

*На правах рукописи*



КРЫЖЕВИЧ ЛЕОНИД СВЯТОСЛАВОВИЧ

**МЕТОД, МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ СЖАТИЯ  
РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ БИОРТОГОНАЛЬНЫХ  
WAVELET-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (технические и медицинские системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Курск 2013

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре информационных систем и технологий

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
**Сизов Александр Семёнович**

Официальные оппоненты: **Егоров Сергей Иванович,**  
доктор технических наук, доцент,  
Юго-Западный государственный  
университет, профессор кафедры  
вычислительной техники

**Бессонов Дмитрий Петрович,**  
кандидат технических наук,  
Научно-исследовательский центр  
(г. Курск) ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ,  
начальник отдела

Ведущая организация: Военный учебно-научный центр  
военно-воздушных сил «Военно-  
воздушная академия имени  
проф. Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Защита состоится «28» марта 2013 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.105.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета.

Автореферат разослан «27» февраля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.105.03



Милостная Наталья Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время интенсивно развивается мониторинг окружающей среды с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Системы мониторинга на основе БПЛА (СМ БПЛА) широко используются в системах МЧС, ГИБДД и в других приложениях. При создании системы мониторинга, особенно чрезвычайных ситуаций (ЧС), учитывают непрерывность наблюдений, обеспечивающую необходимый темп обновления данных, соответствующий динамике развития чрезвычайной ситуации. Мониторинг окружающей среды на основе БПЛА предназначен для существенного повышения эффективности управленческих решений и мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС на федеральном, региональном и местном уровнях.

Основным источником информации об окружающей среде является передача изображений с беспилотного летательного аппарата на пункты управления. Качество передачи информации о районе мониторинга определяется методами ориентирования БПЛА в пространстве и средствами его видеонаблюдения. Управление летательным аппаратом осуществляется на основе анализа полученных снимков. В связи с этим предъявляются высокие требования к качеству принимаемых с БПЛА изображений и скорости их передачи. Последняя характеристика во многом определяется помеховой обстановкой и пропускной способностью канала связи. Однако недостаточная пропускная способность часто не позволяет осуществить передачу растровых изображений с высоким качеством.

Решение этой задачи в настоящее время осуществляется путем разработки соответствующих систем связи с применением методов сжатия информации на борту БПЛА.

Существующие форматы передаваемых изображений разделены на две основные группы: со сжатием информации без потерь и с потерями. В качестве типичных представителей форматов сжатия без потерь выделены GIF и PNG. Однако такие форматы проектировались как универсальные для своего типа данных и не обеспечивали учет особенностей сжимаемого файла, хранящего изображение, что привело к существенному проигрышу в степени сжатия по сравнению с аналогичными алгоритмами сжатия с потерями.

Одним из форматов wavelet-сжатия с потерями является JPEG-2000, в качестве основных ограничений которого при решении задач мониторинга на основе БПЛА можно выделить неоптимальное соотношение степени компрессии и качества восстановленных данных для некоторых типов изображений, появление характерных искажений при сжатии областей однородного цвета и монохромных изображений, труднопредсказуемое качество изображения.

Таким образом, в настоящее время в рассматриваемой предметной области существует **противоречие**: с одной стороны, вследствие высокой динамики развития ЧС требуется передача больших объемов геопространственных данных (ГПД) в масштабе реального времени, с другой –

существующие методы их обработки и передачи в пункты управления имеют ограниченные оперативно-технические возможности. Радикальным направлением разрешения этого противоречия является уменьшение различных видов избыточности, содержащейся в ГПД.

Вопросы управления БПЛА на основе обработки геопространственной информации рассмотрены в научных работах Н. Я. Василина, М. Павлушенко, Г. Евстафьева, И. Макаренко, В. В. Ключкова, а также зарубежных авторов: Н. Eisenbeis, М. А. Jensen, Т. Nelson, М. D. Rice, А. Г. Гребеникова, А. К. Мялицы, В. В. Парфенюка, В. Слюсаря.

Непосредственно алгоритмам сжатия изображений, в частности основанным на wavelet-преобразованиях, обеспечивающих частотную и временную локализацию, а также возможность обрабатывать сигнал на разных масштабах, посвящены работы И. Я. Новикова, А. В. Петрова, Д. Марпе, Х. Трибеля, М. Н. Юдина, К. Ch. Chui, А. Cohen, R. R. Coifman, I. Daubechies, J. - С. Feauveau, S. Mallat, Н. -Т. Pai, Jun Tian, D. Wei и др.).

В данных работах исследовались в основном вопросы применения сжатия информации в информационно-вычислительных сетях, однако в них не учитывались особенности передачи изображений с подвижных летательных объектов. Поэтому **целью диссертации** является увеличение количества передаваемых растровых изображений в контуре управления СМ БПЛА при мониторинге окружающей среды на основе устранения различных видов избыточности, содержащейся в геопространственных сигналах.

**Научно-технической задачей** работы является разработка метода и моделей обработки растровых изображений на основе многомерной кластеризации геопространственных данных, формирования цветового пространства и биортогональных wavelet-преобразований.

Эта задача декомпозирована на **частные научные задачи**:

1. Системный анализ состояния вопроса сжатия изображений в мобильных объектах управления, обоснование направлений исследования.
2. Разработка математической и алгоритмической моделей обработки растрового изображения на основе описания wavelet-пакетами и разложения на биортогональные базисы и определение путей снижения его избыточности.
3. Разработка метода снижения спектральной избыточности на основе анализа многомерной функции плотности палитры цветов растровых изображений и исследования её спектрограмм.
4. Разработка способа минимизации суммарной ошибки при обработке цифровых сигналов изображений путем дискретных линейных преобразований в новом цветовом пространстве.
5. Создание специальных алгоритмических и программных средств, обеспечивающих визуализацию и трансформацию растровых изображений, и экспериментальная проверка инструментальных средств сжатия на реальных образцах.

**Объект исследования** – информационные системы обработки ГПД и управления мобильными объектами мониторинга окружающей среды.

**Предмет исследования** – модели, методы и алгоритмы сжатия растровых изображений при управлении БПЛА.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использованы методы общей теории систем и системного анализа, теорий: обработки изображений, wavelet-преобразований, управления организационно-техническими системами и вероятностей, а также методы линейной алгебры, математического и функционального анализа, инструментарий объектно-ориентированного программирования. Значительную часть исследований составляют компьютерные эксперименты по обработке реальных неподвижных цветных геопространственных изображений, направленные на получение необходимых статистических данных и определение характеристик предложенных методов сжатия.

**Соответствие специальности.** Согласно паспорту специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации», материалы, представленные в диссертации, соответствуют п.5 в части разработки специального математического и программного обеспечения систем анализа и обработки информации, результаты исследования реализованы в виде зарегистрированного программного продукта, а также п.12 в части визуализации, трансформации и анализа информации на основе компьютерных методов обработки информации при управлении сложными динамическими системами.

**Новыми научными результатами и положениями, выносимыми на защиту,** являются:

1. Математическая модель растровых изображений на основе описания wavelet-пакетами и разложения на биортогональные базисы, обеспечивающая уменьшение их структурной и пространственной избыточности.

2. Метод снижения спектральной избыточности, особенностью которого является построение многомерных спектрограмм, выявление корреляционной зависимости его компонент с кластеризацией в массиве многомерных данных, позволяющий сократить число избыточных цветов в растровом изображении.

3. Способ минимизации погрешностей при дискретных преобразованиях цифровых сигналов изображений в ограниченном линейном цветовом пространстве, обеспечивающий оптимизацию коэффициентов базиса и уменьшение уровня суммарной ошибки по сравнению с существующими базисами.

4. Специальные алгоритмические и программные средства, особенностью которых является использование арифметического кодирования блоков биортогональных wavelet-коэффициентов, обеспечивающие визуализацию и трансформацию растровых изображений в режиме реального времени.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке нового метода сжатия изображения применительно к системе мониторинга окружающей среды с использованием БПЛА, позволяющего повысить

оперативность наблюдений за динамикой развития чрезвычайных ситуаций и увеличить количество передаваемых растровых изображений, путем устранения содержащейся в них избыточности.

Показатель эффективности позволяет находить согласованное решение между качеством восстановленного изображения и степенью компрессии, а также осуществлять выбор наиболее рационального алгоритма сжатия изображений с приемлемым уровнем потерь.

Применение метода снижения спектральной избыточности обеспечивает уменьшение количества используемых цветов в 256 раз при этом качество восстановленного изображения соответствует требованиям рассматриваемой предметной области.

Модифицированный модальный алгоритм позволяет получить дополнительно сжатие в 2 раза (с 24 до 12 бит на wavelet-коэффициенты) и выигрыш в производительности в 1,4 раза.

На основе разработанных методов и алгоритмов был создан программный комплекс для использования в контуре управления БПЛА, обеспечивающий повышение эффективности передачи геопространственных данных по каналам связи с низкой пропускной способностью.

Разработанные алгоритмы обладают характеристиками, подтвержденными экспериментально и соответствующими современным требованиям по скорости, качеству обработки и сжатию данных при мониторинге окружающей среды.

Полученные теоретические результаты при анализе данных мониторинга окружающей среды на основе БПЛА являются основой разработанных конкретных алгоритмов и схем компрессии цифровых изображений, способных в потенциале уменьшить объем файла на два порядка при решении задач предметной области.

**Реализация результатов исследования.** Результаты диссертации реализованы в МЧС при передаче изображений с борта БПЛА на наземный комплекс управления, используются в научно-производственной деятельности ОБУ «Информационно-аналитический центр» Курской области, а также при разработке учебно-методического комплекса по дисциплинам «Теория информационных систем и процессов», «Информационные технологии» в ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» и по дисциплинам «Непрерывные wavelet-преобразования», «Цифровая обработка сигналов» в ФГБОУ ВПО «Курский государственный университет». Реализация результатов работы подтверждена соответствующими актами внедрения.

**Достоверность и обоснованность результатов** исследования обеспечиваются адекватностью применяемых методов, математической корректностью преобразований при получении аналитических зависимостей, а также соответствием результатов экспериментальных исследований основным теоретическим положениям и выводам.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 8 международных научно-

практических конференциях: Воронежской зимней математической школе (Воронеж, 2011, 2012 г.); Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Математика и ее приложения в современной науке и практике» (Курск, 2011, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы преподавания математики» (Курск, 2011, 2012 г.); IV Международной дистанционной научной конференции «Инновации в медицине» (Курск, 2011 г.); 16-я СЗШ «Современные проблемы теории функций и их приложения» (Саратов, 2012 г.).

**Основное содержание диссертации** отражено в 19 научных работах, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Изложенные в диссертации результаты получены лично автором. Среди работ, опубликованных в соавторстве, автором в [4] сделан обзор современного состояния беспилотных летательных средств, выявлены ограничения пропускной способности современных каналов связи и показано преимущество использование wavelet-алгоритма сжатия изображений, позволяющего увеличить количество передаваемой геопространственной информации по сравнению с другими методами, в [2] предложен критерий оценки изменения качества изображения к степени его сжатия и распространен алгоритм многомерной дискретной кластеризации на множества рациональных чисел, в [16] получена функция плотности палитры цветов, исследованы ее свойства и следствия из них, разработаны алгоритмы wavelet-поиска экстремальных точек финитного сигнала, выделение границ областей и обоснованы параметры выбора характеристического значения для каждой многомерной области.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 98 наименований, и 2 приложений. Основная часть диссертации изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 7 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, а также другие общие характеристики работы.

**В первом разделе** рассматривается система мониторинга окружающей среды, приводится краткая характеристика БПЛА, как одного из её компонентов.

Предложен вариант структурно-функциональной организации (СФО) систем мониторинга окружающей среды на основе применения БПЛА. Показано, что основой управления БПЛА в процессе мониторинга является геопространственная информация (ГПИ), полученная бортовыми средствами БПЛА. Целью управления является получение качественных геопространственных снимков в режиме реального времени, согласующихся с динамикой изменения мониторинговой среды.

Основным фактором, определяющим результативность мониторинга окружающей среды, является эффективность управления БПЛА на основе поступающей ГПИ. Скорость доставки ГПИ зависит от её объема, пропускной способности канала передачи графических данных и качества полученных изображений.

Проведен краткий обзор современных отечественных и зарубежных БПЛА, используемых в гражданских и военных приложениях, определены элементы, входящие в контур управления БПЛА. Большие объемы передаваемой геопространственной информации и ограниченная пропускная способность канала передачи геопространственных данных с борта БПЛА объективно обуславливают необходимость сжатия изображений.

В связи с этим в разделе проведен анализ современных методов сжатия изображений (GIF, TIFF, PNG, JPEG, JPEG-2000, FIF) и оценка их применимости в рамках решаемой задачи. Проведенный анализ выявил, что применительно к беспроводной передаче эти форматы обладают определенными ограничениями, в результате обоснована необходимость разработки новых методов сжатия изображений, на основе биортогональных wavelet-преобразований с повышенной гладкостью с учетом специфики предметной области, определены основные направления его реализации.

**Во втором разделе** проведен анализ видов избыточности в изображении и предлагаются подходы к её устранению. Строится математическая и алгоритмическая модели обработки растрового изображения на основе описания wavelet-пакетами и разложения на биортогональные базисы, уменьшающие структурную и пространственную избыточность.

Проведён системный анализ проблемных вопросов повышения эффективности специального математического и программного обеспечения систем wavelet-обработки информации. Полученные результаты выявили преимущество биортогональных wavelet-базисов по сравнению с ортогональными, поскольку они, обладая симметричностью, гладкостью и имея большее число нулевых моментов, обеспечивают более компактное представление сигнала, тем самым устраняя пространственную избыточность.

С целью уменьшения структурной избыточности в алгоритме Малла предложена модель его модификации, заключающаяся в применении wavelet-пакетного разложения элементов массива  $A$ . Однако применение полной процедуры вышеуказанного разложения по базисам пространств  $W^j$  приводит к излишней декорреляции данных, что делает малоэффективной последующую работу архиватора. Поэтому корректно использование частичного wavelet-пакетного разложения только для элементов предыдущего уровня, коррелированных по строкам  $R_{wv}^{j-1}$  и по столбцам  $C_{wv}^{j-1}$ , не подвергая преобразованию диагональные элементы  $D_{wv}^{j-1}$ . Показателем качества выбора базиса в данной модели берется величина энтропии, вычисляемая по формуле:

$$E = \sum_{n \in Z} |a_n|^2 \ln |a_n| \rightarrow \min. \quad (1)$$



Структура предлагаемой модификации схематически изображена на рисунке 1. Разработанная модель не приводит к излишней декорреляции значений wavelet-коэффициентов по сравнению со схемой полного wavelet-пакетного разложения и обеспечивает в среднем дополнительных 10% сжатия.

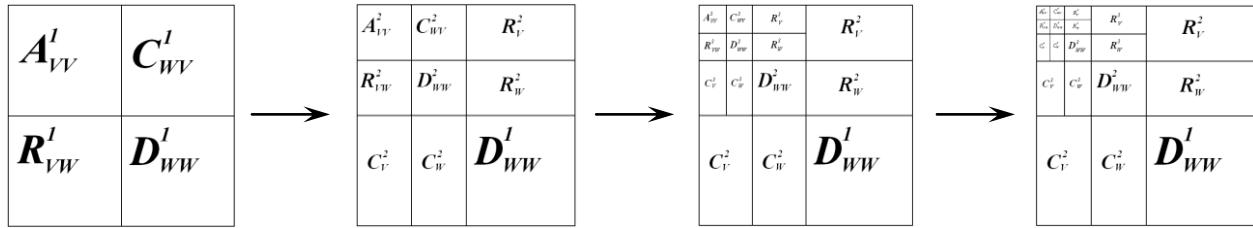


Рис. 1. Схема разложения в соответствии с предложенной алгоритмической моделью

В конце второго раздела сформулированы задачи разработки методов оптимального разбиения пространства wavelet-коэффициентов.

**Третий раздел** посвящен оптимизации сжатия и обратного воспроизведения цветных растровых изображений. Проведены исследования механизма цветоразличия человеческого глаза, предложены медианный и модальный методы построения неравномерной вероятностной функции, которая аппроксимирует исходный многомерный сигнал заданным количеством отсчетов с минимальной погрешностью. Показано наличие сильной корреляционной зависимости между компонентами цвета.

Для уменьшения избыточности по восприятию в ходе исследования были получены функции спектральной чувствительности рецепторов человеческого глаза с точностью до нормировочных множителей. С помощью этих функций был построен новый базис цветового пространства, адаптированный к восприятию оператором БПЛА. Также аналитическим путем выявлен эффект объединения длинноволновых каналов, а также коротковолнового канала с откликом палочек, что подтвердило гипотезу о снижении чувствительности к цвету при контрастных значениях яркости.

С целью снижения спектральной избыточности в изображении вводится новый подход к обработке набора значений исходного сигнала, устраняющий избыточные, с точки зрения восприятия, цвета в спектре сигнала.

Сущность подхода состоит в следующем. Пусть  $\Theta \subset R^m$  и  $\Omega \subset R^n$ , где  $m, n \in N$ . Зададим ограниченную кусочно-непрерывную функцию  $s: \Theta \rightarrow \Omega$ ,  $x \mapsto s(x)$ .

Необходимо разработать аналитический метод построения дискретной функции  $g(x) \in \Omega$ , ( $dom(g) = dom(s)$ ), которая удовлетворяет условиям

$$card(ran(g)) \leq u,$$

$$\int_{x \in dom(s)} |s(x) - g(x)| dx \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $dom(\cdot)$  – область определения функции,  $ran(\cdot)$  – область значений функции,  $card(M)$  – число элементов множества  $M$ ,  $u \in N$  – число уровней квантования.

Для решения этой задачи в работе разработан метод снижения спектральной избыточности, включающий следующие этапы:

**Этап I:** Ввести разбиение  $\{y^0, y^1, \dots\}$  одинаковой ширины  $\Delta y \in R_+$ . Под операцией  $y^i \oplus \Delta y$  будем понимать следующее действие  $y^{i+1} = (y_1^i + \Delta y, y_2^i + \Delta y, \dots, y_n^i + \Delta y)$ . В силу ограниченности функции  $s(x)$  количество таких разбиений конечно.

**Этап II:** Построить функцию плотности палитры  $f : \Omega \rightarrow R_+$  следующим образом:

$$f(y^i) = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\text{card}(\{\tilde{y} \in [y^i; y^i \oplus \Delta y), \tilde{y} = s(x), x \in \text{dom}(s)\})}{\mu \cdot \text{card}(\text{dom}(s))}, \quad (3)$$

где  $\text{card}(\{\tilde{y} \in [y^i; y^i \oplus \Delta y), \tilde{y} = s(x), x \in \text{dom}(s)\})$  – число элементов множества значений функции  $s(x)$  лежащих в промежутке  $[y^i; y^i \oplus \Delta y)$ , а  $1 \leq \mu < \infty$ .

В диссертационной работе сформулированы и доказаны свойства функции плотности палитры (3) и следствия из них.

**Этап III:** Построить и проанализировать график плотности палитры  $f(y)$ .

**Этап IV:** Определить точки локальных экстремумов функции  $f(y)$ .

Для определения точек локальных максимумов и минимумов функции  $f(y)$  в диссертации разработан метод wavelet-анализа, с помощью которого находятся экстремумы функции  $f$ , и их обобщение на многомерный случай, что позволяет реализовать быстрый поиск.

**Этап V:** Выделить области  $[y_{\min_i}; y_{\min_{i+1}}]$ .

**Этап VI:** Выбрать характеристическое значение  $\tilde{y}$  из каждой области  $[y_{\min_i}; y_{\min_{i+1}}]$ , для которого выполняется условие:

$$E(\tilde{y}) = \int_{y_{\min_i}}^{y_{\min_{i+1}}} |y - \tilde{y}| f(y) dy \rightarrow \min. \quad (4)$$

Обоснованность выбора характеристического значения доказана следующей теоремой:

*Уровень ошибки  $E(\tilde{y})$ , вычисляемой по (4), будет принимать минимальное значение, если  $\tilde{y}$  – медиана распределения значений палитры.*

Для реализации автоматического режима вычислений разработан алгоритм выделения областей дискретизации и поиска медианы распределения, который приведен в диссертации, а также показано, что для ускорения вычислений эффективно использование моды.

С помощью разработанного метода получена аппроксимирующая дискретная функция  $g(x)$  следующего вида:

$$g(x) = \begin{cases} \tilde{y}^1, y \in \Omega^1; \\ \tilde{y}^2, y \in \Omega^2 \\ \dots \\ \tilde{y}^u, y \in \Omega^u \end{cases}, \text{ где } \bigcup_{i=1}^u \Omega^i = \text{ran}(s). \quad (5)$$

Для снижения спектральной избыточности в изображении, каждая компонента цвета подвергается обработке в соответствии с вышеописанным методом, в результате чего значительно снижено количество спектральных составляющих, что позволило их кодировать 18 битами на пиксель, вместо 24.

С целью детального изучения свойств спектральной функции (3) и удобства её визуализации, в дальнейшем, цветовой куб анализируется по трем проекциям ( $rg$ ,  $rb$ ,  $gb$ ). Для построения 3-х мерных проекций, производится вычисление функции парных частот

$$F(r, g) = \int_0^{255} f(r, g, b) db, \quad F(r, b) = \int_0^{255} f(r, g, b) dg, \quad F(g, b) = \int_0^{255} f(r, g, b) dr. \quad (6)$$

При компьютерном анализе большинства изображений было обнаружено, что эллипс рассеивания точек вытянут вдоль главной диагонали каждой из трех проекций. Это обстоятельство позволило сделать вывод о корреляционной зависимости между компонентами  $r$ ,  $g$  и  $b$ .

Значения функций (6) представляют собой корреляционные таблицы степени взаимосвязи переменных. Для того, чтобы количественно определить уровень этой зависимости, вычисляются коэффициенты парной корреляции ( $r, g$ ), ( $r, b$ ), ( $g, b$ ),.

Полученные значения множественного коэффициента детерминации более 90% позволяют сделать вывод о степени взаимосвязи, причем по всем трем направлениям, что свидетельствует о расположении цветов вдоль главной пространственной диагонали куба. Это обуславливает необходимость смены цветового пространства путем введения нового базиса с целью уменьшения эллипсоида рассеивания точек в спектре многомерного сигнала.

**Четвертый раздел** посвящен анализу эффективности дискретных преобразований линейных пространств при использовании операций округления и извлечения целой части, разработке критериев и алгоритмов минимизации уровня потерь при таких преобразованиях, построению оптимального базиса цветового пространства.

В начале рассматривается процесс перехода между векторными пространствами в компьютерных системах, который записан как:

$$Y = \lfloor f(X) \rfloor, \tilde{X} = \lfloor f^{-1}(Y) \rfloor; \quad (7)$$

тогда  $|X - \tilde{X}|$  – абсолютная величина расстояния между исходными и восстановленными данными. В этом случае  $X$  и  $\tilde{X}$  представляют собой векторы в  $n$ -мерном пространстве.

Согласно раздела 2 делается вывод, что к наименьшим потерям приводят линейные преобразования (7). Таким образом, искажения при  $n$ -мерном линейном преобразовании можно задать в виде:

$$g(X, A) = \|X - [A^{-1} \cdot [A \cdot X + B + 0.5] + D + 0.5]\|, \quad (8)$$

где  $[\cdot + 0.5]$  – операция округления,  $B, D$  –  $n$ -мерные векторы,  $A$  – невырожденная матрица перехода. Для случая, если  $X$  – непрерывная величина, методами гармонического анализа было показано, что функция  $g(X, A)$  – является квазипериодической, с периодом  $P = \left\lfloor \frac{1}{|A|} \right\rfloor$ .

В этом случае суммарная ошибка в преобразованиях (8) целых массивов данных накапливается по закону:

$$F(A) = \int_{\Omega} g(X, A) dX, \quad (9)$$

где  $\Omega$  – ограниченное множество значений  $X$ .

В рамках раздела сформулированы условия минимизации уровня суммарной ошибки (9) при дискретных преобразованиях пространств, накладываются условия компактности на базисы этих пространств, а также рассмотрены возможные варианты усечения и сжатия их отдельных компонент.

Для обеспечения возможности решения таких задач на ЭВМ был разработан следующий способ перехода от уровня  $l$  к более низким уровням, обеспечивающий решение поставленной задачи с необходимой точностью  $\varepsilon$ .

#### ***Способ минимизации суммарной ошибки:***

На первом этапе необходимо выбрать начальную точку  $(a_{11}^0, a_{12}^0, a_{21}^0, a_{22}^0)$  и проводить оптимизацию с первой переменной  $j$  по первому рассматриваемому слою  $i$ . Оптимизировать функцию  $F$  по переменной  $a_{ij}$ . Затем проводятся аналогичные рассуждения для следующей переменной  $j = (j \bmod 2) + 1$  внутри  $i$ -ого уровня и осуществляется переход к этапу оптимизации. Если внутри этого слоя найден  $\min(F)$  по всем  $n$  переменным  $a_{ij}$ , то необходимо перейти к следующему слою  $i = (i \bmod 2) + 1$ , в противном случае следует начать оптимизацию внутри  $i$ -ого слоя. Если же оптимизация прошла на всех  $n$  слоях, тогда решение, которым является набор  $(a_{11}^l, a_{12}^l, a_{21}^l, a_{22}^l)$ , считается найденным. Иначе необходимо вернуться к этапу оптимизации  $i$ -ого слоя.

В дальнейшем производится модификация предложенного способа на многомерный случай (развернутое описание способа приведено в диссертационной работе). В соответствии с вышеописанным способом, полученные экспериментальным путем (раздел 2) начальные значения яркости  $Y$  и цветоразностных компонентов  $V_r$  и  $V_b$ , удовлетворяющие условию, что

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} = 0, \quad i = \overline{2..n}, \text{ оптимизируются и на их основе строится новый базис.}$$

В итоге была получена следующая матрица перехода в пространство  $YV_rV_b$  и обратная ей матрица для преобразования в пространство RGB в виде:

$$Transf = \begin{pmatrix} 0.29147 & 0.58329 & 0.12494 \\ -0.50005 & 0.4999 & -0.00005 \\ 0.16665 & 0.33328 & -0.5 \end{pmatrix}, Transf^{-1} = \begin{pmatrix} 1,00005 & -1,33356 & 0,25003 \\ 1,00045 & 0,67644 & 0,24993 \\ 1,00018 & -0,00026 & -1,75008 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

По разным метрикам  $d$  производилось сравнение относительных уровней суммарных ошибок нового пространства  $YV_rV_b$  с существующими в настоящее время цветовыми пространствами, такими как  $XYZ$ ,  $LMS$ , являющиеся цветовыми системами функций спектральной чувствительности, и  $YUV$ ,  $YIQ$ , используемые при хранении и обработке данных в телевидении (таблицы 1 и 2). Показатели разработанного базиса в таблицах выделены жирным шрифтом.

Таблица 1

Относительный уровень суммарных ошибок для различных цветовых пространств

$l$	$d$	$YV_rV_b$	$XYZ$	$LMS$	$YUV$	$YIQ$
$l_1$	$d_r^1$	<b>0.00066</b>	0.00464	0.00608	0.00395	0.00403
	$d_g^1$	<b>0.00005</b>	0.00379	0.00402	0.00389	0.00390
	$d_b^1$	<b>0.00236</b>	0.00368	0.00390	0.00487	0.00470
	$d_{sum}^1$	<b>0.00307</b>	0.01211	0.01400	0.01271	0.01263
$l_2$	$d_r^2$	<b>0.00161</b>	0.00585	0.00762	0.00493	0.00505
	$d_g^2$	<b>0.00042</b>	0.00464	0.00505	0.00450	0.00457
	$d_b^2$	<b>0.00349</b>	0.00388	0.00423	0.00615	0.00593
	$d_{sum}^2$	<b>0.00552</b>	0.01437	0.01690	0.01558	0.01555
$l_\infty$	$d_r^\infty$	<b>0.0039</b>	0.01563	0.01953	0.01172	0.01172
	$d_g^\infty$	<b>0.0039</b>	0.00781	0.01172	0.00781	0.0078
	$d_b^\infty$	<b>0.0078</b>	0.00781	0.00781	0.01563	0.00156
	$d_{sum}^\infty$	<b>0.0156</b>	0.03125	0.03906	0.03516	0.03516
$l_1$	$d_v^1$	<b>0.0016</b>	0.00472	0.00552	0.00501	0.00497
$l_2$	$d_v^2$	<b>0.00223</b>	0.00487	0.00581	0.00524	0.00521
$l_\infty$	$d_v^\infty$	<b>0.00506</b>	0.00930	0.01235	0.01150	0.01033

Таблица 2

Относительный уровень суммарных ошибок, после усечения количества отсчетов в 16 раз

$l$	$d$	$YV_rV_b$	$XYZ$	$LMS$	$YUV$	$YIQ$
$l_1$	$d_r^1$	<b>0,02588</b>	0,05053	0,09878	0,03453	0,03689
	$d_g^1$	<b>0,01267</b>	0,05972	0,06895	0,02051	0,02256
	$d_b^1$	<b>0,04112</b>	0,02883	0,03222	0,06008	0,05226
	$d_{sum}^1$	<b>0,07967</b>	0,13908	0,19995	0,11512	0,11171
$l_2$	$d_r^2$	<b>0,03327</b>	0,05711	0,11736	0,04029	0,04364
	$d_g^2$	<b>0,01693</b>	0,06860	0,08102	0,02495	0,02653
	$d_b^2$	<b>0,05044</b>	0,03440	0,03850	0,07040	0,06469
	$d_{sum}^2$	<b>0,10064</b>	0,16011	0,23688	0,13564	0,13486
$l_\infty$	$d_r^\infty$	<b>0,09375</b>	0,11328	0,22266	0,07813	0,10547
	$d_g^\infty$	<b>0,05469</b>	0,12109	0,15234	0,06441	0,06250
	$d_b^\infty$	<b>0,11328</b>	0,07031	0,07813	0,13281	0,17969
	$d_{sum}^\infty$	<b>0,26172</b>	0,30468	0,45313	0,27535	0,34766
$l_1$	$d_v^1$	<b>0,03220</b>	0,05059	0,07557	0,04517	0,04385
$l_2$	$d_v^2$	<b>0,03623</b>	0,05523	0,08528	0,04900	0,04758
$l_\infty$	$d_v^\infty$	<b>0,08237</b>	0,10080	0,15602	0,09440	0,10474

Данные таблицы свидетельствует о том, что новый базис является наиболее предпочтительным с точки поставленной задачи. На основе полученного базиса строятся проекции спектрального состава в новое цветовое пространство. В результате проверки на наличие корреляционных зависимостей между компонентами было выяснено, что взаимосвязь является слабой, и ей можно пренебречь. Следовательно, новый базис более точно описывает природу образования и взаимодействия новых цветов.

**Пятый раздел** посвящен созданию специальных алгоритмических и программных средств, обеспечивающих визуализацию и трансформацию растровых изображений, оценку качества и степени сжатия декоррелируемых данных в пространстве wavelet-коэффициентов.

Методика проведения экспериментальных исследований включала следующие этапы:

- формирование массива реальных изображений;
- разработка алгоритмических и программных средств обработки изображений;
- выбор числа интервалов кластеризации;
- оценка характеристических значений для интервалов;

- оценка показателя качества преобразования;
- выбор уровня квантования wavelet-коэффициентов;
- оценка качества преобразованного изображения.

Для дискретного случая при экспериментальных исследованиях был разработан алгоритм многомерной кластеризации палитры цветов, схема которого изображена на рисунке 2. В соответствии с алгоритмом строится дискретный ряд  $(s, w)$  распределения цветов в изображении, где  $s(r, g, b)$  – подмножество возможных цветов, а  $w(r, g, b)$  – их частот в изображении. Этот ряд ранжируется по частоте  $w$ . На следующем шаге устанавливается число  $n$  интервалов кластеризации с указанием: абсолютного значения, процентного соотношения, коэффициента снижения избыточности или числа бит на пиксель. Затем все значения из заданного интервала заменяются характеристическими.

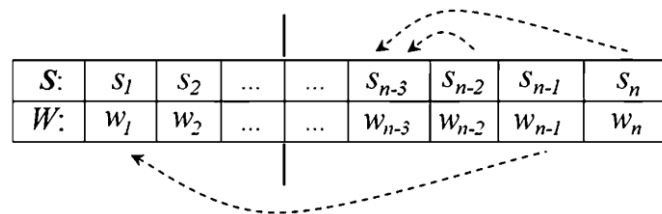


Рис. 2. Схема модального алгоритма многомерной кластеризации

Традиционно уровень качества преобразованного сигнала относительно исходного определяют по формуле:

$$P = 20 \lg \left( \frac{|s_{\max} - s_{\min}|}{\sigma_s} \right), \quad (11)$$

где  $\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{W \cdot H} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} (s_{\text{исх}}(i, j) - s_{\text{обр}}(i, j))^2}$  – среднее квадратическое отклонение,

а  $s_{\min}, s_{\max}$  – минимальное и максимальное значение сигнала.

Для допустимого снижения уровня качества сигнала (30дБ) рассчитывается допустимое значение  $\sigma_s$ , которому соответствует:

$$\sigma_s \leq \frac{255\sqrt{3}}{\sqrt{1000}} \approx 14. \quad (12)$$

По значению (12) компьютерная система в автоматическом режиме определяют порог сжатия изображения, заранее определив его качество.

Сравнение среднего квадратического отклонения для различных характеристических значений, приведенное на рисунке 3, позволило определить, что наиболее приемлемым значением является мода. Из анализа приведенных зависимостей следует, что, эффективность предложенного подхода, позволяющего уменьшить количество цветов на 95% – 99%. Результаты экспериментальных исследований показали, что оптимальным значением является уменьшение цветов в 256 раз.

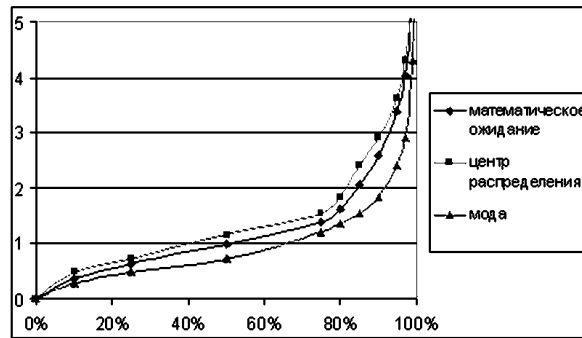


Рис. 3. СКО характеристических значений при итерационном подходе к модальному алгоритму уменьшения спектральной избыточности

Для сравнения эффективности различных преобразований сформулирован показатель сравнения уровня качества и коэффициента компрессии, который определяется как:

$$K(i) = \frac{w_p(i)}{w_c(i)}, \quad i = \overline{0, 128}, \quad (13)$$

где  $w_p(i) = \frac{P(i)}{P(0)}$  — относительный показатель уровня качества преобразованного изображения на  $i$ -ом шаге по сравнению с уровнем качества при преобразовании «почти без потерь»;

$w_c = \frac{C(i)}{C(0)}$  — относительный показатель объема сжатого изображения на  $i$ -ом шаге преобразования в сравнении с объемом сжатого изображения после преобразования «почти без потерь».

Для того что бы сравнить два и более алгоритмов сжатия, а также найти оптимальное соотношение качество/сжатие на первом уровне разложения, необходимо перейти к биортогональному wavelet-базису. Коэффициенты wavelet-разложения квантуются и сохраняются в файле, который затем архивируется. На основе преобразованного файла вычисляется  $w_c^i$ . Далее, после обратного преобразования, сравнивается синтезируемое изображение с исходным по формуле (11) и вычисляются значения уровня качества  $P(i)$ . По результатам экспериментальных данных определяется показатель эффективности (13).

С помощью модального алгоритма, реализующего метод снижения спектральной избыточности, в автоматическом режиме можно определить оптимальное соотношение уровня качества и коэффициента сжатия, а также обеспечивать интеллектуальную поддержку выбора степени сжатия, задавая качество изображения на требуемом уровне.

Качество преобразованных изображений в соответствии с формулой (11) оценивалось группой экспертов, состоящих из 5 человек, в состав которой, в том числе, входили специалисты по изобразительной графике и оператор СМ БПЛА. При сравнении качества была выбрана метрика метода эталонных классов, по которой оценивались типовые для системы мониторинга изображения, в частности фрагменты городской застройки, лесных массивов,

паводковых ситуаций и т.д. Результаты проведенных экспертных оценок удовлетворительно согласуются с теоретическими.

В конце раздела приведены результаты сравнения различных методов квантования wavelet-коэффициентов, представленные на рисунке 4 и в таблице 3. В соответствии принятым показателем наибольшую эффективность дает разработанный в диссертации метод снижения спектральной избыточности, обобщенный на многомерный случай и множество рациональных чисел. Это преобразование на первом уровне обработки позволяет достичь результата показателя эффективности  $K > 2$  и получить дополнительно сжатие в 2 раза (12 бит памяти вместо 24).

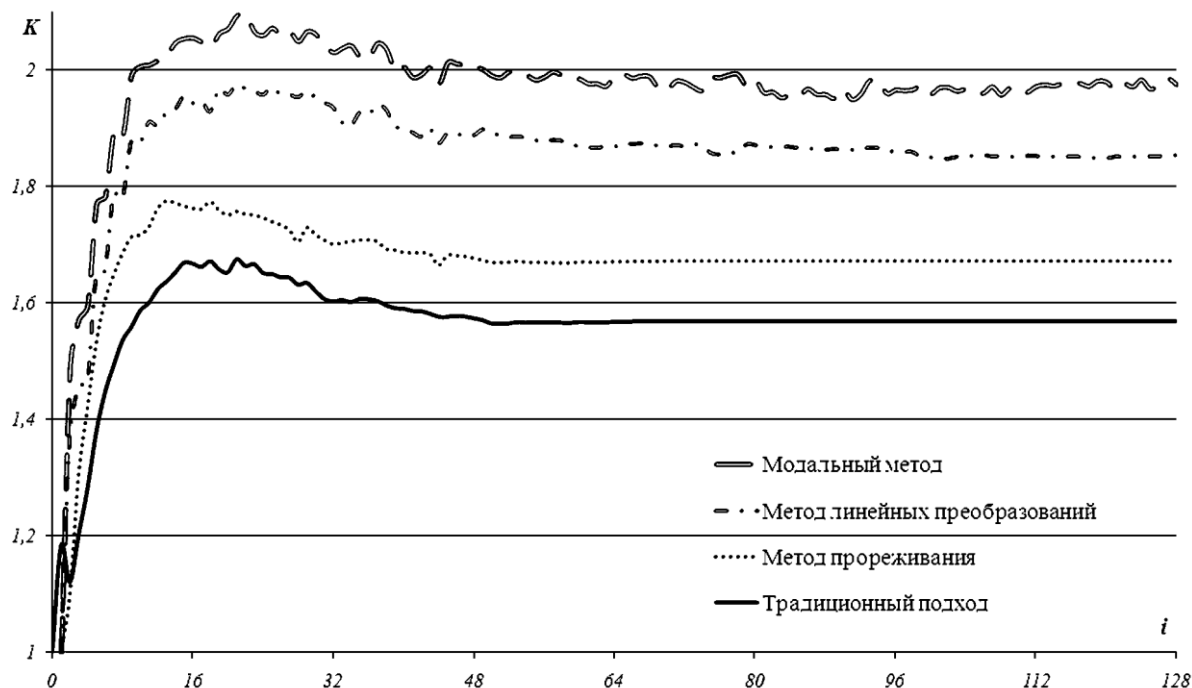


Рис. 4. Показатели эффективности  $K$  при использовании различных моделей преобразований

Таблица 3

Сравнительная характеристика разработанного и существующих методов сжатия

Тип сжатия	Формат	Время обработки, сек	Степень сжатия, раз	Объем файла, Мб	Время передачи, сек	Количество изображений в минуту
Без сжатия	RAW	0	0	54	86,400	0,7
Без потерь	Разработанный метод	1,57	3,97	13,6	21,763	2,8
	JPEG-2000	0,78	3,14	17,2	27,481	2,2
	JPEG	0,58	2,62	20,6	32,977	1,8
	PNG	0,43	1,77	30,5	48,814	1,2
С потерями	Разработанный метод	2,140	20,4	2,6	4,235	14,2
	JPEG-2000	0,945	15,69	3,4	5,506	10,9
	JPEG	0,678	12,07	4,5	7,158	8,4



В результате разработанный метод обеспечивает выигрыш в производительности в 1,4 раза при кодировании методом Хаффмана компонентов изображения, и, тем самым, позволяет осуществить реализацию мониторинга ЧС практически в реальном масштабе времени.

**В заключении** приводятся основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической задачи разработки метода и моделей обработки растровых изображений на основе многомерной кластеризации геопространственных данных, формирования цветового пространства и биортогональных wavelet-преобразований. В ходе решения этой задачи получены следующие основные результаты:

**1.** В результате анализа структурно-функциональной организации систем мониторинга окружающей среды на основе применения БПЛА и бортовых средств передачи ГПД определены ограничения пропускной способности каналов связи БПЛА и наличие избыточности в изображениях.

**2.** Разработана математическая и алгоритмическая модели растрового изображения на основе описания wavelet-пакетами и разложения на биортогональные базисы, устраняющая декорреляцию данных и обеспечивающая уменьшение структурной и пространственной избыточности.

**3.** Разработан метод снижения спектральной избыточности, содержащий этапы: построения многомерных спектрограмм; выявления корреляционной зависимости его компонент; кластеризацию в массиве многомерных данных, позволяющий сократить число избыточных цветов на 95%-99% в зависимости от типа изображений.

**4.** Разработан способ минимизации погрешностей при дискретных преобразованиях цифровых сигналов изображений в ограниченном линейном цветовом пространстве, обеспечивающий оптимизацию коэффициентов базиса и минимальный уровень суммарной ошибки по сравнению с существующими базисами.

**5.** Создана система алгоритмов и программные продукты wavelet-компрессии статических изображений, основанные на специальном способе арифметического кодирования блоков биортогональных коэффициентов.

**6.** Сформулирован показатель эффективности формата сжатия в виде отношения уровня качества к степени компрессии, на основе которого, с использованием метода экспертных оценок, было показано соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

## **Основные публикации по теме диссертации**

### Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Крыжевич Л. С. Оптимизация потерь при преобразовании пространств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Том 8. №9. С. 23 – 31.
2. Крыжевич Л. С., Довбня В.Г. Подходы к обработке изображения на основе биортогональных всплесков с компактным носителем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. №2. Часть 2. С.133-138.
3. Крыжевич Л.С. Снижение спектральной избыточности на основе анализа спектрограмм изображения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2012. №2. С. 137-145.
4. Крыжевич Л.С., Сизов А.С. Обзор состояния проблемы передачи растровых изображений с беспилотных летательных средств // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №6(45). С. 44-52.

### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Крыжевич Л. С. Программа снижения спектральной избыточности в цифровых изображениях // Программа для ЭВМ №2012610675, заявлено 14.11.2011, опубликовано 12.01.2012.
6. Крыжевич Л. С. Программа сжатия изображений на основе предварительного частотно-временного анализа входного сигнала // Программа для ЭВМ № 2012610897, заявлено 25.11.2011, опубликовано 20.01.2012.
7. Крыжевич Л. С. Программа ускоренной сортировки большого объема числовых массивов данных // Программа для ЭВМ № 2012611360, заявлено 7.12.2011, опубликовано 3.02.2012.

### Статьи и материалы конференций:

8. Крыжевич Л. С. Снижение спектральной избыточности в изображении // Современные методы теории функций и смежные проблемы: материалы Воронежской зимней математической школы. Воронеж: ВГУ, 2011. С. 26 – 27.
9. Крыжевич Л. С. Математические методы в теории сжатия изображений // Математика и ее приложения в современной науке и практике: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Курск: ЮЗГУ, 2011. С. 78 – 82.
10. Крыжевич Л. С. Всплесковое преобразование при анализе ЭКГ для выявления болезней сердца // Актуальные проблемы и перспективы преподавания математики: сб. науч. ст. II Международная науч.-практ. конф. Курск: ЮЗГУ, 2011. С. 97 – 105.
11. Крыжевич Л. С. Формирование звуковых полей в единый пространственный 3D-видеообраз // Инновации в медицине: материалы

Четвертой международной дистанционной научной конференции. Курск: КГМУ, 2011. С. 65 – 70.

12. Крыжевич Л. С. Выбор и преобразование цветового пространства // Ученые записки: электронный журнал Курского государственного университета. 2011. №4(20) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.scientific-notes.ru/pdf/022-006.pdf> (1.2 МБ).

13. Крыжевич Л. С. Адаптивный метод многомерной группировки для снижения спектральной избыточности в изображении. // Воронежская зимняя математическая школа С. Г. Крейна – 2012: материалы международной конференции. Воронеж: ВГУ, 2012. С. 119 – 121.

14. Крыжевич Л. С. Оптимизация уровня потерь при преобразовании пространств // Современные проблемы теории функций и их приложения: материалы 16-й Саратов. зимней школы. Саратов: Научная книга, 2012. С. 102 – 103.

15. Крыжевич Л. С. Использование пакетов всплесков в теории сжатия изображений // Математика и ее приложения в современной науке и практике: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. Курск: ЮЗГУ, 2012. С. 139 – 144.

16. Крыжевич Л.С., Сизов А.С., Яночкина О.О. Минимизация числа отсчетов при дискретизации финитного сигнала // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №5(44). Часть 2. С. 152-160.

17. Крыжевич Л. С. Модель механизма цветоразличия человеческого глаза // Ученые записки: электронный журнал Курского государственного университета, 2012. №3(23). Т. 1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://scientific-notes.ru/pdf/025-005.pdf> (1.6 МБ).

18. Крыжевич Л. С. Модальный метод адаптивной кластеризации палитры цветов // Теория и практика системного анализа: сборник трудов Всерос. молодеж. конф. Белгород: ИД «Белгород», 2012. С. 257-260.

19. Крыжевич Л. С. Подходы к обработке изображения на основе биортогональных всплесков компактным носителем // Прикладная математика, управление и информатика: сборник трудов Междунар. молодеж. конф. Белгород: ИД «Белгород», 2012. Т. 1. С. 446-450.

Подписано в печать 27.02.2013 г. Формат 60x84 1/16.

Печатных листов 1,1. Тираж 100 экз. Заказ\_\_\_\_\_.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября,94.