



## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

---

УДК 621.397

### О ДЕШИФРИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

**Е. Г. ЖИЛЯКОВ**  
**А. А. ЧЕРНОМОРЕЦ**  
**В. В. КРАСИЛЬНИКОВ**

*Белгородский  
государственный  
университет*

*e-mail: Zhilyakov@bsu.edu.ru*

В работе рассмотрены проблемы дешифрирования изображений земной поверхности по космическим снимкам, а также перспективные методы их решения.

Ключевые слова: изображение, дешифрирование, фильтрация, визуальное качество, классификация.

#### **Введение**

Решение значительной части задач, обеспечивающих принятие обоснованных управленческих решений в различных областях экономической, политической, военной и социальной деятельности человека, основывается на данных дистанционного зондирования Земли. Среди таких задач можно указать следующие: изучение природных ресурсов Земли, прогноз урожайности сельскохозяйственных культур, оценка ущерба от лесных пожаров и их последствий, контроль состояния гидротехнических сооружений на каскадах водохранилищ, определение реального местонахождения морских судов в той или иной акватории, обновление топографических карт, отражающих реальное состояние территорий, прогноз и контроль развития наводнений, оценка нанесенного ими ущерба, отслеживание динамики и состояния рубок леса, соблюдение лицензионных соглашений при освоении месторождений полезных ископаемых, контроль несанкционированного строительства, прогноз погоды и мониторинг опасных природных явлений, мониторинг разливов нефти и движения нефтяного пятна, природоохранный мониторинг и др.. Проблемы мониторинга различных процессов и явлений занимают одно из центральных мест среди задач, использующих данные дистанционного зондирования [1,2].

Решение многих задач мониторинга основано на использовании методов дешифрирования изображений. Под дешифрированием понимают процедуры выделения особенностей на изображении и их идентификации на основании выбранных характеристик.



Актуальность исследований в области дешифрирования изображений земной поверхности определяется необходимостью повышения качества обработки изображений, потребностью применения эффективных методов обработки и дешифрирования изображений земной поверхности в различных отраслях экономики и научных исследованиях состояния планеты.

При этом представляется целесообразным применять методы обработки данных, в основе которых используются принципы моделирования деятельности человека при решении задач мониторинга (когнитивность).

#### ***Проблема дешифрирования изображений земной поверхности***

Проблема дешифрирования изображений земной поверхности на космических снимках с использованием компьютерных технологий является одной из важнейших с точки зрения повышения эффективности систем обработки снимков земной поверхности.

Можно указать достаточно много направлений и областей применения методов и алгоритмов обработки изображений, в первую очередь это системы космического мониторинга земной поверхности на основе данных дистанционного зондирования [3], включая:

- геоинформационные системы;
- системы пеленгации и управления движением;
- системы видеонаблюдения и др.

В настоящее время существенное развитие получили технические средства регистрации изображений, порождаемых объектами естественного и искусственного происхождения в различных диапазонах частотного спектра. Сюда, прежде всего можно отнести дистанционную регистрацию изображений в оптическом и инфракрасных диапазонах длин волн электромагнитных излучений с использованием соответствующих датчиков, устанавливаемых на летательных аппаратах, включая спутниковые системы.

На основе таких изображений с целью принятия соответствующих решений осуществляется мониторинг различных процессов естественного и искусственного происхождения, для чего необходимо обеспечить высокий уровень достоверности интерпретаций анализируемых снимков.

Не вызывает сомнения необходимость разработки новых методов и алгоритмов обработки космических снимков, которые обеспечивают адекватные преобразования изображений земной поверхности с точки зрения их дальнейшего дешифрирования. Решение этой проблемы позволяет минимизировать ошибки в определении характеристик исследуемых объектов на земной поверхности и обеспечивает мировой уровень достоверности интерпретаций анализируемых снимков. Важным направлением исследований является разработка методов и алгоритмов восстановления изображений на космических снимках, позволяющих повысить пространственное разрешение объектов на земной поверхности, компенсировать дефокусировку и смазы, которые возникают при регистрации изображений. При решении задач дешифрирования изображений важным направлением исследований также является создание методов классификации объектов, обладающих на изображении подобными свойствами и характеристиками.

Существующие методы получения снимков земной поверхности с помощью искусственных спутников Земли должны позволять получать качественные снимки больших участков с высоким разрешением в различных участках спектра электромагнитных волн, что обеспечит возможность комплексного анализа свойств изучаемых объектов. Наличие открытого доступа к снимкам земной поверхности в различных диапазонах, получаемых со спутников WorldView-1, QuickBird, Ikonos, Cartosat, ALOS, EROS, Orbview, SPOT, IRS, TERRA (ASTER), Landsat, и др. определяет широкие возможности по их использованию для решения различных задач.



Таким образом, проблема разработки адекватных методов и алгоритмов дешифрирования изображений земной поверхности по космическим снимкам является актуальной, ее решение позволит существенно повысить эффективность использования вычислительных средств при реализации современных систем мониторинга различных естественных и искусственных процессов на земной поверхности.

Для обработки изображений земной поверхности в настоящее время широко используется следующее программное обеспечение:

- Программный комплекс ENVI (разработчик – компания ITT Visual Information Solutions) на сегодняшний день является одним из наиболее распространенных и доступных программных продуктов для визуализации и обработки данных дистанционного зондирования, мультиспектральных и гиперспектральных изображений.

- Программный продукт INPHO (разработчик – компания INPHO) используется для выполнения фотограмметрических проектов.

- Программный пакет SARscape для ENVI (разработчик – компания ITT Visual Information Solutions) – специализированный программный продукт, предназначенный для обработки радиолокационных данных, полученных радаром с синтезированной апертурой.

- Графическая система MicroStation (разработчик: компания Bentley Systems) – это полномасштабная 2D/3D графическая система для проектирования в машиностроении, архитектуре, строительстве, геодезии и картографии.

- Программный пакет Matlab (разработчик: компания MathWorks) – пакет прикладных программ для решения разнообразных инженерных задач.

Методы и алгоритмы, используемые в известном программном обеспечении, представляют «ноу-хау» исследователей и в большинстве случаев не доступны для анализа [4,5,6]. Экспериментальные исследования показали, что в отдельных случаях данные алгоритмы не позволяют получать качественные результаты по обработке и дешифрированию изображений.

По косвенным экспериментальным признакам недостатки методов, реализованных в известном программном обеспечении для решения задач обработки изображений связаны с использованием дискретного преобразования Фурье и КИХ-фильтрации, применение которых не позволяет точно определить долю энергии сигнала в отдельном частотном диапазоне и получить оптимальные по некоторому критерию результаты фильтрации изображений. Для повышения четкости изображений в известных подходах используют градиентные методы. Данные подходы основаны на конечно-разностных реализациях вычисления производных, которые являются неустойчивыми к исходным данным.

#### ***Методы дешифрирования изображений земной поверхности***

Для достижения мирового уровня качественного дешифрирования снимков земной поверхности, в первую очередь, следует решить существующие проблемы повышения эффективности методов и алгоритмов обработки изображений:

- фильтрация изображений;
- повышение визуального качества, выделение контуров изображений;
- масштабирование изображений;
- улучшение разрешения объектов на изображениях;
- классификация объектов на изображениях и др.

Для решения первой из указанных проблем одним из основных направлений обработки изображений в цифровой форме является их исследование на основе частотных представлений. Возможность проведения анализа изображений на основе частотных представлений определяется тем, что в визуальных данных, зачастую, наблюдается периодичность или квазипериодичность отображаемых процессов. На изображении могут присутствовать повторяющиеся объекты, которые задают некоторую периодичность изменения яркости изображения: параллельные дороги, пер-



пендикулярные и параллельные улицы, здания, овраги, леса, облака и др. Исследования на основе частотных представлений позволяют выявлять периодичность на изображении, оценивать энергию отдельных компонент изображения в заданном частотном интервале, обнаруживать шумы и удалять их, осуществлять фильтрацию компонент, соответствующих некоторому диапазону частот. Большинство известных методов обработки изображений предполагает использование дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [7] или быстрого преобразования Фурье (БПФ). Известно, что алгоритмы, использующие преобразование Фурье и БПФ, не позволяют вычислять точные значения энергетических характеристик в заданных частотных интервалах. Современные достижения в данном направлении связаны с разработкой методов [8,9] выделения на изображениях пространственных квазициклических компонент на основе превосходящих мировой уровень по точности и адекватности методов вычисления попадающих в заданные двумерные частотные диапазоны точных значений долей энергий [10] фрагментов изображений и частотной фильтрации, оптимальной в смысле минимума квадратического отклонения трансформанты Фурье  $Z(u,v)$  получаемого результата  $Y_\Omega$  от трансформанты Фурье  $F(u,v)$  исходного изображения  $\Phi$ , заданного в цифровом виде с помощью матрицы яркости  $\Phi=(f_{ik})$ ,  $i=1,2,\dots,M$ ,  $k=1,2,\dots,N$ , в выбранном частотном диапазоне  $\Omega$  и от нуля вне его:

$$\iint_{(u,v)\in\Omega} |F(u,v) - Z(u,v)|^2 dudv + \iint_{(u,v)\notin\Omega} |Z(u,v)|^2 dudv \Rightarrow \min.$$

Решению данной оптимизационной задачи соответствует изображение  $Y_\Omega$ ,

$$Y_\Omega = A^T \cdot \Phi \cdot B,$$

где матрицы  $A=(a_{i_1i_2})$ ,  $i_1,i_2=1,2,\dots,M$ , и  $B=(b_{k_1k_2})$ ,  $k_1,k_2=1,2,\dots,N$ , – субполосные матрицы [8], значения элементов которых определяются соотношениями

$$a_{i_1i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \sin(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases} \quad b_{k_1k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) - \sin(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases}$$

Значения  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  задают границы симметричной частотной области (частотного субинтервала)  $\Omega$ , которая имеет вид

$$\Omega : \{ \Omega(u,v) \mid (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2]) \}, \\ 0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi.$$

Другая группа проблем возникает в случаях, когда в виду воздействия различных факторов объекты на изображениях часто получают недостаточно чёткими для их восприятия, а наиболее важный фрагмент изображения может иметь слишком малый размер, чтобы на нём просматривались интересующие интерпретатора детали. Для повышения чёткости объектов на изображениях наиболее часто рекомендуется применять так называемые градиентные методы [11,12], основанные на численном дифференцировании с использованием тех или иных операторов над разностями значений функций. Известным недостатком таких операторов является чувствительность к воздействиям так называемых шумов измерений, что приводит к неустойчивостям получаемых оценок производных. Таким образом, необходимо использовать иные методы оценивания частных производных (в том числе смешанных) дискретных двумерных функций, которые позволяют вычислять устойчивые к влиянию шумов оценки.

В основе таких методов [8] предложено использовать принцип минимизации евклидовых норм оценок первых производных из класса функций с финитными областями трансформант Фурье, при дополнительных условиях совпадения соответствующих определённых интегралов (формула Ньютона- Лейбница) с разностями за-



регистрированных значений исходной функции (матрицы изображения). Методы вычисления производных цифровых сигналов на основе частотных представлений позволяют, используя принцип градиентной обработки изображений, получить более четкие, в смысле субъективного восприятия, изображения  $\bar{\Phi}$ , то есть к исходному изображению  $\Phi$  добавляется значение вычисленной производной  $\nabla\Phi$ :

$$\bar{\Phi} = \Phi + \nabla\Phi,$$

где

$$\nabla\Phi = \frac{\partial\Phi}{\partial x} + \frac{\partial\Phi}{\partial y} = B_x A^{-1} \cdot \Phi + \Phi \cdot B_y A^{-1},$$

элементы матриц  $A=\{a_{ik}\}$ ,  $B_x=\{b_{ik}\}$  и  $B_y=\{b_{ki}\}$ ,  $k=1,\dots,N$ ,  $i=1,\dots,N$  (для координаты  $y - k=1,\dots,M$ ,  $i=1,\dots,M$ ) имеют вид:

$$a_{ik} = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\sin\left(\frac{xk}{2}\right) \sin\left(\frac{xi}{2}\right)}{\left(\frac{x}{2}\right)^2} \cos\left[\frac{x}{2}(k-i)\right] dx, \quad b_{ki} = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} \frac{\sin\left(\frac{\omega\Delta t}{2} i\right)}{\omega\Delta t/2} \cos\left[\omega\left(k\Delta t - i\Delta t/2\right)\right] d\omega.$$

На рис. 1 представлены исходное изображение участка земной поверхности и результат его обработки с применением приведенного метода (отчетливо видно улучшение отображения мелких деталей).

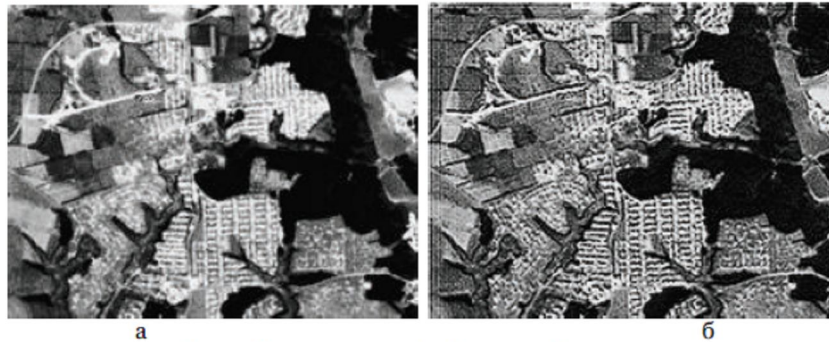


Рис. 1. Градиентная обработка изображения:  
а – исходный снимок, б – результат обработки

Пространственное разрешение объектов на снимках земной поверхности является одной из важнейших характеристик систем регистрации изображений, которая характеризует способность сенсоров различать детали в пространственных данных [13]. Для решения задачи повышения пространственного разрешения объектов на снимках земной поверхности, которое определяется размером наименьшего объекта, поддающегося идентификации, в настоящее время в большинстве известных систем используются аппаратные методы, характеризующиеся высотой расположения регистрирующего устройства, размером сенсора и фокусным расстоянием оптической системы, что имеет существенные ограничения по получению изображений высокого разрешения. Современные достижения связаны с методами повышения пространственного разрешения объектов на земной поверхности, компенсации дефокусировки и смазов, основанными на реализации вариационных процедур [8] вычислений приближенных решений соответствующих интегральных уравнений Фредгольма первого рода, которые превосходят по точности и устойчивости известные подходы к решению задач восстановления сигналов, например, такие как метод регуляризации А.Н. Тихонова.



Известно [14], что если  $R(y, x)$ ,  $y \in [c, d]$ ,  $x \in [a, b]$ , является аппаратной функцией линейной системы, то интегральное соотношение вида (уравнение Фредгольма первого рода)

$$u(y) = \int_a^b R(y, x) f(x) dx, \quad y \in [c, d],$$

с достаточной для практических задач точностью позволяет осуществлять вычисления значений входных воздействий  $f(x)$  по значениям откликов  $u(y_i)$ , которые регистрируются на выходе системы (восстановление сигналов).

Перспективным является вариационный метод восстановления аддитивных компонент сигналов [8], в котором для восстановления (оценки) входного сигнала использовано соотношение

$$\hat{f}(x) = \hat{f}_1(x) + \hat{f}_2(x),$$

где

$$\hat{f}_1(x) = \sum_{i=0}^M b_i \varphi_i(x), \quad \vec{b} = (b_0, \dots, b_n) = \sum_{i=0}^M \tilde{\gamma}_i \tilde{q}_i / \lambda_i,$$

$$(\hat{f}_2, \varphi_k) = 0, \quad k = 0, \dots, N, \quad \varphi_k(x_i) = R(y_k, x_i), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

компонента  $\hat{f}_2(x)$  содержит невозстановимые особенности сигнала.

Пример восстановления некоторого модельного сигнала приведен на рис. 2. Для сравнения осуществлялось также восстановление по методу Тихонова А.Н. На приведенном ниже рисунке (рис. 2б) результаты восстановления с использованием описанного выше метода соответствуют сплошной линией, а по методу Тихонова А.Н. - прерывистой.

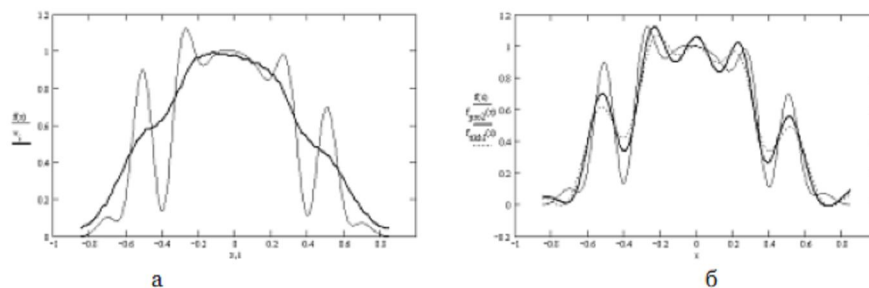


Рис. 2. Восстановление сигнала:

а – входное воздействие и отклик, б – результаты восстановлений

Одно из центральных мест в анализе визуальных данных занимает задача автоматической классификации объектов различной природы. Решением задачи автоматической классификации объектов является такое разбиение исходного множества анализируемых объектов без участия человека на непересекающиеся подмножества, в которых содержатся только сходные, близкие друг к другу в заданном признаковом пространстве, в некотором, возможно неизвестном, но объективно существующем отношении.

В настоящее время существует множество методов автоматической классификации объектов на изображениях. Каждый из этих методов основан на различных принципах (наиболее распространенные: К-внутригрупповые, ИСОМАД), в соответствии с которыми производится разбиение исходного множества объектов на классы. Выбор какого-либо конкретного метода или принципа производится в соответствии с представлениями о природе классифицируемых объектов и целью классификации. Адекватность получаемых в процессе классификации результатов может быть оцене-

на только экспертом, т.е. человеком. Таким образом, перспективным направлением в области разработки методов и алгоритмов классификации является разработка принципов, моделирующих человеческие представления об адекватности разбиения.

В настоящее время разрабатывается метод вариационной автоматической классификации [15] объектов на космических снимках земной поверхности. Вариационный подход наиболее приемлем для решения задачи автоматического агрегирования элементов, хотя и в данном подходе присутствует эвристическая составляющая при построении функционала качества разбиения, экстремальное значение которого соответствует наилучшему, в интуитивном понимании исследователя, разделению. В некоторых работах обращается внимание на степень однородности (похожести) объектов внутри каждого класса, которая должна быть учтена в функционале качества разбиения. Наиболее перспективным представляется конструирование функционала качества в виде аналога энтропии Шеннона, реализующего принцип максимальной однородности получаемых разбиений, который позволяет учитывать степень однородности (похожести) объектов внутри каждого класса. Вариационный алгоритм классификации объектов на изображениях основан на применении следующего функционала качества разбиения

$$L = \frac{1}{V},$$

где

$$V = 1 + \sum_{i=1}^K \frac{S_i}{Norm} * \frac{Ln\left(\frac{S_i}{Norm}\right)}{Ln(K)}, \quad Norm = \sum_{i=1}^K S_i,$$

$$S_i = - \sum_{q=1}^{M_i} \rho_{iq} * Ln(\rho_{iq}), \quad \rho_{iq} = \frac{r_{iq}}{R_q}, \quad \sum_{i=1}^{M_q-1} r_{iq} = R_q,$$

$R_q$  - общая длина внутренних ребер  $q$ -го подмножества (класса);

$r_{iq}$  - длина  $i$ -ого ребра в  $q$ -ом подмножестве ( $i=1, \dots, M_q-1$ ).

На рис. 3 приведено классифицируемое изображение и результат классификации объектов с помощью вариационного алгоритма, при использовании которого автоматическое разбиение на классы соответствует характеристикам реальных объектов на изображении.

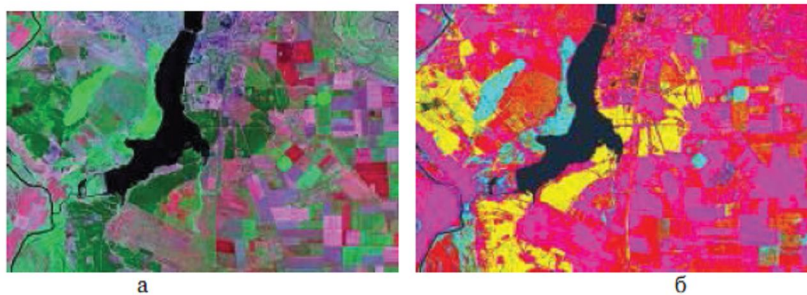


Рис. 3. Автоматическая классификация объектов на изображении:  
а – исходное изображение, б – результат классификации (14 классов)

### Заключение

Предварительные исследования, в том числе с использованием вычислительных экспериментов, показали, что существующая степень решения проблем обработки и дешифрирования изображений земной поверхности по космическим снимкам требует дальнейшего совершенствования существующих методов и разработки новых методов и алгоритмов для повышения качества получаемых результатов. Перспективность исследований состоит в разработке алгоритмов и их программной реализации, обеспечиваю-



щей улучшение визуального качества при обработке снимков независимо от частотного диапазона их регистрации, аппаратурных помех, в решении задач восстановления и масштабирования изображений, автоматической классификации и распознавании объектов на снимках земной поверхности, что принесет технический и экономический эффект в задачах дистанционного зондирования земной поверхности, и определяется заинтересованностью организаций в использовании результатов исследований.

#### Литература

1. Чандра, А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы [Текст] / А.М. Чандра, Гош С.К. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
2. Трифонова, Т.А. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях [Текст] / Т.А. Трифонова, Н.В. Мищенко, А.Н. Краснощеков. – М.: Академический проект, 2005. – 352 с.
3. Рис, У. Основы дистанционного зондирования [Текст] / У. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 346 с.
4. Яне, Б. Цифровая обработка изображений [Текст] / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
5. Журавлев, Ю.И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения [Текст] / Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько. – М.: Фазис, 2005. – 159 с.
6. Визильтер, Ю. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision [Текст] / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, В. А. Князь, А. Н. Ходарев, А.В. Моржин. – М.: ДМК пресс, 2007. – 464 с.
7. Методы компьютерной обработки изображений [Текст] / Под редакцией В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
8. Жилияков, Е.Г. Методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений [Текст] / Е.Г. Жилияков – Белгород, изд-во БелГУ, 2007. – 160 с.
9. Жилияков, Е.Г. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец. – Белгород: Изд-во ООО «ГиК», 2009. – 146 с.
10. Жилияков, Е.Г. Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Черноморец, И.В. Лысенко // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. РЛТ, 2007. – Вып. 4. – С. 115-123.
11. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
12. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
13. Кравцова, В.И. Космические методы исследования почв [Текст] / В.И. Кравцова. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
14. Верлань, А.Ф. Интегральные уравнения [Текст] / А.Ф. Верлань, В.И. Сизиков. – Киев: Наукова думка, 1986.
15. Жилияков, Е.Г. О компьютерной реализации одного метода автоматической вариационной классификации объектов на спутниковых фотографиях земной поверхности [Текст] / Е.Г. Жилияков, А.А. Барсук // Вопросы радиоэлектроники. – Сер. ЭВТ, 2010. – Вып. 1. – С. 166-177.

### ON DECODING OF EARTH SURFACE COSMIC IMAGES

**E. G. ZHILYAKOV**  
**A. A. CHERNOMORETS**  
**V. V. KRASILNIKOV**

*Belgorod State University*

*e-mail:*  
*Zhilyakov@bsu.edu.ru*

This article presents the problems of decoding earth surface cosmic images and the promising methods of their solution.

Key words: image, decoding, filtering, visual quality, classification.