

На правах рукописи

Нгуен Динь Минь

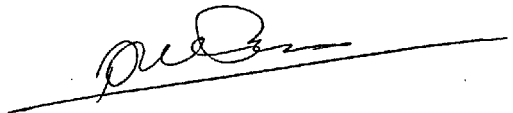
**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА  
СЖАТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.35 - "Геоинформатика"

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии  
Московского государственного университета геодезии и картографии

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Малинников В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Журкин И.Г.,  
кандидат технических наук  
Кочнова И.В.

Ведущая организация: ФГУП «ГОСГИС центр»  
Государственный научно-внедренческий  
центр геоинформационной системы и  
технологии.

Защита состоится ~~2.1~~ декабря 2006 года в ~~12~~ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном  
университете геодезии и картографии по адресу: 105064 Москва, Гороховский  
пер., д. 4, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан «~~15~~» ~~нояб. 2006~~...2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Климков Ю.М.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Использование изображений и видеoinформации в современном мире стремительно возрастает. Здесь и различные системы мониторинга, наблюдения, технического зрения, видеотелефонии, регистрирующие и передающие огромные объемы видеоданных, и различные автономные системы, принимающие решение на основе анализа видеoinформации, и персонализированное телевизионное вещание, и полиграфия со значительно возросшим объемом иллюстрации в печатной продукции, и медицина, и Интернет, и многие другие направления. Каждый день огромное количество информации запоминается, преобразуется и передается в цифровом виде. Таким образом, значительный научный, практический и коммерческий интерес приобретают средства сжатия данных для их передачи или хранения.

Сжатие изображений ориентировано на решение проблемы сокращения объема данных, требуемого для представления цифрового изображения. Основной целью такого процесса сокращения является удаление избыточных данных. С математической точки зрения это равнозначно преобразованию некоторого двумерного массива данных в статистически некоррелированный массив. Такое преобразование сжатия применяется к исходному изображению перед тем, как его сохранить или передать. Впоследствии сжатое изображение распаковывается и восстанавливается в исходное изображение или некоторое его приближение.

Все методы компрессии подразделяются на два вида: методы сжатия без потерь информации и с потерями. Первые из них позволяют сжимать данные таким образом, чтобы впоследствии их можно было восстановить с абсолютной точностью. Во многих приложениях сжатие без потерь является единственно допустимым способом сокращения объема данных. Одним из таких приложений является архивация медицинских или деловых документов, сжатие с потерями которых обычно запрещено по закону. Другим является обработка спутниковых изображений, где как применение, так и стоимость получения исходных данных делают сжатие нежелательным. Еще одним направлением является цифровая рентгенология, в которой потеря информации может ухудшить точность диагностики.

При сжатии с потерями выполняется поиск данных, мало влияющих на общее содержание сжимаемой информации, и их удаление из общего потока. Понятно, что при декомпрессии данных, сжатых с потерями, исходная информация никогда не будет в точности восстановлена, но алгоритм сжатия рассчитан на то, что ее искажения не будут замечены.

Методы сжатия с потерями обладают одним существенным преимуществом, которое и дало им право на жизнь: они гораздо эффективнее. Коэффициент сжатия - отношение объема исходной информации к объему сжатой - при использовании алгоритмов компрессии с потерями всегда выше, чем при сжатии без потерь. Исследования показали, что максимально

возможный коэффициент сжатия без потерь равен, примерно, 2:1, а с потерями - 200:1 и выше. Поэтому при цифровой записи изображений алгоритмы компрессии с потерями применяются очень широко.

Но при восстановлении сжатых изображений теряется информация и качество изображений. Кроме этого, при обработке и анализе изображений всегда приходится задаваться вопросом об их качестве. Качество столь сложного объекта как изображение является очень важным, но одновременно и довольно нечетким понятием. Оно оценивается разными способами и в связи с различными задачами. В настоящее время нет достаточно полной методики, позволяющей всесторонне исследовать потери качества изображений при их сжатии. Недостатки популярных критериев оценки качества изображений, таких как среднеквадратическая ошибка, пиковое отношение сигнал/шум и др. заключаются в том, что по ним невозможно сказать, как меняются спектральные и структурные характеристики восстановленных после сжатия изображений.

Актуальность диссертационной работы, таким образом, обусловлена:

- необходимостью более полной количественной оценки потери информации при сжатии изображений методами с потерями;
- необходимостью разработки методики оценки качества сжатых изображений.

В связи с этим, целью диссертационной работы является разработка методики оценки качества алгоритмов сжатия и сжатых изображений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы конкретные научные задачи, решаемые в данной диссертационной работе:

1. Качественный анализ эффективности сжатия различных видов цифровых изображений с помощью наиболее распространенных алгоритмов сжатия.
2. Сравнительный анализ кодеков стандарта JPEG 2000 и стандарта JPEG.
3. Разработка интегрального, спектрального и мультифрактального критериев оценки качества сжатых изображений.
4. Разработка модулей, реализующих стандартные и разработанные критерии оценки качества сжатых изображений.
5. Исследование влияния сжатия изображений на их яркостные и статистические характеристики.
6. Исследование влияния сжатия на спектральные и шумовые характеристики изображений.
7. Исследование влияния сжатия на фрактальные характеристики изображений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана критериальная модель оценки качества сжатых изображений, учитывающая их яркостные, статистические, спектральные и фрактальные характеристики.

2. Предложены корреляционный, спектральный и мультифрактальный критерии оценки качества изображения, учитывающие его структурные и спектральные характеристики.

3. Впервые разработаны комплексные методики оценки качества сжатых изображений, позволяющие всесторонне изучить влияния алгоритмов сжатия.

Практическая значимость работы определяется тем, что полученные автором результаты диссертационной работы могут быть использованы в региональных центрах приема и обработки геопространственной информации; в высокопроизводительных центрах по обработке цифровых изображений и в центрах обработки мониторинговой аэрокосмической информации.

На защиту выносятся следующие разработки и результаты:

1. Критериальная модель оценки качества сжатых изображений.

2. Методика оценки качества сжатых изображений.

3. Результаты тестирования предложенной методики оценки качества на реальных изображениях природных и антропогенных объектов.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 61-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, проводившейся в Московском Государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК), а также на X Международной научно-практической конференции «Методы дистанционного зондирования и ГИС-технологии для оценки состояния окружающей среды, инвентаризации земель и объектов недвижимости», Китай, май 2006 г.

По результатам проведенных исследований и разработок, выполненных в процессе работы, опубликовано 3 научных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 156 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа иллюстрирована 59 рисунками и 7 таблицами. Библиографический указатель включает 87 источников, из них 60 отечественных и 27 иностранных.

## Содержание работы

**Введение.** Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость.

### Глава 1. Обзор современных алгоритмов сжатия изображений

В первой главе рассматриваются широко используемые в настоящее время алгоритмы сжатия статистических растровых изображений, а также соответствующие им графические форматы. Для каждого метода сжатия описываются его алгоритм, классы изображений, на которые он ориентирован, коэффициенты сжатия: минимальный, средний и максимальный, есть ли у метода потери информации. Так же в данной главе рассматриваются стандарты сжатия двоичных изображений: CCITT G3 и CCITT G4, стандарты сжатия полутоновых и цветных изображений: JPEG и JPEG 2000, критерии выбора формата графических изображений. Выбор конкретного формата для определенного приложения обычно предполагает различные взаимозависимые соображения, включающие качество, гибкость, вычисления, хранение или эффективность передачи и возможность поддержки существующими программами.

Особое внимание уделено алгоритмам с потерями информации: JPEG и JPEG 2000. Алгоритм JPEG является очень эффективным методом сжатия изображений с потерей информации. Он применим как к цветным, так и к полутоновым изображениям (но не к мультфильмам и анимациям). Этот алгоритм не очень хорошо сжимает двухуровневые черно-белые образы, но он прекрасно обрабатывает изображения с непрерывными тонами, в которых близкие пиксели обычно имеют схожие цвета. Важным достоинством метода JPEG является большое количество настраиваемых параметров, которые пользователь может выбирать по своему усмотрению, в частности, он может регулировать процент теряемой информации, а значит, и коэффициент сжатия, в широком диапазоне. Стандарт JPEG доказал свою эффективность и стал широко применяться для сжатия изображений, особенно во всемирной паутине.

Существенными положительными сторонами алгоритма является то, что:

1. Задается степень сжатия. Степень сжатия варьируется от 2 до 200.
2. Выходное цветное изображение может иметь 24 бита на точку.

Ухудшение качества декодированного изображения обусловлено основными искажениями, возникающими на этапе квантования коэффициентов дискретного косинусного преобразования (DCT), которые можно классифицировать следующим образом:

При повышении степени сжатия изображение распадается на отдельные квадраты (8x8). Это связано с тем, что происходят большие потери в низких частотах при квантовании, и восстановить исходные данные становится невозможно; Эффект Гиббса - ореолы по границам резких переходов цветов; Блокинг-эффект; Мозаичный-эффект; Размытие изображения; Окантовки на

границах; Размытие цветов; Искажение типа «ступеньки»; Искажение, имеющие вид базисных функций DCT.

Стандарт JPEG 2000, хотя он еще окончательно формально не принят, расширяет исходный стандарт JPEG, предоставляя большую гибкость, как при сжатии полутоновых неподвижных изображений, так и при доступе к самим сжатым данным. Базовая схема JPEG 2000 очень похожа на базовую схему JPEG. Основное отличие заключается в следующем: вместо дискретного косинусного преобразования (DCT) используется дискретное вэйвлет-преобразование (DWT). Алгоритм JPEG 2000 поддерживает сжатие без потерь информации. Помимо привычного сжатия с потерями новый JPEG теперь будет поддерживать и сжатие без потерь. Таким образом, становится возможным использование JPEG для сжатия медицинских изображений, в полиграфии, при сохранении текста под распознавание OCR системами и т.д.

С бурным развитием информационных технологий наблюдается возрастающее число областей, взаимосвязанных с эффективной обработкой, запоминанием, хранением и передачей графических данных. Поэтому использование методов сжатия изображений для уменьшения объема исходных данных является необходимым. Однако, методы сжатия без потери информации являются малоэффективными для сжатия больших массивов. Этого можно добиться только с помощью методов сжатия с потерями информации. Тогда возникает вопрос: «как оценить качество изображений до и после сжатия, и по каким критериям?». Одна из серьезных проблем при обработке графических изображений заключается в том, что до сих пор не найден адекватный критерий оценки качества изображения. Однако оно теряется везде – оно теряется не только при сжатии изображений с потерями но и при оцифровке, при переводе в ограниченную палитру цветов и при переводе в другую систему цветопредставления. Недостатки популярных всем критериев оценки качества изображений как среднеквадратической ошибки, пикового отношения сигнал/шум и др. являются тем, что по ним невозможно сказать, как меняются спектральные характеристики и структуры восстановленных после сжатия изображений. Вопрос количественной оценки качества изображений до конца не решен. Он является важным шагом на пути к решению задач оптимальных преобразований изображений с точки зрения визуального восприятия.

В связи с этим, целью диссертационной работы является разработка методики оценки качества сжатых изображений, учитывающая их яркостные, спектральные и мультифрактальные характеристики.

## **Глава 2. Методика оценки качества сжатых изображений**

Во второй главе рассматриваются различные критерии и методика оценки качества сжатых изображений.

При цифровой записи изображений алгоритмы компрессии с потерями применяются очень широко. Но при восстановлении сжатых изображений мы теряем информацию и качество изображений. Кроме этого, при обработке и

анализе изображений всегда приходится задаваться вопросом об их качестве. Оно оценивается разными способами и в связи с различными задачами.

При первом подходе качество рассматривается как характеристика самого изображения и определяется его собственными свойствами (яркостными, статистическими, структурными, семантическими). Соответствующие критерии либо являются субъективными, либо опираются на объективные характеристики изображения: форму и параметры распределения яркости, ширину пространственного спектра и т.п. Такие безотносительные критерии имеют довольно ограниченное применение. Яркостные статистические характеристики представлены в табл. 1.

Табл. 1. Статистические характеристики для оценки качества цифровых изображений.

№	Характеристики	Формулы	Описания
1	Средняя яркость	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$	Средняя яркость изображения
2	Дисперсия	$\sigma^2(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)$	Мера яркостного контраста изображения
3	Третий момент	$\mu_3(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i)$	Характеристика асимметрии гистограммы распределения яркостей изображения
4	Четвертый момент	$\mu_4(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^4 p(z_i)$	Характеристика эксцесса гистограммы распределения яркостей изображения
5	Относительная гладкость	$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2(z)}$	Равна 0 для областей постоянной яркости (где дисперсия равна нулю) и приближается к 1 для больших значений $\sigma^2(z)$
6	Однородность	$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$	U достигается для изображения, все элементы которого имеют одинаковую яркость (максимально однородное), и уменьшается по мере роста яркостных различий
7	Средняя энтропия	$e = \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$	Энтропия характеризует изменчивость яркости изображения; она, наоборот, равна 0 для области постоянной яркости и максимальна в случае равновероятных значений.

При другом подходе качество рассматривается как мера близости двух изображений: реального и некоторого идеального, или исходного и преобразованного. Такой подход более конструктивен, он позволяет оценивать количественные изменения значений яркости, уровень искажений изображений при их преобразованиях (фильтрации, сжатии данных и т.д.), то есть, по существу, качество самого средства преобразования – алгоритма или системы обработки изображений и оценке качества алгоритмов. Критерии качества, рассматриваемые как мера близости двух изображений, представлены в табл. 2.

Табл. 2. Критерии качества, рассматриваемые как мера близости двух изображений: реального и некоторого идеального, или исходного и преобразованного.

№	Показатели оценки	Формулы	Описание	
1	Анализ ошибок	Средняя пиксельная ошибка	$AD = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M  f(x,y) - \hat{f}(x,y) }{N \cdot M}$	где: $f(x,y)$ : исходное изображение $\hat{f}(x,y)$ : восстановленное изображение
		Максимальная ошибка	$MD = \max  f(x,y) - \hat{f}(x,y) $	- Это очень строгий критерий. Он используется в тех случаях, когда выдвигается требование высокой точности представления не изображения в целом, а каждой его точки. Это необходимо в ответственных случаях, при получении ценных, уникальных изображений. Однако данный показатель имеет серьезный недостаток - сложность теоретической оценки и, соответственно, использование его в процедурах оптимизации.
		Среднеквадратичная ошибка	$MSE = \frac{1}{NM} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2$	- Эта величина будет постоянной по всему полю аргументов. $\epsilon^2_{кк}$ характеризует среднее качество изображения в целом, а на различных его фрагментах ошибки, в принципе, могут различаться. - Достоинство среднеквадратичного критерия - его простота. При его использовании многие задачи анализа и оптимизации алгоритмов обработки изображений легко решаются аналитически. Поэтому он очень часто применяется.
4	Оценки шумов	Отношение сигнал/шум	$SNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y)]^2}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2} \right]$	$rms = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2}$ $M_{Graylevel}$ : максимальное количество градаций серого.
		Пиковое отношение сигнал/шум	$PSNR = 20 \log_{10} \left[ \frac{M_{Graylevel}}{rms} \right]$	
6	Корреляционный анализ	Нормированная корреляция	$NK = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x,y) \cdot \hat{f}(x,y)}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y)]^2}$	Двумерная автокорреляционная функция (ДАКФ) характеризует внутреннюю корреляционную структуру изображения. $i=0, 1, 2, \dots$
		Коэффициент взаимной корреляции	$CQ = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x,y) \cdot \hat{f}(x,y)}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M f(x,y)}$	
		Статистическое отличие изображений	$IF = 1 - \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y) - \hat{f}(x,y)]^2}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x,y)]^2}$	

9	Автокорр. функция (ДАКФ)	$R_i = \frac{M\{ f_i - \bar{f}_i  \times  g_i - \bar{g}_i \}}{\sigma_{f_i} \sigma_{g_i}}$
---	-----------------------------	---

**Интегральный критерий.** Для оценки визуального качества изображения используется эмпирический подход. Для формирования этой оценки рассматриваются такие параметры изображения как среднееарифметическое значение  $\bar{L}$  яркостей, полнота использования градаций яркостей, резкость изображения и его яркостной контраст. Предложенный интегральный критерий оценки качества сжатых изображений представлен в табл. 3.

Табл. 3. Интегральный критерий оценки качества сжатых изображений.

№	Показатели оценки	Формулы	Описание
1	Уровень адаптации зрительной системы	$LQ = 1 - \frac{\bar{L} - L_{MAX} / 2}{L_{MAX} / 2}$	$\bar{L}$ и $L_{MAX}$ : средняя и макс. яркость изобр.
2	Полнота использования его элементами градаций яркостей изображения	$KQ = \frac{S}{L_{MAX}}$	$S$ - количество уровней яркостей
3	Показатель контраста изображения	$\sigma^2(z) = \mu_2(z) = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)$	
4	Показатель резкости изображения	$RQ = RQ_{1нпр.} \times RQ_{2нпр.}$	
5	Интегральный критерий	$Q = k.KC.LQ.KQ.RQ$	$k$ - нор. коэф.
	$RQ_1 = \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} \nabla^2 f_{ij} = \sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} [f(i+1, j) + f(i-1, j) + f(i, j+1) + f(i, j-1)] - 4f(i, j)$		
	$RQ_{1нпр.} = \frac{RQ_1}{4 \times (N-2) \times (M-2) \times (L-1)} = \frac{\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} \nabla^2 f_{ij}}{4 \times (N-2) \times (M-2) \times (L-1)}$		
	$RQ_{2нпр.} = \frac{\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} [(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)] + [(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)]}{8 \times (N-2) \times (M-2) \times (L-1)}$		

где:  $z_1=f(x-1,y-1)$ ,  $z_2=f(x-1,y)$ ,  $z_3=f(x-1,y+1)$ ,  $z_4=f(x,y-1)$ ,  $z_5=f(x,y)$ ,  $z_6=f(x,y+1)$ ,  $z_7=f(x+1,y-1)$ ,  $z_8=f(x+1,y)$ ,  $z_9=f(x+1,y+1)$ .

Важным параметром оценки визуального качества изображения в данном методе является его резкость, которая определяется первой и второй производными изображения. Это объясняется тем, что первая производная дает в результате «толстые» контуры, а вторая – значительно более тонкие.

Следующей является отдельная точка. На ней отклик второй производной оказывается значительно сильнее отклика первой производной. В данном критерии, в качестве второй производной мы используем оператор Лапласа, а первой производной – оператор Собела (модуль градиента изображения).

Большинство известных нам подходов использует лишь один параметр качества изображения. Преимущество разработанного интегрального критерия заключается в том, что он объединяет важные показатели качества, определение которых исходит из единой вероятностной модели изображения.

**Спектральные критерии.** Одного учета влияния сжатия изображения на яркостные статистические характеристики, для всестороннего изучения искажений, вносимых процессом сжатия, недостаточно. В связи с этим мы исследуем влияние сжатия изображений на их спектральные и шумовые характеристики. Кратко опишем методику оценки спектральных критериев. Сначала необходимо получить из исходного изображения его Фурье-спектр мощности. Далее вычисляются спектральные критерии восстановленных после сжатия изображений. Спектральные критерии оценки качества сжатых изображений представлены в табл. 4.

Табл. 4. Спектральные критерии оценки качества сжатых изображений.

Показатели оценки	Формулы
Прямое дискретное Фурье преобразование	$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(xu/M + vy/N)}$
Фурье-спектр мощности	$P(u, v) =  F(u, v) ^2 = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]$
Одномерный профиль спектра	$F(k_i) = A k_i^{-p}, \quad y_i = \ln[F(k_i)], \quad x_i = \ln(k_i), \quad a = -p$
Показатель наклона одномерного сечения спектра	$p = -a = -\frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{i=1}^N x_i - N \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2}$
Число степеней свободы спектра	$K_s = \frac{M^2 \cdot S^*(f_k)}{(M \cdot S(f_k))^2}, \quad S^*(f_k) = \frac{S(f_k)}{\sum S(f_k)}$
Показатель степени иерархичности структуры исследуемого спектра	$R = 1 - \frac{H}{H_{\max}}, \quad H = M(-\log S^*(f_k)) \text{ и } H_{\max} = \frac{\log N}{2}$
Относительное среднее квадратичное отклонение энтропии Н спектра мощности	$K_H = \frac{\sigma_H}{H}, \quad \sigma_H = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \sqrt{\sum_k [S^*(f_k) \cdot \log^2 S^*(f_k) - H^2]}$

**Мультифрактальные критерии.** Изучение геометрических характеристик природных объектов (острова, речные системы, лесные массивы, облака и др.) показало, что многим из них присущи такие свойства, как структурное самоподобие, самоаффинность их контурной составляющей. Исследование и параметризация этих особенностей в рамках традиционной

математической обработки изображений ограничено, так классическая геометрия не может описать выше названные стохастические свойства реальных геометрических структур. В последние годы для анализа природных объектов все чаще используются методы фрактальной геометрии. Но эти объекты очень редко могут быть описаны с помощью лишь одной величины фрактальной размерности. Поэтому в настоящее время получил большое распространение анализ, основанный на теории мультифракталов. Мы предлагаем использовать для анализа качества изображений следующие мультифрактальные критерии, представленные в табл. 5.

Табл. 5. Мультифрактальные критерии оценки качества сжатых изображений.

Мультифрактальные критерии	Описание
1. $D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln(Z(q, \varepsilon))}{\ln(\varepsilon)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>D_q</math> – обобщенная фрактальная размерность Реньи;</li> <li>▪ <math>Z(q, \varepsilon)</math> – обобщенная статистическая сумма вероятностей заполнения ячеек размера (масштаба) <math>\varepsilon</math>, покрывающих исследуемое изображение;</li> </ul>
2. $Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>K_D, \Delta D, D_{\Delta q}</math> – количественные меры степени неоднородности фрактальной структуры.</li> </ul>
3. $K_D = \frac{\sigma(D_q)}{M(D_q)} = \frac{\sqrt{M[D_q^2] - [M(D_q)]^2}}{M(D_q)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ При <math>K_D \ll 1</math> можно говорить о высокой степени однородности структуры спектра фрактальной размерности и вычислять общую фрактальную размерность. В противном случае можно говорить лишь о средней фрактальной размерности.</li> </ul>
4. $\Delta D = D_{q_{\min}} - D_{q_{\max}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Показатель <math>\Delta D</math> также связан с неоднородностью структуры спектра размерности. Если <math>\Delta D</math> близко к нулю, то структура спектра однородна, а достаточно большое <math>\Delta D</math> характерно для хаотической динамики.</li> </ul>
5. $D_{\Delta q} = \frac{\max\{D_q - D_{q-1}\}}{\Delta q}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Показатель <math>D_{\Delta q}</math> характеризует крутизну перехода от отрицательных к положительным значениям <math>q</math>.</li> </ul>
6. $AM - D_q^{avr} = \frac{1}{D_{q=0}} \times \frac{\sum_{q=q_{\min}}^{q_{\max}}  D_q^{avr} - D_q^{max} }{(q_{\max} - q_{\min})} \times 100\%$	
<p>где <math>\sigma(D_q)</math> и <math>M(D_q)</math> – среднев квадратическое отклонение и среднее арифметическое обобщенной фрактальной размерности <math>D_q</math>.</p>	

### Глава 3. Экспериментальные исследования

В третьей главе производится классификация изображений по их типам и статистическим характеристикам. По результатам данной классификации выделяются следующие классы изображений: черно-белые, полутоновые (низко-контрастные, средне-контрастные и сильноконтрастные) и цветные изображения. Далее в работе описаны проведенные автором исследования: качественный анализ эффективности сжатия различных видов цифровых изображений с помощью наиболее распространенных алгоритмов сжатия. В нашем исследовании рассматриваются следующие методы сжатия: методы без потери: RLE(BMP), RLE(PCX), RLE(TGA), LZW(TIFF), LZW(GIF), Deflate(TIFF), Lossless JPEG 2000 и методы с потерями: JPEG, JPEG 2000.



Табл. 6. Сравнительный анализ эффективности наиболее широко используемых алгоритмов сжатия.

Алгоритмы сжатия	Черно-белые изображения	Полутоновые и цветные изображения	Потери качества
	Коэффициенты сжатия: мин., ср., макс.	Коэффициенты сжатия: мин., ср., макс.	
RLE (BMP, TGA, PCX)	0,5/1; 1,5/1; 4/1	0,5/1 – 1,2/1 (малоэффективны)	Нет
LZW (TIFF, GIF)	2/1; 4/1; 12/1	0,5/1 – 1,2/1 (малоэффективны)	Нет
Deflate (TIFF)	2/1; 4/1; 16/1	1/1; 2/1; 3/1	Нет
CCITT G3 (TIFF)	2/1; 4/1; 16/1	Не поддерживается	Нет
CCITT G4 (TIFF)	2/1; 6/1; 19/1	Не поддерживается	Нет
Lossless JPEG 2000 (JP2)	<1	1,5/1; 2/1; 3/1	Нет
JPEG (JPG)	0,5/1 – 2/1 (малоэффективны)	2-200	Да
JPEG 2000 (JP2)	0,5/1 – 2/1 (малоэффективны)	2-200 и выше	Да

Из результатов выполненного экспериментального исследования, представленных на рис. 1 и табл. 6, можно сделать следующие выводы и рекомендации:

Для изображений с малым числом цветов методы сжатия с потерями информации как JPEG и JPEG 2000 малоэффективны. Более того, эти методы приводят к потере качества изображений. Методы сжатия без потери показывают высокие степени сжатия для изображений с малым числом цветов: стандарт CCITT G4, стандарт CCITT G3, Deflate и LZW.

Наоборот, для полутоновых и цветных изображений методы без потери малоэффективны: степень сжатия методов RLE и LZW варьируется в диапазоне 0,5:1-1,2:1. Максимальная степень сжатия достигается при применении методов сжатия с потерями информации JPEG и JPEG 2000.

- Не рекомендуется использовать алгоритмы с потерями информации: JPEG и JPEG 2000 для сжатия черно-белых и изображений с малым числом цветов (2-16 цветов).
- Рекомендуется использовать следующие методы без потери: стандарт CCITT G4, стандарт CCITT G3, Deflate(TIFF), LZW(GIF), LZW(TIFF) для сжатия черно-белых и изображений с малым числом цветов.

- В случае необходимости сохранения 100% качества полученных после сжатия изображений автор рекомендует использовать методы сжатия без потери: Deflate (TIFF) и метрика Lossless JPEG 2000.
- В зависимости от области применения сжатых и восстановленных после сжатия изображений, можно использовать методы JPEG и JPEG 2000. Тогда необходимо наблюдать и контролировать качество полученных изображений.

Далее в работе описаны проведенные автором исследования, заключающиеся в сравнительном анализе кодеков JPEG 2000 и JPEG. Результаты исследования представлены на рис. 2.

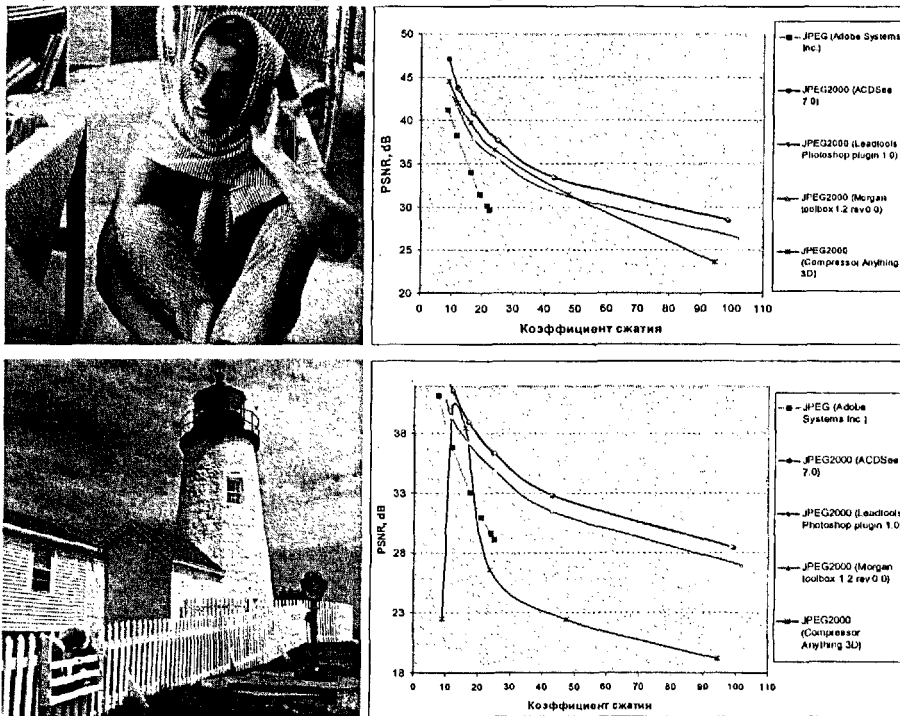


Рис. 2. Графики зависимости PSNR от коэффициента сжатия.

На основе результатов данного экспериментального исследования можно сделать следующие выводы: Как и ожидалось, JPEG сильно уступает всем кодекам стандарта JPEG 2000. Все кодеки стандарта JPEG 2000 достигают гораздо более высоких коэффициентов сжатия, чем JPEG, при лучшем визуальном качестве. Если его поддержка будет встроена в популярные программы, то в скором времени JPEG 2000 сможет полностью заменить устаревший JPEG.

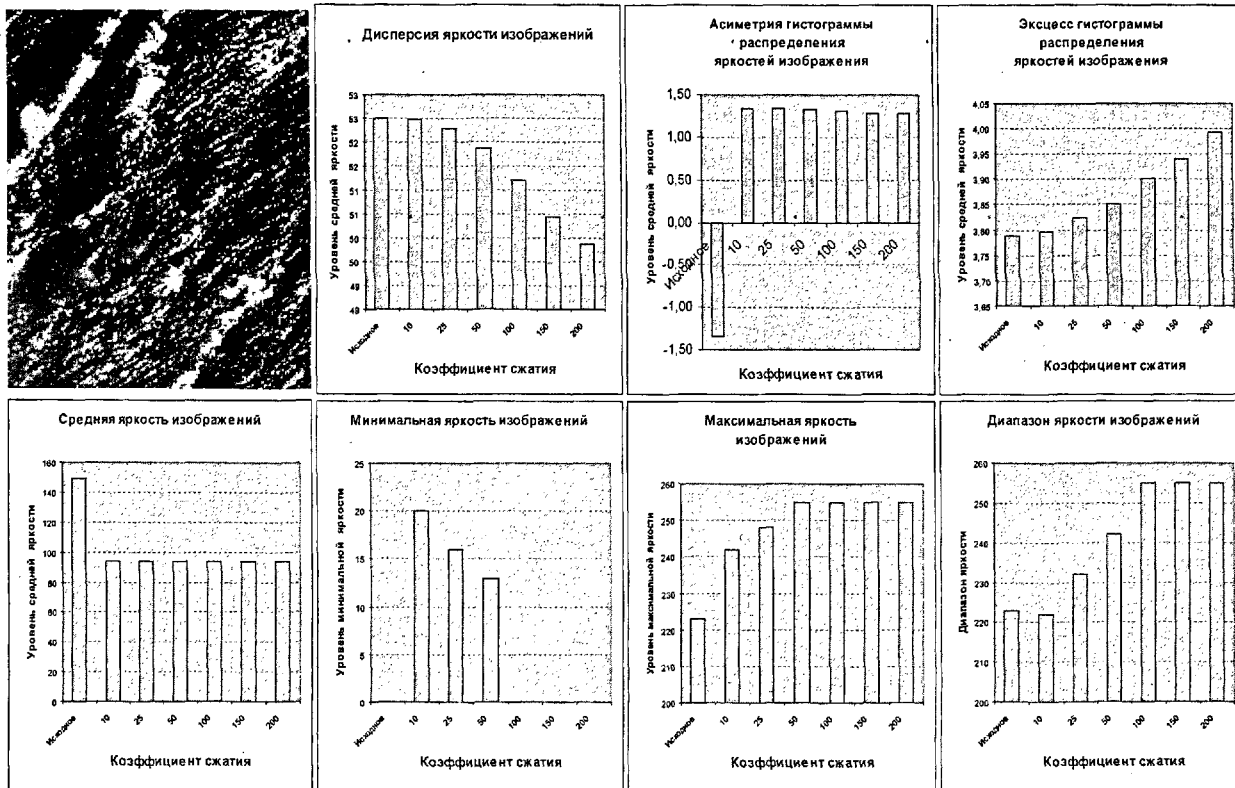


Рис. 3. Яркостные и статистические характеристики сжатых изображений.

Далее в работе описаны проведенные автором исследования, заключающиеся в изучении влияния сжатия изображений на их яркостные и статистические характеристики. Результаты данного исследования представлены на рис. 3.

Проведенное исследование показало, что искажения яркостных статистических характеристик изображений не имеют определенных закономерностей. По ним мы не можем предсказать, насколько качество изображения теряется в каждом конкретном случае.

Рассмотрим оценку качества изображений, выполненную с применением следующих критериев: интегральный критерий, средняя ошибка, максимальная ошибка и среднеквадратическая ошибка (см. результаты на рис. 4 и рис. 5).

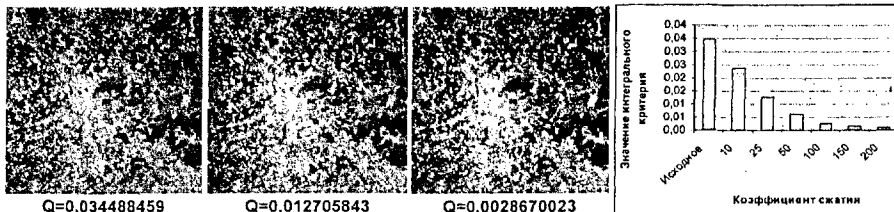


Рис. 4. Применение интегрального критерия для оценки качества сжатых изображений.



Рис. 5. Применение критерия оценки качества сжатых изображений: средняя ошибка, максимальная ошибка и среднеквадратическая ошибка.

Как показали результаты нашего исследования, интегральный критерий, средняя ошибка, максимальная ошибка и среднеквадратичная ошибка монотонно зависят от степени сжатия изображений. Полученные количественные оценки хорошо коррелируют с визуальным восприятием.

Рассмотрим результаты применения автокорреляционной функции для оценки качества сжатых изображений.

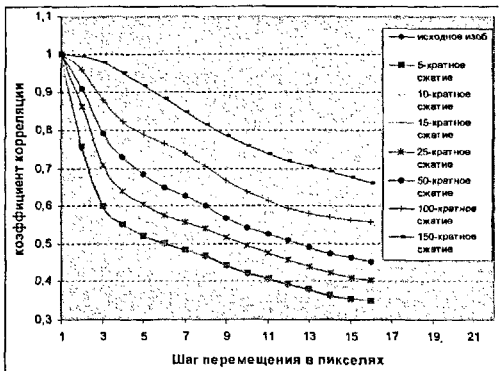


Рис. 6. Применение автокорр. функции (АКФ) для оценки качества сжатых изобр.

Из рис. 6 видно, что графики ДАКФ восстановленных после сжатия изображений находятся выше графика исходного изображения. Чем больше степень сжатия, тем выше находится график ДАКФ восстановленного после сжатия изображения. Более того, наклон графика ДАКФ (т.е. скорость спадания) восстановленного после сжатия изображения уменьшается при увеличении степени сжатия. Можно сказать, что процесс сжатия изображений с потерями изменяет их внутреннюю корреляционную структуру, а именно происходит сглаживание неоднородности изображений, соседствующие пиксели становятся более связаны между собой.

Далее описаны проведенные автором исследования, заключающиеся в изучении влияния сжатия на спектральные и шумовые характеристики изображений.

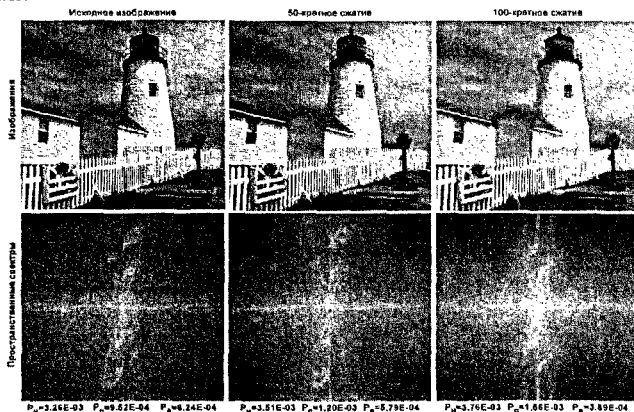


Рис. 7. Фурье спектр мощности изображений.

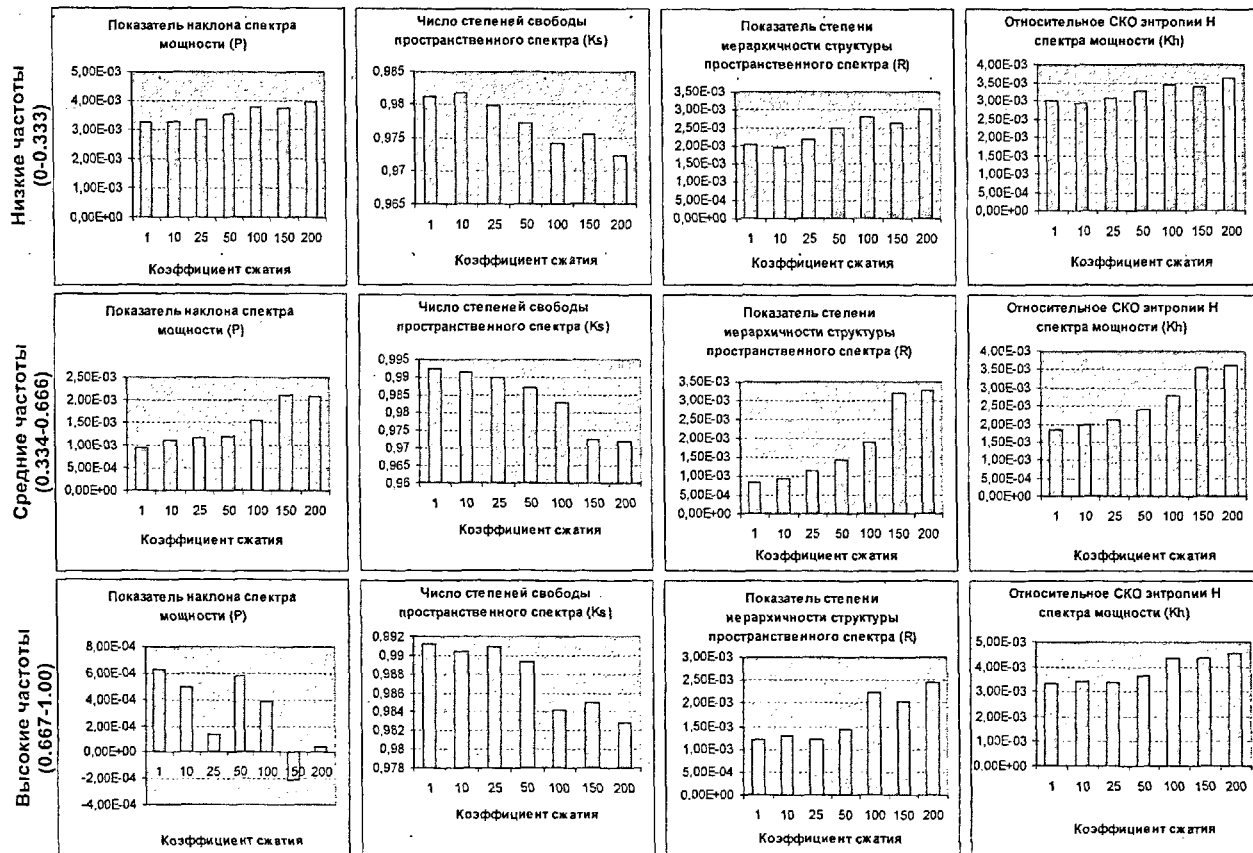


Рис. 8. Графики зависимости спектральных характеристик восстановленных после сжатия изображений от их степени сжатия.

Анализ результатов вычислительного эксперимента, представленных на рис. 7. показал что, начиная с 5-го кратного сжатия наблюдается существенные отличия в спектральном составе восстановленных после сжатия изображений от исходных. Медленно меняющие периодические составляющие изображения сглажены. Контуры, мелкие детали размыты, также структура изображения изменилась после сжатия. Соответственно, в частотной области видно, что структура пространственного спектра изменилась. Диагональные составляющие, которые отвечают резким контурам деталей, видны на спектре исходного, но не видны на спектрах восстановленных изображений.

Количественные оценки изменения спектральных характеристик изображения можно видеть на рис. 8. В нижней и средней частотной областях пространственного спектра показатель наклона спектра монотонно увеличивается в направлении увеличения степени сжатия изображений. Это говорит о том, что медленно меняющиеся составляющие изображения были сглажены. В высокочастотной области пространственного спектра показатель наклона спектра уменьшается не монотонно. Даже для некоторых восстановленных изображений этот показатель отрицателен. Поэтому можно утверждать, что при сжатии изображений шумовые составляющие как бы добавляются в восстановленные после сжатия изображения. Если значение показателя наклона спектра восстановленного изображения отклоняется на 10% от исходного, то визуально наблюдается существенная потеря качества изображения при его сжатии.

Проведенные исследования показали, что предложенные критерия достаточно эффективны для количественной оценки влияния сжатия изображений на их спектральные характеристики и обладают достаточной чувствительностью к изменению спектрального состава изображения.

Рассмотрим результаты исследования влияния сжатия на фрактальные характеристики изображений, которые представлены на рис. 9, рис. 10 и рис. 11.

Традиционно меры качества или искажения были основаны на среднеквадратичной ошибке MSE или ее вторичной величине как PSNR (отношение сигнал/шум). Обычно такие меры применяются для оптимизации систем обработки изображений. Эти критерии рассматривают особенности изображения, такие как резкие границы, периодические текстуры и др. как однородные. В отличии от них, мультифрактальные меры, предлагаемые в данной диссертационной работе, – по определению – характеризуют именно такие особенности изображений. Кроме того, эти меры могут классифицировать шумы в зашумленных сигналах или изображениях в зависимости от их природы (периодический, случайный и т.д.). Как показали наши исследования, мультифрактальные спектры  $f(\alpha)$  и  $D_v$  могут быть использованы для оценки качества изображений, качество которых сильно зависит от степени их сжатия.

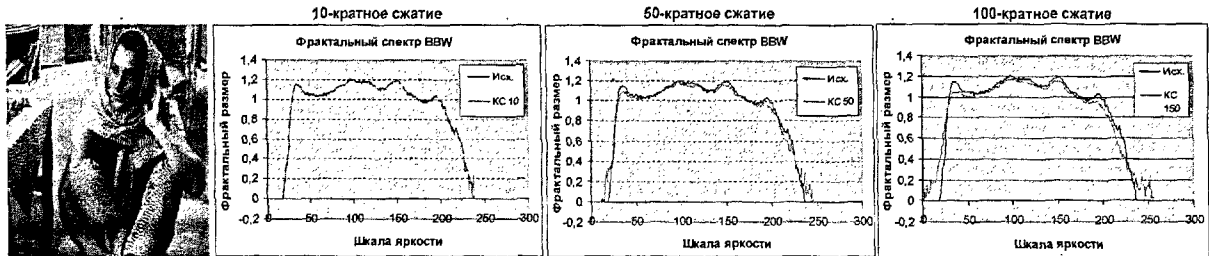


Рис. 9. Сравнительный анализ фрактальных спектров сжатых изображений

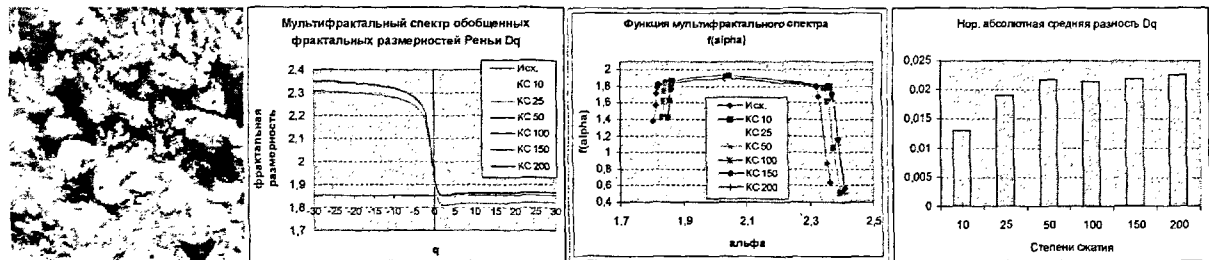


Рис. 10. Результаты мультифрактального анализа изображений

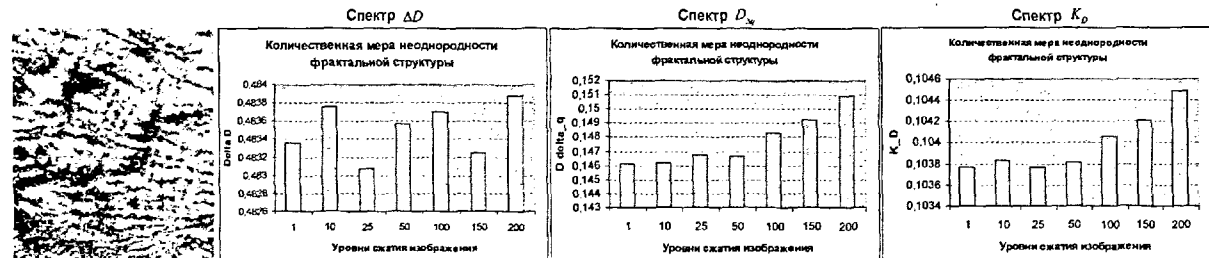


Рис. 11. Пример использования количественной меры степени неоднородности фрактальной структуры сжатых изображений.

Степень искажения изображения зависит от того, насколько спектры  $f(\alpha)$  и  $D_q$  для восстановленного после сжатия изображения отклоняются от исходных. При сжатии зашумленных изображений, изменения спектров  $f(\alpha)$  и  $D_q$  позволяют оценить уровень периодических и шумовых составляющих в восстановленном после сжатия изображении. Качественно уровень искажения может быть определен визуальным отображением разницы  $f(\alpha)$  и  $D_q$  или путем измерения отдельных характеристик  $f(\alpha)$  и  $D_q$  оригинальных и обработанных изображений.

Анализируя влияние сжатия на фрактальные характеристики различных полутоновых и цветных изображений (рис. 9, 10, 11), мы видим, что мультифрактальный спектр обобщенных фрактальных размерностей Ренья  $D_q$  и функция мультифрактального спектра  $f(\alpha)$  восстановленных после сжатия изображений точечных объектов сильно отклоняются от исходных. Для изображений площадных объектов наблюдаются только малые отклонения.

Для оценки влияния сжатия на фрактальные структуры изображений мы рекомендуем использовать мультифрактальные критерии:  $K_D$ ,  $\Delta D$ ,  $D_{dq}$ . Эти критерии могут быть использованы для оценки изменчивости, стохастичности, однородности и упорядочности фрактальной структуры изображений.

- При  $K_D \ll 1$  можно говорить о высокой степени однородности структуры спектра фрактальной размерности и вычислять общую фрактальную размерность. В противном случае можно говорить лишь о средней фрактальной размерности.
- Показатель  $\Delta D$  также связан с неоднородностью структуры спектра размерности. Если  $\Delta D$  близко к нулю, то структура спектра однородна, а достаточно большое  $\Delta D$  характерно для хаотической динамики.
- Показатель  $D_{dq}$  характеризует крутизну перехода от отрицательных к положительным значениям  $q$ .

Как показали результаты нашего исследования, представленные на рис. 11., мы видим, что значения  $K_D$ ,  $\Delta D$ ,  $D_{dq}$  достаточно чувствительны к изменениям исходного изображения в случае сжатия.

### Заключение

Представленная диссертационная работа содержит научные исследования автора, связанные с качественным и количественным анализом эффективности и влияния наиболее широко используемых в настоящее время алгоритмов сжатия графических изображений.

Основным итогом диссертационной работы является разработанная автором методика оценки качества алгоритмов сжатия и сжатых изображений.

В работе получены следующие основные результаты:

- Изучены и проанализированы существующие методы сжатия цифровых изображений с точки зрения эффективности и влияния на качество изображений.
- Разработана критериальная модель оценки качества сжатых изображений.
- Разработаны программные модули, позволяющие реализовать предложенную методику оценки качества сжатых изображений.
- Предложены новые критерии оценки качества цифровых изображений, базирующиеся на их спектральных и мультифрактальных характеристиках.
- Выработаны рекомендации по использованию наиболее распространенных алгоритмов сжатия.

Разработанная автором методика оценки качества сжатых изображений может быть использована для решения широкого круга научных и практических задач. Возможны следующие направления использования результатов выполненного исследования:

- Региональные центры приема и обработки геопространственной информации;
- Высокопроизводительные центры по обработке цифровых изображений;
- Центры обработки мониторинговой аэрокосмической информации;
- При подготовке специалистов в области цифровой обработки изображений.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации**

1. Нгуен Динь Минь, Малининков В.А. Оценка качества сжатых изображений. // Труды X Международной научно-практической конференции GEOINFOCAD - ASIA, Китай 2006, М: МИИГ АнК, 2006, - стр.30-40.
2. Нгуен Динь Минь. Проблемы сжатия цифровых изображений при формировании банков геопространственных данных. // Рациональное природопользование, промышленная экология и дистанционные методы. Сб. науч. трудов, М.: ГУЗ, 2006, - стр.104-114.
3. Нгуен Динь Минь. Критерии оценки качества сжатых изображений. // Известия вузов, специальный выпуск, М.: МИИГ АнК, 2006, - стр. 115-122.

Подписано в печать 14.11.2006. Гарнитура Таймс  
Формат 60×90/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 1,5 Тираж 80 экз. Заказ № 251 Цена договорная

Отпечатано в УПП «Репрография» МИИГАиК  
105064, Москва, Гороховский пер., 4



