемных элементов и создания на их основе новых оптоэлектронных приборов. Однако подобный подход на сегодняшний день является практически не реализуемым в связи с существующими технологическими проблемами. Таким образом, основными направлениями обработки изображений объектов, расположенных на данной земной поверхности, по спутниковым снимкам являются цифровые методы

[‡] Работа выполнена в рамках исполнения проекта РФФИ №15-48-03163 «Создание и исследование технологии и прототипа системы интеллектуального экомониторинга, прогнозирования и ситуационного управления биотехносферой сельско-городских территорий»

[9,10,11,12]. Наибольшую известность получил метод регуляризации задач восстановления Тихонова А.Н. [13,14,15], который, однако, также не позволяет восстановить высокочастотные компоненты и получить результирующее изображение с достаточным уровнем резкости.

Основная часть

Математической моделью формирования изображения является известное интегральное соотношение Фредгольма [16]:

$$u(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-t, y-\tau) f(t, \tau) dt d\tau + v(x, y), \tag{1}$$

где (x, y) – координаты точки (пикселя) на регистрируемом изображении $u(x, y)$; $f(t, \tau)$ – интенсивность отражений земной поверхности; $h(x-t, y-\tau)$ – так называемая функция рассеяния точки (ФРТ), которая является основной характеристикой, описывающей передачу структуры объекта оптической системой со сглаживающим эффектом; $v(x, y)$ – внешние шумовые воздействия (помехи).

Для восстановления изображений (т.е. компенсации действия ФРТ на изображениях) решается обратная некорректная задача: вычисление f по данным u . Она рассматривалась в работах многих ученых, в результате чего появилось достаточно много методов и алгоритмов регуляризации задачи восстановления. Наиболее часто используется оператор восстановления Тихонова А.Н., который имеет вид [13,14,15]:

$$\hat{f}(t, \tau) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{H^*(\omega_x, \omega_y) U(\omega_x, \omega_y)}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 + \rho(\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2}} e^{j\omega_x t} e^{j\omega_y \tau} d\omega_x d\omega_y, \tag{2}$$

где $U(\omega_x, \omega_y)$ – спектр регистрируемого изображения; ρ – параметр регуляризации; $\omega = 2\pi\nu$; V – пространственная частота; $j = (-1)^{1/2}$; $H(\omega_1, \omega_2)$ – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) системы (звездочка означает комплексное сопряжение), определяемая как

$$H(\omega_x, \omega_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j\omega_x x} e^{-j\omega_y y} dx dy. \tag{3}$$

В виду достаточно быстрого спада спектра ФРТ в области высоких частот (и соответствующего спада ЧКХ) происходит подавление или полное уничтожение в этой спектральной полосе мелких деталей на формируемом изображении. Это, в частности, не позволяет достичь достаточной резкости снимков. Существующие методы восстановления, включая метод Тихонова А.Н., не позволяют решить эту проблему.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению задачи усиления высокочастотных компонент является применение численного дифференцирования. Однако его использование часто приводит к чрезмерно высокому уровню высокочастотных компонент в производной регистрируемого изображения (переконтрастирование).

Для решения выявленных проблем авторами разработан и исследован метод восстановления спутниковых изображений земной поверхности с одновременным повышением резкости на основе модификации метода регуляризации Тихонова, позволяющий повысить вклад высокочастотных компонент с одновременным решением проблемы переконтрастирования.

Для обеспечения компенсации спада (коррекции) ЧКХ и соответствующего повышения резкости в работе предлагается использовать аддитивное представление восстанавливаемого изображения с применением дифференцирования

$$S_I(x, y) = S_R(x, y) + a p(S(x, y)), \tag{4}$$

где S_R – формируемое изображение; S_I – восстанавливаемое изображение, $a > 0$ – коэффициент.

Для конструирования аддитивной добавки $p(S(x, y))$, позволяющей выровнять вклад высокочастотных компонент, будем использовать операцию дифференцирования нецелого порядка D^α ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$), определяемую для допускающих Фурье-представлений функций в виде:

$$D_x^\alpha S(x, y) = \int_{\Omega} (j\omega_x)^\alpha F_S(\omega_x, \omega_y) e^{j\omega_x x} d\omega_x, \quad (5)$$

$$D_y^\beta S(x, y) = \int_{\Omega} (j\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{j\omega_y y} d\omega_y, \quad (6)$$

где $F_S(\omega_x, \omega_y)$ – преобразование Фурье.

Формируемая аддитивная добавка p по сути является оценкой псевдоградиентного вектора $grad_{\alpha\beta}(D_x^\alpha S(x, y), D_y^\beta S(x, y))$

$$p(S(x, y)) = grad_{\alpha\beta} ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Для эффективной реализации данного подхода возникает задача выбора параметров a и α . пределим следующие условия выбора параметров a и α :

- максимизация функционала – объема под огибающей поверхностью ЧКХ

$$\sum_{i,j}^{N,M} H(\omega_i, \omega_j) \delta\omega_i \delta\omega_j = \sum_{i,j}^{N,M} F(S_R) / F(S_I) \delta\omega_i \delta\omega_j = R_1 = \max, \quad (9)$$

где M и N – размеры (в отсчетах) спектрального окна задачи, $\delta\omega_i, \delta\omega_j$ – приращения значений частот; i и j нумеруют дискретные отсчеты на осях ω_x, ω_y .

- квазигладкость огибающей поверхности ЧКХ и ее параллельность координатной плоскости, что соответствует вычислению среднего значения

$$grad_{\alpha\beta} H(\omega_i, \omega_j) = R_2 = \min \text{ при } \omega < \omega_2; \quad (10)$$

- обеспечение устойчивого спада огибающей ЧКХ, начиная с некоторой моды ω_2 с минимизацией разницы $\omega_6 - \omega_2$ (ω_6 – наибольшая частота спутника)

$$grad_{\alpha\beta} H(\omega_i, \omega_j) = R_3 < 0 \text{ при } \omega > \omega_2; \quad \omega_6 - \omega_2 = R_4 = \min. \quad (11)$$

Из (9) и (10) находятся a_1 и α_1 ; а (11) используется для коррекции их или игнорируются при априорном задании значения моды ω_2 .

В соответствии с вышеизложенным запишем фильтр Тихонова в виде:

$$F(S_I) = H^*(\omega_i, \omega_j) F(S_I) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2, \omega_j^2)^{1/2}) = H_\mu^{-1} F(S_R). \quad (12)$$

Пусть $H_0 = H(\omega_i, \omega_j)$ при $a = a_1$ и $\alpha = \alpha_1$.

В этом случае можно поставить задачу определения параметра ε , введенного для коррекции ядра восстанавливающего оператора минимизацией невязки R_5 (значения функционала сравнения):

$$\sum_{i,j}^{N,M} \left| H_0(\omega_i, \omega_j) - (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2, \omega_j^2)^{1/2}) + \varepsilon)^{-1} \right|^2 = R_5^2 = \min, \quad (13)$$

при этом выражение в (13) находим как $F(S_R) / F(S_I)$ – это ЧКХ тракта, при восстановлении изображения соотношением (12).

Если корректирующая добавка $\varepsilon = v(\omega_i, \omega_j)$, то она согласует эти две ЧКХ с более высокой точностью. Перепишем регуляризованное соотношение (13) в виде

$$\left| H_0(\omega_i, \omega_j) - (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2, \omega_j^2)^{1/2}) + v(\omega_i, \omega_j))^{-1} \right|^2 = R_6^2 = \min. \quad (14)$$

Из него следует

$$v(\omega_i, \omega_j) = (H_0(\omega_i, \omega_j) + |R_6|^2)^{-1} - H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2, \omega_j^2)^{1/2}). \quad (15)$$

В результате получим следующее соотношение для восстановления изображения на основе модификации оператора Тихонова

$$\begin{aligned} F(S_I) &= F(S_R)(H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2, \omega_j^2)^{1/2}) + v(\omega_i, \omega_j)) = \\ &= F(S_R)(H_\mu^{-1} + v), \end{aligned} \quad (16)$$

т.е.

$$F(S_I) = F(S_R)(H_0(\omega_i, \omega_j) + R_6)^{-1} = F(S_R)(H_0(\omega_i, \omega_j))_{|R_6=0}^{-1}, \quad (17)$$

где $(H_0(\omega_i, \omega_j))_{|R_6=0}^{-1}$ – это спектральное представление оператора восстановления.

Использование вышеизложенного метода позволяет реализовать процесс восстановления изображений с компенсированием сглаживающего действия ФРТ и с оценкой параметров восстанавливающего оператора, позволяющих предотвратить эффект переэконтрастирования.

На рисунках 1-4 приведены результаты обработки фрагмента цифрового космического изображения (ЦКИ) участка промышленной зоны сельско-городской территории с использованием разработанного метода (а) и их пространственно-частотный спектр (ПЧС) (б).



Рисунок 1 – Исходный фрагмент ЦКИ и его ПЧС:
а) ЦКИ; б) ПЧС



Рисунок 2 – Результат свертки ЦКИ с однородной ФРТ размером 3x3 пикселя: а) ЦКИ; б) ПЧС



Рисунок 3 – Результат восстановления с применением соотношения (17): а) ЦКИ; б) ПЧС



Рисунок 4 – Результат восстановления без применения соотношения (17): а) ЦКИ; б) ПЧС

Фрагменты ЦКИ, используемые на рисунках, получены со спутника «Ресурс ДК». Вычисленные оптимальные значения $\alpha = 0,1$ и $\alpha = 0,15$.

Для практической реализации алгоритмов восстановления изображений на сельско-городских территориях разработана программная реализация (с использованием языка C# и интегрированной среды Microsoft Visual Studio), а также приведен сравнительный анализ разработанного метода с существующими методами восстановления.

Проведенный сравнительный анализ показал: разработанный метод восстановления изображений на основе модификации оператора Тихонова в среднем обеспечивает повышение уровня восстановления относительно существующих методов на 62%.

На рисунке 5 приведен пример обработки тестового изображения (загородная территория с расположенным на ней аэродромом).

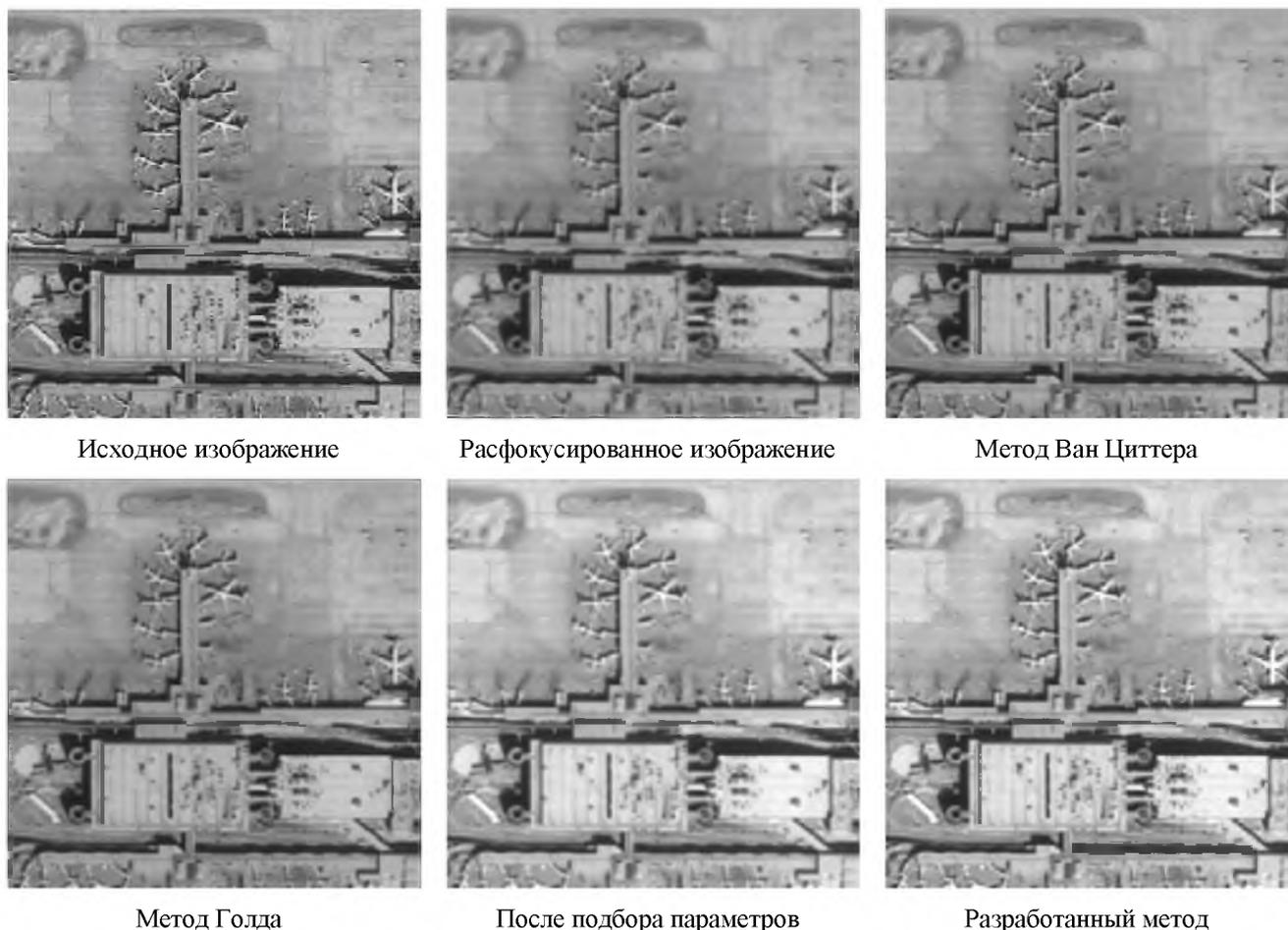


Рисунок 5 – Обработка тестового изображения.

Заключение

Предложен метод восстановления спутниковых изображений земной поверхности, отличительной особенностью которого является модификация оператора Тихонова за счет аддитивной добавки, которая позволяет повысить вклад высокочастотных компонент с помощью оценивания параметров компенсации действия функции рассеяния точки непосредственно по результатам измерений с одновременным подавлением эффекта переэконтрастирования.

Реализуемый в разработанном методе процесс определения конкретных параметров восстановления качества изображения позволяет составить полный паспорт для метрической аттестации измерительных свойств изображений земной поверхности.

Разработана программная реализация алгоритмов восстановления изображений, которая позволяет осуществлять практическую реализацию разработанного метода для решения задач строительства, проектирования территорий, земельного кадастра, а также экологического мониторинга, прогнозирования и управления в сфере техносферной безопасности территорий.

Результаты проведенного вычислительного эксперимента показали, что применение разработанного метода позволяет повысить резкость изображения на спутниковых снимках на 60% по сравнению с существующими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karini H.A. Techiques For Automated Extraction of Roadway Inventory Features From High-Resolution Satellite Imagery [Text] / H.A. Karini, X.Dai, S.Khorran, A.J. Khattack, J.E.Hummen // Geocanto Int. – 1999. - 14.-№2. - P.5-16.
2. Preliminary Analysis of Landsat-4 Thematic Mapper Products // Inter. J. of Remote Sens., L. – 1983. - V.4.- №4.-P.817-828.
3. Куусуль, Н.Н. Геопространственный анализ рисков на основе слияния данных [Текст] / Н.Н. Куусуль, Я.И. Зельк, С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов // Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса – физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», учреждение Российской академии наук, институт космических исследований РАН, 2010. – 2010. – Т.7. – № 2.– С. 55-66.
4. El-Mowafy A. Integrated Use of GPS and GLONASS in Support of the Redesign of Road Networks [Text] /A. El-Mowafy // Navig J. -2001.-54.-№1.-P.15-17.
5. Дубина, В.А. Интеграция спутниковых данных и наземных видеонаблюдений в системах мониторинга [Текст] / В.А. Дубина, В.К. Фищенко, О.Г. Константинов, Л.М. Митник // Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса – физические основы, методы и технологи мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», учреждение Российской академии наук, институт космических исследований РАН, 2011. – 2011. – Т.8. – № 3. – С. 214-222.
6. Fergus Robert. Removing camera shake from a single photograph [Text] / Fergus Robert, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, William T. Freeman. // Journal: ACM Transactions on Graphics. – 2006. – TOG. – Vol. 25. – No.3. – pp. 787-794.
7. Eric Breton, Christophe Lamy, Fabrice Levy and Bernard Rouge. "Operational data processing to improve SPOT image resolution"// Proc. SPIE 4474, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, 323 (November 20, 2001); doi:10.1117/12.4486.
8. Селиванов, А.С. Субпиксельная обработка как способ повышения пространственного разрешения в системах дистанционного зондирования [Электронный ресурс] / А.С. Селиванов //ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИКП»). – 2008. – Режим доступа: <http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm>.
9. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений [Текст] / Р.А. Шовенгердт. – М.: «Техносфера», 2010. – 560 с.
10. Jacobsen, K. Very high resolution satellite images – competition to aerial images [Text] // Proc.Map World Forum, Hyderabad, India – 2010.
11. Park S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview [Text] / Park S. C., Park M. K., Kang M. G. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – P. 21–36.
12. Ращупкин, А.В. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений [Текст] / Ращупкин А.В. // Полет. – 2008. – № 11. – С. 42 - 48.
13. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника [Текст] / В.И.Тихонов. – М.: Советское радио, 1966. – 677 с.
14. Остриков, В. Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления [Текст] / Остриков В.Н. // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011». – М.: ИКИ РАН, 2012. – Т.38 – С. 16-21.
15. Сизиков, В.С. Математические методы обработки результатов измерений [Текст]: учебник для вузов / Сизиков В.С. – СПб: Изд-во «Политехника», 2001. – 239 с.
16. Бейтс, Р. Восстановление и реконструкция изображений [Текст] / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – М.: Мир, 1989 – 336 с.

Ивашук Ольга Александровна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем
E-mail: olga.ivashuk@mail.ru

Щербинина Наталья Владимировна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных систем

Федоров Вячеслав Игоревич

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
аспирант
Email: fedorov_v@bsu.edu.ru

IMPROVING MANAGEMENT EFFECTIVENESS OF TECHNOSPHERE SAFETY OF TERRITORIES ON THE BASIS OF IMPROVING THE QUALITY OF SATELLITE IMAGES OF THE EARTH'S SURFACE

Authors provided results of development and application of a method and algorithms of recovery of images of an earth surface on satellite pictures of high resolution. This method significantly raises visual characteristics of quality (sharpness, definition, contrast) of satellite pictures that expands a range of their application in case of the solution of tasks, such as planning of building of the territory, exponentiation and reconstruction of construction objects of different function, the organization of effective functioning of their engineering infrastructure, the solution of questions of the land registry, support of a technosphere safety with simultaneous increase of efficiency of decision-making process.

Keywords: remote sensing of Earth, digital space image, the spatial-frequency range, function of dispersion of a point.

BIBLIOGRAPHY

1. Karini H.A. Techiques For Automated Extraction of Roadway Inventory Features From High-Resolution Satellite Imagery [Text] / H.A. Karini, X.Dai, S.Khorran, A.J. Khattack, J.E.Hummen // Geocanto Int. – 1999. – 14. -№2. – P.5-16.
2. Preliminary Analysis of Landsat-4 Thematic Mapper Products // Inter. J. of Remote Sens., L. – 1983. – V.4. - №4. -P.817-828.
3. Kussul', N.N. Geoprostranstvennyy analiz riskov na osnove sliyaniya dannykh [Tekst] / N.N. Kussul', YA.I. Zelyk, S.V. Skakun, A.YU. Shelestov // Sbornik nauchnykh statey «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa – fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsi-al'no opasnykh yavleniy i ob'yektov», uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk, institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2010. – 2010. – T.7. – № 2. – S. 55-66.
4. El-Mowafy A. Integrated Use of GPS and GLONASS in Support of the Redesign of Road Networks [Text] /A. El-Mowafy // Navig J. -2001. -54. -№1. -P.15-17.
5. Dubina, V.A. Integratsiya sputnikovykh dannykh i nazemnykh videonablyudeniy v sistemakh monitoringa [Tekst] / V.A. Dubina, V.K. Fishchenko, O.G. Konstantinov, L.M. Mitnik // Sbornik nauchnykh statey «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa – fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologi monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob'yektov», uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk, insti-tut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2011. – 2011. – T.8. – № 3. – S. 214-222.
6. Fergus Robert. Removing camera shake from a single photograph [Text] / Fergus Robert, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, William T. Freeman. // Journal: ACM Transactions on Graphics. – 2006. – TOG. – Vol. 25. – No.3. – pp. 787-794.
7. Eric Breton, Christophe Lamy, Fabrice Levy and Bernard Rouge. "Operational data processing to improve SPOT image resolution"// Proc. SPIE 4474, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, 323 (November 20, 2001); doi:10.1117/12.4486.
8. Selivanov, A.S. Subpiksel'naya obrabotka kak sposob povysheniya prostranstvennogo razresheniya v sistemakh distantsionnogo zondirovaniya [Elektronnyy resurs] / A.S. Selivanov //FGUP «Rossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut kosmicheskogo priborostroyeniya» (FGUP «RNIKP»). – 2008. – Rezhim dostupa: <http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm>.
9. Shovengerdt, R.A. Distantsionnoye zondirovaniye. Metody i modeli obrabotki izobrazheniy [Tekst] / R.A. Shovengerdt. – M.: «Tekhnosfera», 2010. – 560 s.
10. Jacobsen, K. Very highe resolution satellite images – competition to aerial images [Text] // Proc.Map World Forum, Hyderabad, India – 2010.
11. Park S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview [Text] / Park S. C., Park M. K., Kang M. G. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – R. 21–36.
12. Rashchupkin, A.V. Tekhnologii obrabotki videoinformatsii, obespechivayushchiye kachestvo aerokosmicheskikh izobrazheniy [Tekst] / Rashchupkin A.V. // Polet. – 2008. – № 11. – S. 42 - 48.
13. Tikhonov, V.I. Statisticheskaya radiotekhnika [Tekst] / V.I.Tikhonov. – M.: Sovetskoye radio, 1966. – 677 s.
14. Ostrikov, V. N. Otsenka funktsii rasseyaniya tochki na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vostanovleniya [Tekst] / Ostrikov V.N. // Sbornik trudov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskoye zreniye v sistemakh upravleniya 2011». – M.: IKI RAN, 2012. – T.38 – S. 16-21.

15. Sizikov, V.S. Matematicheskiye metody obrabotki rezul'tatov izmereniy [Tekst]: uchebnyk dlya vuzov / Sizikov V.S. – SPb: Izd-vo «Politekhnik», 2001. – 239 s.

16. Beyts, R. Vosstanovleniye i rekonstruktsiya izobrazheniy [Tekst] / R. Beyts, M. Mak-Donnel. – M.: Mir, 1989 – 336 s.

O.A. Ivaschuk

Belgorod State National Research University, Belgorod

Doctor of technical sciences, professor of Information Systems Department

Email: ivaschuk@bsu.edu.ru

N. Shcherbinina

Belgorod State National Research University, Belgorod

Candidate of technical sciences, senior lecturer of Information Systems Department

V. Fedorov

Belgorod State National Research University, Belgorod

Postgraduate student

Email: fedorov_v@bsu.edu.ru