

Министерство образования и науки Украины

Одесский национальный политехнический университет

На правах рукописи

ГРИГОРЕНКО СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА

УДК 004.056.5

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЯ
ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

05.13.21 — системы защиты информации

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Кобозева Алла Анатольевна
доктор технических наук,
профессор

ОДЕССА — 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
РАЗДЕЛ 1	
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАДАЧИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ	17
1.1 Способы фальсификаций цифровых изображений и методы их выявления	18
1.2 Современные подходы и методы выявления клонирования	21
1.2.1 Блоково-ориентированные методы выявления результатов клонирования в цифровом изображении	22
1.2.2 Методы, ориентированные на анализ ключевых (характерных) точек изображения	29
1.2.3 Гибридный подход	33
1.3 Сравнение блоково-ориентированных методов и методов, основанных на анализе ключевых точек изображения	34
1.4 Выводы к разделу 1	36
РАЗДЕЛ 2	
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	39
2.1 Особенности геометрического представления цифрового изображения в случае наличия в нем областей клона и прообраза при дополнительных возмущающих воздействиях и их отсутствии	40
2.2 Выбор количественного параметра, характеризующего поверхность S , отвечающую изображению, нечувствительного к	

	3
возмущающим воздействиям	48
2.3 Формальные условия, характеризующие области клона/прообраза в изображении при наличии/отсутствии дополнительных возмущающих воздействий	50
2.3.1 Вычисление объема цилиндрического тела T , которое ставится в соответствие цифровому изображению	50
2.3.2 Обеспечение формального критерия областей клона и прообраза при отсутствии дополнительных возмущающих воздействий на изображение	53
2.3.3 Построение матриц блоковых отличий для цифрового изображения	55
2.3.4 Построение матрицы минимальных блоковых отличий для цифрового изображения. Формальное условие наличия в цифровом изображении клона и прообраза	64
2.3.5 Практический анализ матрицы минимальных блоковых отличий	68
2.3.6 Идея анализа матрицы минимальных блоковых отличий с помощью сечений соответствующей поверхности	74
2.4 Выводы к разделу 2	76
РАЗДЕЛ 3	
РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ	78
3.1 Определение параметров возмущающих воздействий, сохраняющих надежность восприятия цифрового изображения	79
3.2 Определение количественных показателей отличия между соответствующими блоками клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий	83
3.3 Разработка метода деления отрезка пополам анализа матрицы	

минимальных блоковых отличий при помощи сечений определяемой ею поверхности	87
3.4 Уточнение формального условия для соответствующих блоков клона и прообраза в случае значительных возмущающих воздействий, использованных при постобработке изображения	93
3.4.1 Постобработка цифрового изображения, проводимая путем использования значительных возмущающих воздействий	93
3.4.2 Использование для постобработки изображения малоранговых аппроксимаций его матрицы	99
3.5 Базовый метод выявления областей клона/прообраза в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий	106
3.6 Выводы к разделу 3	108

РАЗДЕЛ 4

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ	111
4.1 Анализ эффективности разработанного базового метода выявления результатов клонирования в условиях отсутствия постобработки изображения	112
4.2. Усовершенствование базового метода обнаружения результатов клонирования в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий	115
4.2.1 Определение характерных особенностей окрестностей совпадающих по значению локальных минимумов матрицы G и попиксельных отличий блоков цифрового изображения	116
4.2.2. Усовершенствованный метод выявления результатов клонирования в изображении в условиях его постобработки	121

4.3 Анализ эффективности усовершенствованного метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении	126
4.3.1. Анализ эффективности алгоритмической реализации метода <i>KL</i> в условиях дополнительных возмущающих воздействий, сохраняющих надежность восприятия изображения	126
4.3.2. Анализ эффективности алгоритмической реализации метода <i>KL</i> в условиях значительных дополнительных возмущающих воздействий	131
4.3.3. Сравнительный анализ эффективности алгоритмической реализации разработанного метода выявления клонирования в условиях пособработки изображения с современными аналогам	139
4.4 Выводы к разделу 4	145
ВЫВОДЫ	148
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	169

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЦИ	цифровое изображение
ЦВЗ	цифровой водяной знак
ДКП	дискретное косинусное преобразование
СНЧ	сингулярные числа
СНВ	сингулярные векторы
МБО	матрица блоковых отличий
ММО	модифицированная матрица блоковых отличий
ММБО	матрица минимальных блоковых отличий
ХО	характеристика отличия
ВВ	возмущающее воздействие
БМКВВ	базовый метод выявления результатов клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий
МАМБО	метод деления отрезка пополам анализа матрицы минимальных блоковых отличий

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Стремительное развитие информационных технологий и электронно-вычислительной техники привели к небывалой легкости осуществления неавторизованных модификаций цифровых контентов, в частности, цифровых изображений (ЦИ). Широко используемые сегодня программные среды, такие, как Adobe Photoshop, Gimp и др. позволяют настолько качественно проводить изменения в ЦИ, видео, воплощая в жизнь различные, часто далекие от безобидно-развлекательных, цели своих пользователей, что выявить подделки оказывается крайне затруднительным. Высокопрофессиональные подделки цифровых контентов могут привести к серьезным негативным последствиям как для отдельно взятых людей, так и для групп людей, объединенных определенными целями, а также общества в целом, при использовании их в виде вещественных доказательств в судебных разбирательствах, в виде объектов контроля результатов деятельности человека или технического устройства, в деле пропаганды, при создании «черного пиара» для «нежелательных» оппонентов и т.д. Все это приводит к необходимости проведения экспертизы целостности цифровых контентов для возможности их использования в целях, отличных от развлекательных, а также к необходимости обеспечения эффективности такой экспертизы.

В качестве цифровых контентов в работе рассматриваются ЦИ.

Одним из наиболее широко и часто используемых программных инструментов при неавторизованных изменениях ЦИ является клонирование, реализованное во всех современных графических редакторах. При клонировании одна область изображения, называемая прообразом, копируется и вставляется в другую область этого же изображения, заменяя собой его оригинальную часть и образуя клон прообраза. Описанная процедура часто используется в случае, когда с ЦИ убирается «нежелательный» объект, изменяется взаимное расположение объектов, дублируется объект/объекты.

При выполнении клонирования без какой-либо последующей обработки ЦИ задача выявления его наличия, областей клона, прообраза сводится к задаче выявления наличия в матрице ЦИ двух (или более) одинаковых подобластей. Однако эта задача принципиально усложняется, если ЦИ после клонирования подверглось возмущающим воздействиям, что, как правило, предпринимается на практике «заинтересованными лицами» с целью маскировки результатов клонирования, усложнения процесса его обнаружения, вызванного изменением значений параметров ЦИ в областях клона, прообраза.

Под нарушением целостности ЦИ в работе понимается результат применения к нему операции клонирования в условиях наличия/отсутствия дополнительных к клонированию возмущающих воздействий – постобработки изображения, что является частным случаем фальсификации, под которой в общем случае понимаются любые несанкционированные изменения ЦИ. В настоящей работе фальсифицированное ЦИ – это изображение, претерпевшее клонирование с/без последующей постобработки.

Вопросы решения задачи выявления клонирования, в том числе в условиях дополнительных возмущающих воздействий, уже поднимались специалистами в области информационной безопасности, среди которых S.A. Thajeel, H. Huang, W. Guo, I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. C. Popescu, H. Farid, B. Xu, J.Wang, G. Liu и др., а также ученые из Украины: О.В.Рыбальский, А.А.Кобозева, Е.Ю.Лебедева, Е.В.Нариманова, В.В.Зорило и др., которые внесли весомый вклад в решение проблемы обнаружения нарушения целостности цифровых контентов. Однако существующие на сегодняшний день методы не обеспечивают желаемую эффективность при использовании постобработки ЦИ, претерпевшего клонирование. Даже в условиях отсутствия дополнительных возмущений нулевое значение ошибки первого рода, когда отсутствует пропуск фальсифицированного ЦИ, достигается лишь очень немногими алгоритмами.

Существующие методы, как правило, оказываются эффективными лишь в определенных условиях проведения клонирования, при конкретных возмущающих воздействиях, используемых в процессе постобработки ЦИ

(причем не рассчитаны на значительные возмущающие воздействия), одной из основных причин чего является ориентированность используемых математических аппаратов на специфику и реализацию конкретных программных инструментов обработки ЦИ, «тиражирование» основных идей существующих подходов для решения рассматриваемой задачи при разработке новых методов.

Одной из важных задач, нерешенной до настоящего момента в полной мере, является задача обнаружения областей клонирования, имеющих малые относительно изображения размеры, что часто происходит на практике, например, когда с ЦИ убираются малые объекты, позволяющие опосредованно судить о реальном времени и месте запечатленной сцены. Однако существующие методы, как правило, вообще не рассматривают задачу выявления областей клона/прообраза, когда они составляют менее 0.85 – 1% ЦИ, что можно объяснить лишь недостаточной состоятельностью тех математических базисов, которые использовались разработанными до сих пор методами.

Таким образом, усовершенствование имеющихся, разработка новых методов для выявления результатов клонирования в ЦИ с использованием принципиально новых математических базисов является важным, своевременным и требует привлечения для своего решения математических инструментов, которые не использовались в рассматриваемой области до сих пор, а тема диссертационного исследования «Повышение эффективности выявления нарушения целостности цифрового изображения» является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертация выполнялась в соответствии с пп. 1.2.1.1, 1.2.1.2, 1.2.3.4, 1.2.6.9 и 1.2.8 «Основных научных направлений и важнейших проблем фундаментальных исследований в области естественных, технических и гуманитарных наук Национальной академии наук Украины на 2014-2018 годы» определенных постановлением Президиума НАН Украины от 20.12.2013

№ 179; отвечает перечню приоритетных тематических направлений научных исследований и научно-технических разработок на период до 2015 года, утвержденному Постановлением Кабинета Министров Украины №942 от 7 сентября 2011 г. Выбранное направление исследования согласовывается с пп. 4.11, 4.12 «Стратегии национальной безопасности Украины», утвержденной Указом Президента Украины от 26 мая 2015 г. № 287/2015.

Диссертационная работа выполнена в Одесском национальном политехническом университете в соответствии с планами научно-исследовательской работы на тему «Разработка методов повышения эффективности комплексной системы защиты информации» (№ госрегистрации 0115U000834).

Цель работы — повышение эффективности процесса выявления нарушения целостности цифрового изображения путем разработки метода обнаружения результатов клонирования в изображении, эффективного, в том числе в условиях (значительных) дополнительных возмущающих воздействий, а также для областей клона/прообраза малых относительных размеров.

Под областями клона/прообраза малых относительных размеров понимаются области, занимающие менее 0.85% ЦИ. Процесс выявления нарушений целостности ЦИ трактуется как процесс выявления клонирования в условиях наличия/отсутствия постобработки ЦИ.

Эффективность выявления нарушения целостности ЦИ в работе определяется при помощи двух параметров: отношения количества фальсифицированных ЦИ, определенных как фальсифицированные, к общему числу рассмотренных фальсифицированных (*TPR* (true positive rate)), выраженное в процентах; отношения количества оригинальных ЦИ, определенных как фальсифицированные, к общему количеству рассмотренных оригинальных изображений (*FPR* false positive rate), выраженное в процентах. Далее полагается, что фальсифицированное ЦИ является выявленным, если в нем определяется наличие области клона и прообраза, причем эти области имеют непустое пересечение с реальными областями клона

и прообраза. Оригинальное ЦИ определяется как фальсифицированное, если в нем фиксируется наличие областей клона, прообраза.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие *задачи*:

1. Провести анализ современного состояния задачи выявления областей клона/прообраза в цифровых изображениях в условиях дополнительных возмущающих воздействий;
2. Определить формальные характеристики подобластей ЦИ, нечувствительные к возмущениям входных данных, количественно одинаковые для областей клона и прообраза, в том числе в условиях постобработки, независимо от специфики и силы дополнительного возмущающего воздействия, а также от условий проведения клонирования;
3. Разработать теоретические основы метода выявления клонирования в ЦИ, которые обеспечат его эффективность независимо от вида и специфики дополнительных возмущающих воздействий, используемых для постобработки изображения;
4. Разработать метод выявления результатов клонирования в ЦИ, эффективный, в том числе для областей клона/прообраза малых относительных размеров, в условиях (значительных) дополнительных возмущающих воздействий;
5. Установить качественные и количественные отличия областей клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, с учетом которых разработать алгоритмическую реализацию метода выявления областей клона/прообраза в ЦИ; провести анализ эффективности разработанного алгоритма, в том числе сравнительный с современными аналогами.

Объект исследования — процессы нарушения целостности цифрового изображения.

Предмет исследования — методы обнаружения нарушения целостности ЦИ, проведенного путем клонирования.

Методы исследования. Для разработки теоретического базиса метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении используются теоретические основы цифровой обработки изображений, теория интерполяции, численные методы, математический анализ, матричный анализ, теория возмущений. При непосредственной разработке метода для выбора формальных характеристик ЦИ, нечувствительных к возмущениям входных данных, количественно одинаковых для областей клона и прообраза, в том числе в условиях дополнительных возмущающих воздействий, использовался математический анализ, теория возмущений, численные методы. Для обеспечения независимости эффективности разработанного метода и реализующего его алгоритма от особенностей цифрового изображения и от размеров областей клона/прообраза использовались математический анализ и теоретические основы цифровой обработки изображений. Оценка вычислительной сложности разработанного метода осуществляется с использованием теории алгоритмов.

Достоверность основных научных результатов, выводов и рекомендаций подтверждалась численными экспериментами, совпадением их результатов с известными экспериментальными данными других исследований, а также с реальными результатами проведенного клонирования в ЦИ средствами графических редакторов, соответствием полученных теоретических результатов результатам вычислительных экспериментов.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. *Впервые* на основании геометрического представления цифрового изображения найден формальный параметр, количественно одинаковый для соответствующих блоков областей клона и прообраза в условиях наличия/отсутствия дополнительных возмущающих воздействий: значение глобального (локального) минимума для матрицы минимальных блоковых отличий, которая ставится в соответствие анализируемому изображению, что дало возможность разработать теоретический базис, обеспечивающий независимость эффективности разработанного на его основе метода

- выявления результатов клонирования от вида и специфики дополнительных возмущающих воздействий, используемых для постобработки изображения.
2. *Впервые* на основании найденного формального параметра, количественно одинакового для соответствующих блоков клона и прообраза, установлены характерные особенности элементов матрицы минимальных блоковых отличий в случае наличия клонирования: существование совпадающих по соответствующим значениям окрестностей радиуса не меньше единицы для элементов матрицы, определяющих совпадающие по значению ее глобальные (локальные) минимумы, что не свойственно для оригинальных цифровых изображений. Учет этого в совокупности с установленными особенностями гистограмм абсолютных значений элементов матрицы разности блоков изображения в случае их принадлежности/непринадлежности клону и прообразу дал возможность для обеспечения эффективной работы разработанного метода выявления результатов клонирования независимо от характерных особенностей анализируемого изображения, что отличает его от современных аналогов.
 3. *Впервые* на основании полученного теоретического базиса, разработан метод выявления результатов клонирования, эффективный, в том числе в условиях дополнительных (значительных) возмущающих воздействий, эффективность которого не зависит от особенностей анализируемого ЦИ, проведения операции клонирования, специфики конкретного возмущающего воздействия, используемого для постобработки изображения, и превосходит современные аналоги, что позволило в целом повысить эффективность выявления нарушения целостности цифрового изображения.
 4. *Получили дальнейшее развитие* теоретические основы блоково-ориентированного подхода к выявлению клонирования в изображении путем получения критерия в условиях отсутствия постобработки и необходимого условия при наличии постобработки изображения принадлежности блоков матрицы изображения областям клона и прообраза. Полученные условия характеризуются нечувствительными к изменениям входных данных

количественными параметрами. Это обеспечило эффективную работу разработанного метода при выявлении в условиях постобработки областей клона/прообраза, относительные размеры которых значительно меньше тех, которые эффективно выявляются существующими аналогами.

Практическое значение полученных результатов.

Практическая ценность работы заключается в доведении соискателем полученных научных результатов до конкретных алгоритмов, которые могут быть использованы как составные части систем защиты информации, информационных систем различного наполнения любого учреждения, предприятия и т.д.

Алгоритм, реализующий разработанный метод *KL* детектирования результатов клонирования в ЦИ, позволил повысить эффективность процесса выявления нарушения целостности изображения (с учетом показателя TPR): на 6.7% в условиях сжатия с потерями клонированного ЦИ, на 5.8% в условиях наложения шума, на 4% в условиях размытия клонированного ЦИ, по сравнению с наилучшими из современных аналогов, при этом при отсутствии дополнительных возмущающих воздействий наличие клона/прообраза определяется при его использовании в 100% ЦИ.

Алгоритм остается эффективным в случае малых относительных размеров области клона/прообраза ($<0.85\%$ ЦИ) и позволяет эффективно выявлять результаты клонирования в случае, когда клон/прообраз составляют $\ll 0.85\%$ ЦИ, в отличие от существующих аналогов.

В условиях дополнительных возмущающих воздействий, в том числе комплексных, сохраняющих надежность восприятия ЦИ, значение показателя TPR для разработанного алгоритма не меньше 97%, а значение FPR=4.8% сравнимо с лучшими современными аналогами. Алгоритм позволяет эффективно выявлять результаты клонирования в условиях значительных возмущающих воздействий, где современные аналоги вообще не работают: в условиях сжатия с коэффициентом качества $QF=10$ детектирует результаты

клонирования в 70% фальсифицированных изображений, а при возмущающем воздействии, для которого $SNR=5dB$ – в 67.8% ЦИ.

Разработанный алгоритм является полиномиальным степени 4.

Практическое значение полученных результатов подтверждается актами внедрения в деятельность ООО «СКАЙ СИСТЕМ АУТОМЕЙШН», ООО "ВПА-ЮГ", ООО «НГХ СЕРВИС».

Личный вклад соискателя. Работы [139,144,145,158] выполнены автором самостоятельно. Из работ, которые опубликованы в соавторстве, соискателю принадлежат: идея использования нечувствительности объема цилиндрического тела, которое ставится в соответствие цифровому изображению (части цифрового изображения), к сжатию изображения с потерями при выявлении областей клона и прообраза, анализ матрицы блоковых отличий [137,149]; доказательство нечувствительности задачи построения интерполяционного сплайна для элементов матрицы изображения к изменениям входных данных для сплайнов различной, в том числе высокой, степени [132,136]; обеспечение эффективности разрабатываемого метода выявления клонирования в условиях постобработки ЦИ к условиям сжатия с потерями с произвольным коэффициентом качества, в том числе для формата Jpeg2000 [147]; исследование характерных особенностей окрестностей элементов – локальных минимумов матрицы минимальных блоковых отличий, для случая оригинального ЦИ и изображения, для которого соответствующие блоки матрицы принадлежат областям клона и прообраза; анализ попиксельного отличия соответствующих блоков клона и прообраза [155–157]; разработка метода выявления областей клона/прообраза в условиях дополнительных изменений ЦИ после осуществления клонирования [138,140].

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, которые составляют основное содержание работы, докладывались и обсуждались на Международных и Всеукраинских научных конференциях и семинарах, в том числе:

- семинар при ученом совете НАН Украины «Технические средства защиты информации» (Одесса, 2015);
- VIII Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития ИТ-индустрии» (Харьков, 2016);
- II Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації» (Міжгірський р-н, с.Верхнє Студене, 2016);
- Перша міжнародна науково-практична конференція «Проблеми науково-технічного та правового забезпечення кібербезпеки у сучасному світі «ПНПЗК–2016» (Харків, 2016);
- 17-я Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии «СИЭТ–2016» (Одесса, 2016);
- V Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні управляючі системи та технології «ІУСТ–2016» (Одесса, 2016);
- 5-я Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии «ИСТ–2016» (Харьков – Коблево, 2016).

Публикации. Материалы диссертационной работа изложена в 14 публикациях: 7 статей, из которых 6 опубликовано в журналах, включенных в перечень специализированных изданий Украины, из них 3 без соавторов, 5 статей – в журналах, включенных в международные наукометрические базы (Index Copernicus, РИНЦ, EBSCO, Google Scholar, Ulrich, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Научная периодика Украины); 1 статья в зарубежном периодическом издании; 1 коллективная монография; 6 тезисов докладов на международных научных конференциях.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАДАЧИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

На сегодняшний день проблема выявления неоригинальных (претерпевших различные неавторизованные изменения) цифровых контентов является чрезвычайно актуальной [1–5]. Современный уровень развития информационных технологий, существование и непрерывное совершенствование таких программных «монстров», как Adobe Photoshop, Gimp и др., делают подделки (фальсификации) ЦИ легко и качественно реализуемыми, а потому очень распространенными. Теперь при встрече, например, в Интернете, какой-либо информации, подкрепляемой видео, фотоматериалами, используемыми якобы для доказательства ее подлинности, каждый раз возникает вопрос, а не являются ли эти материалы результатом качественной фальсификации. «Цена» такой подделки, ее последствия могут быть различными. Такие видео материалы могут привести к непоправимым последствиям при их использовании в качестве вещественных доказательств в судебных разбирательствах, в медицине, в ходе различных манипуляций общественным сознанием, мнением, в ходе политической борьбы и т.д. В силу этого сейчас, как никогда ранее, остро встает вопрос эффективной экспертизы подлинности ЦИ, разработки новых и усовершенствования существующих методов выявления и локализации нарушений их целостности, что невозможно без детального анализа существующих подходов для решения рассматриваемой задачи.

1.1 Способы фальсификаций цифровых изображений и методы их выявления

Сравнительно низкая стоимость современного аппаратного и программного обеспечения позволяет легко создавать, изменять и манипулировать цифровыми изображениями. В результате в настоящий момент создалась такая ситуация, когда нельзя быть уверенными в целостности, подлинности ЦИ без их качественной экспертизы [1,6,7].

Все методы выявления фальсификаций ЦИ с учетом необходимости наличия информации об оригинальном изображении могут быть разделены на активные и пассивные (слепые) [6,8–10]. Активные методы для организации своей работы требуют информацию об оригинальном изображении. Большинство из активных методов используют цифровую подпись [11,12] или стеганографическое вложение цифровых водяных знаков (ЦВЗ), что является значимым недостатком и ограничивает их применение [13,14]. Действительно, погружение какой-либо дополнительной информации в ЦИ уже нарушает его целостность, требует непосредственного человеческого вмешательства или наличия фото-, видеокамеры, оснащенной специальными техническими возможностями, которые у многих камер на сегодняшний день отсутствуют. Кроме того, для ЦВЗ возможны различные атаки, приводящие к их разрушению (изменению) [11,12], тем самым уничтожающие необходимую для решения рассматриваемой в работе задачи информацию об изображении; для ЦИ с внедренным ЦВЗ необходимо обеспечение достаточной пропускной способности скрытого канала связи, что само по себе является непростой задачей [11,12].

Исходя из вышеперечисленного, на сегодняшний день ведущие позиции для решения рассматриваемой задачи занимают слепые методы, которые не нуждаются ни в какой дополнительной информации об анализируемом ЦИ [15–17]. Они выявляют измененные области изображения, их местоположение, используя только анализируемое ЦИ.

Пассивные методы выявления нарушений целостности ЦИ можно разделить на следующие группы [9,18]: пиксель-ориентированные (pixel-based) (детектируют «аномалии» в значения яркости пикселей ЦИ [19]), формат-ориентированные (format based) (детектирует нарушения целостности путем анализа артефактов, возникающих при сжатии ЦИ [20,21]), камера-ориентированные (camera based) (используют технические характеристики камеры: хроматическую аберрацию, показатели сенсорного шума и др. для детектирования следов несанкционированных изменений ЦИ, проведенных на различных стадиях его создания [22–29]), ориентированные на физическую окружающую среду (physical environment based) (основанные на оценке и сопоставлении освещенности объектов на ЦИ [30–33]), ориентированные на геометрию изображения (geometry based) (основанные на выявлении неточностей при сравнении геометрических особенностей и характеристик объектов в реальности и на ЦИ). Наиболее широко используемыми для детектирования несанкционированных изменений ЦИ являются пиксель-ориентированные методы [34].

Способы фальсификации цифровых изображения классифицируется в пяти категориях [9,18,35] (хотя возможна и более грубая их классификация, включающая в себя три категории [36,37]): клонирование (copy-move (cloning) forgery), фотомонтаж (Image Splicing), ретуширование изображения (Image Retouching), трансформация (Morphing), и усовершенствование (Enhanced), для выявления каждой из которых могут использоваться как активные, так и пассивные методы.

При клонировании, как отмечалось выше, часть ЦИ (прообраз) копируется и переносится в другую область этого же изображения, образуя клон [38–41] (рис. 1.1).

При фотомонтаже [42–45] используются части нескольких ЦИ, композиция которых образует новое ЦИ (рис.1.2).

Ретуширование изображения включает легкое изменение в изображение для различных эстетических и коммерческих целей (рис.1.3 [9]).



а



б

Рис.1.1. Иллюстрация применения для ЦИ клонирования: а – оригинальное ЦИ; б – результат проведенного клонирования



а



б



в

Рис.1.2. Иллюстрация применения для ЦИ фотомонтажа: а, б – оригинальные ЦИ; в – результат проведенного фотомонтажа

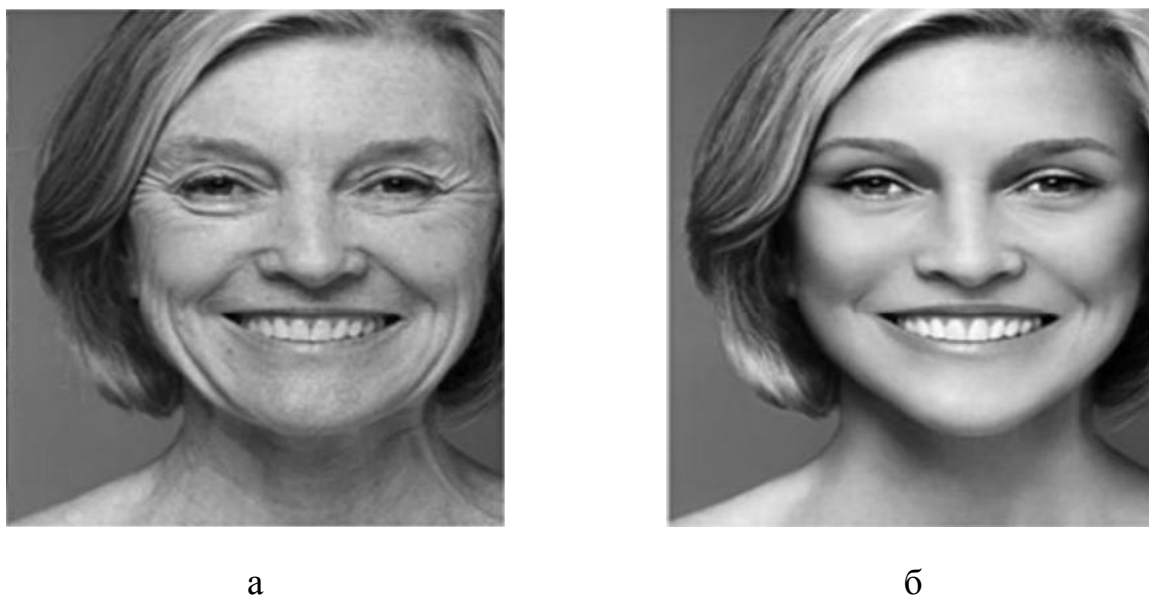


Рис.1.3. Иллюстрация применения для ЦИ ретуширования: а – оригинальное ЦИ; б – результат проведенного ретуширования

Трансформация – вид фальсификации ЦИ, когда объект одного изображения вводится в объект другого изображения, претерпевая при этом определенные изменения [9,18,35].

При усовершенствовании исходное ЦИ подвергается различным операциям обработки: коррекции цвета, размытию и т.д. [46,47].

Одним из наиболее часто и широко используемым вариантом фальсификации было и остается клонирование, реализованное во всех современных графических редакторах [48–52].

1.2 Современные подходы и методы выявления клонирования

Задача выявления результатов клонирования, проведенного в ЦИ в условиях дополнительных возмущающих воздействий (ВВ), не является новой. На сегодняшний день существуют различные методы выявления результатов клонирования в ЦИ, большинство из которых работают в соответствии со схемой, представленной на рис.1.4 [53,54].



Рис.1.4. Общая схема работы методов выявления результатов клонирования в цифровом изображении

- Для выявления результатов клонирования в ЦИ используются три подхода:
- блочно-ориентированный (Block-based) [1];
 - ориентированный на ключевые (характерные) точки (key-point based) [55];
 - гибридный [56].

Каждый из перечисленных выше подходов имеет как свои преимущества, так и недостатки.

1.2.1 Блоково-ориентированные методы выявления результатов клонирования в цифровом изображении. Основная идея блоковых методов, обладающих часто значительной вычислительной сложностью, заключается в том, что ЦИ разбивается на пересекающиеся/непересекающиеся области/блоки, после чего изображение анализируется не целиком, а отдельными полученными после разбиения частями, среди которых ищутся совпадающие или сравнимые по определенным признакам. Блоково-ориентированный подход нашел свое

отражение в многочисленных разработках современных специалистов в области информационной безопасности.

В [57] авторами для получения векторов признаков малого размера предложен подход, основанный на анализе главных компонент (РСА). Он позиционируется авторами как устойчивый исключительно к сжатию с потерями и наложению аддитивного шума, хотя при этом значение коэффициента TPR составляет лишь 87%.

Разработанные в [57], а также в [58] методы полезны в случае, когда в фальсификации ЦИ задействуются статистики второго порядка. Если же подделка изображения основана на манипуляции со статистиками более высокого порядка, то здесь предложенные методы оказываются несостоятельными.

Блоково-ориентированный метод, представленный в работе [59], имеет незначительную вычислительную сложность и является робастным к таким ВВ, которым подвергается ЦИ после клонирования, как размытие, наложение шума и их композиции. При реализации соответствующего алгоритма матрица ЦИ разбивается на пересекающиеся блоки. Метод применим как для цветных изображений, так и для изображений в градациях серого. Однако, являясь эффективным для перечисленных выше ВВ, метод не является робастным к таким часто используемым атакам, как масштабирование, сжатие с потерями.

В [60] предложена техника использования инвариантных моментов, которая обеспечивает детектирование клонирования в условиях размытия, наложения аддитивного шума, изменения контрастности в областях клона и прообраза. Подобная же идея (использование инвариантных моментов) положена в основу методов, предложенных в [61–63], являющихся робастными к сжатию с потерями, размытию, наложению шума, но оказывающихся неэффективными в условиях масштабирования и других возмущающих воздействий. Существенным недостатком здесь является значительная вычислительная сложность.

В [64] авторами предложена техника поиска результатов клонирования, эффективная в условиях сохранения клонированного ЦИ в формате Jpeg, поворота и наложения гауссовского шума. Анализируемое ЦИ разбивается на пересекающиеся блоки одинакового размера, каждый из которых разбивается на 4 блока. После этого рассчитывается вектор признаков, хранящий информацию о средней яркости каждого подблока. Указанный вектор и является объектом анализа в соответствующем алгоритме.

Ориентированным лишь на определенные ВВ, в частности, на атаку вращением, является метод, предложенный в [65]. В [66,67] во главу угла поставлена робастность соответствующего алгоритма к масштабированию и повороту, не обеспечивая устойчивость к другим ВВ.

В [68] предложен блоково-ориентированный метод, устойчивый к наложению гауссовского шума, Jpeg-сжатию. Метод является эффективным с точки зрения вычислительных затрат, однако требует дополнительных усовершенствований для обеспечения возможности локализации областей клона/прообраза.

Метод, работающий в режиме реального времени, предложен в [69]. Имея высокую эффективность, предложенный метод работает только с ЦИ в градациях серого, что является его значимым недостатком, существенно ограничивая его область применимости.

Не осталась без внимания при решении задачи выявления клонирования и область сингулярного разложения (SVD) матрицы (блоков матрицы) изображения. В [70] техника SVD используется для получения геометрических и алгебраических инвариантных характеристик блоков матрицы изображения. Алгоритм разбивает изображение на пересекающиеся блоки, получая задачу меньшего размера, применяет сингулярное разложение для блоков. Полученные в результате векторы сохраняются в дополнительной матрице. В результате лексикографической сортировки строк после их анализа находятся искомые блоки ЦИ. Для установления сравнимости блоков, как и для большинства существующих блоково-ориентированных методов, используется

пороговое значение. Если значение параметра, определяющего степень схожести блоков, выше порогового значения, то делается вывод о том, что эти блоки принадлежат областям клона и прообраза, их местоположение фиксируется. Предложенный метод обладает малой вычислительной сложностью, но является устойчивым исключительно к наложению шумов на ЦИ.

Область сингулярного разложения эффективно используется в методах выявления результатов клонирования в условиях коррекции цвета или яркости областей клона/прообраза [71–74]. Матричное представление коррекции цвета ЦИ в соответствии с результатами реализации этой операции в графическом редакторе Adobe Photoshop с некоторым допущением имеет следующий вид:

$\bar{F} = kF$, где F, \bar{F} – $n \times n$ -матрицы цветовых каналов ЦИ до и после коррекции соответственно, k – скалярное значение коррекции, или коэффициент коррекции, $0 < k \leq 1$. В силу этого в работе [72] делаются следующие выводы:

сингулярные числа (СНЧ) $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \dots, \bar{\sigma}_n$ матрицы \bar{F} определяются как: $\bar{\sigma}_i = k\sigma_i, i = \overline{1, n}$, где $\sigma_i, i = \overline{1, n}$, – СНЧ F , что является формальным представлением коррекции цвета ЦИ; определение коэффициента коррекции

цвета k проводится в соответствии с формулой: $k = \frac{\bar{\sigma}_1}{\sigma_1} = \frac{\bar{\sigma}_2}{\sigma_2} = \dots = \frac{\bar{\sigma}_n}{\sigma_n}$;

сингулярные векторы матрицы ЦИ в результате коррекции цвета не меняются. Аналогичное заключение будет иметь место в случае коррекции цвета для отдельных частей (блоков) ЦИ, являющихся результатом клонирования. Разработанный на основе полученных теоретических заключений метод позволяет очень точно локализовать область клонирования в условиях коррекции цвета области клона/прообраза, может быть использован для решения аналогичной задачи для цифрового видео, представляемого в виде последовательности кадров, однако этот метод не является робастным к другим дополнительным ВВ на клонированное ЦИ, в частности, к последующему сжатию изображения с потерями.

Предложенный этими же авторами в [73,74] метод, робастный к коррекции яркости области клона, основан на полученном формальном представлении этого ВВ, которое заключается в увеличении/уменьшении в случае осветления/затемнения изображения максимального сингулярного числа σ_1 $n \times n$ -матрицы яркости Y ЦИ на величину, равную произведению kn , k – натуральное число, определяющее количество градаций яркости, на которое происходит коррекция, при этом все остальные СНЧ остаются без изменения. Таким образом, определение количества градаций яркости, на которое произошла коррекция, может быть проведено в соответствии с формулой:

$$k = \frac{|\sigma_1 - \bar{\sigma}_1|}{n}, \text{ где } \sigma_1, \bar{\sigma}_1 - \text{соответственно максимальные СНЧ матриц } Y, \bar{Y} \text{ (}\bar{Y} -$$

матрица яркости возмущенного ЦИ); сингулярные векторы в результате коррекции яркости не меняются. Аналогичные выводы делаются для произвольного блока матрицы ЦИ. Ни к каким другим ВВ, кроме коррекции яркости области клона, данный метод робастным не является, более того, если после коррекции яркости клона или коррекции его цвета в [72] ЦИ будет подвергнуто еще каким-то возмущающим воздействиям, то в таких условиях оба метода окажутся несостоятельными. Одним из основных преимуществ рассмотренных методов является их возможность очень точного определения области клона и прообраза путем использования для этого блоков нестандартной формы [75–77].

Методы, представленные в [78–80], как признаки для детектирования результатов клонирования используют текстурные признаки, обеспечивая робастность лишь к некоторым ВВ.

В [81] предложен алгоритм, основанный на характеристиках ЦИ, инвариантных к вращению. Алгоритм имеет значительные временные затраты, которые быстро растут с ростом размера ЦИ, обладает устойчивостью по отношению к вращению и масштабированию ЦИ.

Частотная область ЦИ является областью, которая очень часто и эффективно используется для цифровой обработки изображений [82]. В силу

этого большое количество существующих методов детектирования клонирования в ЦИ работают в пределах именно этой области.

В [83] авторами предлагается подход, который использует в качестве основных объектов для анализа квантованные коэффициенты дискретного косинусного преобразования (ДКП) блоков матрицы ЦИ. Метод, основанный на анализе ДКП-коэффициентов, позиционируется авторами как устойчивый к сжатию и наложению шумов (хотя TPR для него составляет лишь 89%), но несостоятельный в условиях масштабирования изображения.

Анализ частотной области ЦИ является основой для метода, предложенного в [84–86]. В указанных работах авторами выявлены особенности проявления эффекта двойного квантования (double quantization), или DQ-эффекта, для коэффициентов ДКП в виде периодически повторяющихся пиков и ненулевых впадин или пиков и нулей на гистограммах ДКП-коэффициентов. На основании полученных особенностей предлагается метод, позволяющий в условиях сохранения клонированного ЦИ (которое до клонирования хранилось в формате с потерями) в формате с потерями определить ту подобласть ЦИ, где присутствует клон. Хотя метод является чувствительным к области клона малых размеров (сравнимых с размерами блока ЦИ при его стандартном разбиении [82]), но он не локализует его непосредственно, что является значимым недостатком метода. Условием, ограничивающим область применимости метода, является требование, чтобы коэффициент квантования для вторичного сжатия ЦИ был больше, чем при его первичном сжатии. Кроме того, сама идея метода такова, что он настроен на работу в условиях только конкретного ВВ – сжатия с потерями.

В [87] предлагается алгоритм, использующий коэффициенты ДКП блоков ЦИ фиксированного размера. Каждый квадратный блок в ходе работы алгоритма представляется круговым блоком, для которого используются четыре характеристики, что позволяет уменьшить объем обрабатываемой информации. В итоге происходит лексикографическая сортировка характеристических векторов и искомые области клона/прообраза традиционно

определяются с учетом предварительно найденного порогового значения. Предложенный алгоритм является робастным к размытию, наложению аддитивного шума, имеет малые временные затраты.

ДКП является основой и для метода, предложенного в [88], который детектирует области клона/прообраза исключительно в условиях наложения гауссовского шума и поворота.

Частотная область (область дискретного преобразования Фурье, дискретного косинусного преобразования, дискретного вейвлет-преобразования, преобразования Фурье-Меллина и др.) для анализа ЦИ используется методами выявления результатов клонирования в [58,89–98]. Основным недостатком данных методов является их ориентированность на конкретные возмущающие воздействия, которые используются для постобработки ЦИ. В частности, метод, основанный на преобразовании Фурье-Меллина [99], позиционируется устойчивым лишь к повороту ЦИ. Кроме того, эти методы не обеспечивают желаемые значения эффективности в условиях постобработки. Так метод, предложенный в [90] обеспечивает в условиях сохранения клонированного ЦИ с потерями $TPR=99\%$ лишь при $QF=90$, а при $QF=70$ (что нельзя назвать значительным ВВ) это значение падает до 86% ; при наложении гауссовского шума с $SNR=20dB$ значение TPR составило всего 71% .

Одним из способов «маскировки» результатов клонирования ЦИ является его последующее размытие. В [46] разработан блоково-ориентированный метод выявления нарушения целостности ЦИ путем обнаружения следов размытия, основанный на учете теоретически обоснованных отличительных особенностей СНЧ блоков матрицы размытого ЦИ: скорость роста наименьших СНЧ спектра соответствующей матрицы (при использовании для них кусочно-линейной интерполяции) качественно отличается от соответствующей характеристики исходного изображения – она значительно меньше. Количественная оценка скорости роста наименьших СНЧ блоков позволяет отличить ЦИ, подвергавшееся размытию, от того, для которого данное ВВ не использовалось. Однако упомянутый метод, фиксируя нарушение целостности ЦИ, не дает

возможности обнаружить на изображении непосредственно области клона и прообраза, что является его значительным недостатком, ограничивающим область применения для решения задачи, рассматриваемой в настоящей работе. Аналогичным недостатком обладает и метод, предложенный в [47].

На основе анализа литературных источников можно утверждать, что блочные методы в состоянии достаточно точно локализовать область клона/прообраза. Практически обязательной в существующих блочно-ориентированных методах является лексикографическая сортировка векторов признаков, требующая дополнительных вычислительных затрат [54,87,100], что является нежелательным при разработке новых методов. Основным при выявлении клона/прообраза в блочно-ориентированных методах является сравнение устанавливаемого количественного признака отличия областей анализируемого ЦИ с пороговым значением, что в общем случае не гарантирует высокую эффективность его использования в условиях анализа ЦИ, не входящих во множество изображений, бравших участие при определении порога, а также в условиях постобработки с использованием ВВ, вид или параметры которых отличны от тех, которые использовались при определении порога. В общем случае для определения порога, пригодного в условиях произвольной постобработки ЦИ (для исключения ориентированности соответствующих методов на конкретные ВВ), необходимо рассмотреть все возможные здесь ВВ со всеми возможными значениями определяющих их параметров, что является практически невыполнимым.

1.2.2 Методы, ориентированные на анализ ключевых (характерных) точек изображения. Алгоритм, основанный на анализе характерных точек ЦИ, как правило, работает с изображением целиком, не разбивая его на подобласти, блоки. Используемые характеристики относятся ко всему изображению, что повышает эффективность вычислений и делает эту группу методов предпочтительными по сравнению с блочно-ориентированными с точки зрения вычислительной сложности. Двумя основными типами таких методов

являются SIFT (Scale Invariant Features Transform) и SURF (Speed UP Robust Features) [8,101–103].

В [104] предложен метод, использующий корреляцию между областями изображения, основанный на SIFT-технологии. Авторы рассматривают SIFT-алгоритм как устойчивый к постобработке ЦИ. SIFT-алгоритм в ходе своей работы вычисляет все ключевые точки изображения и ищет пары областей, для которых ключевые точки соответствуют друг другу. Такие области и будут определять клон и прообраз. Предложенный на основе SIFT алгоритм, используя локальные характеристики изображения, эффективен для обнаружения клонированных областей в условиях масштабирования и поворота. Существенным недостатком метода является то, что он является неэффективным в случае, когда области клона, прообраза имеют малые относительно всего ЦИ размеры, а также тогда, когда при постобработке ЦИ использовались значительные ВВ, количественным показателем которых является низкое значение отношения «сигнал–шум» SNR.

SIFT-технология является основополагающей для метода, предложенного в [105], использующего алгоритм, формализуемый в виде дерева размерности k , для сопоставления шаблону, как наиболее быстрый. Авторы рассматривают различные преобразования ЦИ, идентифицируя области клона и прообраза путем анализа ключевых точек, определяемых SIFT. Предложенный метод хорошо зарекомендовал себя в условиях наложения на клонированное ЦИ аддитивного шума и сжатия изображения с потерями.

SIFT-технология используется также авторами [106] при разработке метода, устойчивого к геометрическим преобразованиям ЦИ. Основными преимуществами этого метода являются малое время вычислений и малые запросы к памяти.

В [107] SURF-алгоритм использует вейвлет Хаара для обнаружения ключевых точек. Его основное преимущество заключается в высокой скорости обнаружения клонирования. Алгоритм позиционируется как устойчивый к ВВ,

но его основным недостатком является неспособность даже «грубо» определить границы фальсифицированной области.

В [108] предлагается использование SURF-технологии для подобластей ЦИ, что дает возможность определения границ клона и прообраза, но лишь для конкретных ВВ и в случае, когда область клона не является малой относительно всего ЦИ.

Ориентированность на конкретные возмущающие воздействия присуща и методу, предложенному в [109], который является робастным к повороту, а также методу, предложенному в [15], эффективному в условиях поворота и масштабирования.

Результатом исследований, проведенных в [110], стал метод, основанный на учете относительного положения ключевых точек. Алгоритм, реализующий метод, имеет малую вычислительную сложность, малое количество ошибок второго рода, но он не может обнаружить область клона, если она имеет малые относительные размеры, как и метод, предложенный в [111], где за основу взята SURF-технология.

Технология SURF используется также в [112,113], оставляя нерешенной задачу выявления областей клона и прообраза малых относительных размеров.

Эффективный метод, основанный на SIFT-технологии, был предложен в [114], а очередной работой авторов в этом направлении стала работа [115]. Предложенные методы являются устойчивыми в условиях дополнительных ВВ, причем первый из них [114] обеспечивает при отсутствии постобработки ЦИ $TPR=100\%$ (отсутствие ошибок первого рода), поэтому используются в разделе 4 настоящей работы при сравнительном анализе эффективности разработанного метода. Однако область применимости этих методов ограничивается изображениями, в которых относительные размеры клонов/прообразов сравнимы с 1% от размера ЦИ, малые клоны ($\ll 1\%$ ЦИ)) при тестировании методов авторами вообще не рассматриваются. В этих условиях при наличии постобработки ЦИ они обеспечивают $TPR < 94.5\%$.

В [116] авторами предложена композиция двух подходов, основанных на анализе ключевых точек: SURF и SIFT. На основе проведенного сравнения показано, что SIFT обнаруживает больше ключевых точек, но требует для этого больше времени по сравнению с SURF. SIFT используется для выделения из изображения признаков, инвариантных к масштабированию и вращению изображения, тогда как SURF используется для высокоскоростного детектирования областей клона и прообраза. Идея композиции SURF и SIFT нашла свое отражение также в методе, предложенном в [117].

Заметим, что поскольку основная идея методов данной группы заключается в выделении ключевых точек ЦИ (подобласти ЦИ), эти методы могут оказаться неэффективными в случае, когда клонирование используется с целью удаления некоторого (возможно малого по размерам) объекта с части изображения, которой присущ незначительный перепад значений яркости пикселей (фоновая часть), причем используется для этого прообраз, являющийся подобластью той же фоновой части (что естественно при практической реализации клонирования в этом случае) [108]. Условия клонирования здесь таковы, что само выделение (описание) ключевых точек является сложной задачей, а результат может не привести к решению задачи выявления клона/прообраза. Подтверждением этого вывода является тот факт, что иллюстрация работы алгоритмов и методов, основанных на анализе ключевых точек ЦИ, проводится, как правило, в условиях клонирования объектов изображения (прообраз содержит объект) [102,111,114,118,119].

Таким образом, общими основными недостатками методов выявления в ЦИ результатов клонирования, основанными на анализе ключевых точек, являются: зависимость эффективности методов от размеров областей клона/прообраза (несостоятельность методов в случае малой относительной области клона), а также от конкретных условий проводимого клонирования; использование подхода, основанного на анализе ключевых точек, дает меньше возможностей для определения границ областей клона/прообраза, чем использование блоково-ориентированных методов. Блоково-ориентированные

методы на сегодняшний день остаются более эффективными с точки зрения локализации клона/прообраза, чем методы, основанные на ключевых точках ЦИ [9].

1.2.3 Гибридный подход. Еще одним подходом, как было отмечено выше, при разработке методов выявления клонирования является гибридный. В гибридных методах два или более подходов комбинируются с целью использования преимущества каждого из них. Чаще всего в тех или иных вариациях используется комбинация блоково-ориентированного подхода и подхода, основанного на анализе ключевых точек ЦИ. Так в [56] предложена новая гибридная схема, использующая адаптивную сегментацию ЦИ и согласование точечных признаков. Предложенная схема является традиционной композицией блоково-ориентированного и основанного на анализе ключевых точек подходов. Алгоритм адаптивной сегментации разбивает ЦИ на непересекающиеся нерегулярные блоки. Затем особые точки выделяются в каждом блоке, образуя блоковые характеристики. Блоковые характеристики сопоставляются друг с другом для локализации особых точек. Эта процедура «грубо» указывает на неоригинальные области ЦИ. Для уточнения области клона предлагается алгоритм, в ходе выполнения которого соседние блоки со сравнимыми характеристиками объединяются между собой. Авторы утверждают, что результаты тестирования предложенного ими метода превосходят соответствующие результаты для существующих методов решения рассматриваемой задачи, однако сами результаты на представительной выборке ЦИ не приводят (за исключением их иллюстрации на одном ЦИ), что заставляет усомниться в их объективности.

В [120] также предложен метод, основанный на композиции блоково-ориентированного подхода и подхода, основанного на анализе ключевых точек ЦИ, устойчивый к геометрическим преобразования и сжатию с потерями, хотя никакие количественные результаты тестирования авторами не приводятся.

Примерами гибридных методов могут служить методы, предложенные в [34,62,118,121–127], однако ни один из них не дает окончательного решения рассматриваемой задачи, не свободен от недостатков, многие из которых уже были перечислены выше. Так метод, предложенный в [34], хотя в условиях наложения аддитивного гауссовского шума обеспечивает значение TPR близкое к 95%, но в условиях сжатия с потерями для QF=70 лишь 92%.

Метод, предложенный в [125], основанный на комбинации SIFT- и вейвлет-подходов, а именно Dyadic Wavelet Transform (DyWT), используется в разделе 4 для сравнительного анализа, поскольку позиционируется авторами как устойчивый к возмущающим воздействиям, используемым в процессе постобработки ЦИ, и превосходит по эффективности SIFT-алгоритм.

Таким образом, использование гибридного подхода на практике также не обеспечивает всесторонне эффективное решение задачи выявления результатов клонирования в условиях постобработки ЦИ, включающее независимость от вида ВВ, возможность точной локализации клона/прообраза, робастность к значительным ВВ, возможность выявления областей клона/прообраза малых относительных размеров.

1.3 Сравнение блоково-ориентированных методов и методов, основанных на анализе ключевых точек изображения

Основными из 3-х рассмотренных подходов остаются на сегодняшний день блоково-ориентированный и основанный на анализе ключевых точек.

На основании проведенного анализа литературных источников можно сказать, что каждая из групп блоково-ориентированных методов и методов, основанных на анализе ключевых точек, имеет свои особенности (табл. 1.1).

Преимущество подхода, основанного на анализе ключевых точек изображения, заключающееся в меньшем времени вычисления, с учетом специфики рассматриваемой задачи, звучит не убедительно с учетом того, что этот подход уступает блоково-ориентированному по точности обнаружения

областей клона/прообраза: для многих приложений (в частности, судебные разбирательства, медицинские изображения, видео-информация, используемая средствами масмедиа и др.) основным является как можно более точное обнаружение областей клонирования, а не время вычислений.

Таблица 1.1 – Сравнение блоково-ориентированного подхода и подхода, основанного на анализе ключевых точек для выявления результатов клонирования в ЦИ

<i>Блоково-ориентированный подход</i>	<i>Подход, основанный на анализе ключевых точек изображения</i>
Разбиение изображения на блоки для выделения характерных признаков	Без разбиения изображения определение ключевых точек для выделения характерных признаков
Требуется большее количество памяти и большее время вычисления, чем в подходе, основанном на анализе ключевых точек ЦИ	Поскольку количество ключевых точек меньше количества блоков, то требуется меньше памяти и времени вычислений
Более точное обнаружение области клона и прообраза	Менее точное обнаружение области клона и прообраза
Чувствительность методов к размерам области клона/прообраза (несостоятельность в условиях малых относительных размеров)	
Ориентированность на конкретные возмущающие воздействия, используемые в процессе постобработки ЦИ после клонирования	
Необеспечение достаточной эффективности в условиях значительных возмущающих воздействий	

Как блоково-ориентированные, так и методы, основанные на анализе ключевых точек ЦИ, остаются в большинстве своем ориентированными на конкретные ВВ, причем, как правило, незначительные, являются чувствительными к размерам областей клона/прообраза. Задача определения

областей клона малых относительных размеров в условиях дополнительных ВВ остается нерешенной до настоящего момента. Существующие методы, как правило, работают с областями клона/прообраза, площадь которых больше 1% от площади всего ЦИ (площади определяются количеством пикселей, попавших в соответствующую область) [115,128]. Редко предлагаются методы, детектирующие обсуждаемые области, когда их площади больше, чем 0.85% площади всего ЦИ [59].

Таким образом, задача усовершенствования существующих и разработки новых методов выявления результатов клонирования в ЦИ в условиях его постобработки остается актуальной на сегодняшний день.

1.4 Выводы к разделу 1

На основании проведенного литературного обзора по теме диссертационного исследования можно сделать следующие выводы:

- Одним из наиболее часто и широко используемых при фальсификации ЦИ инструментов был и остается инструмент «клонирование», реализованный во всех современных графических редакторах, обеспечивая актуальность его выявления;
- Задача выявления результатов клонирования в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий не является полностью решенной; существующие методы не обеспечивают достаточную эффективность при использовании постобработки изображения, претерпевшего клонирование. Даже в условиях отсутствия дополнительных возмущений нулевое значение ошибки первого рода достигается лишь очень немногими алгоритмами;
- Большинство существующих методов выявления результатов клонирования в цифровом изображении ориентированы на работу в условиях определенного и иногда очень ограниченного набора дополнительных возмущающих воздействий;

- Существующие методы выявления результатов клонирования часто оказываются несостоятельными в условиях значительных возмущающих воздействий, которые для многих из них даже не рассматриваются в ходе тестирования;
- Блочно-ориентированные методы часто оказываются более эффективными при определении границ области клона/прообраза, чем методы, основанные на анализе ключевых точек изображения, но, как правило, обладают значительной вычислительной сложностью, превосходящей данный параметр для методов типа SIFT, SURF;
- Методы, основанные на анализе ключевых точек цифрового изображения, могут оказаться несостоятельными в случае, когда клонирование происходит с целью устранения объекта, находящегося в области ЦИ с малыми перепадами значений яркости (фоновой области), и прообраз выбирается из этой же области изображения, что часто имеет место на практике. Таким образом, можно утверждать, что эффективность методов, основанных на ключевых точках изображения, зависит от специфики областей изображения, участвующих в процессе клонирования, т.е. от специфики проводимого клонирования;
- Существующие методы рассчитаны на анализ цифровых изображений, в которых области клона, прообраза не меньше 0.85% всего изображения, что является значительным ограничителем использования этих методов на практике, где применение клонирования в случаях, когда область клона/прообраза будет меньше, чем 0.85% изображения, является очень вероятным;
- Нужны новые математические подходы к решению рассматриваемой задачи, т.к. использование существующих подходов даже в случае их комбинации (гибридный подход) не обеспечивает значительный рост эффективности при выявлении клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий.

Таким образом, в разделе 1 решена задача 1 из перечня задач диссертационного исследования; показано, что задача повышения эффективности процесса выявления нарушения целостности цифрового изображения путем разработки нового метода обнаружения результатов клонирования в изображении, эффективного, в том числе, в условиях (значительных) дополнительных возмущающих воздействий, а также для областей клона/прообраза малых относительных размеров, на основе принципиально нового математического базиса является актуальной.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Как уже отмечалось выше, одной из причин недостаточной эффективности существующих методов выявления нарушения целостности ЦИ, проведенного путем клонирования с последующей постобработкой измененного изображения, является некоторая ограниченность, «тиражируемость» теоретических, математических базисов, используемых ими. Даже комбинация существующих подходов с целью использования преимуществ каждого из них в гибридных методах не дает желаемого результата. В связи с этим

Целью раздела является разработка теоретических основ метода решения задачи выявления нарушения целостности ЦИ, произошедшего вследствие клонирования в условиях наличия/отсутствия дополнительных к клонированию возмущающих воздействий на измененное ЦИ, который бы не был ориентирован на специфику реализации конкретного программного инструмента обработки изображения, эффективного независимо от особенностей проводимого клонирования, а также в случае малых областей клона/прообраза и значительных возмущающих воздействий.

Исходя из результатов литературного обзора по теме диссертационного исследования, для решения задачи выявления результатов клонирования в ЦИ в работе при разработке метода используется блоково-ориентированный подход.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить особенности геометрического представления цифрового изображения в случае наличия в нем областей клона и прообраза при дополнительных возмущающих воздействиях и их отсутствии;

2. Получить формальный критерий принадлежности блоков ЦИ областям клона и прообраза в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий на изображение;
3. Установить характеристику отличия – формальную характеристику ЦИ, количественные показатели которой для областей клона и его прообраза отличаются между собой меньше, чем эти же показатели для любых других областей ЦИ аналогичной формы и размеров, в условиях дополнительных возмущающих воздействий, используя геометрическое представление изображения;
4. Обеспечить нечувствительность характеристики отличия к малым изменениям входных данных, где под входными данными понимается фальсифицированное путем клонирования ЦИ;
5. На основе характеристики отличия установить формальную характеристику для блоков ЦИ, одинаковую для соответствующих блоков областей клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий – показатель совпадения;
6. Обеспечить независимость показателя совпадения от особенностей и реализации возмущающих воздействий на изображение после клонирования, а также относительных размеров клона/прообраза.

2.1 Особенности геометрического представления цифрового изображения в случае наличия в нем областей клона и прообраза при дополнительных возмущающих воздействиях и их отсутствии

Клонирование в ЦИ без последующей обработки области клона или в условиях его незначительной обработки приводит к смысловому, зрительному повторению некоторой части ЦИ – прообраза. Даже если изображение потом претерпело дополнительные возмущающие воздействия, сходство клона и его прообраза в целом в нашем восприятии остается (рис.2.1). Необходимо отметить, что дополнительные изменения в ЦИ, претерпевшее клонирование, которые нарушитель будет вносить с целью замаскировать клонирование, на

практике, в подавляющем большинстве случаев, не будут значительными, поскольку такие изменения сами по себе могут привлечь внимание эксперта, что, очевидно, не входит в цели нарушителя [46]. Наша зрительная система, мозг, несмотря на то, что не в состоянии заметить различия яркостей в несколько градаций, изменения ширины линии контура на несколько пикселей, уловить незначительное понижение контрастности изображения, изменения, связанные с размытием ЦИ с небольшим радиусом и т.д., оказываются способными установить сходство частей изображения, их идентичность даже в случае их неполного совпадения, анализируя ЦИ в целом, уделяя особое внимание тем его частям, которые по тем или иным причинам оказываются «под подозрением».



а



б

Рис.2.1. Пример проведения клонирования с постобработкой измененного ЦИ:
а – оригинальное ЦИ в формате без потерь (Tif); б – ЦИ, являющееся результатом клонирования с последующим изменением цвета отдельных частей клона, размытием области клона и пересохранением результирующего ЦИ в формат с потерями (Jpeg)

Таким образом, при выявлении областей клонирования на ЦИ имеет смысл поиск не совпадающих (при постобработке ЦИ такой поиск будет безрезультатным), а мало отличающихся между собой его областей путем

анализа изображения в целом. Характеристика ЦИ, используемая для этого, должна быть нечувствительной к малым изменениям изображения (к изменениям входных данных) [129,130].

Для простоты изложения, не ограничивая общность рассуждений, ниже рассматриваются монохромные ЦИ. В случае цветных изображений (схема RGB) все нижеприведенные рассуждения могут быть применены для каждой цветовой компоненты в отдельности, либо для матрицы яркости Y (цветовая схема YUV).

Любое ЦИ является результатом дискретизации области определения $D \subset R^2$ и квантования значений некоторой функции двух переменных $f(x, y), (x, y) \in D$ [82] (при работе с ЦИ функция $f(x, y)$ в явном виде отсутствует), результатом чего служит $n \times m$ -матрица F с элементами $f_{ij} \in \{0, 1, \dots, 255\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, а наглядным представлением может служить трехмерная поверхность S (рис.2.2), соответствующая ЦИ, являющаяся графиком функции $g(x, y)$, приближающей $f(x, y)$ на множестве D с использованием элементов F , в частности, $g(x, y)$ может выступать интерполяционным сплайном [129] для элементов F , использующим $(x, y) = (i, j), i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, как узлы интерполирования, а значения соответствующих элементов $f_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, матрицы F как значения в узлах интерполирования, что и предполагается ниже.

Заметим, что в общем случае $g(x, y)$ хоть и является приближающей для исходной функции $f(x, y)$, но не является для нее интерполирующей в силу проведенного для значений $f(x, y)$ квантования в процессе получения цифрового изображения.

Формально геометрическая структура, аналитические характеристики поверхностей, отвечающих изображениям, отличающимся незначительно (имеются ввиду значения яркости соответствующих пикселей), также будут мало отличаться друг от друга (срав. рис.2.3(б) с рис.2.3(в) и 2.3(г)), а вот части

поверхности S , соответствующие клону и его прообразу в отсутствии какой-либо постобработки окажутся идентичными (рис.2.3(б)), а при ее наличии будут сравнимы между собой (рис.2.4, где для наглядности поверхность построена лишь для части ЦИ, содержащей области клона и прообраза, выделенные на рис.2.4(в)).

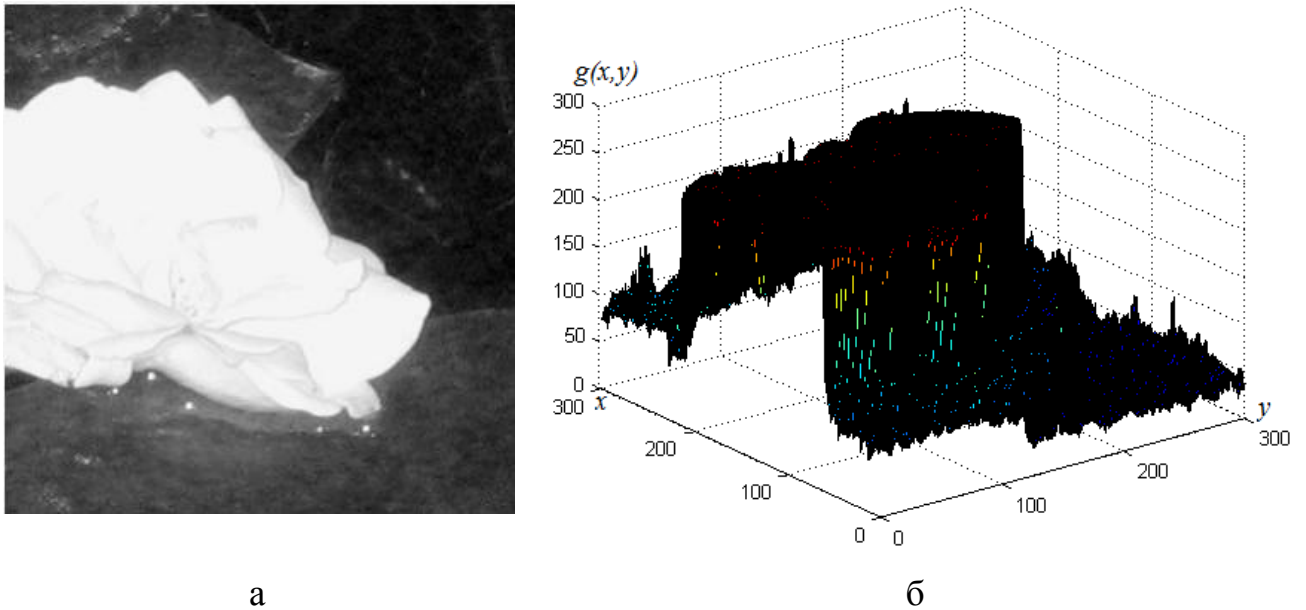


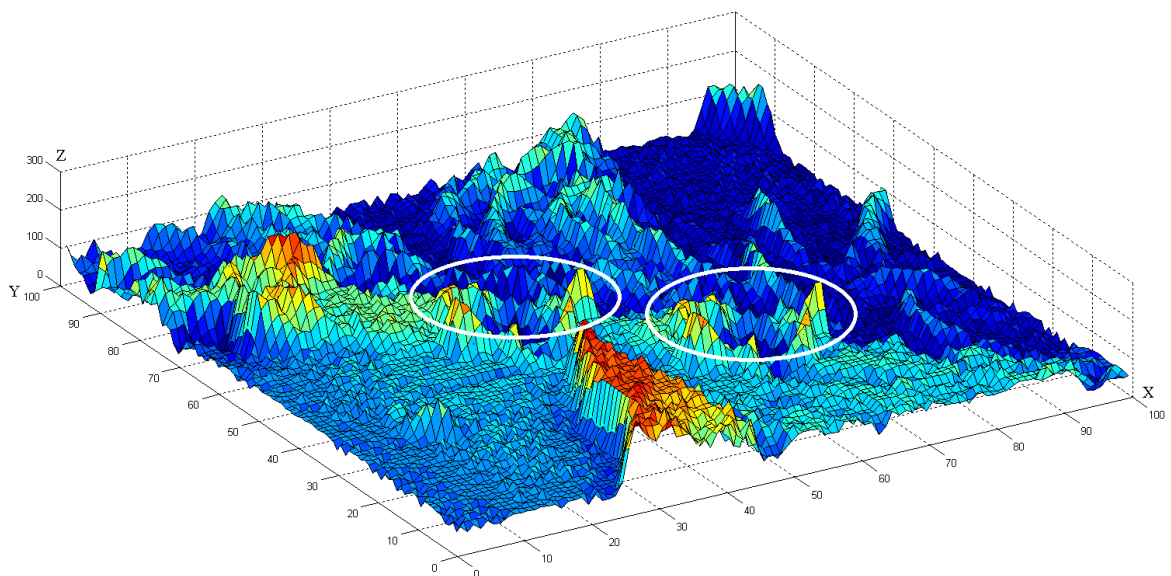
Рис. 2.2. Иллюстрация представления монохромного ЦИ в виде трехмерной поверхности: а – исходное ЦИ; б – соответствующая поверхность S , представляющая собой график $g(x, y), (x, y) \in D$ – интерполяционного сплайна 1-й степени для элементов матрицы F

Действительно, если $g(x, y)$ – интерполяционный сплайн нулевой степени для элементов F , то сделанный вывод о малых изменениях структуры поверхности S , отвечающей ЦИ, при его малых изменениях является очевидным. Однако сплайн нулевой степени представляет из себя разрывную функцию, что часто осложняет ее обработку и анализ, а поэтому является нежелательным.



а

б



в

Рис.2.4. Геометрическая визуализация ЦИ: а – оригинальное ЦИ «Lenna»; б – ЦИ «Lenna», подвергнутое наложению гауссовского шума и сжатию с потерями после клонирования; в – часть поверхности S , отвечающая выделенной на изображении «Lenna» квадратной области, с выделенными частями, соответствующими областям клона и прообраза

Рассмотрим вариант, когда $g(x, y)$ – интерполяционный сплайн 1-ой степени. После дискретизации области D и квантования значений функции $f(x, y)$ элементы изображения – пиксели имеют целочисленные координаты

$(x, y), x, y \in Z$ [82], что приводит к тому, что координаты соседних пикселей могут отличаться лишь на 1 (рис.2.5).

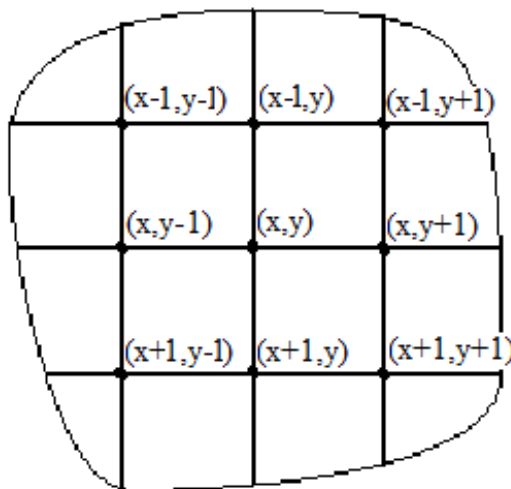


Рис.2.5. Фрагмент области D после дискретизации с указанием соседей пикселя с координатами $(x, y), x, y \in Z$

Для определения коэффициентов уравнения плоскости $z = ax + by + c$, проходящей через три не лежащих на одной прямой соседних пикселя с координатами $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ и соответствующими значениями яркости z_1, z_2, z_3 необходимо решить систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} ax_1 + by_1 + c = z_1, \\ ax_2 + by_2 + c = z_2, \\ ax_3 + by_3 + c = z_3 \end{cases} \quad (2.1)$$

с матрицей $A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix}$, являющейся хорошо обусловленной [129,131].

Действительно, определитель матрицы равен

$$\det A = (x_2 - x_1)y_3 + (x_1 - x_3)y_2 + (x_3 - x_2)y_1.$$

Для соседних трех узлов интерполяции, не лежащих на одной прямой, совпадение значений абсцисс наблюдается для пары узлов. Если для определенности, не ограничивая общности рассуждений, предположить, что $x_2 = x_1$, то

$$x_3 - x_2 = x_3 - x_1 = -(x_1 - x_3) \neq 0,$$

а

$$\det A = (x_1 - x_3)y_2 + (x_3 - x_2)y_1 = (x_1 - x_3)(y_2 - y_1) \neq 0,$$

поскольку, если $x_2 = x_1$, то обязательно $y_2 \neq y_1$. Более того, различие несовпадающих абсцисс/ординат по абсолютной величине здесь может быть равно только единице. Таким образом, $|\det A| = 1$, матрица системы далека от вырожденной, а потому является хорошо обусловленной [129], а значит система (2.1) является нечувствительной к изменениям исходных данных, т.е. при малых изменениях z_1, z_2, z_3 коэффициенты интерполирующей плоскости изменятся незначительно.

Рассмотрение интерполяционных сплайнов более высокой степени, как показано ниже, не является принципиальным для решения задачи, поставленной в настоящей работе, хотя с учетом имеющей место зависимости между координатами узлов-соседей, очевидно приведет к тем же результатам относительно чувствительности задачи нахождения сплайна.

Таким образом, показано, что задача построения интерполяционного сплайна 1-ой степени для функции, являющейся результатом дискретизации и квантования $f(x, y)$, является нечувствительной к изменениям входных данных – изменению значений яркости пикселей ЦИ [132]. Но даже в случае нечувствительности в результате возмущающих воздействий изменения с $g(x, y)$ и соответствующей поверхностью произойдут.

2.2 Выбор количественного параметра, характеризующего поверхность S , отвечающую изображению, нечувствительного к возмущающим воздействиям

Необходимо определить параметр, который бы характеризовал поверхность S (часть поверхности) в целом и при этом был бы нечувствительным к изменениям характеристик поверхности (к изменениям входных данных) [129]. Одним из параметров, характеризующих поверхность в целом, является объем тела, ограниченного этой поверхностью (в случае ее замкнутости), либо цилиндрического тела T с образующей, параллельной оси аппликат OZ , ограниченного поверхностью S (незамкнутой) и координатной плоскостью XOY . Далее рассматривается второй вариант, поскольку поверхность S , отвечающая ЦИ, не может быть замкнутой. Цилиндрическое тело T будет называться телом, соответствующим ЦИ с матрицей F . Вычисление объема V тела T , отвечающего ЦИ, порождаемому функцией $f(x, y), (x, y) \in D$, проведем в соответствии с формулой [133]:

$$V = \iint_D g(x, y) dx dy, \quad (2.2)$$

где $g(x, y)$ – интерполяционный сплайн 1-ой степени для элементов матрицы F .

Задача численного интегрирования является нечувствительной к изменениям входных данных (изменению подинтегральной функции) [129,130], что обеспечивает нечувствительность параметра V .

При помощи введенного объема V можно характеризовать не только ЦИ в целом, но и его части. Если, например, $P \subset D, K \subset D$ – области, отвечающие прообразу и клону соответственно, то им также можно поставить в соответствие следующие интегралы:

$$V_P = \iint_P g(x, y) dx dy, \quad V_K = \iint_K g(x, y) dx dy$$

– объемы цилиндрических тел, отвечающих соответствующим частям поверхности S .

Если после клонирования область клона и прообраза не подвергалась никакой постобработке, то:

$$\iint_P g(x, y) dx dy = \iint_K g(x, y) dx dy, \quad (2.3)$$

если постобработка ЦИ имела место, то в силу нечувствительности задачи нахождения объема с использованием двойного интеграла:

$$\iint_P g(x, y) dx dy \approx \iint_K g(x, y) dx dy. \quad (2.4)$$

Таким образом, объемы соответствующих цилиндрических тел V_P и V_K являются теми количественными показателями ЦИ, которые для областей клона и его прообраза отличаются между собой незначительно в условиях дополнительных возмущающих воздействий. Незначительность отличия необходимо понимать в том смысле, что модуль разности

$$\left| \iint_P g(x, y) dx dy - \iint_K g(x, y) dx dy \right|, \quad (2.5)$$

называемый далее *характеристикой отличия* (ХО), для областей клона и прообраза, как правило, будет меньше, чем для любых других областей ЦИ аналогичной формы и размеров. ХО с учетом нечувствительности задачи численного интегрирования, является нечувствительной к возмущениям входных данных.

Соотношение (2.4) требует дополнительного анализа для обеспечения возможности его использования для выявления результатов клонирования в ЦИ.

2.3 Формальные условия, характеризующие области клона/прообраза в изображении при наличии/отсутствии дополнительных возмущающих воздействий

2.3.1 Вычисление объема цилиндрического тела T , которое ставится в соответствие цифровому изображению. Для численного вычисления двойных интегралов (2.2)–(2.4), которые существуют в силу непрерывности на области интегрирования подинтегральной функции $g(x, y)$ – сплайна 1-ой степени [134], в качестве составной квадратурной формулы [129] рассмотрим соответствующую интегральную сумму для $g(x, y)$ [134], отвечающую разбиению области интегрирования в соответствии с рис.2.6: частичная область, полученная в результате разбиения произвольной $L \subset D$, представляет из себя квадрат, в центре которого находится соответствующий пиксель. Не ограничивая общности рассуждений, в соответствии с [82], где координаты рядом стоящих пикселей отличаются на единицу (рис.2.5), можем считать, что длина стороны каждого полученного квадрата, а потому и его площадь S_{ij} равны 1. Тогда численное вычисление двойного интеграла приводит к следующему соотношению:

$$\iint_L g(x, y) dx dy = \sum_{(i, j) \in L} g(i, j) S_{ij} = \sum_{(i, j) \in L} g(i, j). \quad (2.6)$$

В формуле (2.6) намеренно используются $(i, j) \in L \subseteq D$ для обозначения местоположения соответствующего пикселя в пределах области L , чтобы подчеркнуть целые значения координат и связь с индексами элементов матрицы F . Формула (2.6) представляет из себя составную квадратурную

формулу для вычисления интегралов в (2.2)–(2.4). Необходимо отметить, что для (2.6) не имеет значения степень интерполяционного сплайна $g(x, y)$, используемого при приближении $f(x, y)$, поскольку в правой части (2.6) используются лишь значения $g(x, y)$ в узлах интерполирования, что снимает необходимость рассмотрения сплайна степени выше единицы для интерполирования элементов матрицы F в ходе предлагаемого решения рассматриваемой в работе задачи.

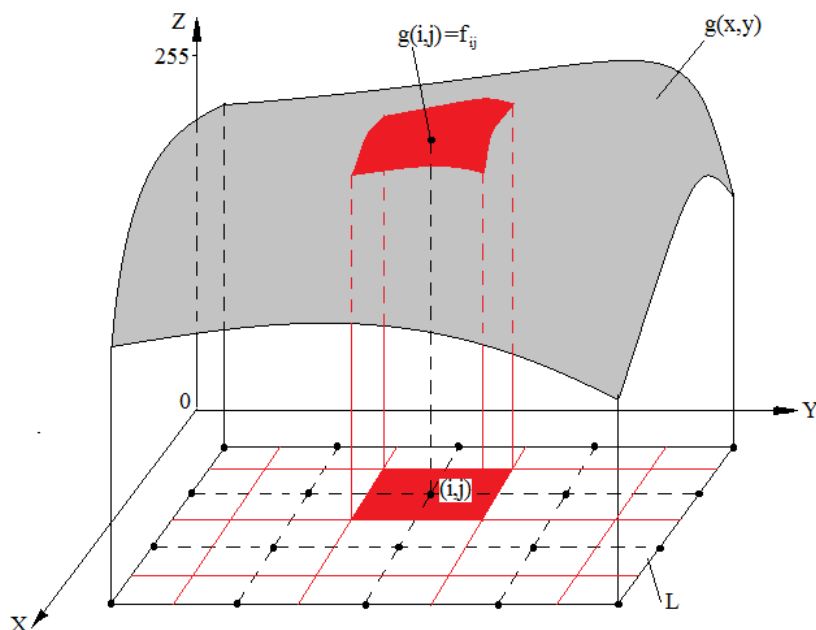


Рис.2.6. Построение составной квадратурной формулы для вычисления интегралов (2.2)–(2.4)

На практике, с учетом того, что используемые в (2.6) значения $g(x, y)$ в узлах интерполирования $(x, y) = (i, j)$ совпадают со значениями соответствующих элементов матрицы F , получаем, что численное интегрирование приводит к результату:

$$\iint_L g(x, y) dx dy = \sum_{(i, j) \in L} f_{ij}.$$

Таким образом, для областей клона и его прообраза без последующей обработки ЦИ должно выполняться соотношение:

$$\sum_{(i,j) \in P} f_{ij} = \sum_{(i,j) \in K} f_{ij}, \quad (2.7)$$

а в условиях дополнительных возмущающих воздействий:

$$\sum_{(i,j) \in K} f_{ij} \approx \sum_{(i,j) \in P} f_{ij}. \quad (2.8)$$

С учетом (2.8) характеристика отличия (2.5) принимает вид:

$$\left| \sum_{(i,j) \in K} f_{ij} - \sum_{(i,j) \in P} f_{ij} \right|. \quad (2.9)$$

Выразить количественно приближенное равенство в соотношении (2.8), характеристику отличия (2.9) для возможности их практического использования при решении задачи выявления результатов клонирования в ЦИ в условиях постобработки очевидно является затруднительным. Действительно, постобработка изображения может осуществляться с использованием различных ВВ с различными параметрами, что приведет к разной степени отличия левой части соотношения (2.8) от правой для разных воздействий. Оценка этих отличий здесь является нецелесообразной, во-первых, это приведет к необходимости учета специфики возмущающего воздействия, в том числе его силы, при постобработке, а значит, не даст возможности уйти от ориентированности соответствующего метода на конкретные возмущающие воздействия; во-вторых, объем вычислительной работы для получения оценок возможных отличий левой и правой частей формулы (2.8) (значений (2.9)) может оказаться практически нереализуемым (представляется крайне затруднительным учесть все варианты возмущающих воздействий на клонированное изображение со всеми возможными параметрами,

проэкспериментировав с ними на представительной выборке ЦИ); в-третьих, в соответствии с задачей 2 диссертационного исследования и задачей 5 данного раздела, желаемой является такая характеристика для клона и прообраза, которая будет для них численно одинаковой, что даст возможность для ее эффективного использования в условиях постобработки, независимо от конкретного вида и силы используемого возмущающего воздействия.

Таким образом, для возможности использования соотношений (2.8) и (2.9) при решении рассматриваемой в работе задачи требуются дополнительные исследования.

2.3.2 Обеспечение формального критерия областей клона и прообраза при отсутствии дополнительных возмущающих воздействий на изображение. Условие (2.7) является необходимым условием для областей клона и прообраза в условиях отсутствия каких-либо возмущающих воздействий. Проверим, является ли оно достаточным условием. С этой целью был проведен вычислительный эксперимент, в котором было задействовано 400 оригинальных ЦИ из базы NRCS [135], являющейся традиционной при работе с ЦИ, а также 100 ЦИ, полученных непрофессиональными видеокамерами (везде далее упомянутое множество ЦИ называется экспериментальным множеством (ЭМ)). Для каждого оригинального ЦИ проверялось наличие в нем областей, удовлетворяющих условию (2.7), при этом с учетом блоковой ориентированности разрабатываемого метода, о чем упоминалось выше, рассматривались квадратные $q \times q$ -области, $q \in \{4, 8, 16, 24, 32\}$. В ходе эксперимента для каждого оригинального ЦИ сравнивались между собой всевозможные пары отличающихся по расположению $q \times q$ -блоков его матрицы. Результаты, говорящие о том, что для $q \geq 16$ условие (2.7) является достаточным, чтобы соответствующие блоки ЦИ являлись блоками клона/прообраза, приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1. Результаты анализа наличия $q \times q$ – блоков, удовлетворяющих условию (2.7), в матрицах оригинальных ЦИ

Размер блока q	4	8	16	24	32
Количество оригинальных ЦИ из ЭМ, имеющих $q \times q$ – блоки матрицы, удовлетворяющие условию (2.7), отличающиеся по расположению (%)	20.5	11.5	0	0	0

Таким образом, имеет место следующее утверждение.

Утверждение 2.1 (*критерий наличия в ЦИ областей клона и прообраза в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий на изображение*). Пусть для $n \times m$ – матрицы F ЦИ с элементами $f_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, $B^{(P)}$ и $B^{(K)}$ – $q \times q$ – блоки, для которых $q \geq 16$ и $B^{(P)} \cap B^{(K)} = \emptyset$. Для того, чтобы блоки $B^{(P)}, B^{(K)}$ были соответствующими блоками, принадлежащими областям клона и прообраза, в случае, когда операция клонирования проведена в отсутствии дополнительных возмущающих воздействий, необходимо и достаточно, чтобы $\sum_{f_{ij} \in B^{(P)}} f_{ij} = \sum_{f_{ij} \in B^{(K)}} f_{ij}$.

Далее предполагается, что постобработка ЦИ после выполненного клонирования касается всего изображения целиком (сжатие всего ЦИ с одним коэффициентом качества, наложение шума с одними и теми же параметрами на все изображение и т.д.), кроме того, области клона и прообраза таковы, что имеют хотя бы одну пару непересекающихся соответствующих $q \times q$ – блоков, из которых блок, принадлежащий прообразу, не принадлежит области пересечения клона и прообраза (рис.2.7). Именно о таких блоках дальше будет идти речь в качестве анализируемых при поиске областей клонирования, хотя пересечение клона и прообраза при этом может быть непустым. Необходимо отметить, что такое ограничение является естественным и, как правило, используется при разработке методов и алгоритмов для решения рассматриваемой задачи [72]. Действительно, если область клона частично

накладывается на область прообраза (рис.2.7), то оригинальная часть прообраза, оказавшаяся замененной клоном, «прекращает свое существование», делая невозможными любые операции, в частности, сравнение, с ней в последующем.

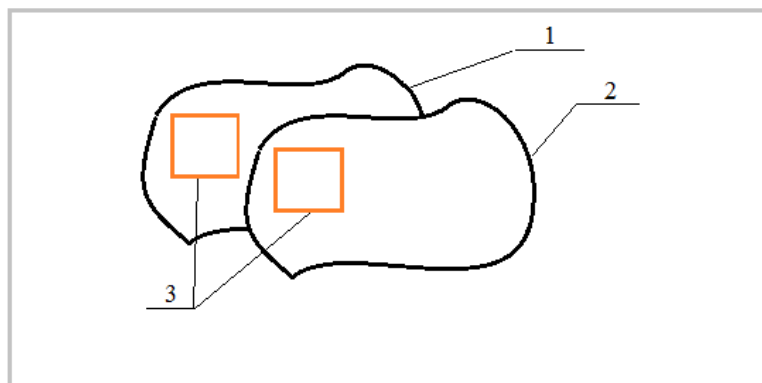


Рис.2.7. Матрица ЦИ: 1 – область прообраза; 2 – область клона; 3 – соответствующие при клонировании непересекающиеся $q \times q$ – блоки

С учетом утверждения 2.1 с целью сокращения возможностей для возникновения ложных тревог при работе разрабатываемого в работе метода и его алгоритмической реализации далее будут использоваться $q \times q$ – блоки, для которых $q \geq 16$.

2.3.3 Построение матриц блоковых отличий для цифрового изображения. Принимая во внимание результаты проведенного эксперимента (табл.2.1), логично предположить, что если постобработка ЦИ после клонирования имела место, то области клона и прообраза, которые были одинаковыми до нее, изменяться друг относительно друга меньше, чем те области, которые отличны от клона/прообраза, а потому отличались друг от друга еще до постобработки. Эта гипотеза позволяет для областей клона и его прообраза соотношение (2.8) на данном этапе исследования качественно понимать в том смысле, что фигурирующие в его частях суммы элементов матрицы F отличаются друг от друга меньше, чем отличаются любые две

другие аналогичные суммы элементов, отвечающих подобластям D таких же размеров и формы, что P и K . Данное утверждение получит свое уточнение (для случая значительных возмущающих воздействий, используемых в процессе постобработки клонированного ЦИ) в подразделе 3.4.

Таким образом, в свете выдвинутой гипотезы, если $B^{(K)}$ и $B^{(P)}$ – соответствующие $q \times q$ –блоки, принадлежащие областям клона и прообраза соответственно, то:

- отличие в смысле (2.9) для блока $B^{(K)}$ ($B^{(P)}$) будет минимальным среди непересекающихся с ним блоков матрицы ЦИ с блоком $B^{(P)}$ ($B^{(K)}$);
- совпадающие по соответствующим значениям после проведения операции клонирования $q \times q$ –блоки клона $B^{(K)}$ и прообраза $B^{(P)}$ после постобработки измененного ЦИ будут отличаться в смысле (2.9) друг от друга меньше, чем какая-либо пара других непересекающихся $q \times q$ –блоков изображения;
- отличие в смысле (2.9) блока $B^{(K)}$ от $B^{(P)}$ будет численно совпадать с отличием $B^{(P)}$ от $B^{(K)}$.

Исключения здесь (когда наименьшее отличие между всевозможными парами блоков достигается в случае, отличном от соответствующих блоков клона и прообраза) теоретически могут составлять варианты, которые качественно могут быть описаны следующим образом:

1. Части ЦИ, содержащие области клона и прообраза, близки по соответствующим значениям яркости: структуру ЦИ можно назвать близкой к «периодической» (рис.2.8(а)); «фоновой» (часть ЦИ на рис.2.8(б), обозначенная как «Вариант 1»);
2. Часть ЦИ, не содержащая области клона, прообраза, имеет структуру, описанную в п.1 (рис.2.8(б)).

Последствия от наличия таких особенностей в ЦИ будут рассмотрены в разделе 3.

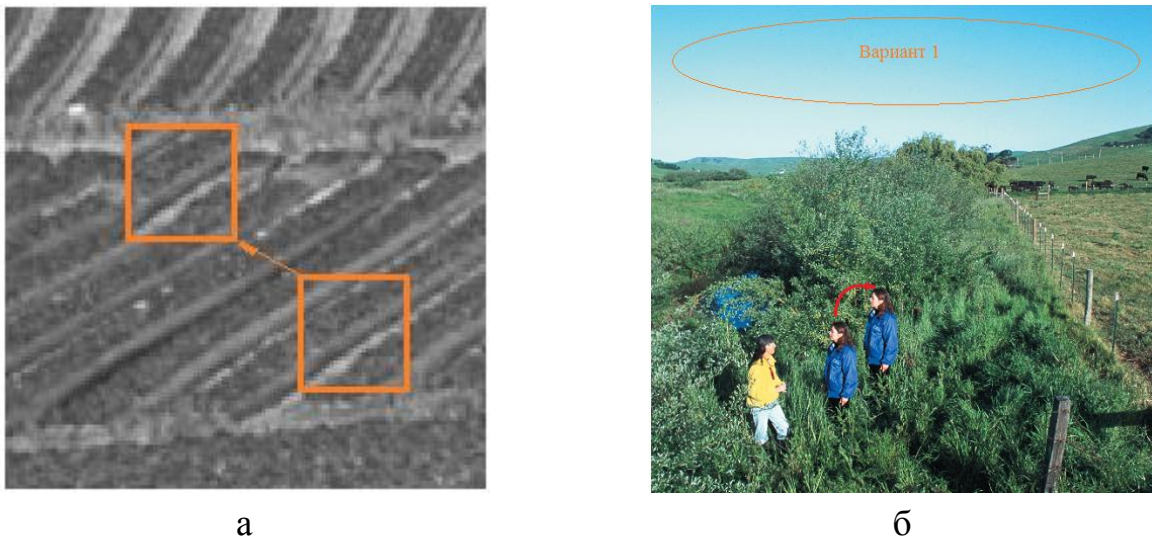


Рис.2.8. Примеры ЦИ, для которых наименьшее отличие между парами блоков достигается в случае, отличном от клона и прообраза

Ведем следующие обозначения: $B_{ij}, i = \overline{1, n-q+1}, j = \overline{1, m-q+1}$, — $q \times q$ -блок $n \times m$ -матрицы ЦИ F , для которого на месте $(1,1)$ находится элемент f_{ij} (рис.2.9). Такой вид блока B_{ij} назовем *основным*. Решая задачу нахождения областей (блоков) с малым отличием друг от друга, каждому блоку B_{ij} поставим в соответствие $(n-q+1) \times (m-q+1)$ -матрицу блоковых отличий $M^{(ij)}$ (МБО) [132,136] с элементами $m^{(i,j)}_{k,l}$, определяемыми как:

$$m^{(i,j)}_{k,l} = \sum_{t,p=1}^q r_{tp}, \quad k = \overline{1, n-q+1}, l = \overline{1, m-q+1} \quad (2.10)$$

где $r_{tp}, t, p = \overline{1, q}$, — элементы $q \times q$ -матрицы R , полученной следующим образом:

$$R = |B_{ij} - B_{kl}|, \quad (2.11)$$

где равенство (2.11) понимается в поэлементном смысле. Заметим, что абсолютная величина в правой части (2.11) берется для того, чтобы избежать принципиальной возможности малости значения $\sum_{t,p} r_{tp}$ за счет взаимного

уничтожения величин (возможно значительно отличающихся от 0) разных знаков в (2.10).

Элементы МБО $M^{(ij)}$ отражают отличие блока B_{ij} от любого другого блока матрицы ЦИ в смысле (2.10)–(2.11).

$$F = \begin{pmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,j} & f_{1,j+1} & \cdots & f_{1,j+q-1} & \cdots & f_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i,1} & \cdots & f_{i,j} & f_{i,j+1} & \cdots & f_{i,j+q-1} & \cdots & f_{i,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i+q-1,1} & \cdots & f_{i+q-1,j} & f_{i+q-1,j+1} & \cdots & f_{i+q-1,j+q-1} & \cdots & f_{i+q-1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,j} & f_{n,j+1} & \cdots & f_{n,j+q-1} & \cdots & f_{n,m} \end{pmatrix} B_{ij}$$

Рис. 2.9. Иллюстрация соответствия элементам f_{ij} матрицы F блоков B_{ij}

Элементы $m^{(i,j)}_{k,l}$ матрицы $M^{(i,j)}$ рассмотрим как значения в узлах интерполяции $(k,l), k = \overline{1, n-q+1}, l = \overline{1, m-q+1}$, некоторой функции $h^{(i,j)}(x,y)$ двух переменных [137,138]. Построим для $h^{(i,j)}(x,y)$ по имеющимся значениям в узлах интерполяционный сплайн $H^{(i,j)}(x,y)$. Получаемая кусочно-полиномиальная функция $H^{(i,j)}(x,y)$ всегда имеет глобальный минимум, равный нулю, в точке с координатами (k,l) , где $k=i, l=j$, поскольку матрица R в этом случае будет точно нулевой: $R = |B_{ij} - B_{kl}| = |B_{ij} - B_{ij}| = 0$, что находит свое отражение на графике $H^{(i,j)}(x,y)$ (рис. 2.10(б), 2.11(б)). В остальном характеристики поверхности – графика функции $H^{(i,j)}(x,y)$ для подавляющего большинства ЦИ будут иметь качественные отличия для блока B_{ij} в случае, когда он является частью области клона или прообраза, от случая, когда такая ситуация места не имеет. Для первой ситуации поверхность, соответствующая $M^{(i,j)}$, для большинства ЦИ будет иметь локальный минимум в элементе,

отвечающем соответствующему блоку прообраза или клона, значение которого хотя и отлично от нуля (в случае наличия дополнительных возмущающих воздействий), но меньше других значений матрицы $M^{(i,j)}$ (включая значения матрицы в единичной окрестности глобального минимума). Иначе говоря: если все значения матрицы $M^{(i,j)}$ упорядочить по возрастанию, то значение, отвечающее упомянутому выше локальному минимуму, окажется вторым для большинства ЦИ, претерпевших клонирование.

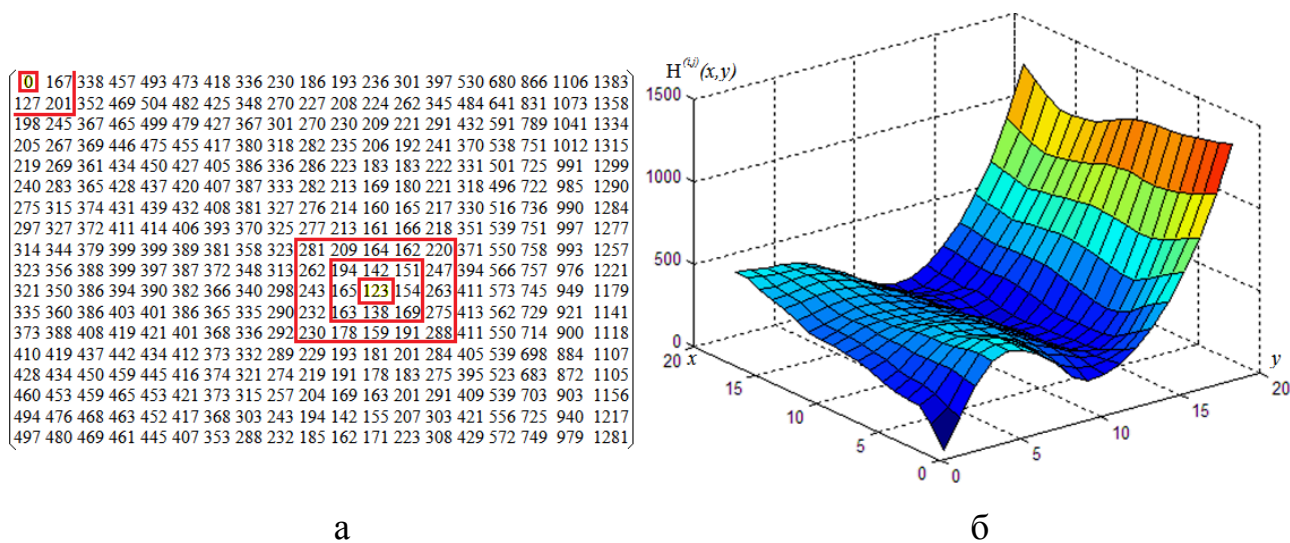


Рис. 2.10. Иллюстрация особенностей МБО для случая, когда блок B_{ij} принадлежит области клона: а – подматрица матрицы $M^{(i,j)}$, содержащая информацию о B_{ij} и блоке, принадлежащем области прообраза клона; б – часть поверхности, отвечающей графику функции $H^{(i,j)}(x,y)$, содержащая точки ее глобального и локального минимумов

Для второй ситуации, если локальные минимумы и будут иметь место, то для большинства ЦИ их значения будут превосходить элементы из малой окрестности глобального минимума функции $H^{(i,j)}(x,y)$, интерполирующей значения $M^{(i,j)}$. Иллюстративный пример сделанных выше заключений для блока B_{ij} , являющегося блоком клона в ЦИ, сохраненном после операции клонирования в формате с потерями, приведен на рис.2.10; для блока, не

принадлежащего ни области клона, ни области прообраза — на рис.2.11. С учетом упомянутых выше недостатков существующих методов, основанных на анализе ключевых точек, а именно зависимость их эффективности от специфики выполняемого клонирования, для иллюстрации сделанных на основе теоретических рассуждений заключений намеренно использованы изображения, где клонирование проводится в части, не содержащей контуры и мелкие детали.

Приведенные примеры иллюстрируют, что поверхности, отвечающие графикам $H^{(i,j)}(x,y)$, для большинства цифровых изображений качественно отличаются в случае принадлежности/непринадлежности блока B_{ij} области клона/прообраза. Очевидно, что выявленные отличия будут иметь место независимо от особенностей и характеристик изображения в части прообраза/клона.

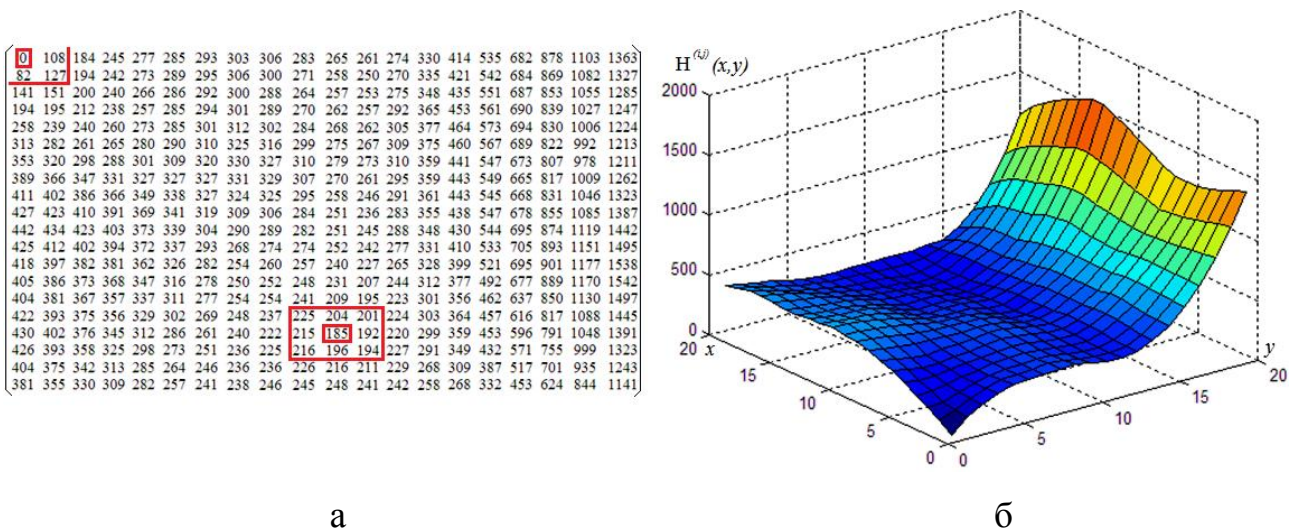


Рис. 2.11. Иллюстрация особенностей МБО для случая, когда блок B_{ij} не принадлежит области клона/прообраза: а – подматрица матрицы $M^{(i,j)}$, содержащая информацию о блоке B_{ij} ; б – часть поверхности, отвечающей графику функции $H^{(i,j)}(x,y)$, содержащая точки ее глобального и локального минимумов

Как уже было отмечено выше, минимальным элементом $M^{(ij)}$ будет $m^{(i,j)}_{ij} = 0$, отражающий отличие B_{ij} от самого себя. Малыми по сравнению с другими элементами $M^{(ij)}$ будут также элементы, являющиеся ближайшими соседями $m^{(i,j)}_{ij}$: $m^{(i,j)}_{kl}$, $k = i-1, i, i+1, l = j-1, j, j+1$. Однако малость этих элементов не является показателем схожести отвечающих им блоков в рассматриваемом в работе смысле, поскольку отражает отличие блока B_{ij} от тех, которые отличаются от него самого на 1 по своему местоположению, имея значительное пересечение с B_{ij} . Поэтому глобальный минимум $m^{(i,j)}_{ij} = 0$ не принимается во внимание, а для удобства последующих исследований элемент $m^{(i,j)}_{ij}$ матрицы $M^{(ij)}$ и его 8 ближайших соседей полагаются равными заведомо большому, по сравнению с другими элементами $M^{(ij)}$, числу. Новую матрицу обозначим $\overline{M}^{(ij)}$ и назовем модифицированной матрицей блоковых отличий (ММО). Последовательность действий для получения матрицы $\overline{M}^{(ij)}$ из $M^{(ij)}$ назовем *процессом модификации*.

Исходя из вышесказанного, минимальный элемент матрицы $\overline{M}^{(ij)}$ должен отвечать блоку B_{kl} клона (прообраза), если B_{ij} – блок прообраза (клона), и в этом случае:

$$\min \overline{M}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)}. \quad (2.12)$$

Если B_{ij} не является блоком клона/прообраза, то в общем случае $\min \overline{M}^{(ij)}$ никак не связан с $\min \overline{M}^{(kl)}$ для произвольного блока B_{kl} , не пересекающегося с B_{ij} .

Таким образом, соотношение (2.12) определяет параметр – минимум ММО, который является совпадающим для соответствующих блоков области клона и прообраза в условиях постобработки цифрового изображения. Заметим, что здесь важны не непосредственные значения $\min \overline{M}^{(ij)}$, $\min \overline{M}^{(kl)}$, а их совпадение.

Для практической проверки истинности теоретически установленного условия (2.12) для соответствующих блоков клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий был проведен вычислительный эксперимент, в котором были задействованы ЦИ из ЭМ. В ходе эксперимента оригинальное цифровое изображение подвергалось клонированию, где область прообраза/клона представляла из себя $q \times q$ -блок; $B^K = B_{ij}$ и $B^P = B_{kl}$, $q \in \{32, 24, 16\}$, с последующим наложением различных шумов с различными параметрами, после чего происходило сохранение изображения в форматах без/с потерями (Tif/Jpeg (с различными коэффициентами качества QF)). Для полученных изображений с учетом того, что $B^K = B_{ij}$ и $B^P = B_{kl}$ строились матрицы $\overline{M}^{(ij)}$ и $\overline{M}^{(kl)}$, для которых находились минимальные значения и их местоположение. ЦИ подтверждало (2.12), если $\min \overline{M}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)}$ и при этом местоположение этих минимумов в пределах соответствующих матриц отвечали действительному местоположению блоков клона и прообраза в ЦИ, т.е. $\min \overline{M}^{(ij)} = m_{k,l}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)} = m_{i,j}^{(kl)}$. При невыполнении какого-либо из приведенных условий фиксировалась «ошибка». Результаты приведены в табл.2.2 [139].

Как свидетельствуют полученные результаты, условие (2.12) действительно на практике имеет место для соответствующих блоков клона и прообраза в подавляющем большинстве цифровых изображений в условиях постобработки, в том числе комплексных возмущающих воздействий. Максимальное количество «ошибок» определилось как 2.6% от общего числа ЦИ из ЭМ, что составило 13 изображений из 500, в условиях комплексных ВВ, включающих в себя мультипликативный шум с $D=0.001$ и сжатие с потерями.

Таблица 2.2 – Количество ЦИ из ЭМ, для которых имела место «ошибка», (%)

q	Тип шума	Параметры шума	Формат ЦИ после клонирования	«Ошибки»,(%)	
32	Гауссовский	D=0.0001	Tif, Jpeg $QF \in \{65,75,85\}$	0	
		D=0.0005	Tif, Jpeg $QF \in \{65,75,85\}$	1	
	Мульти-пликативный	D=0.0005	Tif, Jpeg $QF \in \{65,75,85\}$	0.6	
		D=0.001	Tif	0.6	
			Jpeg	$QF \in \{75,85\}$	0.8
				QF=65	1
24	Гауссовский	D=0.0001	Tif	0	
			Jpeg	$QF \in \{75,85\}$	0
				QF=65	0.6
		D=0.0005	Tif	1.2	
			Jpeg	$QF \in \{75,85\}$	1.4
				QF=65	1.8
	Мульти-пликативный	D=0.0005	Tif	0.6	
			Jpeg	$QF \in \{65,85\}$	1
				QF=75	1.6
		D=0.001	Tif	1.6	
			Jpeg	$QF \in \{75,85\}$	2
				QF=65	2.6
16	Гауссовский	D=0.0001	Tif	0.6	
			Jpeg	QF=85	0.8
				QF=75	1.2
				QF=65	1.4
		D=0.0005	Tif	1	
			Jpeg	QF=85	1.4
	$QF \in \{75,65\}$			1.8	
	Мульти-пликативный	D=0.0005	Tif	0.6	
			Jpeg	QF=85	0.6
				QF=75	1.2
				QF=65	2
		D=0.001	Tif	2.2	
			Jpeg	QF=85	2
				QF=75	2.6
				QF=65	2

2.3.4 Построение матрицы минимальных блоковых отличий для цифрового изображения. Формальное условие наличия в цифровом изображении клона и прообраза. Поставим в соответствие матрице F ЦИ матрицу G размера $(n-q+1) \times (m-q+1)$, которую назовем матрицей минимальных блоковых отличий (ММБО). Элемент этой матрицы $g_{ij}, i = \overline{1, n-q+1}, j = \overline{1, m-q+1}$, отражает величину наименьшего отличия в смысле (2.10)–(2.11) $q \times q$ -блока B_{ij} от любого другого блока матрицы F (исключая блоки, являющиеся ближайшими соседями B_{ij} , т.е. блоки, местоположение которых отличается на 1 от местоположения B_{ij}), т.е.

$$g_{ij} = \min \overline{M^{(ij)}}, i = \overline{1, n-q+1}, j = \overline{1, m-q+1}. \quad (2.13)$$

С учетом (2.12), а также того, что рядом стоящие элементы матрицы G отвечают блокам, отличающимся друг от друга одной строкой и/или одним столбцом, становится очевидным, что соответствующим блокам B_{ij} и B_{kl} клона и прообраза в матрице G будут отвечать совпадающие глобальные (локальные в условиях значительных возмущающих воздействий (см. раздел 3)) минимумы:

$$g_{ij} = g_{kl}. \quad (2.14)$$

При этом g_{ip} будем называть глобальным минимумом матрицы G , если $g_{ip} = \min_{1 \leq i \leq n-q+1, 1 \leq j \leq m-q+1} g_{ij}$, и локальным минимумом, если в матрице G существует такая окрестность $U(g_{ip})$ элемента g_{ip} , что для любого элемента матрицы $g_{ij} \in U(g_{ip}), g_{ij} \neq g_{ip}$ имеет место соотношение: $g_{ij} > g_{ip}$. Окрестность $U(g_{ip})$ радиуса \bar{r} образуют элементы $g_{i+k, p+l}, k, l \in \{-\bar{r}, \dots, 0, \dots, \bar{r}\}$, матрицы G .

Таким образом, для областей клона и прообраза в изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий найден формальный параметр –

показатель совпадения, количественно одинаковый для соответствующих блоков областей клона и прообраза: значение глобального (возможно локального) минимума ММБО, которая ставится в соответствие анализируемому изображению. Это дает возможность обеспечить независимость эффективности разработанного на этой основе метода (см. раздел 3) от специфики реализации конкретного программного инструмента, используемого для постобработки изображения.

С учетом всего вышесказанного очевидно, что задача получения параметров, фигурирующих в (2.14), является нечувствительной к изменениям входных данных, в качестве которых рассматривается ЦИ.

Имеет место следующее утверждение.

Утверждение 2.2 (*необходимое условие наличия в ЦИ областей клона и прообраза*). Пусть ЦИ с $n \times m$ -матрицей F претерпело клонирование и подверглось/не подверглось постобработке. Если B_{ij} и B_{kl} – соответствующие $q \times q$ -блоки, принадлежащие областям клона и прообраза, то для $(n - q + 1) \times (m - q + 1)$ -матрицы минимальных блоковых отличий G , построенной согласно (2.13) для ЦИ, выполняется условие (2.14), где значение $g_{ij} = g_{kl}$ отвечает глобальному (локальному) минимуму G .

Если непересекающиеся части областей клона и прообраза содержат более одного $q \times q$ -блока, то равенство глобальных (локальных) минимумов G $g_{ij} = g_{kl}$ определяет в первую очередь те соответствующие блоки, которые отличаются друг от друга менее всего. Другие блоки непересекающихся частей областей клона, прообраза будут находиться в окрестностях блоков B_{ij} и B_{kl} , им будут соответствовать следующие по значению глобальные (локальные) минимумами G (т.е. без учета того глобального (локального) минимума, который уже был использован).

Полученное теоретически необходимое условие на практике может нарушаться в силу особенностей реализации обработки ЦИ, в частности, в силу того, что все элементы матрицы F ЦИ должны принимать значения из

множества целых чисел $\{0,1,2,\dots,255\}$, что приводит к погрешности, возникающей за счет введения значений яркости в принятые границы от 0 до 255 после проведенной постобработки. Такая ситуация очевидно тем более вероятна, чем сильнее ВВ, использованное в процессе постобработки ЦИ. Однако, необходимо отметить, что при проведении вычислительных экспериментов для ЦИ, подвергнутых клонированию в условиях дополнительных ВВ, не нарушающих надежность восприятия изображения, на практике случаи, когда бы полученное необходимое условие не имело места, фиксировались крайне редко, а с увеличением величины возмущающих воздействий количество упомянутых случаев хотя и возросло, но незначительно (см. раздел 4).

Таким образом, условие (2.14) является указателем на блоки, «подозрительные» на то, чтобы быть соответствующими блоками клона и прообраза в изображении, дает возможность определить их местоположение: это блоки, отвечающие элементам f_{ij}, f_{kl} матрицы F .

Полученное условие (2.14) для подавляющего большинства ЦИ на практике является не только необходимым, но и достаточным для того, чтобы блоки B_{ij} и B_{kl} матрицы F ЦИ были соответствующими блоками клона и прообраза (исключение могут составлять ЦИ, примеры которых проиллюстрированы на рис.2.3).

Заметим, что необходимое условие (2.14) будет иметь место и при ином, по сравнению с основным видом, определении блоков B_{ij} (рис.2.9), например, при таком, как предложено на рис.2.12 (для рис.2.12(б) для определенности полагается q нечетным).

$$F = \left(\begin{array}{cccccccc} f_{11} & \cdots & f_{1,j-q+1} & \cdots & f_{1,j-1} & f_{1,j} & \cdots & f_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i-q+1,1} & \cdots & f_{i-q+1,j-q+1} & \cdots & f_{i-q+1,j-1} & f_{i-q+1,j} & \cdots & f_{i-q+1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i,1} & \cdots & f_{i,j-q+1} & \cdots & f_{i,j-1} & f_{i,j} & \cdots & f_{i,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,j-q+1} & \cdots & f_{n,j-1} & f_{n,j} & \cdots & f_{n,m} \end{array} \right) B_{ij}$$

а

$$F = \left(\begin{array}{cccccccc} f_{11} & \cdots & f_{1,j-\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{1,j} & \cdots & f_{1,j+\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{1,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i-\frac{q-1}{2},1} & \cdots & f_{i-\frac{q-1}{2},j-\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i-\frac{q-1}{2},j} & \cdots & f_{i-\frac{q-1}{2},j+\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i-\frac{q-1}{2},m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i,1} & \cdots & f_{i,j-\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i,j} & \cdots & f_{i,j+\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{i+\frac{q-1}{2},1} & \cdots & f_{i+\frac{q-1}{2},j-\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i+\frac{q-1}{2},j} & \cdots & f_{i+\frac{q-1}{2},j+\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{i+\frac{q-1}{2},m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,j-\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{n,j} & \cdots & f_{n,j+\frac{q-1}{2}} & \cdots & f_{n,m} \end{array} \right) B_{ij}$$

б

Рис.2.12. Возможный вид блока B_{ij}

Очевидно, что соотношение (2.14) не зависит от характера возмущающих воздействий, которые претерпевает ЦИ после клонирования, в том числе, если эти воздействия носят комплексный характер (например, наложение шума с последующим сжатием). Действительно, если изображение подвергается возмущению, то те области, которые менее всего отличались друг от друга до возмущающего воздействия с большой долей вероятности останутся таковыми и после него, а отличие блоков в смысле (2.10)–(2.11) для блоков клона и прообраза даст одинаковый результат. Полученное необходимое условие наличия областей клона/прообраза (2.14) никак не зависит от величины возмущающего воздействия, а значит может быть использовано даже в случае значительных дополнительных возмущающих воздействий, не сохраняющих

надежность восприятия получаемого цифрового изображения. Кроме того, если в непересекающейся части областей клона и прообраза будет помещаться хотя бы один 16×16 блок, то независимо от того, какими относительными размерами (относительно всего изображения) будут обладать области клона и прообраза, условие (2.14) позволит обнаружить соответствующие блоки, что подтверждается при тестировании разработанного на основе (2.14) метода (см. раздел 4).

2.3.5 Практический анализ матрицы минимальных блоковых отличий. Для практического подтверждения полученных выводов был проведен вычислительный эксперимент, в котором было задействовано 500 ЦИ из ЭМ. В ходе эксперимента ЦИ подвергались клонированию таким образом, что вне пересечения клона и прообраза оказывался один $q \times q$ – блок, где $q \in \{16, 24, 32\}$. После проведения клонирования ЦИ подвергались наложению различных шумов с различными параметрами, после чего сохранялись в формате с потерями (Jpeg) с различными коэффициентами качества QF. В результате эксперимента было установлено, что в $\approx 90\%$ анализируемых ЦИ области клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий на измененное ЦИ определялись совпадениями элементов матрицы G , равных по значению ее глобальному минимуму, что служит подтверждением теоретических выводов, полученных выше. На рис.2.13 приведен типичный пример одного из таких ЦИ.

Для остальных ЦИ глобальный минимум G определялся либо в одном элементе, либо в двух, но отличающихся по местоположению таким образом, что соответствующие им блоки в матрице ЦИ являлись пересекающимися (что также не могло соответствовать блокам клона/прообраза). Здесь соотношение (2.14) также имело место для клона и прообраза, только речь шла не о глобальных, а о локальных минимумах матрицы G . Иллюстрация этому приведена на рис.2.14 для ЦИ, где глобальный минимум G достигался в двух рядом стоящих элементах, не отвечающих клону и прообразу, а блоки областей клона и прообраза соответствовали локальным минимумам G , совпадающим

по значению, выделенным замкнутой кривой на рис.2.14(б) (в данном случае клонированное ЦИ подвергалось значительным возмущающим воздействиям). На поверхности, отвечающей графику функции, интерполирующей элементы матрицы G , эти локальные минимумы будут представлять из себя вершины «перевернутых конусов», отвечающих окрестностям блоков клона/прообраза.

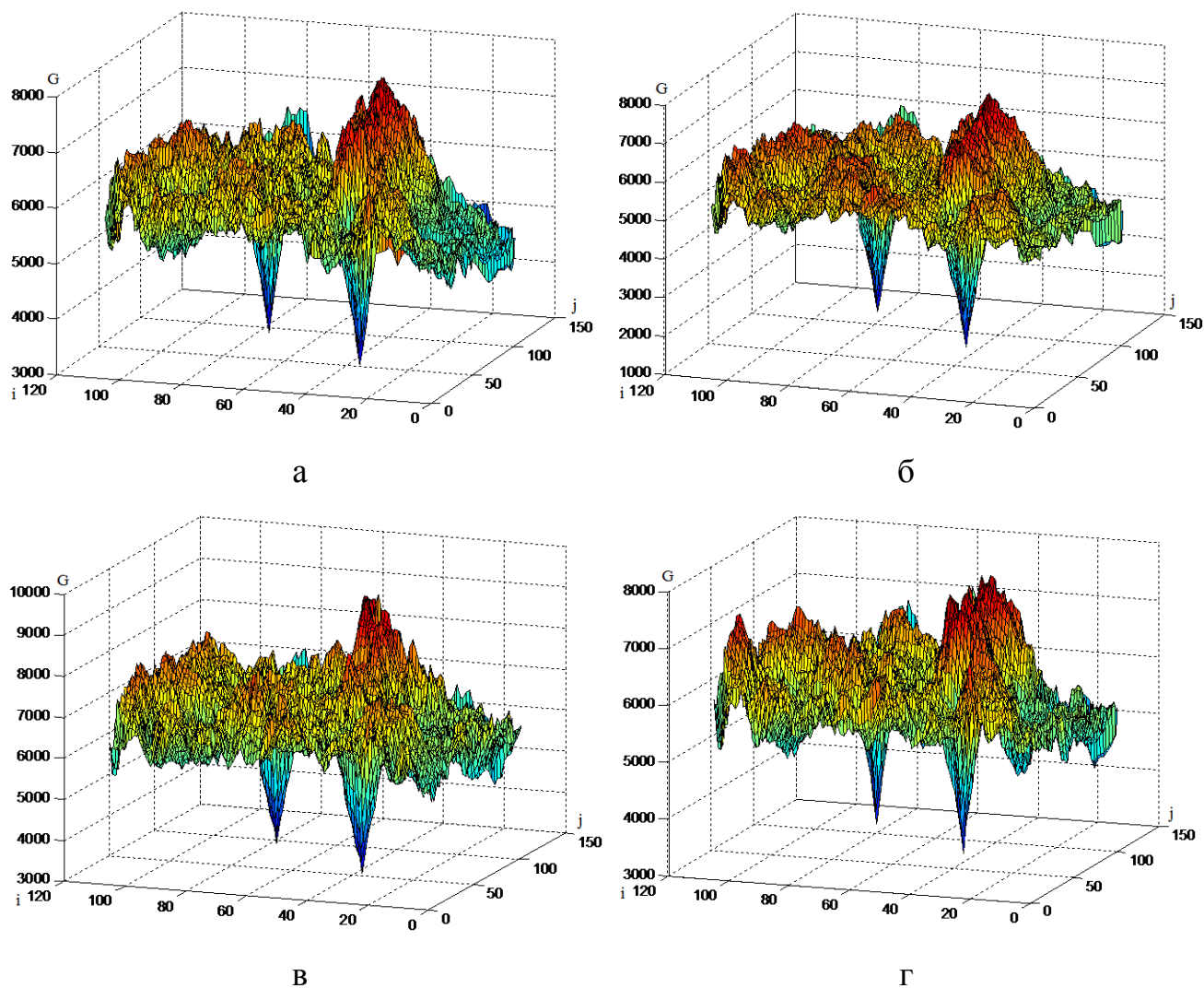


Рис.2.13. Визуализация матрицы G для конкретного ЦИ, подвергнутого клонированию с последующим наложением шума и сохранением в формате Jpeg с QF=75: а – гауссовский шум с нулевым матожиданием и $D = 0.001$; б – мультипликативный шум с $D = 0.001$; в – шум «соль–перец» с $d = 0.02$; г – пуассоновский шум

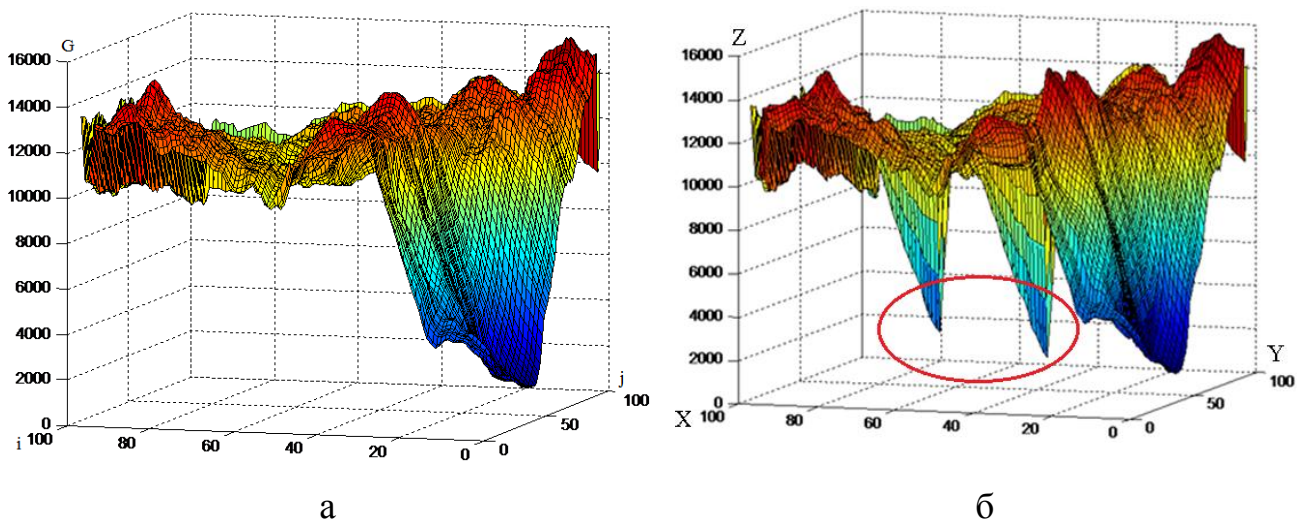
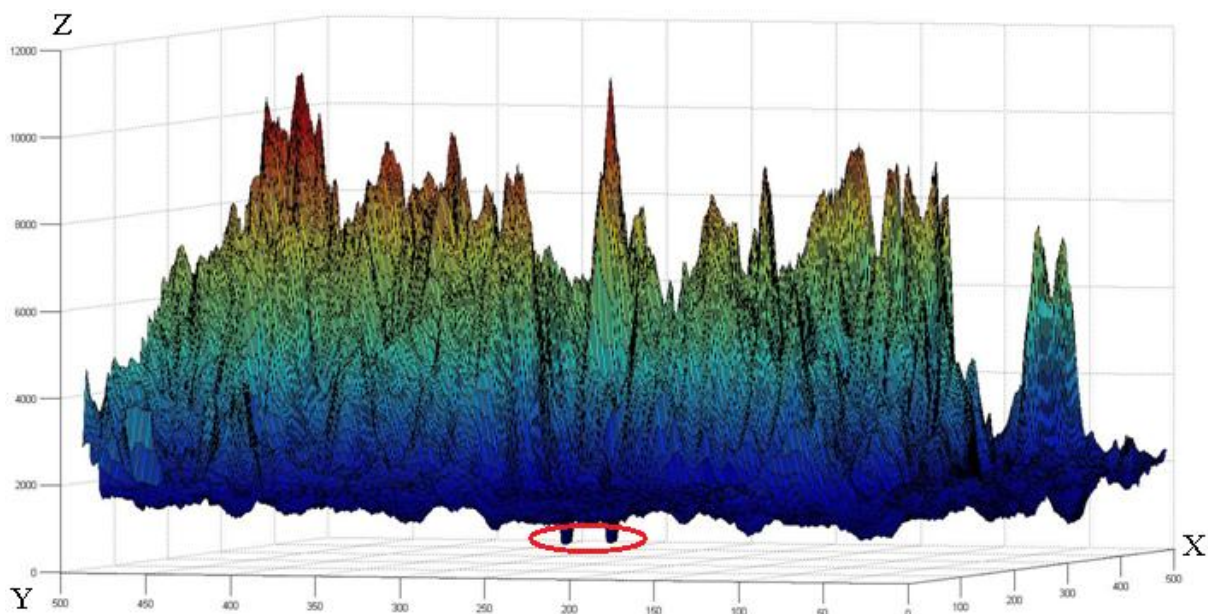


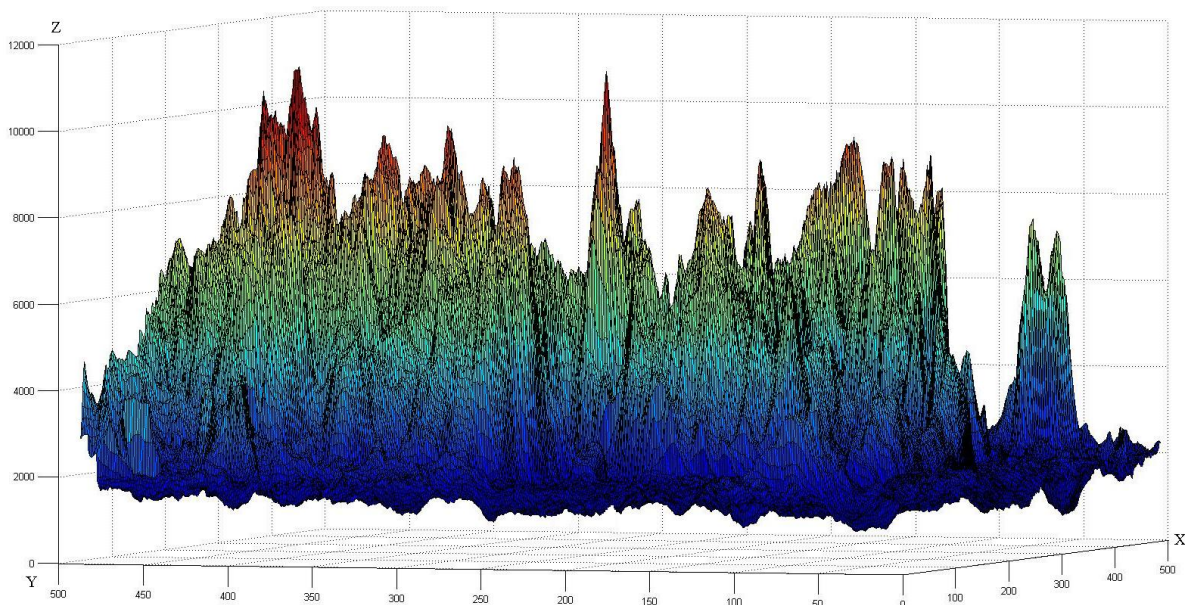
Рис.2.14. Визуализация матрицы G для конкретного ЦИ: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ подвергнутое клонированию и пересохранению в Jpeg с QF=25

Основным в последнем случае является совпадение значений локальных минимумов для матрицы G . Эти значения позволяют установить место нахождения блоков клона и прообраза.

Необходимо отметить, что, как показывает вычислительный эксперимент, экспертная оценка свойств G (наличие/отсутствие совпадающих по значению глобальных (локальных) минимумов с соответствующими окрестностями), производимая по графику интерполирующей ее элементы функции, как правило, является достаточной в условиях рассмотренных в работе возмущающих воздействий для установления наличия/отсутствия областей клона/прообраза в ЦИ при соблюдении условия о том, что часть прообраза, не принадлежащая клону, содержит хотя бы один $q \times q$ -блок, кроме того, позволяет локализовать их месторасположение независимо от их специфики, силы ВВ, относительных размеров области клона. Иллюстрация этому, имеющая типичный характер, для ЦИ, представленных на рис.2.4(а), 2.4(б), дана на рис.2.15, 2.16. Для анализа использовались 16×16 -блоки.



а



б

Рис.2.15. График интерполяционного сплайна для элементов G : а – для ЦИ, подвергнутого клонированию с последующим наложением шума и сжатием с потерями (рис.2.4(б)); б – для оригинального ЦИ (рис.2.4(а));

Как видно из рис.2.15, для ЦИ, подвергнутого клонированию и постобработке (рис.2.4(б)), график функции, интерполирующей элементы матрицы G , качественно отличается от аналогичного графика для оригинального ЦИ (рис.2.4(а)) наличием двух одинаковых по значению

глобальных минимумов (рис.2.15(a)), которые и позволяют верно локализовать области клона и прообраза (рис.2.16).

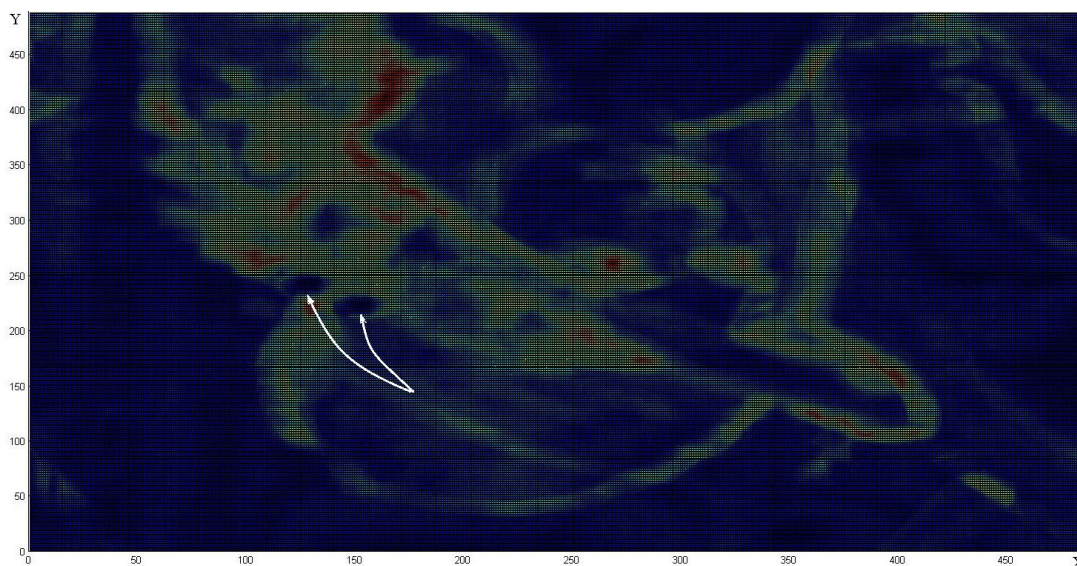


Рис.2.16. Проекция поверхности, отвечающей G для клонированного ЦИ (рис.2.15(a)), на плоскость XOY (проекции областей, отвечающих клону и прообразу, отмечены стрелками)

Для более детального рассмотрения свойств G при проведении эксперимента с ЦИ «Lenna» матрицы G были построены для выделенной части ЦИ, представленного на рис.2.4(б), с использованием блоков различного размера $q \in \{16, 24, 32\}$ (рис.2.17). Анализ матрицы G , построенной с использованием 32×32 -блоков, абсолютно ожидаемо не выявил результаты клонирования (рис.2.17(б)), поскольку область клона настолько мала (0.24% от всего ЦИ), что не содержит в себе ни одного 32×32 -блока, чего нельзя сказать для блоков двух других размеров $q \in \{16, 24\}$. Вывод о наличии клонирования и локализация областей клона/прообраза здесь очевидны из анализа соответствующих матриц G (рис.2.17(в,г)) и проекций поверхностей, отвечающих G , на плоскость XOY (рис.2.17(д,е)).

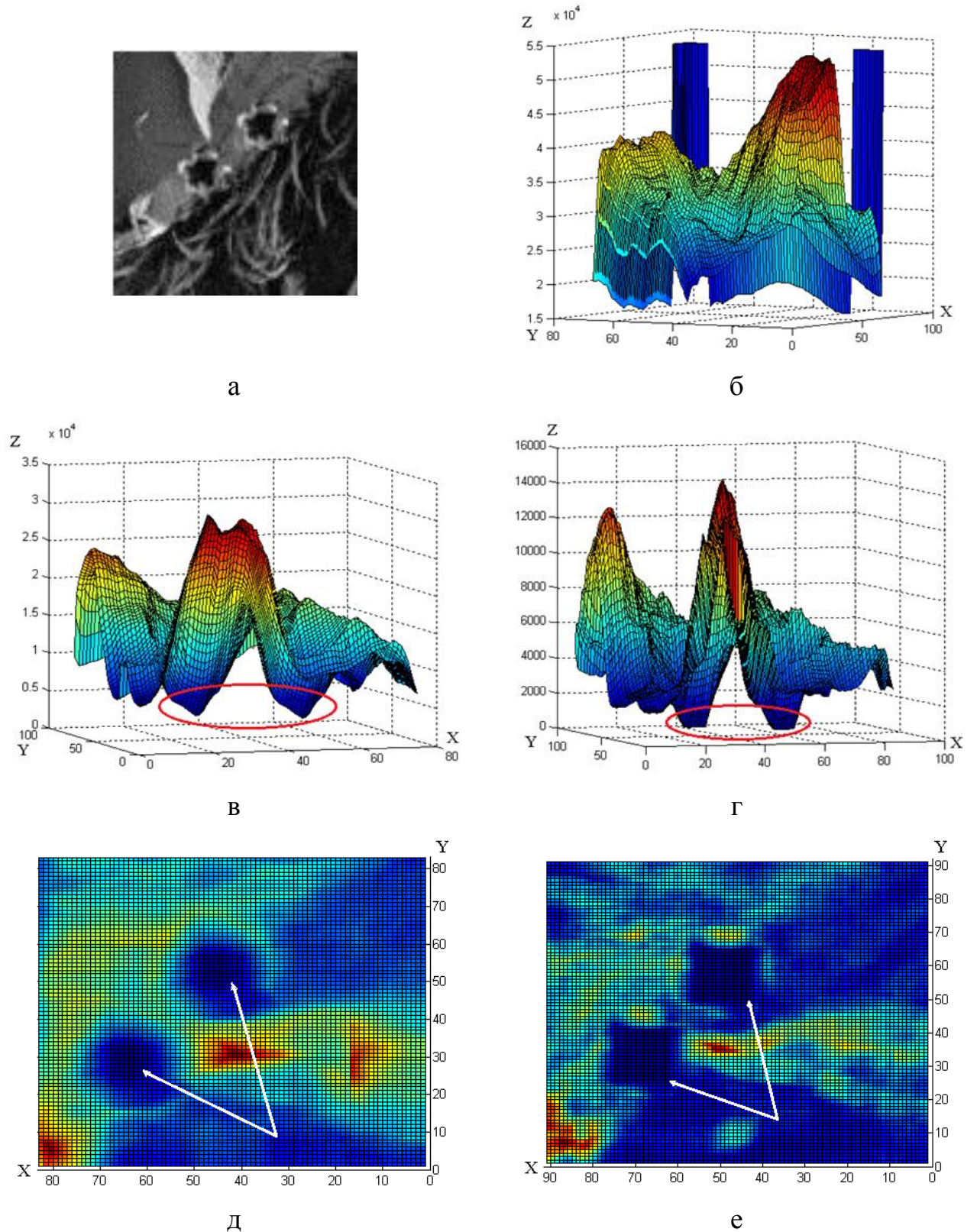


Рис.2.17. График интерполяционного сплайна для элементов G для различных $q \times q$ -блоков: а – анализируемое ЦИ; б – $q = 32$; в – $q = 24$; г – $q = 16$; д, е – проекции поверхностей, отвечающих G , на плоскость XOY для $q = 24$, $q = 16$ соответственно (проекции областей, отвечающих КП, отмечены стрелками)

Таким образом, анализ ММБО дает возможность не только установить сам факт имеющего место клонирования в ЦИ, но и локализовать клон и прообраз в пределах изображения, что полностью подтверждает теоретические выводы о свойствах матрицы G .

2.3.6 Идея анализа матрицы минимальных блоковых отличий с помощью сечений соответствующей поверхности. Автоматизация процесса нахождения совпадающих локальных минимумов ММБО G вместе с их окрестностями, отвечающими областям клона/прообраза, может быть организована путем построения последовательности сечений поверхности, являющейся графиком функции, интерполирующей элементы G , плоскостями, параллельными XOY [139]. При этом, как следует из вышеизложенного, наличие областей клона и прообраза должно проявляться на последовательности сечений поверхности наличием одинаковых по размеру и форме кривых, которые для большинства ЦИ должны быть замкнутыми.

Для цифрового изображения, визуализация матрицы G которого представлена на рис.2.14(б), последовательность сечений плоскостями $z = c, c = const, c \in N$, где N – множество натуральных чисел, с убывающим по величине параметром c , представлена на рис.2.18, где части ЦИ, содержащие области клона и прообраза, проявляются одинаковыми частями сечения – вначале окрестностями непосредственного клона и прообраза, начиная с сечения, представленного на рис.2.18(б), уточняя их область локализации на рис.2.18(в) – 2.18(д) (эти части выделены на соответствующих рисунках), при этом рис.2.18(д) дает точное месторасположение клона и прообраза: координаты блоков – (31,31) и (71,71), что отвечает действительности. На рис.2.18 из последовательности сечений, которых в процессе анализа цифрового изображения насчитывалось более 30, представлены те, которые наиболее ярко и наглядно отражают картину процесса уточнения локализации областей клона и прообраза.

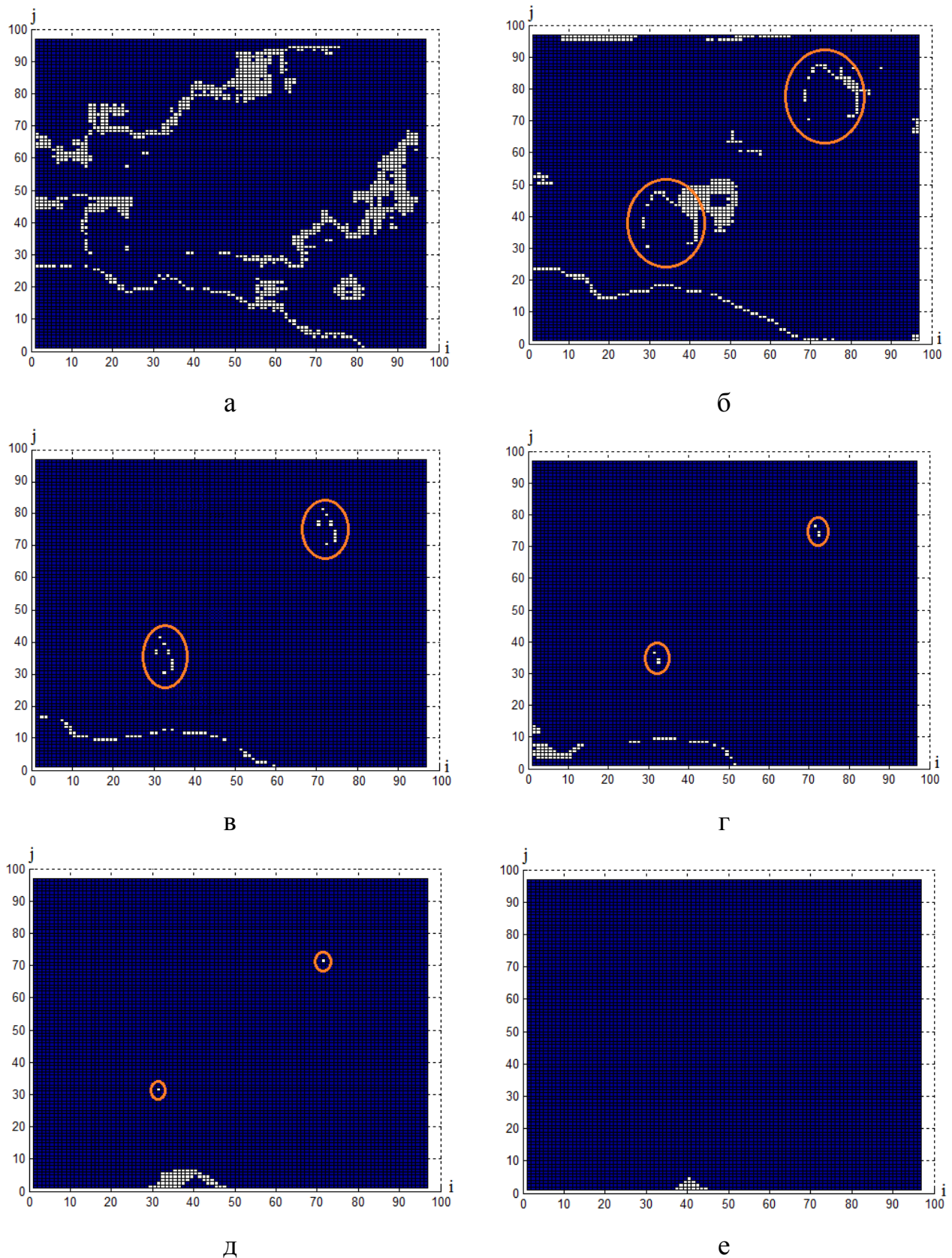


Рис.2.18. Последовательность сечений плоскостями $z = c$ с убывающим по величине параметром c для матрицы G ЦИ, сохраненного в формате с потерями после клонирования: а – $11500 \leq c \leq 12000$; б – $9500 \leq c \leq 10000$; в – $6000 \leq c \leq 6500$; г – $4000 \leq c \leq 4500$; д – $1500 \leq c \leq 2000$; е – $1000 \leq c \leq 1500$

Метод построения сечений [140], а также организации их автоматической обработки, который осложняется тем, что окрестности клона и прообраза на сечении (см. рис.2.18) в общем случае не являются замкнутыми кривыми, предлагается в разделе 3.

2.4 Выводы к разделу 2

Во втором разделе разработаны теоретические основы для метода решения задачи выявления нарушения целостности ЦИ, произошедшего вследствие клонирования в условиях дополнительных к клонированию возмущающих воздействий на измененное ЦИ.

Основными результатами раздела являются:

1. Предложено геометрическое представление ЦИ, которое дало возможность для установления количественной характеристики изображения и его подобластей, нечувствительной к изменениям входных данных: объема цилиндрического тела, ограниченного сверху поверхностью (частью поверхности), отвечающей ЦИ (подобласти ЦИ). Количественные показатели установленной характеристики для областей клона и его прообраза отличаются между собой для подавляющего большинства ЦИ ($\approx 90\%$ изображений ЭМ) меньше, чем эти же показатели для любых других областей ЦИ аналогичной формы и размеров, в условиях дополнительных возмущающих воздействий.
2. Получен критерий принадлежности блоков ЦИ областям клона и прообраза в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий на изображение, а также установлены условия его применимости: области клона/прообраза должны содержать вне своего пересечения хотя бы один $q \times q$ -блок, $q \geq 16$.
3. С использованием геометрического представления изображения и полученного критерия принадлежности блоков ЦИ областям клона и прообраза в условиях отсутствия постобработки изображения найден

формальный параметр, количественно одинаковый для соответствующих блоков областей клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, независимо от характера постобработки ЦИ, относительных размеров областей клона/прообраза (при условии, что не принадлежащая пересечению клона и прообраза область содержит хотя бы один $q \times q$ -блок для $q \geq 16$), специфики проведенного клонирования: значение глобального (локального) минимума для матрицы минимальных блоковых отличий, которая ставится в соответствие анализируемому ЦИ.

4. На основе найденного формального параметра, количественно одинакового для соответствующих блоков клона и прообраза, получено формальное необходимое условие для упомянутых блоков в условиях дополнительных возмущающих воздействий, которое дает возможность выделения в ЦИ блоков, «подозрительных» на принадлежность областям клона/прообраза.
5. Установлено, что полученное необходимое условие для соответствующих блоков клона и прообраза в ЦИ в условиях дополнительных возмущающих воздействий для подавляющего большинства ЦИ является и достаточным. Исключения могут составлять ЦИ, содержащие значительные области с малыми перепадами значений яркости пикселей.

Полученный теоретический базис обеспечит для построенного на его основе метода выявления результатов клонирования независимость от специфики реализации конкретного программного инструмента обработки изображения, от особенностей проводимого клонирования, а также его эффективность в случае малых областей клона/прообраза и значительных возмущающих воздействий.

Таким образом, задачи, поставленные в разделе, решены, цель раздела достигнута.

В разделе решены задачи 2 и 3 из перечня задач диссертационного исследования.

Основные результаты второго раздела нашли свое отражение в работах: [132,136–140].

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Целью раздела является разработка базового метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении, эффективного, в том числе в условиях (значительных) дополнительных возмущающих воздействий, на основе теоретического базиса, разработанного в разделе 2.

Для достижения поставленной цели в разделе решаются следующие *задачи*:

1. Определить возможные параметры возмущающих воздействий, которые традиционно используются при постобработке ЦИ после клонирования, сохраняющие его надежность восприятия;
2. Определить количественные показатели отличия между блоками клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, в том числе, комплексных;
3. Найти пороговые значения для количественных показателей отличия между блоками клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, в том числе, комплексных;
4. Разработать метод анализа матрицы минимальных блоковых отличий при помощи сечений определяемой ею поверхности;
5. Разработать базовый метод выявления результатов клонирования в ЦИ, обеспечить его состоятельность для случая значительных возмущающих воздействий, использованных при постобработке изображения, путем уточнения формального условия для соответствующих блоков клона и прообраза.

3.1 Определение параметров возмущающих воздействий, сохраняющих надежность восприятия цифрового изображения

При моделировании атак на ЦИ на этом этапе исследований используется гауссовский, мультипликативный, пуассоновский шум, шум «соль-перец», сжатие с потерями, фильтрация различными фильтрами подобно тому, как моделирование возмущений на изображение после клонирования происходит в [103,104,141].

«Автор» фальсификации изображения заинтересован в том, чтобы не привлечь к такому изображению дополнительное внимание эксперта. В силу этого, во-первых, с учетом широкого использования в настоящий момент форматов с потерями для передачи и хранения ЦИ, измененное изображение будет с большой долей вероятности сохранено с потерями, причем вероятнее всего, в формате Jpeg, как самом распространенном; во-вторых, результат дополнительных возмущающих воздействий, как правило, не должен привести к возникновению видимых артефактов на итоговом ЦИ, что требует выбора параметров возмущающих воздействий, обеспечивающих надежность восприятия изображения после их применения (хотя на практике постобработка ЦИ, приводящая к нарушению его надежности восприятия, с малой вероятностью, но возможна, поэтому такие возмущения в работе также будут рассмотрены ниже (раздел 4)).

Для выбора возможных параметров возмущающих воздействий, обеспечивающих надежность восприятия ЦИ, в среде Matlab (реквизиты использованного пакета License number: 21808. Platform: All. License option: Group Term: Perretual. Use: Classroom) был проведен вычислительный эксперимент, в котором было задействовано 500 ЦИ из ЭМ, которые в ходе эксперимента возмущались различным образом. В качестве количественной оценки надежности восприятия получаемого ЦИ, подобно тому, как это делается в современных научных публикациях по рассматриваемой и

родственной тематикам, использовалось пиковое отношение «сигнал-шум» PSNR, определяемое в соответствии с формулой [142]:

$$PSNR = 10 \cdot \lg \left(255^2 / \left(\frac{1}{mn} \sum_{i,j} (f_{ij} - \bar{f}_{ij})^2 \right) \right), \quad (3.1)$$

где $\bar{f}_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, – элементы матрицы \bar{F} измененного ЦИ. При этом, в случае $PSNR > 37\text{dB}$, следуя [142,143], будем считать, что надежность восприятия ЦИ при таком возмущающем воздействии сохранена (хотя субъективная оценка качества изображения может быть и иной). Результаты эксперимента отражены в табл.3.1, 3.2, 3.3, где жирным шрифтом обозначены приемлемые в смысле сохранения надежности восприятия ЦИ значения PSNR.

Таблица 3.1 – Средние значения $PSNR$ в результате наложения шума на ЦИ по всем изображениям из ЭМ

Гауссовский шум с нулевым матожиданием				Мультипликативный шум				«Соль и перец»		Пуассоновский
D=0.0001	D=0.0005	D=0.001	D=0.005	D=0.0005	D=0.001	D=0.005	D=0.01	d=0.02	d=0.001	
43.8	39.1	34.5	28.3	42.8	40.4	33.2	30.9	26.2	39.0	33.1

Таблица 3.2 – Средние значения $PSNR$ в результате пересохранения ЦИ в формате с потерями (Jpeg) с различными значениями коэффициента качества

QF

Формат исходного ЦИ	QF							
	95	85	75	65	55	45	35	25
Tif	49.0	46.8	45.4	44.0	43.4	42.6	41.5	39.0
Jpeg	50	41.6	40.3	36.4	35.5	35.1	34.4	34.1

Таблица 3.3 – Средние значения $PSNR$ в результате фильтрации ЦИ

Усредняющий фильтр размера $p \times p$			Гауссов фильтр размера $p \times p$ ($sig = 0.5$)			Медианный фильтр 3×3
$p = 3$	$p = 5$	$p = 7$	$p = 3$	$p = 5$	$p = 7$	
37	32	23	44	44	44	38

В дальнейшем при моделировании возмущающих воздействий на ЦИ шум «соль и перец» использоваться не будет, т.к. даже при приемлемом значении $PSNR$ (табл.3.1), его наложение приводит к возникновению явных артефактов на возмущенном ЦИ, кроме того, специфика данного шума – отдельно расположенные на ЦИ точки не сможет гарантированно скрыть результатов клонирования в случае малого значения параметра шума d , а значит, практически достоверно, не будет использоваться «автором» фальсификации. Аналогичное заключение о наличии видимых артефактов можно сделать и для пуассоновского шума (рис.3.1).

Таким образом, в качестве возмущающих воздействий на этом этапе исследования выбираются [139]: гауссовский шум с нулевым матожиданием и $D \leq 0.0005$ ($D \in \{0.0005, 0.0001\}$); мультипликативный шум с $D \leq 0.001$ ($D \in \{0.0005, 0.001\}$); сжатие с произвольным коэффициентом качества QF от 25 до 95, фильтрация (исключая усредняющий фильтр с размером маски $p \geq 5$). Относительно возмущающего воздействия, заключающегося в сжатии ЦИ с потерями, необходимо отметить, что хотя для $QF < 65$ значение $PSNR$ для ЦИ в формате Jpeg оказались меньше 37dB, но поскольку визуально артефакты на ЦИ не наблюдались, и с учетом того, что сжатие – самое распространенное и не обращающее на себя внимание возмущающее воздействие, сжатие со значениями $QF < 65$ из дальнейшего рассмотрения на данном этапе исследования также не исключается.



а



б



в



г

Рис.3.1. Результаты наложения шума на ЦИ: а – исходное ЦИ; б – ЦИ после наложения шума «соль и перец» с $d=0.02$; в – «соль и перец» с $d=0.001$; г – пуассоновского шума

Для комплекса возмущающих воздействий на ЦИ после осуществления клонирования рассматривалось наложение шумов с указанными выше параметрами с последующим сжатием ЦИ с коэффициентами качества $QF \in \{65,75,85,95\}$ (как наиболее распространенные и вероятные на практике). Результаты эксперимента приведены в табл.3.4.

Таблица 3.4. Значения $PSNR$ (dB) после наложения комплексных ВВ на ЦИ

Формат исходного ЦИ	Гауссовский шум								Мультипликативный шум							
	D=0.0001				D=0.0005				D=0.0005				D=0.001			
	Последующее сохранение в Jpeg с коэффициентом качества QF								Последующее сохранение в Jpeg с коэффициентом качества QF							
	QF=95	QF=85	QF=75	QF=65	QF=95	QF=85	QF=75	QF=65	QF=95	QF=85	QF=75	QF=65	QF=95	QF=85	QF=75	QF=65
Tif	43.6	42.3	41.9	41.1	39.0	38.8	36.9	36.5	42.7	42.5	42.3	40.0	40.3	40.0	39.5	38.7
Jpeg	43.7	38.9	37.2	36.3	36.9	36.7	36.6	36.2	41.9	38.5	37.0	36.1	38.7	37.5	36.7	36.0

С учетом результатов субъективного ранжирования, получаемых в результате комплекса возмущений ЦИ, а также практически достоверном сохранении ЦИ в формате с потерями, даже в случаях $PSNR < 37dB$ будем считать рассмотренные комплексы дополнительных возмущений (табл.3.4) возможными при создании фальсификации изображения путем клонирования.

3.2 Определение количественных показателей отличия между соответствующими блоками клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий

Для последующей разработки метода выявления результатов клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий полезной является информация о количественных показателях отличия между соответствующими блоками клона и его прообраза после постобработки цифрового изображения. Для их определения был проведен вычислительный эксперимент, в котором были задействованы ЦИ из экспериментального

множества. В ходе эксперимента ЦИ подвергалось клонированию (область клона/прообраза представляла из себя $q \times q$ -блок, где $q \in \{32, 24, 16\}$) с последующим наложением гауссовского или мультипликативного шума с параметрами, значения которых установлены выше (обеспечивающие надежность восприятия цифрового изображения), после чего происходило сохранение изображения в форматах без/с потерями (Tif/Jpeg (с различными коэффициентами качества QF, $QF \in \{65, 75, 85\}$)).

Для полученных изображений с учетом того, что $B^K = B_{ij}$ и $B^P = B_{kl}$ строились матрицы $\overline{M}^{(ij)}$ и $\overline{M}^{(kl)}$, для которых находились минимальные значения и их местоположение. Результаты приведены в табл.3.5, где используются следующие обозначения: I – среднее значение по всем ЦИ из ЭМ $\min \overline{M}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)}$; II, III – минимальное, максимальное значение $\min \overline{M}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)}$ по всем цифровым изображениям из экспериментального множества соответственно.

Используя табл.3.5, получаем значения $T_{min}^{(q)}$ и $T_{max}^{(q)}$ соответственно для минимального и максимального в условиях рассмотренных возмущающих воздействий отличия в смысле (2.10)–(2.11) $q \times q$ -блока клона от соответствующего блока прообраза: для $q = 32$ $T_{min}^{(32)} = 408$, $T_{max}^{(32)} = 10147$; для $q = 24$ $T_{min}^{(24)} = 309$, $T_{max}^{(24)} = 5940$; для $q = 16$ $T_{min}^{(16)} = 60$, $T_{max}^{(16)} = 2849$.

Также можно определить аналогичные пороговые значения отдельно для каждого из возмущающих воздействий [139,144,145], что будет использовано при разработке алгоритмической реализации метода выявления результатов клонирования в условиях постобработки ЦИ.

Таблица 3.5. Количественные оценки отличия между блоками клона и прообраза в смысле (2.10) – (2.11) в условиях постобработки изображения

Размер блока	Тип шума	Параметры шума	Формат сохранения ЦИ после клонирования	I	II	III	
32×32	Гауссовский	D=0.0001	Tif	2930	2208	3104	
			Jpeg	QF=85	4068	2183	5764
				QF=75	4357	2113	6764
		QF=65		4680	1900	7375	
		D=0.0005	Tif	6544	4561	7138	
			Jpeg	QF=85	7242	4429	8592
	QF=75			6656	4177	9458	
	QF=65	6799		3900	10147		
	Мульти-пликативный	D=0.0005	Tif	2650	408	6258	
			Jpeg	QF=85	3930	1169	6231
				QF=75	4240	1142	7661
		QF=65		4572	1252	7603	
D=0.001		Tif	3742	707	7770		
		Jpeg	QF=85	4796	1240	7536	
	QF=75		4941	1370	8572		
QF=65	5207		1446	8807			
24×24	Гауссовский	D=0.0001	Tif	1649	1277	1753	
			Jpeg	QF=85	2325	1181	3670
				QF=75	2549	1094	4307
		QF=65		2746	1068	4369	
		D=0.0005	Tif	3687	2593	3994	
			Jpeg	QF=85	4071	2661	4970
QF=75	3946			2400	5467		
QF=65	3889	2080		5940			

Продолжение таблицы 3.5. Количественные оценки отличия между блоками
клона и прообраза в смысле (2.10) – (2.11) в условиях постобработки
изображения

Размер блока	Тип шума	Параметры шума	Формат сохранения ЦИ после клонирования	I	II	III	
24×24	Мульти-пликативный	D=0.0005	Tif	1472	309	4917	
			Jpeg	QF=85	2245	701	3470
				QF=75	2368	634	4261
		QF=65		2597	711	4290	
		D=0.001	Tif	1967	501	4209	
			Jpeg	QF=85	2564	711	4095
				QF=75	2671	731	4511
		QF=65		2690	801	4712	
		16×16	Гауссовский	D=0.0001	Tif	911	501
Jpeg	QF=85				1007	546	1241
	QF=75				1111	678	1535
	QF=65			1247	654	1987	
D=0.0005	Tif			1698	901	2145	
	Jpeg			QF=85	1814	959	2297
			QF=75	1746	811	2611	
QF=65			1800	875	2849		
Мульти-пликативный	D=0.0005		Tif	662	60	1360	
			Jpeg	QF=85	1068	322	1717
				QF=75	1229	344	1981
	QF=65			1338	355	2467	
	D=0.001		Tif	1043	235	2290	
			Jpeg	QF=85	1376	401	2211
				QF=75	1398	484	2268
	QF=65	1478		489	2329		

3.3 Разработка метода деления отрезка пополам анализа матрицы минимальных блоковых отличий при помощи сечений определяемой ею поверхности

Главным объектом анализа при выявлении областей клона/прообраза в ЦИ является введенная для изображения с $n \times m$ -матрицей F в разделе 2 $(n - q + 1) \times (m - q + 1)$ -матрица G с элементами $g_{ij}, i = \overline{1, n - q + 1}, j = \overline{1, m - q + 1}$, определяемыми в соответствии с (2.13), для которой обосновано, что блокам B_{ij} и B_{kl} клона и прообраза в ней будут отвечать совпадающие глобальные (локальные) минимумы: $g_{ij} = g_{kl}$, являющиеся для большинства ЦИ показателем наличия клонирования и указания его местоположения. Однако на практике, как уже указывалось выше, для ЦИ вида, представленного на рис. 2.3, соотношение (2.14) может указывать не на области клона и прообраза, а на малоотличающиеся оригинальные области ЦИ. Для уточнения области клона/прообраза предлагается построение множества «сечений» вида $c_1 \leq z \leq c_2, c_1, c_2 = const, c_1, c_2 \in N$, где N – множество натуральных чисел, поверхности, являющейся графиком функции, интерполирующей элементы матрицы G [140]. На самом деле в результате «сечения» мы получим месторасположение тех блоков ЦИ, для которых минимальное отличие их от всех других блоков в смысле (2.10)–(2.11) находится в пределах сегмента $[c_1, c_2]$.

Построение «сечений» осуществляется в соответствии с методом, называемым далее *методом деления отрезка пополам анализа матрицы минимальных блоковых отличий* (МАМБО), являющимся составной частью представленного ниже базового метода выявления результатов клонирования в ЦИ. Основные шаги МАМБО следующие.

Шаг 1. С учетом специфики анализируемого $n \times m$ -ЦИ или размеров «подозрительной» с точки зрения клонирования области выбрать размер $q \times q$ –

блока, при помощи которого будет анализироваться ЦИ. Построить для ЦИ $(n - q + 1) \times (m - q + 1)$ – матрицу G – ММБО.

Шаг 2. Определить значения порогов T_{min} , T_{max} для возможных значений элементов матрицы G , отвечающих (2.14), т.е. блокам клона и прообраза. В условиях четко выбранного размера блока: $T_{min} = T_{min}^{(q)}$, $T_{max} = T_{max}^{(q)}$; в условиях известных дополнительных возмущающих воздействий на ЦИ после проведенного клонирования T_{min} , T_{max} определяются из табл.3.5. В том случае, если информация о возмущающих воздействиях отсутствует, а размер блока не определен однозначно, в качестве порогов использовать:

$$T_{min} = \min_q T_{min}^{(q)}, T_{max} = \max_q T_{max}^{(q)}.$$

Шаг 3 (деление отрезка пополам).

3.1. Положить: $a = T_{min}$, $b = T_{max}$, $c = (a + b)/2$.

3.2. Построить «сечения» поверхности, являющейся графиком функции, интерполирующей элементы матрицы G : $a \leq z \leq c$, $c \leq z \leq b$, представить их в виде бинарных ЦИ, где элементам матрицы G (соответствующим блокам анализируемого ЦИ), значения которых попадают в сегменты $[a, c]$, $[c, b]$, отвечают белые области соответствующих бинарных ЦИ.

3.3. Положить $k_1 = 0$, $k_2 = 0$.

3.4. (Анализ «сечений» в виде бинарных изображений).

3.4.1. Если «сечение» $a \leq z \leq c$ имеет одинаковые по форме и размерам объекты, ограниченные замкнутой кривой, выделяемые существующими методами обработки ЦИ, то $k_1 = k_1 + 1$.

Если площадь одинаковых объектов равна 1 – объекты точечные, при этом точки являются изолированными [134],

то переход на шаг 4.

3.4.2. Если «сечение» $c \leq z \leq b$ имеет одинаковые по форме и размерам объекты, ограниченные замкнутой кривой, выделяемые существующими методами обработки ЦИ (выделения контуров),

то $k_2 = k_2 + 1$.

Если площадь одинаковых объектов равна 1 (объекты точечные),

то переход на шаг 4.

3.4.3. Если $k_1 = 1, k_2 = 0$,

то из двух «сечений» для дальнейшего анализа используется $a \leq z \leq c$. Положить: $b = c$. Вычислить значение середины нового отрезка $[a, b]$: $c = (a + b)/2$.

Переход на шаг 3.2.

3.4.4. Если $k_1 = 0, k_2 = 1$,

то из двух «сечений» для дальнейшего анализа используется $c \leq z \leq b$. Положить: $a = c$. Вычислить значение середины нового отрезка $[a, b]$: $c = (a + b)/2$.

Переход на шаг 3.2.

3.4.5. Если $k_1 = k_2 = 1$,

то из двух «сечений» выбрать то, одинаковые объекты на котором меньше по размерам. В случае, если это «сечение» $a \leq z \leq c$, положить: $b = c$, иначе: $a = c$. Вычислить значение середины нового отрезка $[a, b]$: $c = (a + b)/2$.

Переход на шаг 3.2.

3.4.6. Если $k_1 = k_2 = 0$ и $c - a > P$, где P – пороговое значение, определяемое экспериментальным путем, то оба сечения требуют дальнейшего анализа. Для каждого из них делать:

Положить a равным левому концу сегмента, определяющего «сечение», b – правому концу сегмента, определяющего «сечение», перейти на шаг 3.2.

Шаг 4. Если $k_1 = k_2 = 0$ для каждого из построенных сечений, то анализируемое ЦИ не подвергалось клонированию.

Если $k_1 = 1$ или $k_2 = 1$,

то анализируемое ЦИ подвергалось клонированию. Соответствующие блоки областей клона и прообраза, отличающиеся друг от друга смысле (2.10)–(2.11) менее всего, определяются изолированными одинаковыми объектами белого цвета площади 1 (1 пиксель) на последнем по порядку бинарном изображении-сечении.

В качестве существующих методов обработки ЦИ, фигурирующих в пп.3.4.1 и 3.4.2, могут использоваться методы выделения контуров, предложенные и реализованные в [146], например, с использованием функции градиента (с помощью функции `colorgrad`).

Экспериментальным путем с использованием ЦИ из ЭМ установлено, что пороговое значение P равно 300.

Проиллюстрируем работу предложенного метода на ЦИ, подвергнутом клонированию с последующим наложением на изображение гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и $D = 0.0001$ и сохранением в формате Jpeg с QF=75 (рис.3.2(б)) и оригинальном ЦИ (рис.3.2(а)). Изображение намеренно выбрано без явно выраженных объектов, что, в общем случае, может усложнить решение рассматриваемой задачи.

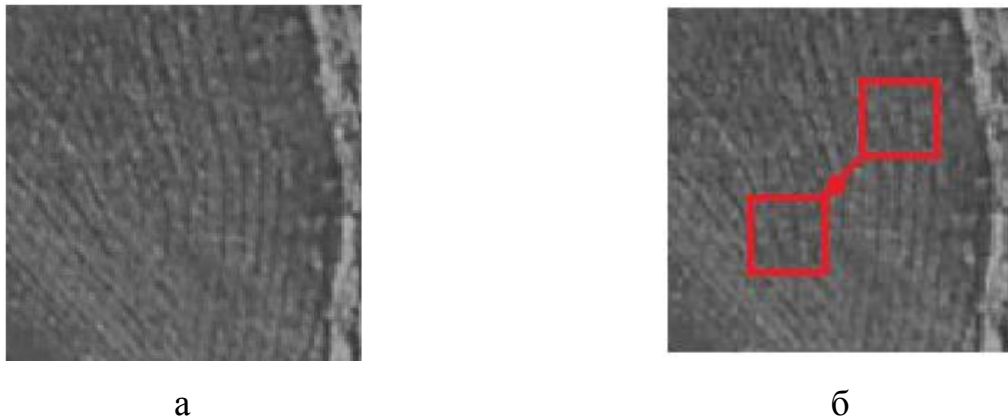


Рис.3.2. ЦИ, используемые для иллюстрации работы МАМБО в условиях дополнительных возмущающих воздействий: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ, являющееся результатом клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий

Рассмотрим сначала фальсифицированное ЦИ (рис.3.2(б)). Используем при анализе блоки среднего размера: $q = 24$. Из табл.3.5 получаем: $T_{min} = 1094$, $T_{max} = 4307$.

Рис.3.3(а,б) иллюстрирует «сечения» в виде бинарных изображений, полученные для первого разбиения отрезка $[a, b] = [T_{min}, T_{max}]$ пополам. Оба «сечения» имеют в своих пределах одинаковые объекты, ограниченные замкнутой кривой: $k_1 = k_2 = 1$. В соответствии с шагом 3.4.5 выбираем для дальнейшего анализа «сечение» $1094 \leq z \leq 2700$ (рис.3.3(а)). Делим отрезок $[1094, 2700]$ пополам и строим два сечения (рис.3.3(в,г)), из которых, в соответствии с предложенным выше методом, выбираем $1094 \leq z \leq 1897$. Это завершает процесс, поскольку площадь одинаковых (точечных) объектов на соответствующем бинарном изображении равна 1. В результате, поскольку $k_1 = k_2 = 1$, делается вывод о проведенном клонировании, кроме того, устанавливается местоположение областей клона и прообраза (рис.3.3(в)): блоки (31, 31), (71, 71), что отвечает действительности.

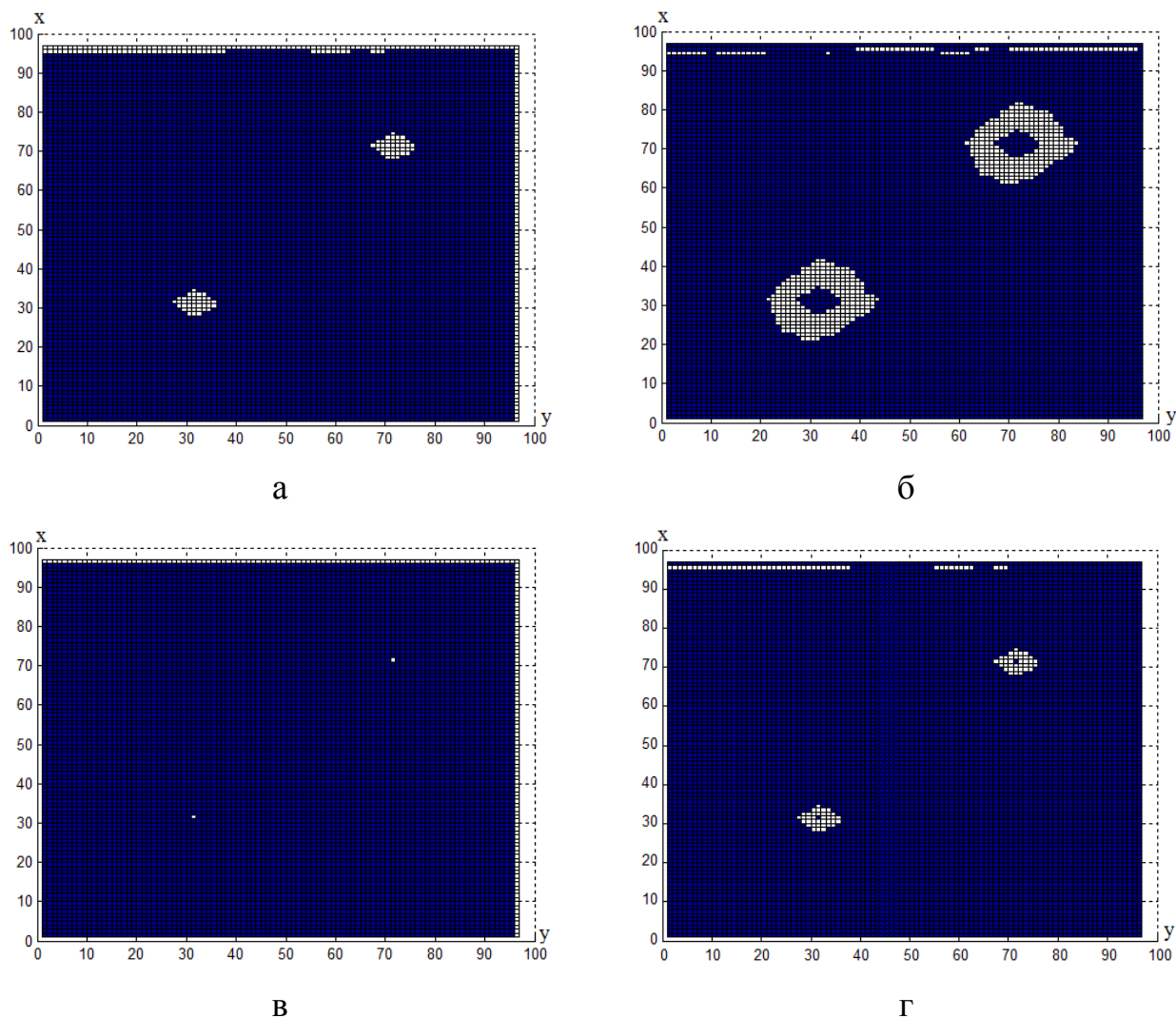


Рис.3.3. Последовательность сечений для ММБО ЦИ, подвергнутого операции клонирования в условиях дополнительных возмущений: а $-1094 \leq z \leq 2700$; б $-2701 \leq z \leq 4307$; в $-1094 \leq z \leq 1897$; г $-1898 \leq z \leq 2700$

Рассмотрим теперь оригинальное ЦИ (рис.3.2(а)), используя при анализе те же значения параметров метода (хотя в общем случае это не обязательно). Рис.3.4 иллюстрирует «сечения» в виде бинарных изображений, полученные для первого разбиения отрезка $[a, b] = [T_{min}, T_{max}]$ пополам.

Дальнейшее разбиение отрезка никак не изменило качественно получаемые сечения, которые по этой причине не приводятся: одинаковые объекты, ограниченные замкнутыми кривыми, в пределах «сечений» выявлены не были, $k_1 = k_2 = 0$. На шаге 4 делается вывод об отсутствии клонирования, что соответствует действительности.

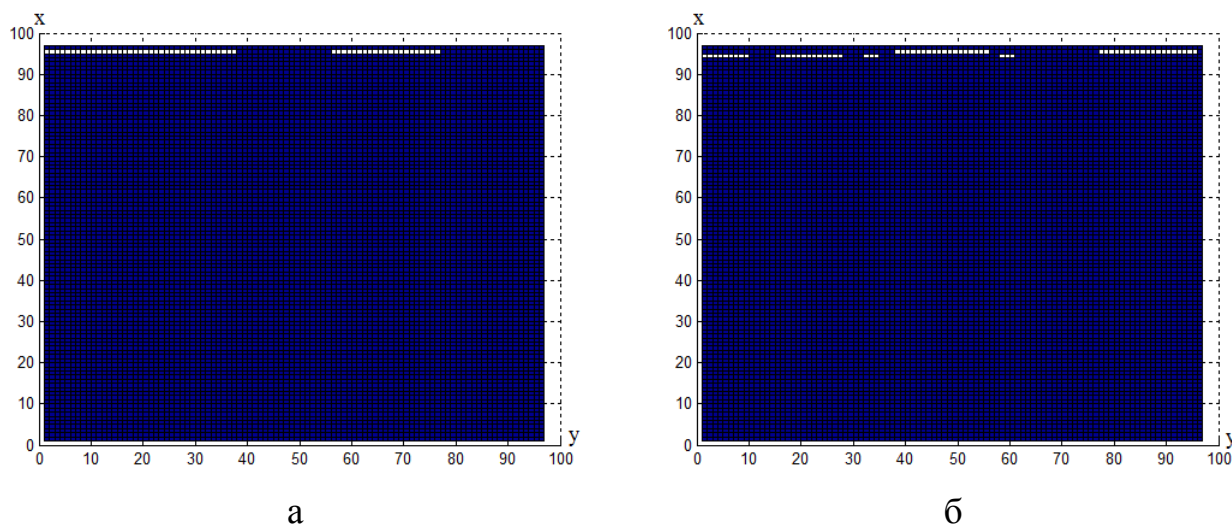


Рис.3.4. Последовательность сечений для оригинального ЦИ: а – $1094 \leq z \leq 2700$; б – $2701 \leq z \leq 4307$

Предложенный МАМБО анализа ММБО не всегда уточняет наличие/местоположение областей клона/прообраза. Получение результата здесь осложняется тем, что окрестности клона и прообраза на сечении (см. рис.2.6) в общем случае могут не быть замкнутыми кривыми, более того, они вообще могут представлять из себя дискретный набор точек/отрезков.

3.4 Уточнение формального условия для соответствующих блоков клона и прообраза в случае значительных возмущающих воздействий, использованных при постобработке изображения

В разделе 2 при получении необходимого условия для соответствующих блоков B_{ij} , B_{kl} клона и прообраза на ЦИ речь шла о возможности соответствия элементов $g_{ij} = g_{kl}$ ММБО G не только ее глобальным, как кажется на первый взгляд, но и локальным минимумам в случае значительных дополнительных возмущающих воздействий. Обоснуем упомянутое утверждение.

3.4.1 Постобработка цифрового изображения, проводимая путем использования значительных возмущающих воздействий. Подход, предложенный в разделе 2, основанный на анализе матрицы G для ЦИ, никак принципиально не связан с величиной коэффициента сжатия (коэффициента

качества) ЦИ при сохранении его в формате с потерями после проведенного клонирования, а также с величинами параметров других возмущающих воздействий, которые до сих пор определялись только с учетом необходимости соблюдения надежности восприятия ЦИ после атаки.

Одной из самых распространенных атак на ЦИ была и остается атака сжатием с потерями, при этом на практике использование малых коэффициентов качества (значительных коэффициентов сжатия) часто не приводит к возникновению видимых артефактов на сжатом изображении, а значит такие параметры принципиально могут быть использованы при неавторизованном изменении ЦИ для последующей маскировки этих изменений, что необходимо учесть при разработке метода выявления результатов клонирования, основная теоретическая идея которого выражена условием (2.14).

Значительное сжатие (с малым коэффициентом качества), как и значительное возмущающее воздействие другого плана, значительно изменит все элементы матрицы ЦИ. Здесь принципиально возможен вариант, когда изменение блоков ЦИ, не совпадавших между собой по соответствующим значениям до сжатия, до возмущающего воздействия, отличного от сжатия, может привести к тому, что их отличие после ВВ окажется сравнимым (или даже меньшим), чем для соответствующих блоков клона и прообраза, первоначально совпадавших по соответствующим значениям. Однако, с учетом способа формирования блоков B_{ij} матрицы ЦИ, очевидно, что в малых окрестностях соответствующих блоков клона и прообраза ($B_{ij} = B^{(K)}$, $B_{kl} = B^{(P)}$), их отличие между собой будет наименьшим. Действительно, блоки $B_{i-1,j-1}, B_{i-1,j}, B_{i-1,j+1}, B_{i,j-1}, B_{i,j+1}, B_{i+1,j-1}, B_{i+1,j}, B_{i+1,j+1}$ отличаются от блока B_{ij} одним столбцом или/и одной строкой. Минимальное блоковое отличие в смысле (2.10)–(2.11) для B_{ij} достигается на блоке прообраза B_{kl} , поэтому практически достоверно значения минимальных блоковых отличий, по крайней мере, для блоков $B_{i-1,j-1}, B_{i-1,j}, B_{i-1,j+1}, B_{i,j-1}, B_{i,j+1}, B_{i+1,j-1}, B_{i+1,j}, B_{i+1,j+1}$ будут больше, поскольку

они сами отличаются от B_{ij} , а это означает, что элементы $g_{i-1,j-1}, g_{i-1,j}, g_{i-1,j+1}, g_{i,j-1}, g_{i,j+1}, g_{i+1,j-1}, g_{i+1,j}, g_{i+1,j+1}$ матрицы G будут больше g_{ij} , образуя такую окрестность этого элемента (по крайней мере, единичного радиуса), в которой g_{ij} будет определять локальный минимум. Аналогичный вывод можно сделать и относительно блока прообраза B_{kl} .

Таким образом, в условиях значительного сжатия с потерями клонированного изображения, при значительных возмущающих воздействиях, отличных от сжатия, показателем соответствующих блоков клона и прообраза B_{ij} и B_{kl} будут совпадающие элементы $g_{ij} = g_{kl}$ матрицы G , в которых с большой вероятностью будет достигаться именно локальный (в общем случае не исключается глобальный) минимум G . Это также может происходить в случаях, когда клонирование используется для удаления объекта с ЦИ при помощи прообраза, являющегося частью фоновой области изображения (с малым перепадом значений яркости). Данный вывод объясняет учет возможности выполнения условия (2.14) для локального минимума матрицы G в разделе 2.

Иллюстрацией сказанному является пример, приведенный на рис.2.14(б), где глобальный минимум функции, являющейся интерполяционным сплайном для элементов матрицы G , достигается в элементах G , отвечающих блокам ЦИ, отличным от блоков клона/прообраза. При этом области клона и прообраза соответствуют совпадающим по значению локальным минимумам G , приводя к характерным особенностям графика: наличию сравнимых по форме конусообразных поверхностей (окрестностей блоков клона/прообраза), аппликаты вершин которых имеют одинаковые значения (выделены на рис.2.14(б)).

Практическим подтверждением эффективного распознавания клонирования в ЦИ в условиях значительного сжатия с использованием разработанного в разделе 2 подхода, явились результаты вычислительного эксперимента, проведенного с ЦИ из ЭМ. В ходе эксперимента оригинальное

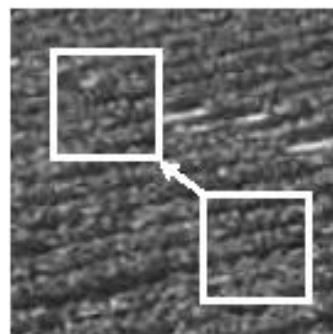
ЦИ подвергалось клонированию, после чего сохранялось в формате Jpeg с коэффициентами качества $QF \in \{25,35,45,55,65,75,85,95\}$. Сжатые ЦИ анализировались с учетом вышесказанного: для полученной матрицы G ($q \in \{16,24,32\}$) строился график функции, интерполирующей ее элементы, на котором констатировалось наличие характерных областей, отвечающих элементам G , в которых достигались ее совпадающие по значению локальные минимумы. Экспертная оценка характерных свойств графика дала положительный результат для 98.7% использованных в эксперименте ЦИ: для них были обнаружены области клона/прообраза, отвечающие реальным. Сравнимый результат (98.1% ЦИ) был получен в случае, когда изображения после клонирования сохранялись в формате Jpeg2000 с коэффициентами качества $QF \in \{25,35,45,55,65,75,85,95\}$ [147].

Характерные особенности матрицы G при значительном комплексном возмущающем воздействии на ЦИ после клонирования, включающем в себя фильтрацию усредняющим фильтром с последующим сохранением в формате Jpeg с $QF=25$, проиллюстрированы на рис.3.5, где области клона и прообраза очевидны и отвечают реальным (рис.3.5(в, г)).

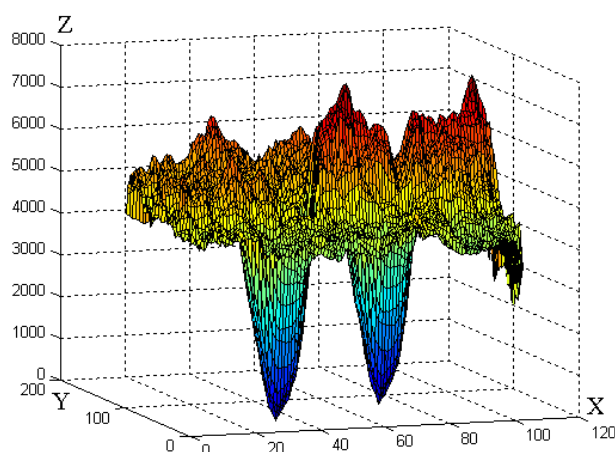
Использование в качестве признака клона/прообраза наличия совпадающих значений локальных минимумов матрицы G позволяет, как уже отмечалось выше, при помощи субъективного анализа этого графика в подавляющем большинстве случаев не только выявить клон и прообраз (при их наличии), но и локализовать их месторасположение, в том числе, в случае геометрических и комплексных значительных воздействий, обязательной составной частью которых, с учетом вышесказанного, является сжатие с потерями (сохранение в формат Jpeg с различными коэффициентами качества QF) (рис.3.6).



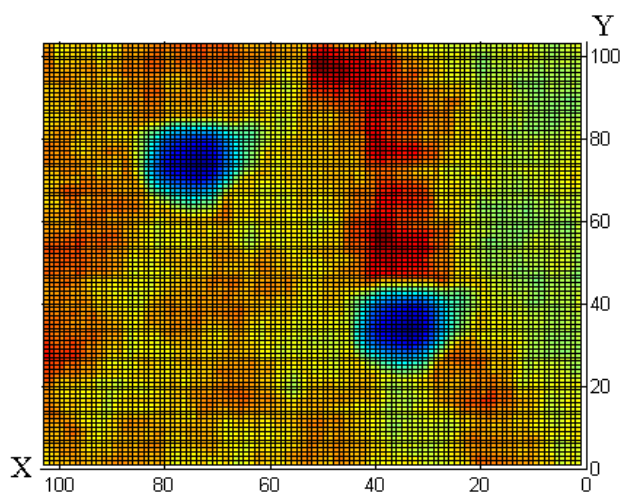
а



б



в



г

Рис.3.5. Иллюстрация работы разработанного метода: а – оригинальное ЦИ; б – часть ЦИ, соответствующая выделенной на рис.3.5(а), после осуществления клонирования и последующей фильтрации с использованием прямоугольного усредняющего фильтра с 3×3 -маской и сохранения результирующего ЦИ в формате Jpeg с QF=25; в – график функции, интерполирующей элементы части матрицы G , отвечающей части ЦИ, содержащей области клона и прообраза; г – проекция G на плоскость XOY

Как видно из результатов, представленных на рис.3.6, даже в случае значительного геометрического преобразования, при котором размер ЦИ уменьшился в 5 раз, после чего в дополнение ЦИ было сохранено с потерями, что еще более увеличило возмущение элементов матрицы изображения,

локальные минимумы соответствующей матрицы G (рис.3.6(г)) дают верную информацию о наличии и местоположении клона и прообраза.



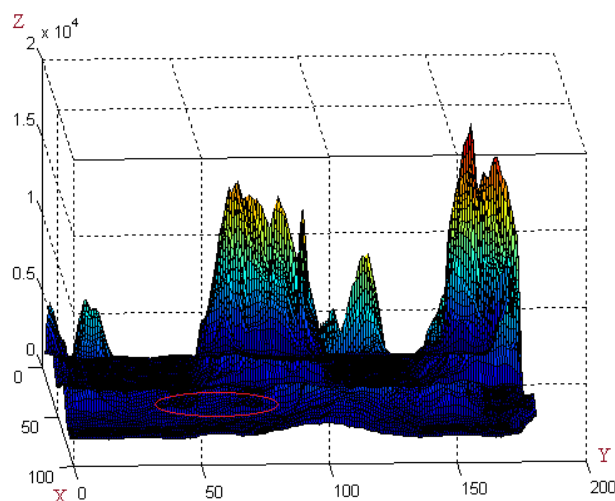
а



б



в



г

Рис.3.6. Пример выявления наличия клонирования в ЦИ в условиях дополнительных возмущений, включающих геометрические: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ, подвергнутое операции клонирования с последующим масштабированием с коэффициентом 0.2 и сохранением в формате Jpeg с $QF = 75$; в – часть фальсифицированного ЦИ, используемая для анализа; г – график G , отвечающей ЦИ, приведенному на рис.3.6(в) (выделены области совпадающих локальных минимумов).

Приведенные в подразделе примеры иллюстрируют работоспособность полученного в разделе 2 теоретического базиса и его основных принципов для выявления результатов клонирования в условиях значительных возмущающих

воздействий, независимо от конкретного вида и программных реализаций этих воздействий.

3.4.2 Использование для постобработки изображения малоранговых аппроксимаций его матрицы. С учетом практической необходимости использования сжатия ЦИ при его обработке в качестве еще одного варианта реализации сжатия ЦИ с потерями рассмотрим способ, который не является принятым стандартом, но часто используется при работе с изображениями [147]. Данный способ основывается на малоранговых аппроксимациях матрицы [148] (блоков матрицы) ЦИ и заключается в следующем.

Для $n \times m$ -матрицы F ($n \geq m$) ЦИ строится ее сингулярное разложение [148]:

$$F = U \Sigma V^T, \quad (3.2)$$

где U, V – ортогональные матрицы размера $n \times m$ и $m \times m$ соответственно, столбцы которых являются соответственно левыми и правыми сингулярными векторами (СНВ) F ,

$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$ – диагональная матрица сингулярных чисел (СНЧ), для которых $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \geq 0$.

Если $n \leq m$, рассматривается сингулярное разложение матрицы F^T .

Разложение (3.2) матрицы F можно представить в форме внешних произведений:

$F = \sum_{i=1}^m \sigma_i u_i v_i^T$, где $u_i, v_i, i = \overline{1, m}$, – соответственно столбцы

матриц U, V – левые и правые СНВ матрицы F .

Аппроксимацией матрицы F ранга $k \leq m$ называется матрица

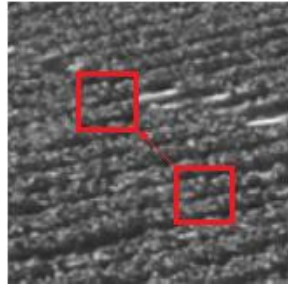
$$F_k = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i v_i^T,$$

являющаяся ближайшей к F (в смысле спектральной матричной нормы) матрицей ранга k [148]. Замена F на F_k приводит к сжатию изображения тем больше, чем меньше k .

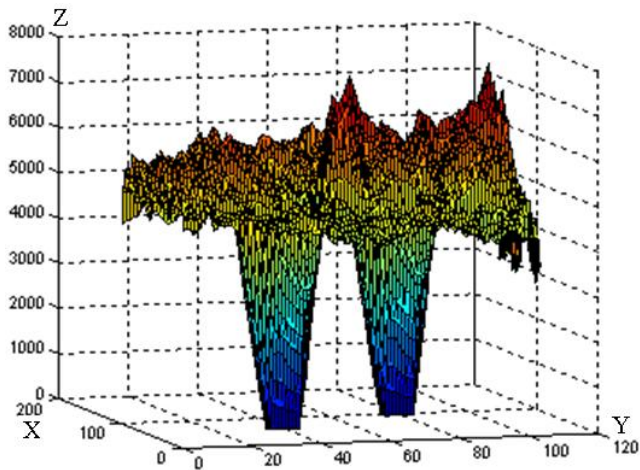
Проверим на практике состоятельность предложенного в разделе 2 подхода к выявлению клонирования в условиях сжатия клонированного ЦИ при помощи использования малоранговых аппроксимаций матрицы всего изображения.

В ходе вычислительного эксперимента ЦИ из ЭМ подвергались клонированию, после чего сжимались при помощи k -ранговых аппроксимаций с различными значениями k . Как показывают результаты эксперимента, предложенный подход остается состоятельным вплоть до $k = m/10$ ($k < m/10$ в эксперименте не рассматривались, поскольку при таком ранге на ЦИ возникают видимые артефакты), т.е. на соответствующих анализируемым ЦИ матрицах минимальных блоковых отличий фиксируется наличие совпадающих по значениям локальных минимумов, расположение которых отвечает реальному расположению на ЦИ областей клона и прообраза.

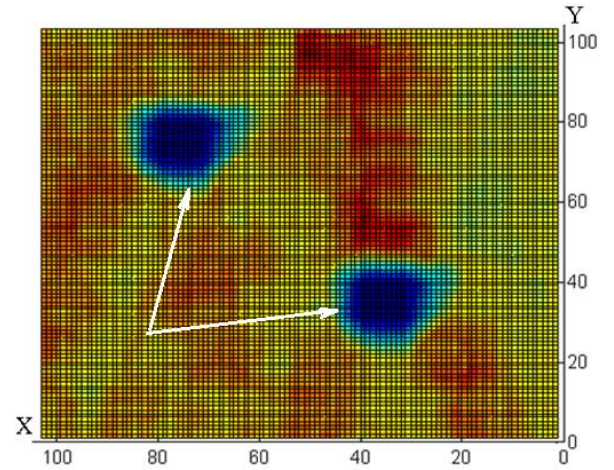
Иллюстрация типичных результатов тестирования предложенного подхода (выявление характерных свойств функции, интерполирующей элементы матрицы G) на конкретном ЦИ представлена на рис.3.7 (результаты даны для $k = 100$ и $k = 20$; для значений $20 < k < 149$ качественная картина аналогичная). Необходимо отметить также очевидную локализацию областей клона/прообраза на проекции графика интерполирующей G функции на плоскость XOY (рис.3.7 (в, д) – соответствующие области указаны стрелками).



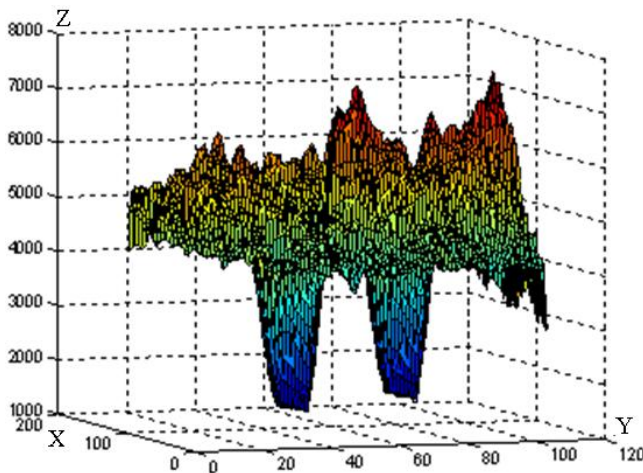
а



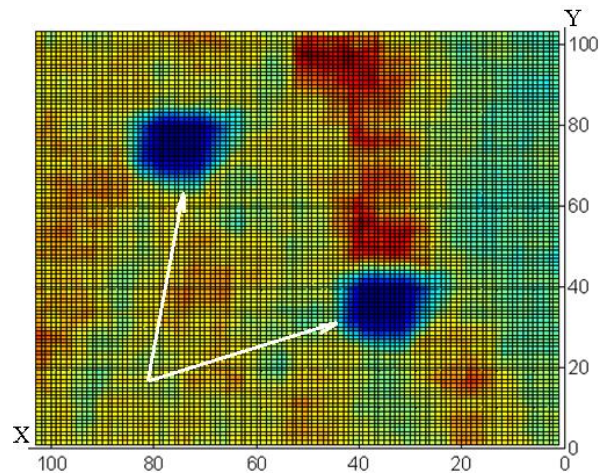
б



в



г



д

Рис.3.7. Результаты выявления областей КП в условиях сжатия клонированного ЦИ с использованием малоранговых аппроксимаций его матрицы: а – часть ЦИ (150×150 пикселей), содержащая области КП, сохраненная в формате без потерь (Tif); б – график функции, интерполирующей элементы матрицы G в случае $k = 100$; в – проекция G на плоскость XOY при $k = 100$; г – график функции, интерполирующей элементы матрицы G в случае $k = 20$; в – проекция G на плоскость XOY при $k = 20$

Рассмотрим использование малоранговых аппроксимаций при обработке отдельных 8×8 -блоков матрицы ЦИ, полученных путем стандартного разбиения (подобно тому, как это делается в Jpeg и Jpeg2000). Такой способ сжатия будет предпочтительнее перед использованием малоранговой аппроксимации всей матрицы в смысле вычислительной сложности, поскольку здесь затраты на построение сингулярного разложения блока не будут зависеть от размера матрицы исходного ЦИ, а будут являться постоянной величиной относительно размера входных данных. Вычислительная сложность процесса сжатия ЦИ с использованием малоранговых аппроксимаций блоков его $n \times m$ -матрицы будет определяться количеством блоков и равняться $O(nm)$.

Установим, каким образом ранг аппроксимации блоков влияет на надежность восприятия сжатого ЦИ, которая количественно оценивается стандартным образом: при помощи пикового отношения «сигнал-шум» $PSNR$ (3.1). Для этого был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого ЦИ из ЭМ подвергались сжатию с использованием k -ранговых аппроксимаций 8×8 -блоков, где $k \in \{1, \dots, 7\}$, после чего вычислялось значение $PSNR$. Результаты приведены на рис.3.8.

Как показывает вычислительный эксперимент, уже для $k = 3$ среднее значение $PSNR < 40dB$, что может выражаться в появлении артефактов на ЦИ, однако даже при малых значениях ранга используемых аппроксимаций блоков ЦИ субъективное ранжирование может не выявить никаких артефактов на сжатом ЦИ. Иллюстрация сказанному приведена на рис.3.9. С учетом этого на практике принципиально возможно использование аппроксимаций блоков любого ранга $k \in \{1, \dots, 7\}$ для маскировки проведенного клонирования. Это приводит к необходимости обеспечения (проверки обеспечения) работоспособности предложенного подхода к выявлению клонирования в условиях использования для сжатия клонированного изображения аппроксимаций блоков произвольного ранга $k \in \{1, \dots, 7\}$, хотя, исходя из

полученных в разделе 2 теоретических заключений, работоспособность разработанного подхода здесь является ожидаемой.

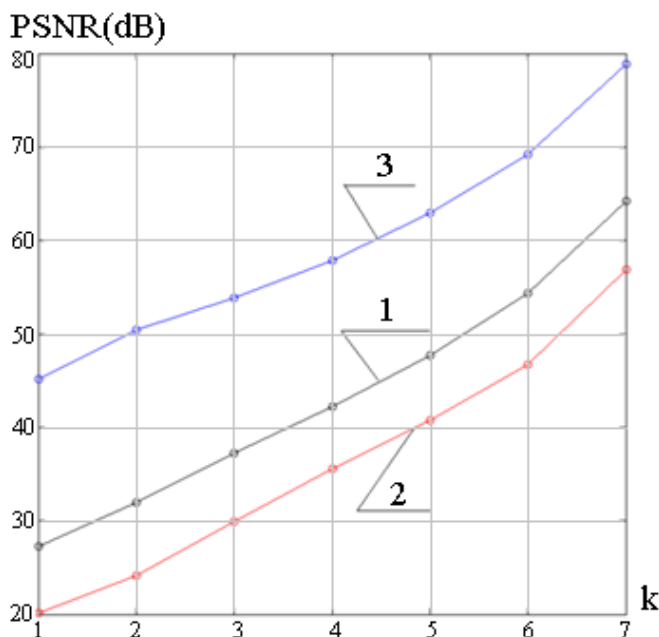


Рис.3.8. Зависимость значения PSNR от величины ранга аппроксимации k 8×8 -блоков матрицы ЦИ при его сжатии: 1 – среднее значение PSNR по ЦИ из ЭМ; 2 – минимальное значение PSNR; 3 – максимальное значение PSNR по всем ЦИ из ЭМ

При проведении вычислительного эксперимента было установлено, что характерные особенности графика функции, интерполирующей элементы матрицы G , указанные выше, присутствовали для всех ЦИ, подвергнутых клонированию с последующим сжатием при любом ранге аппроксимации блоков: $k = \overline{1,7}$. Иллюстрацией является рис.3.10, где сжатию подвергалось цифровое изображение, представленное на рис.3.7(а).



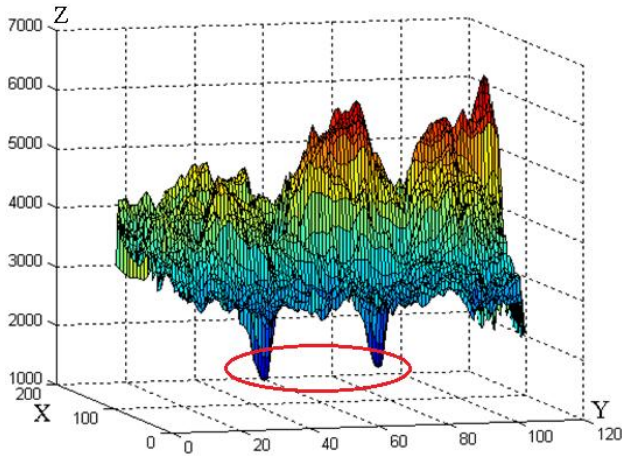
а

б

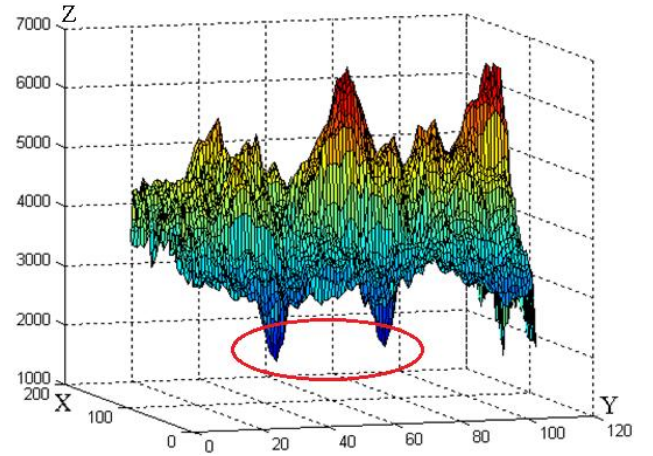
Рис.3.9. Иллюстрация результата сжатия цифрового изображения с использованием малоранговых аппроксимаций блоков его матрицы: а – исходное ЦИ; б – результат сжатия при помощи 1-ранговых аппроксимаций 8*8-блоков ЦИ

Таким образом, предложенный в разделе 2 новый подход к выявлению в ЦИ областей клона/прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий является состоятельным в случае, когда для сжатия используются малоранговые аппроксимации матрицы (блоков матрицы) ЦИ, в том числе при малом ранге (значительном сжатии).

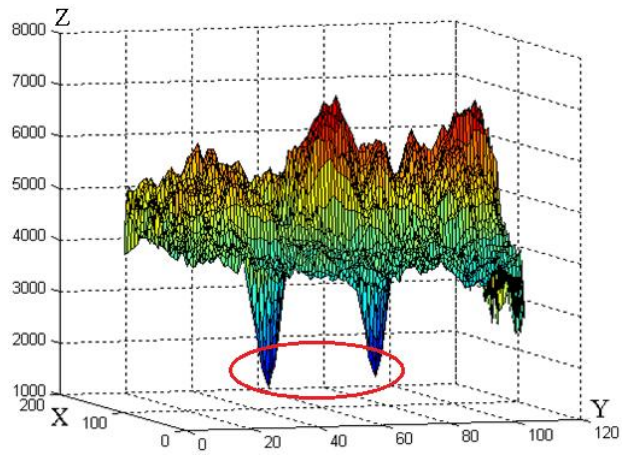
Высокая эффективность метода выявления результатов клонирования в ЦИ и его алгоритмической реализации, разработанных на основе предложенного теоретического подхода, в условиях значительных дополнительных возмущающих воздействий будет подробно продемонстрирована в разделе 4.



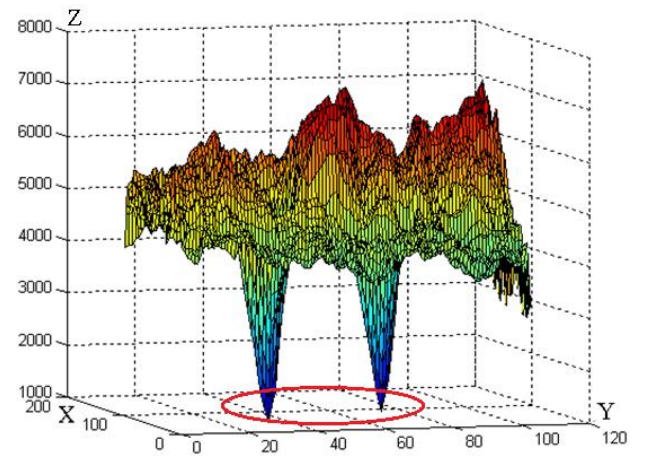
а



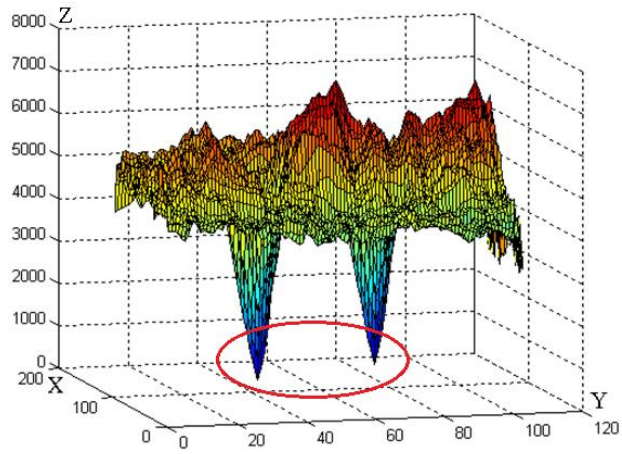
б



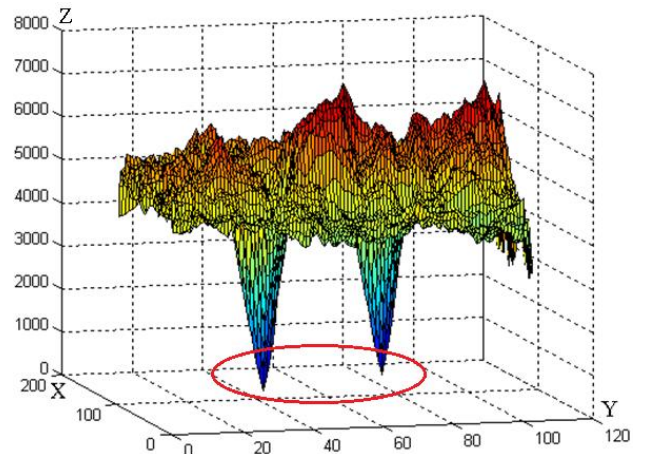
в



г



д



е

Рис.3.10. Графики функций, аппроксимирующих элементы матрицы G ЦИ, подвергнутого клонированию с последующим сжатием с использованием k -ранговых аппроксимаций 8×8 -блоков: а – $k = 1$; б – $k = 2$; в – $k = 3$; г – $k = 4$; д – $k = 5$; е – $k = 6$

3.5 Базовый метод выявления областей клона/прообраза в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий

С учетом всего вышесказанного основные шаги предлагаемого базового метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий (БМКВВ), обозначаемого далее KL_B , выглядят следующим образом [149].

Шаг 1 (построение матрицы минимальных блоковых отличий G).

Выбрать размер $q \times q$ – блока, при помощи которого будет анализироваться ЦИ.

Для $n \times m$ – матрицы F ЦИ:

1.1. Каждому элементу f_{ij} , $i = \overline{1, n-q+1}$, $j = \overline{1, m-q+1}$, матрицы F поставить в соответствие $q \times q$ – блок B_{ij} .

1.2. Для каждого блока B_{ij} , $i = \overline{1, n-q+1}$, $j = \overline{1, m-q+1}$, матрицы F :

1.2.1. Построить $(n-q+1) \times (m-q+1)$ – МБО $M^{(ij)}$, элементы которой $m^{(i,j)}_{k,l}$, $k = \overline{1, n-q+1}$, $l = \overline{1, m-q+1}$, определяются в соответствии с (2.10)–(2.11);

1.2.2. По матрице $M^{(ij)}$ построить модифицированную матрицу блоковых отличий $\overline{M}^{(ij)}$ с использованием процесса модификации;

1.2.3. Определить очередной элемент g_{ij} $(n-q+1) \times (m-q+1)$ – матрицы минимальных блоковых отличий G , отвечающий блоку B_{ij} , в соответствии с формулой:

$$g_{ij} = \min \overline{M}^{(ij)}.$$

Шаг 2 (анализ матрицы G).

2.1. Определить $G_{\min} = \min G$.

2.2. Вычислить количество k_{min} элементов в матрице G , где достигается G_{min} .

2.3. Если $(k_{min} = 2) \& (G_{min} \in [T_{min}^{(q)}, T_{max}^{(q)}])$, где $T_{min}^{(q)}, T_{max}^{(q)}$ – соответственно минимальное и максимальное значения возможного отличия $q \times q$ –блока клона от соответствующего блока прообраза,

то найти месторасположение в G двух ее элементов, равных G_{min} .

Пусть это элементы g_{i_1, j_1} и g_{i_2, j_2} , которым соответствуют блоки B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} ;

иначе найденные минимумы не отвечают клону и прообразу и далее не рассматриваются, переход на шаг 2.5.

2.4. (Проверка блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2}).

Если $B_{i_1, j_1} \cap B_{i_2, j_2} \neq \emptyset$,

то эти блоки не являются блоками клона/прообраза и далее не рассматриваются,

иначе

если для элементов g_{i_1, j_1} и g_{i_2, j_2} существуют окрестности $U(g_{i_1, j_1})$ и

$U(g_{i_2, j_2})$ радиуса \bar{r} , в которых они являются наименьшими (строгими локальными минимумами),

то B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} – «подозрительные» блоки на то, чтобы оказаться соответствующими блоками областей клона и прообраза. Эти блоки помечаются (выделяются) определенным образом на анализируемом ЦИ;

иначе B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} не являются соответствующими блоками областей клона и прообраза.

2.5. Находится следующий по порядку минимум \bar{G}_{min} матрицы G .

Полагается: $G_{min} = \bar{G}_{min}$. Переход на шаг 2.2.

Шаг 3. (Выводы и дополнительный анализ).

Предварительные результаты выявления клонирования, выделены в ходе работы метода на результирующем ЦИ так, как оговорено на шаге 2.4, либо анализируемое ЦИ остается без изменений

Проводится дополнительный анализ матрицы G с использованием МАМБО, в результате которого делается окончательный вывод о наличии/местоположении областей клона и прообраза либо об отсутствии результатов клонирования на анализируемом ЦИ.

Выбор размера $q \times q$ – блока, при помощи которого анализируется ЦИ, может быть осуществлен с учетом специфики изображения или размеров «подозрительной» с точки зрения клонирования области.

Независимо от специфики алгоритмической реализации метода ее вычислительная сложность будет определяться количеством всевозможных пар $q \times q$ – блоков B_{ij} $n \times m$ – матрицы F ЦИ, образующих для определения их отличия $R = |B_{ij} - B_{kl}|$, т.е. равна $O((nm)^2)$ операций, а в случае $n \times n$ – матрицы F – $O(n^4)$, что считается приемлемым для его практического использования для экспертизы цифрового изображения любого, в том числе значительного, размера [150].

3.6 Выводы к разделу 3

В разделе 3 разработан базовый метод выявления результатов клонирования в цифровом изображении в условиях наличия/отсутствия дополнительных возмущающих воздействий на основе теоретического базиса, сформированного в разделе 2.

В ходе разработки получены следующие результаты:

1. Определены возмущающие воздействия и их возможные параметры, которые используются при постобработке ЦИ после клонирования, сохраняющие его надежность восприятия. Обосновано, что основным возмущающим воздействием является сжатие ЦИ с потерями;

2. Определены количественные показатели отличия между блоками клона и его прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, в том числе, комплексных, что дало возможность определения соответствующих пороговых значений для упомянутых количественных показателей, которые используются при разработке метода деления отрезка пополам анализа матрицы минимальных блоковых отличий ЦИ;
3. Разработан метод анализа матрицы минимальных блоковых отличий ЦИ при помощи сечений определяемой ею поверхности, позволяющий уточнить наличие/местоположение клона/прообраза;
4. Проведено уточнение формального условия для соответствующих блоков клона и прообраза, в ходе которого обосновано, что в случае, когда для постобработки ЦИ используются значительные возмущающие воздействия, а также тогда, когда области клона и прообраза являются частями ЦИ с незначительными перепадами значений яркости, соответствующим блокам этих областей отвечают локальные минимумы матрицы минимальных блоковых отличий;
5. Подтверждена состоятельность полученного уточнения формального условия принадлежности блоков ЦИ областям клона и прообраза в условиях значительных возмущающих воздействий, в частности сжатия с потерями, при этом для сжатия изображения использовались стандарты Jpeg, Jpeg2000 и малоранговые аппроксимации матрицы (блоков матрицы) цифрового изображения;
6. Разработан базовый метод выявления результатов клонирования в цифровом изображении, состоятельный в условиях (значительных) возмущающих воздействий, независимо от их конкретного вида и реализации, в том числе, геометрических, использованных при постобработке изображения;
7. Показано, что вычислительная сложность любой алгоритмической реализации разработанного базового метода выявления результатов клонирования в условиях постобработки ЦИ с $n \times n$ -матрицей F определяется как $\underline{O}(n^4)$, что считается приемлемым для ее практического

использования для экспертизы ЦИ любого, в том числе значительного размера.

Таким образом, во втором разделе частично решены задачи 4 и 5 из перечня задач диссертационного исследования.

Материалы раздела нашли свое отражение в работах [139,144,145,147,149].

РАЗДЕЛ 4

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛОНИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ПОСТОБРАБОТКИ

Целью раздела является анализ и оценка, в том числе сравнительная, эффективности алгоритмической реализации разработанного базового метода выявления результатов клонирования в условиях наличия/отсутствия дополнительных возмущающих воздействий с его последующим усовершенствованием и анализом.

При тестировании алгоритмической реализации любого из рассматриваемых в работе методов эффективность оценивалась двумя количественными показателями *TPR* (true positive rate) и *FPR* (false positive rate) [115]:

$$TPR = \frac{\text{кол - во фальсифицир - х ЦИ, определенных как фальсифицированные}}{\text{общее число рассмотренных фальсифицированных ЦИ}} \times 100\%,$$

$$FPR = \frac{\text{кол - во оригинальных ЦИ, определенных как фальсифицированные}}{\text{общее количество рассмотренных оригинальных ЦИ}} \times 100\% .$$

Далее полагается, что фальсифицированное ЦИ выявлено, если в нем обнаружено наличие области клона и прообраза, причем эти области имеют непустое пересечение с реальными областями клона и прообраза. Оригинальное ЦИ определяется как фальсифицированное, если в нем фиксируется наличие областей клона, прообраза.

Для достижения поставленной цели в разделе решаются следующие задачи:

1. Оценить эффективность разработанного БМКВВ в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий, в том числе, по сравнению с современными аналогами;
2. Исследовать характерные особенности окрестностей элементов ММБО, определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы;
3. Проанализировать попиксельно отличия блоков матрицы ЦИ, определяющих локальные минимумы ММБО;
4. Разработать усовершенствование БМКВВ с целью повышения его эффективности и независимости от особенностей анализируемого ЦИ;
5. Оценить эффективность разработанного усовершенствованного метода в условиях дополнительных возмущающих воздействий, в том числе, по сравнению с современными аналогами.

4.1 Анализ эффективности разработанного базового метода выявления результатов клонирования в условиях отсутствия постобработки изображения

При алгоритмической реализации БМКВВ для его тестирования выбирались блоки B_{ij} матрицы F ЦИ основного вида (рис.2.9). Размер $q \times q$ – блока выбирался из множества $\{16,24,32\}$.

Вычислительный эксперимент проводился с использованием ЦИ из ЭМ (схема RGB), размер которых составлял 512×512 пикселей, которые подвергались клонированию с последующим сохранением в формате без потерь (Tif).

Единственным ограничением на работу метода KL , как упоминалось выше, является принадлежность области, не принадлежащей пересечению клона и прообраза, хотя бы одного $q \times q$ – блока, для которого $q \geq 16$. Это говорит о принципиальной возможности эффективной работы метода при выявлении областей клона/прообраза малых относительных размеров. В силу этого везде в работе при проведении вычислительных экспериментов области

клона и прообраза составляют $\ll 0.85\%$ ЦИ: как правило, от 0.098% до 0.39% ЦИ, хотя использовались области клона, размер которых был меньше 0.098% изображения, что особо указывается ниже.

Анализировалась матрица одной цветовой составляющей ЦИ, которая выбиралась случайным образом. Анализ проводился с использованием 16×16 – блоков. Локальный минимум соответствующей ММБО G в условиях отсутствия дополнительных ВВ на ЦИ, претерпевшее клонирование, совпадал с глобальным и имел нулевое значение ($T_{\min}^{(q)} = T_{\max}^{(q)} = 0$), что исключало необходимость проведения дополнительного анализа матрицы G с использованием МАМБО. Показатель TPR в этих условиях дал максимально возможное значение: TPR=100%.

Для определения значения показателя FPR оригинальные ЦИ из ЭМ анализировались с использованием $q \times q$ – блоков для $q \in \{16, 24, 32\}$. Результаты эксперимента представлены в табл.4.1.

Таблица 4.1 – Оценка показателя FPR для алгоритмической реализации KL_B

Размер $q \times q$ – блока	$q = 16$	$q = 24$	$q = 32$
FPR (%)	11.0	7.5	3.0

Для сравнительного анализа здесь и далее эффективности алгоритмических реализаций разработанного базового метода KL_B , а также его усовершенствованной модификации KL , предложенной ниже, были выбраны следующие современные аналоги: Fridrich (2003) [83], Lowe (2004) [101], Popescu and Farid (2004) [57], Lin et al. (2009) [64], Bayram et al. (2009) [94], Pan and Lyu (2010) [48], Pan Xunyu (2010) [106], Liu et al. (2011) [151], Amerini (2011) [114], Huang et al. (2011) [90]; Amerini (2013) [115], Mishra (2013) [152], Hashmi et al. (2014) [125], Diao et al. (2015) [153], Deoli et al. (2016) [88]; Mahmood et al. (2016) [154], Diao et al. (2016) [34].

Результаты сравнения показателей TPR и FPR алгоритмической реализации БМКВВ в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий представлены в табл.4.2, где для KL_B намеренно приведен наихудший результат (табл.4.1).

Таблица 4.2. – Результаты сравнительного анализа эффективности разработанного базового метода KL_B и современных аналогов в условиях отсутствия постобработки клонированного ЦИ

Метод	TRP (%)	FRP (%)
Fridrich (2003)	89	84
Lowe (2004)	74	4
Popescu and Farid (2004)	87	86
Pan and Lyu (2010)	83	8.8
Pan Xunyu (2010)	89.96	1.25
Amerini(2011)	100	8
Amerini(2013)	94.9	9.2
Mishra (2013)	73.6	3.6
Hashmi et al. (2014)	80	10
Diaa et al. (2015)	92	8
Diaa et al. (2016)	96	2.9
KL_B	100	11

Необходимо отметить, что в современных условиях при решении задачи обнаружения фальсифицированных ЦИ основное внимание уделяется максимизации показателя TPR: главным является не пропустить имеющее место неавторизованное нарушение целостности изображения. Предложенный БМКВВ в условиях отсутствия постобработки ЦИ, как видно из полученных результатов, имеет максимально возможное значение для TPR. Однако алгоритмическая реализация KL_B уступает некоторым современным аналогам

по количеству ложных тревог (показатель FPR), что является нежелательным и говорит о необходимости его усовершенствования.

4.2. Усовершенствование базового метода обнаружения результатов клонирования в цифровом изображении в условиях дополнительных возмущающих воздействий

Использование в качестве единственного признака клона/прообраза наличие совпадающих значений локальных минимумов соответствующей изображению ММБО G , который (признак) в подавляющем большинстве случаев оказывается достаточным для выявления клона и прообраза (при их наличии), приводит к значительному количеству ложных тревог (FPR) алгоритмической реализации для оригинальных ЦИ. Это происходит в случае, когда на ЦИ присутствуют области (так называемые «фоновые»), в пределах которых изменение яркости пикселей очень незначительно. Блоки основного вида в таких частях оригинального ЦИ сами по себе мало отличаются друг от друга в смысле (2.10)–(2.11) (на рис.2.3(б) такая область выделена замкнутой кривой) и могут вызвать ошибочное определение их как клона и прообраза.

В случае, когда в пределах такого изображения происходит клонирование, но не в «фоновой» области (рис.2.3(б)), возможна ситуация, когда блоки «фоновой» оригинальной области обеспечат совпадающие локальные минимумы для интерполирующего элемента G сплайна, что при выделении областей клона/прообраза приведет к ухудшению их локализации в пределах ЦИ, к появлению так называемых «лжеблоков» (оригинальные блоки выявлены как клонированные) [75–77].

В связи с этим БМКВВ нуждается в усовершенствовании для обеспечения его эффективной работы независимо от специфики анализируемого ЦИ. Для этого необходимо исследовать характерные особенности окрестностей элементов матрицы G , определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы, для случая оригинального ЦИ и изображения, для которого соответствующие блоки матрицы принадлежат областям клона и прообраза;

проанализировать попиксельно отличия соответствующих блоков клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий и блоков оригинального ЦИ, определяющих локальные минимумы матрицы G .

4.2.1 Определение характерных особенностей окрестностей совпадающих по значению локальных минимумов матрицы G и попиксельных отличий блоков цифрового изображения. Рассмотрим более подробно окрестности тех элементов матрицы G , которые определяют совпадающие по значению ее локальные минимумы, отвечающие соответствующим блокам клона B_{ij} и прообраза B_{kl} . Эти блоки определяют равные по значению локальные минимумы матрицы G в элементах g_{ij} и g_{kl} : вокруг них существуют окрестности из элементов G , где g_{ij} и g_{kl} – самые малые по значению. В соответствии с тем, как происходит формирование матрицы G , очевидно, что в подавляющем большинстве случаев наименьшим отличием для блока $B_{i-1,j}$ в смысле (2.10)–(2.11) будет обладать блок $B_{k-1,l}$, для блока $B_{i,j-1}$ – блок $B_{k,l-1}$ и т.д., т.е. от блока $B_{i-p,j-u}$ будет менее всего отличаться блок $B_{k-p,l-u}$, где $p, u \in \{0,1\}$, и наоборот. Действительно, блоки $B_{i-p,j-u} / B_{k-p,l-u}$ отличаются от блока B_{ij} / B_{kl} лишь одним столбцом или/и строкой. И если отличие B_{ij} от B_{kl} минимально, то практически очевидным будет минимальным отличие и между соответствующими блоками, полученными из них одинаковым (влево, вправо, вверх, вниз) сдвигом в пределах матрицы на 1 пиксель, т.е. именно эти блоки и определяют значения соответствующих элементов G . С учетом (2.13) в подавляющем большинстве случаев будет иметь место соотношение:

$$g_{i-p,j-u} = g_{k-p,l-u}, \quad p, u \in \{0,1\}. \quad (4.1)$$

Соотношение (4.1) означает, что в окрестностях элементов g_{ij} и g_{kl} радиуса $r=1$ в матрице G значения соответствующих элементов будут одинаковыми, если B_{ij} и B_{kl} – блоки клона и прообраза.

Предположим теперь, что B_{ij} и B_{kl} – блоки оригинальной области ЦИ, определяющие совпадающие по значению локальные минимумы $G: g_{ij} = g_{kl}$. Поскольку эти блоки не являются блоками клона и прообраза, то несмотря на их малое отличие в смысле (2.10)–(2.11), где учитывается целиком сумма абсолютных отличий по всем пикселям блоков, можно предположить, что максимальное попиксельное отличие в таких блоках будет превосходить аналогичный параметр для соответствующих блоков клона и прообраза, где отличия в соответствующих пикселях сравнимы между собой. Кроме того, естественно ожидаемым будет для блоков оригинального ЦИ и то, что величина попиксельного отклонения в большинстве соответствующих пикселей пары блоков будет больше, чем для блоков клона и прообраза, для которых до постобработки эти отклонения были нулевыми.

Для практического подтверждения выдвинутой гипотезы был проведен вычислительный эксперимент, в котором были задействованы 400 ЦИ (как оригинальных, так и претерпевших клонирование с последующей постобработкой), при этом 200 оригинальных изображений брались из ЭМ. Далее сформированное множество ЦИ называется M400.

В ходе эксперимента анализировались гистограммы значений матрицы R (2.11) блоков, определяющих пары совпадающих по значению локальных минимумов матрицы G ЦИ. Типичный вид таких гистограмм для блоков размера 32×32 представлен на рис.4.1. Как видно, гистограмма для блоков клона и прообраза отличается от возможных вариантов гистограмм для блоков оригинальных областей ЦИ. Как и предполагалось, максимальное попиксельное отличие в первом случае меньше, чем во втором. Кроме того, для блоков оригинального ЦИ часто наблюдался вариант, когда гистограмма имела глобальный максимум в аргументе, отличном от «условного нуля»

(соответствующий столбец гистограммы не включал в себя нулевые значения элементов R) (рис.4.1(в)), что является нетипичным для блоков клона и прообраза (рис.4.1(а)).

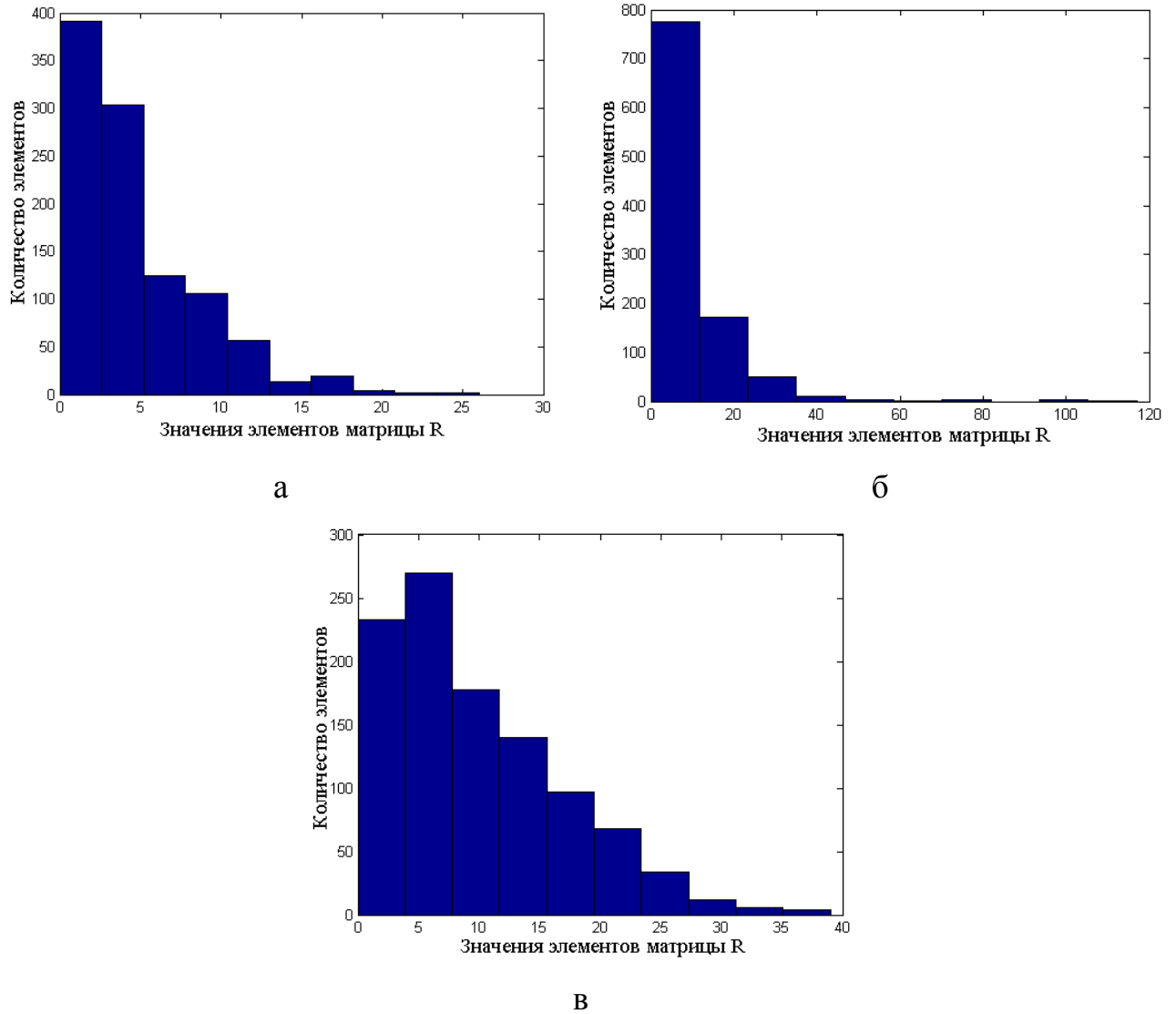


Рис.4.1. Пример типичных гистограмм значений элементов матрицы R для пар блоков, определяющих совпадающие по значению локальные минимумы G : а – соответствующие блоки КП; б, в – блоки, не принадлежащие КП

Количественно результаты эксперимента выглядели следующим образом. Для соответствующих блоков клона и прообраза максимальное значение элементов в матрице R , как правило, не превосходило 40 (среднее значение максимального элемента R по всем ЦИ из М400 составило 29, наименьшее –

13, наибольшее – 46), при этом максимум гистограмма достигала в «условном нуле» более чем в 95% ЦИ. Для оригинальных ЦИ из М400 картина значительно отличалась: среднее значение максимального элемента R по всем ЦИ составило 71, а аргумент максимума гистограммы превосходил «условный ноль» для 37% ЦИ.

Таким образом, если B_{ij} и B_{kl} – блоки оригинального ЦИ, определяющие совпадающие по значению локальные минимумы матрицы G , то в силу показанного выше, сдвиг каждого из них на один пиксель с большой долей вероятности приведет к тому, что блоки $B_{i-p,j-u}$, $B_{k-p,l-u}$, потеряв «старые» относительно B_{ij} и B_{kl} столбцы/строки (значения элементов которых возможно отличались между собой значительно) и приобретя «новые», уже не будут иметь минимальные отличия друг от друга, т.е. элемент $g_{i-p,j-u}$ в матрице G будет сформирован не за счет блока $B_{k-p,l-u}$, а элемент $g_{k-p,l-u}$ – не за счет блока $B_{i-p,j-u}$. Это приведет к тому, что с большой вероятностью окрестности радиуса $r=1$ элементов g_{ij} , g_{kl} в матрице G будут отличаться друг от друга (хотя бы в одном элементе). Это отличие рассматривается как показатель оригинальности блоков, определяющих совпадающие по значению локальные минимумы G [155–157].

Можно предположить, что радиус r совпадающих по соответствующим значениям окрестностей элементов g_{ij} и g_{kl} для блоков B_{ij} и B_{kl} клона и прообраза может оказаться больше 1, причем этот радиус будет тем больше, чем больше размер $q \times q$ – блока клона/прообраза.

Для проверки такой гипотезы был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого оригинальные ЦИ из М400 подвергались операции клонирования (клон и прообраз представляли из себя области, где часть, не принадлежащая их пересечению, содержала хотя бы один $q \times q$ – блок, где $q \in \{16, 24, 32\}$) с последующими возмущающими воздействиями, в качестве которых использовались наложение различных шумов, сжатие с потерями с

различными коэффициентами качества QF . Для каждого такого ЦИ строилась матрица G , по которой устанавливалось месторасположение блоков B_{ij} и B_{kl} клона и прообраза; для элементов g_{ij} и g_{kl} в матрице G определялись совпадающие по значениям окрестности, для которых находился радиус r . Результаты эксперимента, полностью подтверждающие выдвинутую гипотезу, представлены в табл.4.3.

Таблица 4.3. Размер совпадающих по соответствующим значениям окрестностей элементов матрицы G , отвечающих соответствующим $q \times q$ -блокам клона и прообраза

Размер $q \times q$ -блока	$q = 32$	$q = 24$	$q = 16$
Среднее значение r	7.1	3.67	1.89
Максимальное значение r	14	7	4
Минимальное значение r	1	1	1

Аналогичный эксперимент был проведен для оригинальных ЦИ: для них строилась матрица G , для которой определялись элементы, дающие пары совпадающих по значению ее локальных минимумов. Если такие элементы в G существовали, то находился радиус совпадающих по значениям окрестностей этих элементов. Результаты представлены в табл.4.4.

Таблица 4.4 – Размер совпадающих по значениям окрестностей элементов матрицы G , построенной для оригинальных ЦИ, отвечающих совпадающим по значению локальным минимумам,

Размер $q \times q$ -блока	$q = 32$	$q = 24$	$q = 16$
Среднее значение r	0.15	0.24	0.35
Максимальное значение r	1	1	1
Минимальное значение r	0	0	0

Таким образом, проведенный вычислительный эксперимент практически подтвердил выдвинутую выше гипотезу: наличие в матрице G совпадающих по значениям окрестностей ненулевого радиуса элементов g_{ij} и g_{kl} , определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы, в подавляющем большинстве случаев присуще блокам клона и прообраза, и практически не свойственно для блоков оригинальных ЦИ.

4.2.2. Усовершенствованный метод выявления результатов клонирования в изображении в условиях его постобработки. С учетом проведенного анализа характерных особенностей окрестностей совпадающих по значению локальных минимумов ММБО G и попиксельных отличий блоков цифрового изображения в случаях, когда эти блоки принадлежат/не принадлежат областям клона и прообраза, шаг 2 усовершенствованного метода KL выявления результатов клонирования в ЦИ в условиях дополнительных возмущающих воздействий, который отличает его от метода KL_B , будет выглядеть следующим образом.

Шаг 2 (анализ матрицы минимальных блоковых отличий G).

2.1. Определить $G_{\min} = \min G$.

2.2. Вычислить количество k_{\min} элементов в матрице G , где достигается G_{\min} .

2.3. Если $(k_{\min} = 2) \& (G_{\min} \in [T_{\min}^{(q)}, T_{\max}^{(q)}])$, где $T_{\min}^{(q)}, T_{\max}^{(q)}$ – соответственно минимальное и максимальное значения возможного отличия $q \times q$ – блока клона от соответствующего блока прообраза,

то найти месторасположение в G двух ее элементов, равных G_{\min} .

Пусть это элементы g_{i_1, j_1} и g_{i_2, j_2} . Блоки B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} – «подозрительные» на то, чтобы быть соответствующими блоками областей клона и прообраза;

иначе найденные минимумы не отвечают клону и прообразу и далее не рассматриваются, переход на шаг 2.5.

2.4. (Проверка блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2}).

Если $B_{i_1, j_1} \cap B_{i_2, j_2} \neq \emptyset$,

то эти блоки не являются искомыми и далее не рассматриваются,

иначе

если для элементов g_{i_1, j_1} и g_{i_2, j_2} существуют окрестности $U(g_{i_1, j_1})$ и $U(g_{i_2, j_2})$ радиуса \bar{r} , в которых они являются наименьшими (строгими локальными минимумами),

то

2.4.1. Найти r – радиус совпадающих по значениям окрестностей элементов g_{i_1, j_1} и g_{i_2, j_2} в матрице G .

2.4.2. *Если* $r = 0$

то пара блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} не принадлежат клону/прообразу,

иначе

если $r > 1$

то пара блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} принадлежат областям клона/прообраза; эти блоки отмечаются соответствующим образом на анализируемом ЦИ (например, закрашиваются в белый цвет)

если $r = 1$

то

2.4.2.1. Построить матрицу $R = |B_{i_1, j_1} - B_{i_2, j_2}|$;

2.4.2.2. Построить гистограмму значений матрицы R . Для этой гистограммы определить аргумент t , в котором достигается ее максимум, а также M – максимальное значение R ;

если

$(M > 46)OR(t \text{ не является "условным нулем"})$

то пара блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} не принадлежит

областям клона/прообраза,

иначе пара блоков B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} принадлежит

областям клона/прообраза. Эти блоки

отмечаются соответствующим образом на

анализируемом ЦИ (например, закрашиваются

в белый цвет)

иначе B_{i_1, j_1} и B_{i_2, j_2} не являются соответствующими блоками

областей клона и прообраза.

2.5. Находится следующий по порядку минимум \bar{G}_{min} матрицы G .

Полагается: $G_{min} = \bar{G}_{min}$. Переход на шаг 2.2.

Замечание 4.1. Использование в методе KL , а также в реализующем его алгоритме $T_{min}^{(q)}, T_{max}^{(q)}$ – соответственно минимального и максимального значений возможного отличия $q \times q$ –блока клона от соответствующего блока прообраза проводится для ускорения работы алгоритма. В общем случае с целью получения конечного результата – областей клона и прообраза проверку $G_{min} \in [T_{min}^{(q)}, T_{max}^{(q)}]$ можно вообще не проводить. Блоки, не принадлежащие искомым областям, в методе KL отсекутся на шаге 2.4.

Проиллюстрируем работу усовершенствованного метода KL на примере анализа двух ЦИ, одно из которых является результатом клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий (представлено на рис.3.6(в)), а второе – оригинальное, выбрано из ЭМ. Оба изображения взяты для иллюстрации в силу того, что при их анализе алгоритмической реализацией метода KL_B возникали «лжеблоки». Блоки, определяемые в результате работы алгоритмических реализаций методов KL, KL_B как принадлежащие областям клона/прообраза, окрашиваются на ЦИ в белый цвет.

Без учета характерных особенностей окрестностей элементов матрицы G , определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы, полученных в данном подразделе, при экспертизе изображений при помощи KL_B были выявлены блоки, реально принадлежащие областям клона/прообраза, а также блоки оригинальных областей (на рис.4.2(а,в) эти блоки выделены замкнутой кривой), приводя к неточной локализации (рис.4.2(а)), либо к ошибкам второго рода (рис.4.2(в)). Использование же усовершенствованного метода KL позволило устранить здесь указанные ошибки (рис.4.2(б,г)).



а



б



в



г

Рис.4.2. Иллюстрация работы методов KL и KL_B (блоки, не принадлежащие клону/прообразу, ограничены замкнутой кривой): а – результат работы KL_B на

ЦИ, подвергнутом клонированию; б – результат работы KL ; в – результат работы KL_B на оригинальном ЦИ; г – результат работы KL на оригинальном

ЦИ

Для тестирования алгоритмической реализации метода KL был проведен вычислительный эксперимент, в котором были задействованы оригинальные ЦИ из ЭМ, $q \in \{16, 24, 32\}$.

Усовершенствование базового метода KL_B , основанное на учете установленных особенностей окрестностей элементов матрицы G , определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы, включающее в себя также анализ попиксельного отличия блоков цифрового изображения, «подозрительных» на принадлежность областям клона/прообраза, позволило уменьшить значение FPR (показатель ошибок 2-го рода) по сравнению с базовым методом. Для различных значений q величина сокращения была различной: для $q=16$ – в 2.3 раза, для $q=24$ – в 2.6 раза. Максимальный эффект был достигнут для $q=32$, где ошибки 2-го рода при использовании метода с предложенными усовершенствованиями были устранены практически полностью (табл.4.5).

Таблица 4.5 – Оценка показателя FPR для алгоритмической реализации метода KL

Размер $q \times q$ – блока	$q = 16$	$q = 24$	$q = 32$
FPR (%)	4.8	2.8	0.8

Как показывают полученные результаты, для разработанного метода KL значение показателя $FPR=4.8\%$ сравнимо со значением FPR для лучших в этом смысле современных аналогов (рис.4.3).

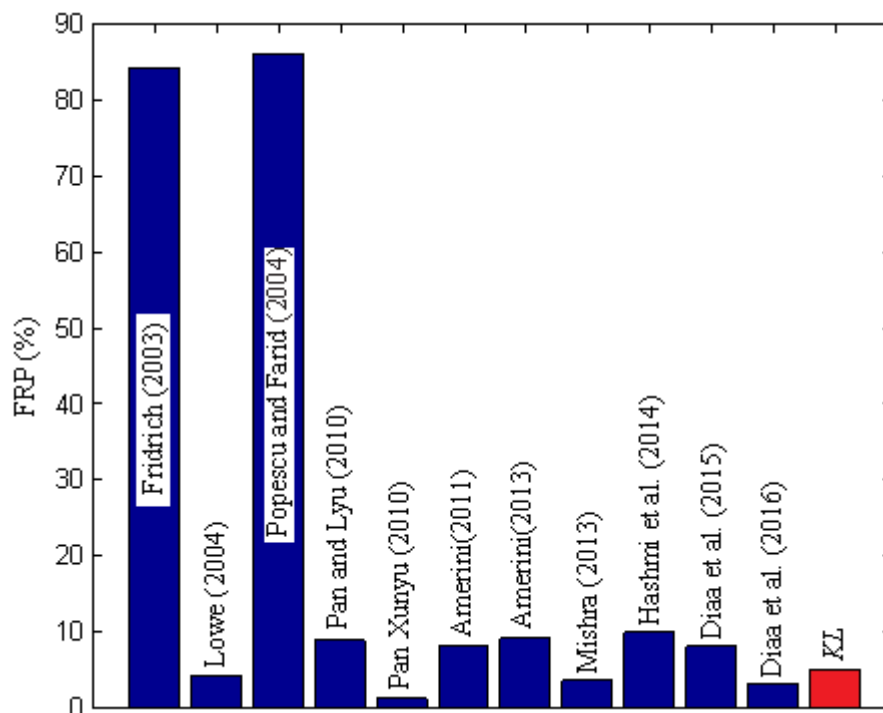


Рис.4.3. Столбцовая диаграмма для сравнительного анализа *FPR*

4.3 Анализ эффективности усовершенствованного метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении

4.3.1. Анализ эффективности алгоритмической реализации метода *KL* в условиях дополнительных возмущающих воздействий, сохраняющих надежность восприятия изображения. Возмущающие воздействия, которым подвергались ЦИ после клонирования, имея своей целью сокрытие самого факта наличия клонирования, на практике, с большой долей вероятности, не будут значительными, поскольку значительные возмущающие воздействия могут привести к возникновению на изображении артефактов, которые сами по себе привлекут внимание экспертов. Кроме того, результаты обработки ЦИ программными инструментами (размытие, фильтрация и т.д.) выявляются существующими методами тем проще, чем интенсивнее возмущающее воздействие [46], в чем нарушитель не заинтересован. В силу этого, в первую очередь, оценивается эффективность алгоритмической реализации *KL* в условиях дополнительных возмущающих воздействий, сохраняющих

надежность восприятия ЦИ (см. раздел 3). Для этого проводился вычислительный эксперимент, в котором задействовались ЦИ из ЭМ.

В ходе эксперимента оригинальные ЦИ подвергались клонированию, относительный размер области клона максимально составлял 0.4% ЦИ, после чего на изображение накладывался шум (мультипликативный или гауссовский), или оно размывалось (по Гауссу), или фильтровалось (медианным или усредняющим фильтром). После чего ЦИ сохранялось либо в формате без потерь (Tif), либо с потерями (Jpeg). При сохранении ЦИ в формат Jpeg использовались самые распространенные коэффициенты качества $QF \in \{65, 75, 85\}$. Параметры возмущающих воздействий брались с учетом необходимости сохранения надежности восприятия ЦИ после атаки ($PSNR > 37dB$) [142,143]. Размытие по Гауссу осуществлялось с использованием маски фильтра нижних частот Гаусса, формируемой при помощи функции *fspecial* (среда Matlab), одним из параметров которой, наряду с размерами маски, является δ , который задает среднеквадратическое отклонение распределения Гаусса, используемое при формировании маски фильтра. На данном этапе вычислительного эксперимента $\delta = 0.5$, что предполагается по умолчанию.

Результаты, говорящие о высокой абсолютной эффективности алгоритмической реализации разработанного метода *KL*, представлены в табл.4.6. С учетом этих результатов необходимо отметить, что эффективность выявления областей клонирования (при его наличии) практически не зависит от размера используемого при анализе $q \times q$ -блока, а также не зависит от специфики возмущающих воздействий и их комплексов, что и предполагалось при разработке теоретического базиса метода.

Таблица 4.6 – Оценка показателя TPR для алгоритмической реализации KL в условиях ВВ, сохраняющих надежность восприятия ЦИ

Вид возмущающего воздействия	Параметры возмущающего воздействия	Формат сохранения ЦИ после клонирования и дополнительного возмущения	TRP (для Jpeg – минимальное) в случае, когда для анализа ЦИ используются $q \times q$ – блоки (%)		
			$q = 32$	$q = 24$	$q = 16$
Гауссовский шум	D=0.0001	Tif	99.8	99.6	99.8
		Jpeg	99.2	99.4	99.4
	D=0.0005	Tif	98.8	98.8	98.6
		Jpeg	97.6	98.0	97.8
Мульти-пликативный шум	D=0.0005	Tif	99.2	99.4	99.2
		Jpeg	97.4	97.8	97.4
	D=0.001	Tif	98.2	98.0	97.4
		Jpeg	97.0	97.0	97.0
Размытие по Гауссу с маской $r \times r$	$r = 3$	Tif	99.2	99.0	99.4
		Jpeg	98.2	98.0	98.2
	$r = 5$	Tif	98.2	98	98.4
		Jpeg	97.8	97.2	97.0
Фильтрация	Усредняющий фильтр размера 3×3	Tif	99.2	99.0	99.4
		Jpeg	98.2	97.4	97.2
	Медианный фильтр размера 3×3	Tif	98.2	98.0	98.0
		Jpeg	97.0	97.0	97.0

Продемонстрируем работу метода на примере ЦИ «Lenna» (512*512 пикселей), представленного на рис. 2.4(б), которое после выполнения операции

клонирования (область клонирования составила 0.24% ЦИ) было подвергнуто дополнительным возмущающим воздействиям путем наложения гауссовского шума с нулевым матожиданием ($D=0.0001$) с последующим сохранением в формат Jpeg с коэффициентом качества $QF=75$.

Результаты работы алгоритмической реализации метода KL для различных значений q (для полноты эксперимента здесь использовалось также значение $q=8$) при анализе фальсифицированного ЦИ (рис.2.4(б)), полученного на основе изображения «Lenna», представлены на рис.4.4. Для большей наглядности на рис.4.4 продемонстрирована лишь часть ЦИ, выделенная на рис.2.4(б), содержащая клон и прообраз, и соответствующие ей части изображений, явившихся результатами работы алгоритмической реализации.

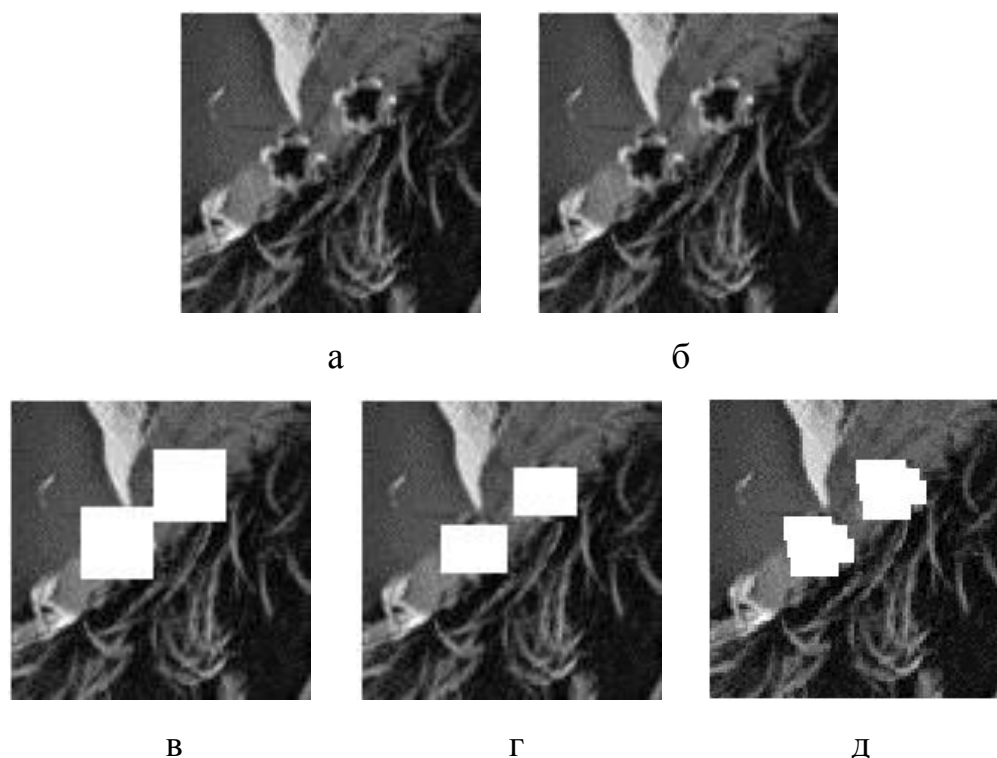


Рис.4.4. Результаты работы алгоритмической реализации метода KL при различном размере q используемых при анализе блоков: а – часть ЦИ «Lenna», подвергшегося после клонирования наложению шума и сжатию с потерями, содержащая области клона и прообраза; б – результат работы разработанного метода для $q=32$; в – $q=24$; г – $q=16$; д – $q=8$

Как видно (рис.4.4), наиболее точно область клона/прообраза локализована в случае $q = 8$, однако хотя такой размер блока и был использован для иллюстративного примера, он не является подходящим для алгоритмической реализации разработанного метода, поскольку может привести к «ложным тревогам» (см. табл. 2.1). Использование в процессе анализа 32×32 –блоков закономерно не выявило областей клона/прообраза, поскольку область клона/прообраза в рассматриваемом примере значительно меньше 32×32 –блока.

Для иллюстрации всесторонней состоятельности алгоритмической реализации KL продемонстрируем его работу в случае области клона малых относительных размеров (область клона составляет менее 0.06% цифрового изображения (для сравнения в [115] – 1.12% изображения)), когда целью клонирования является сокрытие объекта, присутствующего на оригинальном изображении, при этом прообраз является частью «фоновой» области изображения, и само клонирование происходит в пределах этой области (в условиях комплексного дополнительного возмущающего воздействия). Результаты представлены на рис.4.5. Необходимо отметить, что и в этом случае экспертная оценка свойств G является достаточной для установления факта клонирования (рис.4.5(в)).

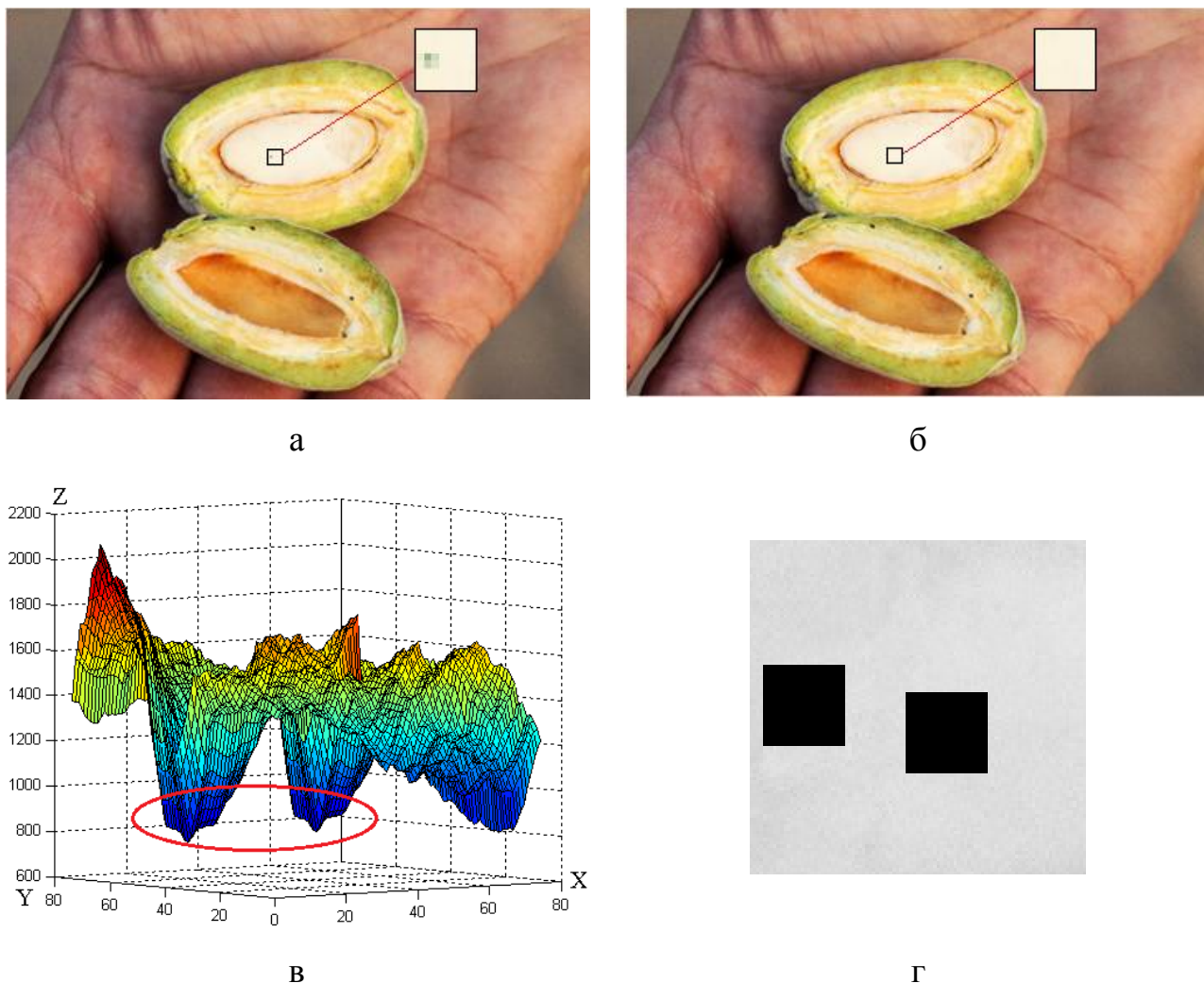


Рис. 4.5. Иллюстрация работы алгоритмической реализации метода KL в случае малых относительных размеров клона: а – оригинальное ЦИ; б – ЦИ, являющееся результатом клонирования с последующим размытием по Гауссу с $r = 2$ и сохранением в формате Jpeg с $QF = 75$; в – часть графика функции, интерполирующей элементы матрицы G , отвечающей части ЦИ, выделенной на рис.4.5(б); г – результат работы KL (для наглядности приведена часть анализируемого ЦИ, выделенной на рис.4.5(б), где области КП окрашены в черный цвет)

4.3.2. Анализ эффективности алгоритмической реализации метода KL в условиях значительных дополнительных возмущающих воздействий. В разделе 2 теоретически показано, что использование для выявления результатов клонирования условия (2.14) дает возможность для эффективной работы

разработанному на его основе методу в условиях значительных дополнительных возмущающих воздействий (в том числе, приводящих к нарушению надежности восприятия результирующего ЦИ). Проверим это на практике.

С учетом значимости атаки сжатием в свете решения поставленной задачи алгоритмическая реализация *KL* тестировалась в условиях малых значений коэффициента качества *QF* ($QF \leq 50$) при сохранении ЦИ с потерями (Jpeg) после клонирования. Анализ ЦИ проводился с использованием $q \times q$ –блоков, при этом $q \in \{16, 24, 32\}$. Результаты эксперимента представлены в табл.4.7, иллюстрация которого для одного ЦИ, для которого областью клона служил $q \times q$ –блок, представлена на рис.4.6, 4.7, 4.8.

Таблица 4.7 – Значение TPR для алгоритмической реализации *KL* в условиях сохранения ЦИ после клонирования в формате Jpeg с различными коэффициентами качества *QF* (%)

Размер блока	<i>QF</i>						
	5	20	25	35	40	45	50
32×32	70	92	93	93.4	94.4	95.6	95.6
24×24	69.2	92	92	93.4	93.4	95.8	95.8
16×16	68.8	92.2	93.4	93.6	95	95	95.4

Полученные результаты практически подтверждают выводы об эффективности разработанного метода выявления результатов клонирования в цифровом изображении в условиях его значительного сжатия с потерями, сделанные в п.3.4 раздела 3, а также состоятельность теоретического подхода, на основе которого разработан метод *KL*, в рассмотренных условиях.

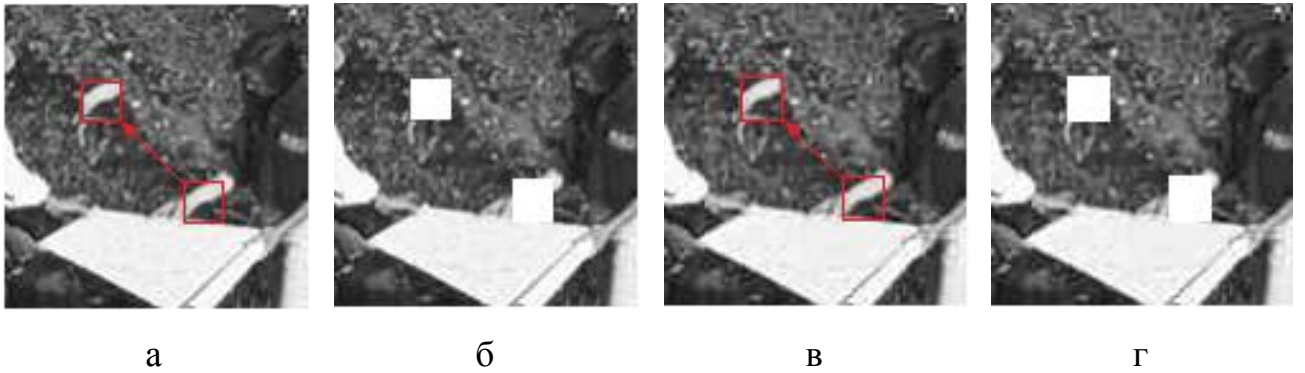


Рис.4.6. Иллюстрация результатов анализа ЦИ при $q = 16$: а, в – ЦИ, подвергнутое клонированию и сохраненное в Jpeg с QF=50, 25 соответственно; б, г – результат работы *KL* в условиях QF=50, 25 соответственно

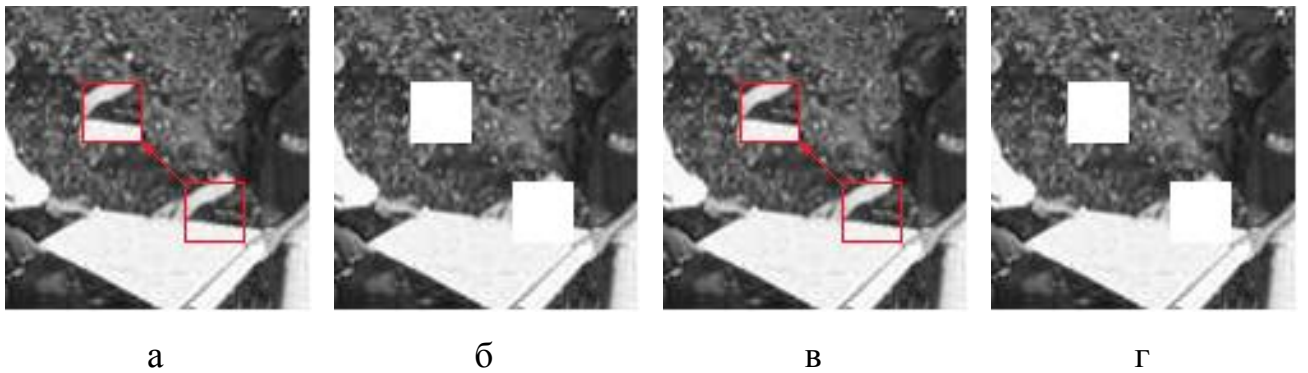


Рис.4.7. Иллюстрация результатов анализа ЦИ при $q = 24$: а, в – ЦИ, подвергнутое клонированию и сохраненное в Jpeg с QF=50, 25 соответственно; б, г – результат работы *KL* в условиях QF=50, 25 соответственно

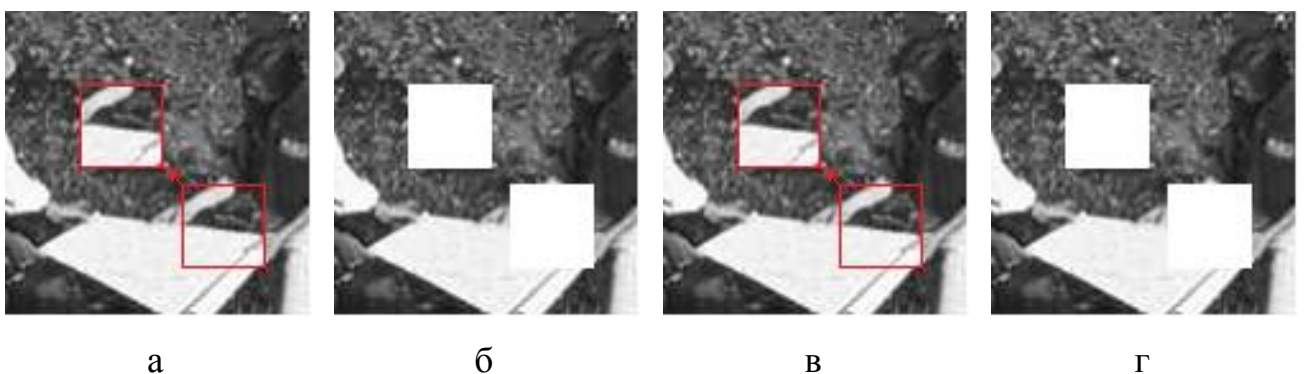


Рис.4.8. Иллюстрация результатов анализа ЦИ при $q = 32$: а, в – ЦИ, подвергнутое клонированию и сохраненное в Jpeg с QF=50, 25 соответственно; б, г – результат работы *KL* в условиях QF=50, 25 соответственно

Одним из наиболее часто используемых для маскировки результатов клонирования дополнительных возмущающих воздействий, в том числе значительных, является наложение на ЦИ гауссовского шума. Оценим количественно эффективность алгоритмической реализации KL в условиях значительных возмущающих воздействий – наложения гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием с малыми значениями SNR ($SNR \leq 25dB$). Анализ ЦИ проводился с использованием $q \times q$ – блоков, при этом $q \in \{16, 24, 32\}$. После осуществления клонирования и наложения шума ЦИ сохранялись в формате без потерь (Tif). Результаты эксперимента, подтверждающие высокую эффективность KL в упомянутых выше условиях значительных ВВ, представлены в табл.4.8.

Таблица 4.8 – Значение TPR (%) для алгоритмической реализации метода KL в условиях наложения на ЦИ после клонирования гауссовского шума, приводящего к искажению ЦИ, выражающемуся различными значениями SNR (dB)

Размер блока	SNR (dB)				
	5	10	15	20	25
32×32	67.8	94.4	96.2	98.6	98.6
24×24	67.6	94.4	96.6	98.6	99.0
16×16	68.0	94.4	96.4	98.6	98.8

Для иллюстрации состоятельности теоретического подхода в рассматриваемых условиях, положенного в основу метода KL , на рис.4.9 приведены графики функций, интерполирующих элементы соответствующих матриц минимальных блоковых отличий, построенных для цифровых изображений, претерпевших клонирование с последующим наложением гауссовского шума с $SNR = 5 dB$, приводящего к значительному искажению изображения – потере его надежности восприятия. Однако очевидным является

наличие характерных областей на графиках, говорящих о наличии результатов клонирования и указывающих на местоположение блоков клона и прообраза на ЦИ.

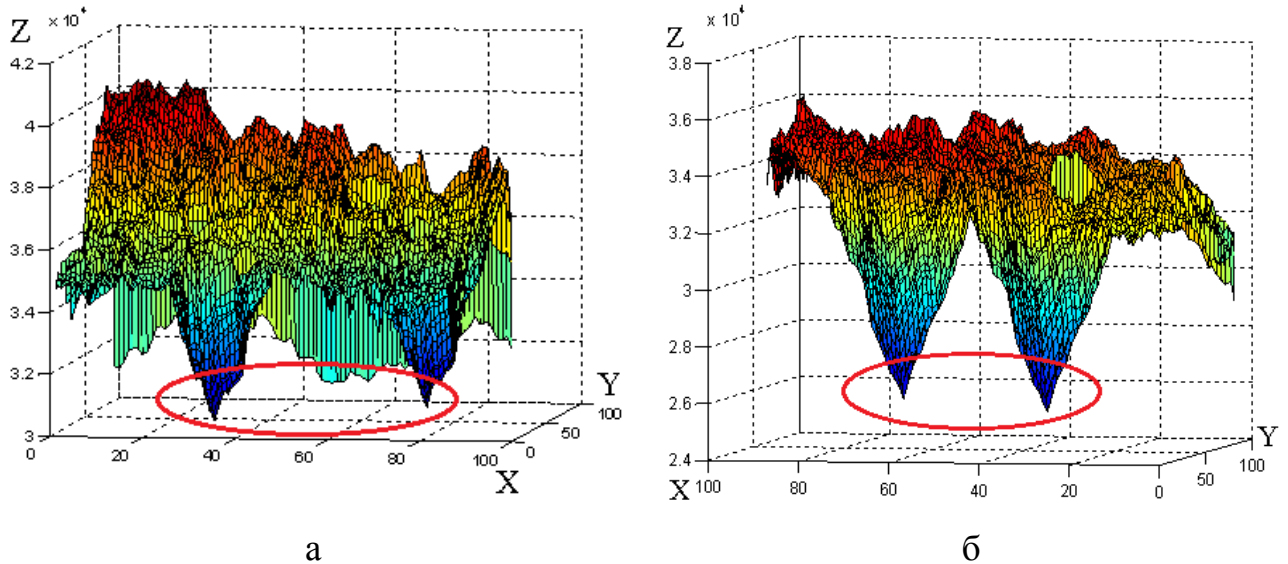


Рис. 4.9. Графики функции, интерполирующей элементы матрицы G для ЦИ, претерпевших клонирование с последующим наложением гауссовского шума с $SNR=5dB$ (области, отвечающие клону и прообразу, выделены замкнутой кривой)

Как уже упоминалось выше, на практике возмущающие воздействия для маскировки клонирования часто будут носить комплексный характер, обязательной составной частью такого комплекса будет сжатие ЦИ с потерями. Проверим эффективность KL в условиях такого комплексного возмущения, первым шагом в котором будет наложение гауссовского шума с малым значением $SNR \leq 25 dB$, а вторым – сохранение ЦИ в формате Jpeg с $QF = 75$. Результаты представлены в табл.4.9.

Как видно из полученных результатов, алгоритмическая реализация метода KL остается эффективной даже в условиях значительных комплексных возмущающих воздействий. Иллюстрацией этому являются результаты, приведенные на рис. 4.10, 4.11 для ЦИ «Lenna», где возмущающие воздействия

настолько значительны, что приводят к явному нарушению надежности восприятия цифрового изображения (особенно для ЦИ на рис. 4.11 (а,б)).

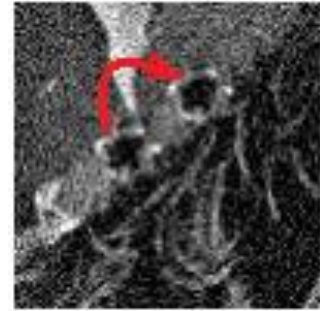
Таблица 4.9 – Значение TPR (%) для алгоритмической реализации метода *KL* в условиях наложения на цифровое изображение после клонирования гауссовского шума, приводящего к искажению изображения, выражающемуся различными значениями *SNR* (dB), с последующим сохранением в формате Jpeg с $QF = 75$

Размер блока	<i>SNR</i> (dB)				
	5	10	15	20	25
32×32	66.8	93.2	95.6	97.6	98.0
24×24	66.6	93.2	95.2	96.6	97.8
16×16	67.0	93.2	95.6	97.8	97.8

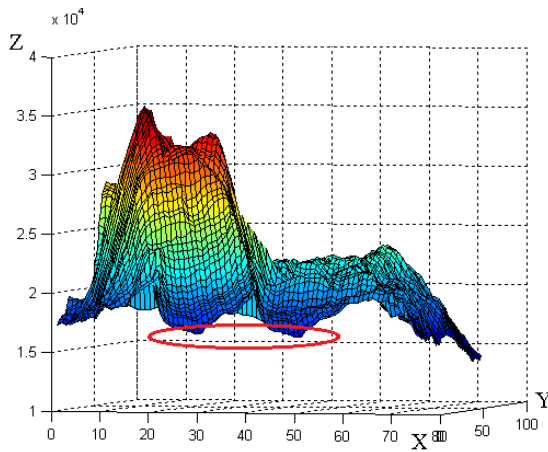
Как проиллюстрировано на рис. 4.10, 4.11, при изменении силы возмущающего воздействия матрица *G* и ее характерные для клона и прообраза области принципиально не меняются (сравн. рис.4.10(в) и 4.11(в), 4.10(д) и 4.11(д)), что приводит к сравнимым результатам работы алгоритмической реализации метода *KL* независимо от силы дополнительного возмущающего воздействия, что и ожидалось при формировании теоретического базиса разработанного метода.



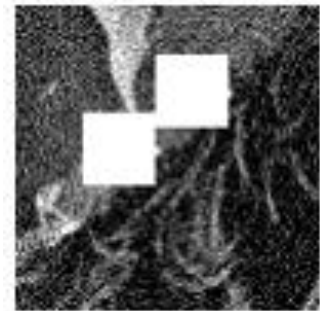
а



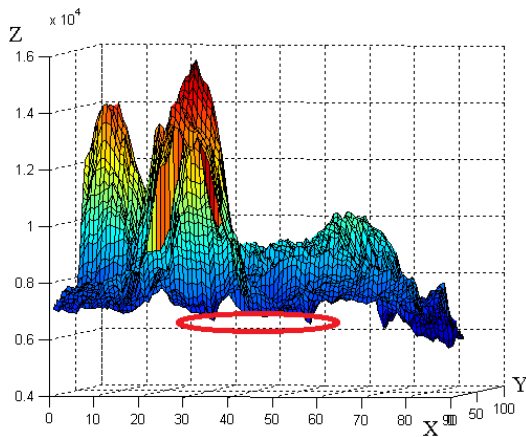
б



в



г



д



е

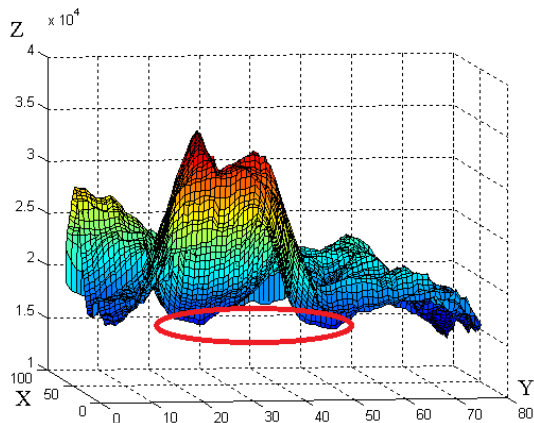
Рис.4.10. Иллюстрация работы KL в условиях значительных ВВ: а – ЦИ, претерпевшее клонирование с последующим наложением гауссовского шума ($SNR=4.7dB$) и сохранения в Jpeg с $QF=75$; б – выделенная часть ЦИ ($100*100$ пикселей), содержащая области КП; в, г – поверхность, отвечающая G и результат работы KL в случае анализа $24*24$ –блоками; д, е – поверхность, отвечающая G и результат работы KL в случае анализа $16*16$ –блоками



а



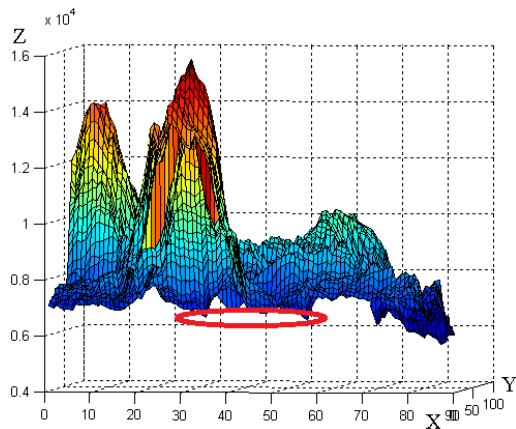
б



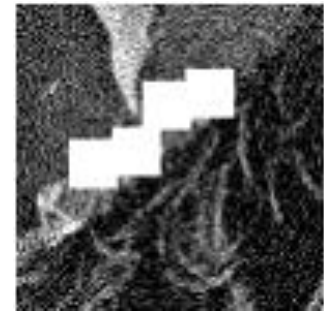
в



г



д



е

Рис.4.11. Иллюстрация работы KL в условиях значительных ВВ: а – ЦИ, претерпевшее клонирование с последующим наложением гауссовского шума ($SNR=3.5dB$) и сохранения в Jpeg с $QF=75$; б – выделенная часть ЦИ ($100*100$ пикселей), содержащая КП; в, г – поверхность, отвечающая G и результат работы KL в случае анализа 24×24 –блоками; д, е – поверхность, отвечающая G и результат работы KL в случае анализа 16×16 –блоками

4.3.3. Сравнительный анализ эффективности алгоритмической реализации разработанного метода выявления клонирования в условиях постобработки изображения с современными аналогами. Проведем сравнительный анализ алгоритмической реализации разработанного метода *KL* с современными аналогами в условиях дополнительных, в том числе значительных, возмущающих воздействий. Рассмотрим наиболее часто используемые при маскировке результатов клонирования ВВ: сжатие с потерями, наложение шума, размытие изображения.

Результаты сравнительного анализа разработанного метода с современными аналогами в условиях сжатия с потерями (сохранения клонированного ЦИ в формате Jpeg с различными коэффициентами качества QF) представлены в табл.4.10. Для разработанного метода *KL* в таблицу внесены средние значения TPR по всем использованным при анализе изображений $q \in \{16,24,32\}$ для каждого коэффициента качества QF, полученные с учетом соответствующих значений для $q \in \{16,24,32\}$ (см. табл.4.7).

Полученные результаты свидетельствуют о превосходстве по эффективности с точки зрения TPR разработанным методом *KL* всех рассмотренных современных аналогов [158].

С уменьшением коэффициента QF эффективность *KL* падает очень незначительно: при уменьшении QF в 5 раз (с 100 до 20) значение TPR уменьшилось лишь на 7.1% (с 99.2% до 92.1%). Необходимо отметить, что для $QF < 40$ тестирование современных аналогов практически не проводится. Исключение из рассмотренных современных методов составляет Amerini (2011), для которого проводилось тестирование в условиях сжатия с $QF=20$, в которых алгоритмическая реализация разработанного метода *KL* превосходит Amerini (2011) на 5.6% по значению TPR.

Таблица 4.10 – Значение TPR (%) в условиях сохранения ЦИ после клонирования в формат Jpeg с различными коэффициентами качества QF

Метод QF	Lin et al. (2009)	Bayram et al. (2009)	Huang et al. (2011)	Liu et al. (2011)	Amerini (2011)	Mahmood et al. (2016)	Diaa et al. (2016)	<i>KL</i>
5	—	—	—	—	—	—	—	69.3
20	—	—	—	—	87.2	—	—	92.1
25	—	—	—	—	—	—	—	92.8
35	—	—	—	—	—	—	—	93.4
40	—	—	—	89	92.1	—	—	94.3
45	—	—	—	—	—	—	—	95.5
50	—	—	—	89	93.2	—	90	95.6
55	—	—	—	—	—	—	—	96.0
60	—	—	—	90	—	—	90	96.0
70	—	82	86	91	—	89	92	97.2
75	—	88	91	—	93.4	94	—	98.2
80	96	94	96	93	—	96	94	98.4
85	—	96	97	—	—	97.5	—	98.4
90	98	97	99	96	—	99	96	98.8
100	98	—	—	—	93.4	—	—	99.2

Тестирование в условиях сжатия с QF=5 ни одного из современных аналогов не проводилось вообще, что может говорить об их несостоятельности в данных условиях, в то время как для разработанного метода TPR=69.3% (табл.4.10). Тестирование для большинства современных аналогов проводилось в условиях $QF \geq 50$. Для $QF = 50$ алгоритмическая реализация *KL* превосходит Amerini (2011) – лучший из аналогов в этих условиях на 2.6% по показателю TPR. Для наиболее часто используемого при сжатии в формате Jpeg

значения коэффициента качества $QF = 75$ алгоритмическая реализация KL превосходит лучший из аналогов в этих условиях Mahmood et al. (2016) по показателю TPR на 4.5%. Максимальное превосходство KL над аналогами наблюдается в условиях $QF = 60$ для Diaa et al. (2016) и составляет 6.7%. При этом области клона для разработанного метода всегда при его тестировании имели малые относительные размеры (меньше 0.85% ЦИ), в отличие от методов-аналогов. Наиболее наглядно преимущества разработанного метода над современными аналогами с точки зрения значения TPR в условиях сжатия с потерями видны на рис.4.12.

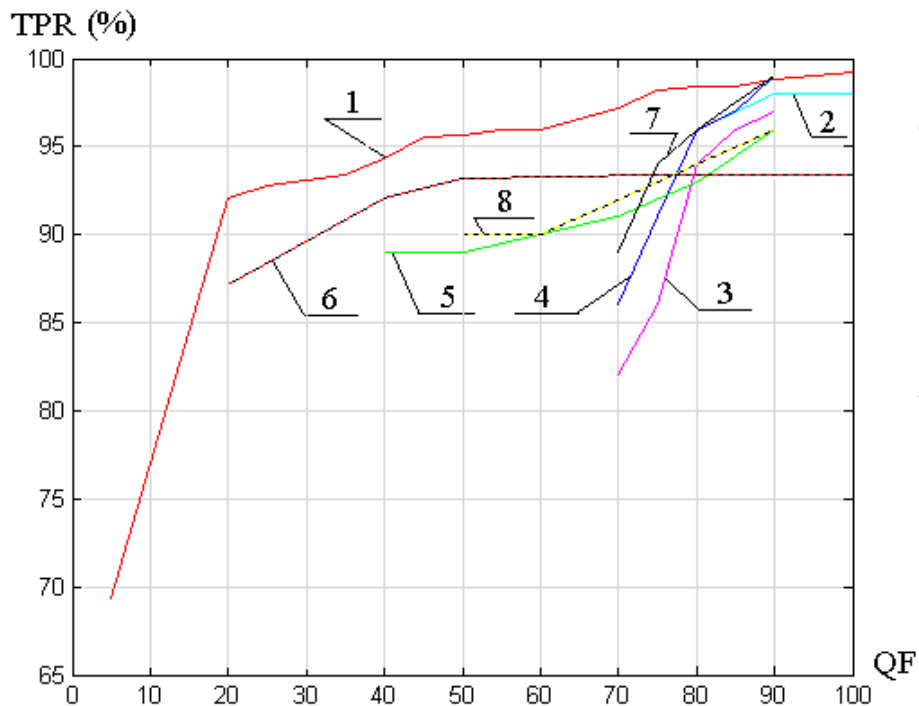


Рис.4.12. Зависимость значения TPR от значения коэффициента качества QF , используемого при сжатии ЦИ после клонирования: 1 – KL ; 2 – Lin et al. (2009); 3 – Bayram et al. (2009); 4 – Huang et al. (2011); 5 – Liu et al. (2011); 6 – Amerini (2011); 7 – Mahmood et al. (2016); 8 – Diaa et al. (2016)

Проведем сравнительный анализ эффективности KL с современными аналогами в условиях наложения на ЦИ после клонирования гауссовского шума. Сила возмущающего воздействия количественно оценивается разностным показателем искажения «сигнал-шум» SNR. Результаты

эксперимента, в котором были задействованы ЦИ из ЭМ, приведены в табл.4.11, где для алгоритмической реализации разработанного метода *KL* в таблицу внесены средние значения *TPR* по всем использованным при анализе изображений $q \in \{16,24,32\}$ для каждого значения *SNR*.

Таблица 4.11. Значение *TPR* (%) в условиях наложения на ЦИ после клонирования гауссовского шума, приводящего к искажению изображения, определяемого отношением «сигнал-шум» *SNR* (dB)

Метод SNR (dB)	Popescu and Farid (2004)	Lin et al. (2009)	Bayram et al. (2009)	Huang et al. (2011)	Amerini (2011)	Liu et al. (2011)	Diaa et al. (2016)	Deoli et al. (2016)	Mahmood et al. (2016)	<i>KL</i>
60	—	—	—	—	—	—	—	100	—	99.8
50	—	—	—	—	94.1	—	—	—	—	99.6
40	75	—	96	95	93.7	98	—	—	98.5	99.6
35	66	98	96	95	—	98	96	85	97.9	99.2
30	46	—	95	91	92	—	96	—	96.5	98.8
25	31	—	79	82	—	—	96	—	90	98.8
20	26	98	79	71	82.4	97	94	—	80	98.6
15	—	—	—	—	—	96	94	—	—	96.4
10	—	94	—	—	—	—	—	—	—	94.4
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	67.8

Как видно из полученных результатов, предложенный метод превосходит свои аналоги по эффективности с учетом *TPR* (максимально – на 5.8% для Amerini(2011) в условиях *SNR*=50dB), при этом являясь состоятельным даже в тех условиях, в которых аналоги вообще не работают – при *SNR*=5dB *TPR*=67.8%. Необходимо отметить, что значения *TPR* при уменьшении *SNR* от

60 до 20 dB практически не меняется, имея высокое значение: $TPR \geq 98.6\%$ [158]. Наглядно преимущества метода *KL* видны на рис.4.13.

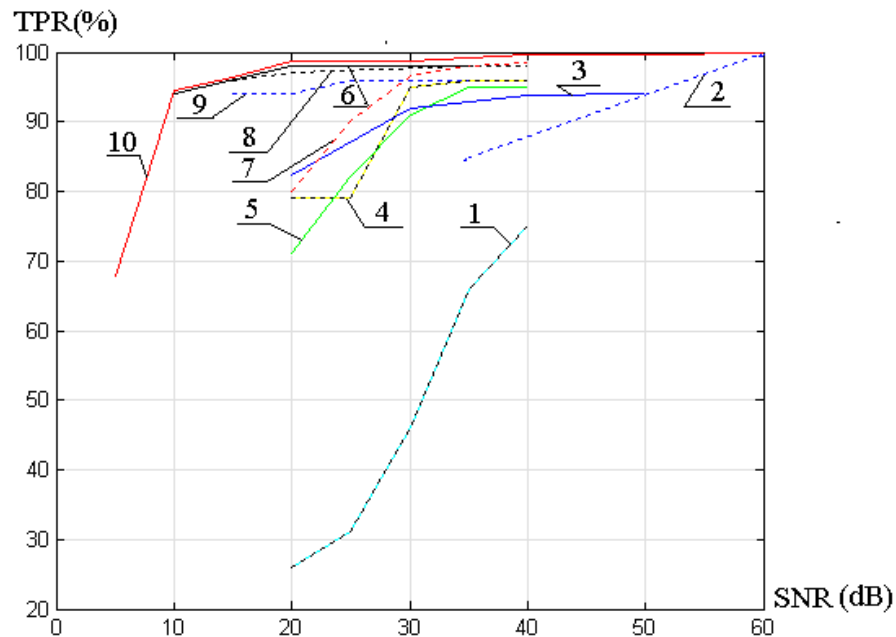


Рис.4.13. Зависимость значения TPR от значения SNR при наложении на ЦИ гауссовского шума после клонирования: 1 – Popescu and Farid (2004); 2 – Deoli et al. (2016); 3 – Amerini (2011); 4 – Bayram et al. (2009); 5 – Huang et al. (2011); 6 – Lin et al. (2009); 7 – Mahmood et al. (2016); 8 – Liu et al. (2011); 9 – Diaa et al. (2016); 10 – KL

Результаты сравнительного анализа в условиях Гауссова размытия представлены в табл.4.12 (маска 5×5). Для алгоритмической реализации разработанного метода *KL* в таблицу внесены средние значения TPR по всем использованным при анализе изображений $q \in \{16, 24, 32\}$ для каждого значения $\delta \in \{0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$, полученные с использованием соответствующих значений для $q \in \{16, 24, 32\}$ для $\delta = 0.5$ (см. табл.4.6). Как видно, алгоритм, реализующий разработанный метод, превосходит современные аналоги по эффективности (с учетом показателя TPR), в том числе и лучший из них Mahmood et al.(2016), причем последний максимально на 4% (в условиях $\delta = 2$).

Табл.4.12. – Значение TPR (%) в условиях размытия по Гауссу ЦИ после клонирования для различных значений параметра гауссова фильтра δ с маской 5×5

Метод δ	Fridrich (2003)	Huang et al. (2011)	Bayram et al. (2009)	Mahmood et al. (2016)	<i>KL</i>
0.5	85	92	89	97	98.2
1	84	91	88	96	97.0
1.5	79	90	87	94	93.0
2	74	85	76	89	92.6
2.5	71	81	76	85	87.2
3	71	80	74	83	85.6

Таким образом, из полученных результатов очевидна как абсолютная, так и относительная высокая эффективность алгоритмической реализации метода *KL* выявления результатов клонирования в цифровом изображении как при наличии, так и при отсутствии дополнительных возмущающих воздействий.

Замечание 4.2. Везде в работе в качестве формального представления цифрового изображения использовалась одна $n \times m$ -матрица F , что имело своей целью упрощение изложения представленного материала и никак не ограничивает область применимости усовершенствованного метода *KL* выявления клонирования в условиях дополнительных возмущающих воздействий монохромными ЦИ. Для цветного изображения в качестве матрицы F могут выступать, например, цветовые составляющие (схема RGB), матрица яркости (схема YUV).

Замечание 4.3. Разработанный метод *KL* может быть применен для экспертизы цифрового видео, представляющего из себя последовательность кадров-изображений.

4.3 Выводы к разделу 4

В разделе 4 проведен анализ, в том числе сравнительный, эффективности алгоритмических реализаций разработанных базового и усовершенствованного методов выявления результатов клонирования, в том числе в условиях дополнительных возмущающих воздействий, в ходе чего получены следующие результаты:

1. Установлено, что алгоритмическая реализация разработанного БМКВВ KL_B в условиях отсутствия дополнительных возмущающих воздействий имеет максимально возможную эффективность с точки зрения показателя TPR : $TPR=100\%$, при этом наибольшее значение FPR , полученное для 16×16 –блоков, составило 11%, что по результатам сравнительного анализа привело к необходимости усовершенствования KL_B ;
2. Исследованы характерные особенности окрестностей элементов ММБО G , определяющих совпадающие по значению ее локальные минимумы. Установлено, что для подавляющего большинства ЦИ для соответствующих блоков клона и прообраза локальные минимумы G будут иметь окрестности с совпадающими по значению соответствующими элементами, радиус которых $r \geq 1$, что не свойственно блокам оригинальной области изображения, причем величина радиуса тем больше, чем больше размер $q \times q$ –блока, принадлежащего области вне пересечения клона и прообраза.
3. Путем поэлементного анализа матрицы R абсолютной разности для пары блоков ЦИ установлено, что отличие яркости между соответствующими пикселями блоков клона и прообраза после постобработки изображения в среднем меньше, чем аналогичная характеристика для блоков оригинальной области ЦИ. Такое же соотношение имеет место для максимальных значений элементов R . Установлены характерные особенности гистограмм значений элементов R в случае, когда определяющие ее блоки ЦИ принадлежат или не принадлежат клону и прообразу.

4. С учетом характерных особенностей окрестностей элементов ММБО, определяющих ее совпадающие по значению локальные минимумы, для блоков, принадлежащих/не принадлежащих клону и прообразу, а также количественных показателей попиксельных отличий между блоками ЦИ в случае наличия/отсутствия клонирования, разработан усовершенствованный метод выявления результатов клонирования KL , наибольшее значение показателя FPR для которого составило 4.8% (для 16×16 – блоков), что в 2.3 раза меньше, чем для БМКВВ, и сравнимо с аналогичным показателем для лучших современных аналогов.
5. Практически показана высокая эффективность алгоритмической реализации KL в условиях постобработки ЦИ. Так в условиях дополнительных ВВ, сохраняющих надежность восприятия ЦИ, в качестве которых использовались наложение различных шумов, фильтрация, размытие, сжатие с потерями и их комбинации, коэффициент $TPR \geq 97\%$. Высокая эффективность имеет место в случае значительных ВВ: при сохранении ЦИ после клонирования в формат Jpeg с $QF=5$ значение $TPR > 69\%$; при наложении гауссовского шума с $SNR=5dB$ значение $TPR > 67\%$. Область клона при этом составляла $< 0.85\%$ ЦИ.
6. Сравнительный анализ эффективности KL , проведенный в условиях сжатия с потерями, наложения гауссовского шума, размытия ЦИ, показал, что для каждого из ВВ алгоритмическая реализация разработанного метода превосходит по эффективности современные аналоги, которые не рассчитаны на работу в условиях очень значительных ВВ (сжатие с $QF < 20$, наложение шума, приводящее к искажению с $SNR < 10dB$), а также областей клона и прообраза малых относительных размеров ($< 0.85\%$ ЦИ). В условиях сжатия с потерями с $QF = 50$ алгоритмическая реализация KL превосходит лучший из аналогов по значению TPR на 2.6%, а для наиболее часто используемого при сжатии в формате Jpeg значения $QF = 75$ – на 4.5%. Максимальное превосходство достигается в условиях $QF = 60$ и достигает

6.7%. В условиях наложения шума максимальное превосходство по показателю TPR достигает 5.8%. В условиях размытия KL превосходит лучший из аналогов максимально на 4%.

Таким образом, задачи, поставленные в разделе 4, решены, цель раздела достигнута.

В разделе 4 получили окончательное решение задачи 4, 5 из перечня задач диссертационного исследования.

Результаты раздела нашли свое отражение в работах [155–158].

ВЫВОДЫ

В работе решена важная научно-практическая задача повышения эффективности процесса выявления нарушения целостности цифрового изображения путем разработки метода обнаружения результатов клонирования в изображении, эффективного, в том числе в условиях дополнительных (значительных) возмущающих воздействий, а также для областей клона/прообраза малых относительных размеров.

Практическая ценность работы состоит в доведении полученных научных результатов до конкретных методов и алгоритмов, которые могут быть использованы как составляющие комплексных систем защиты информации, информационных систем разного наполнения.

В рамках достижения цели работы были получены следующие результаты:

1. Впервые на основании найденного нечувствительного к возмущающим воздействиям параметра, количественно характеризующего изображение в целом – объема цилиндрического тела, отвечающего изображению, показано, что соответствующим блокам клона и прообраза будут отвечать равные по значению, в том числе в условиях постобработки, элементы матрицы минимальных блоковых отличий, соответствующей изображению, определяющие ее глобальный (локальный в случае значительных возмущающих воздействий при постобработке или при наличии в ЦИ областей с малыми перепадами яркости) минимум. Это послужило теоретической основой для разработки метода выявления результатов клонирования и обеспечило его высокую эффективность независимо от вида и силы возмущающего воздействия, используемого в процессе постобработки клонированного изображения.
2. Впервые на основании установленных характерных особенностей гистограмм абсолютных значений матрицы разности $q \times q$ -блоков ЦИ и различия максимального отличия яркости пикселей блоков в случае их принадлежности/непринадлежности клону и прообразу (средние значения

составили 29 и 71 соответственно для $q = 32$), с использованием анализа матрицы минимальных блоковых отличий установлено наличие совпадающих по соответствующим значениям окрестностей радиуса $r \geq 1$ ее элементов, определяющих одинаковые по значению локальные минимумы, отвечающие соответствующим блокам клона и прообраза. Величина радиуса тем больше, чем больше величина $q \times q$ -блока, содержащегося в области, отличающей клон от прообраза, и для $q = 32$ может достигать 14. Для подавляющего большинства оригинальных ЦИ $r = 0$. Установленные свойства обеспечили, в отличие от существующих аналогов, высокую эффективность разработанного метода выявления результатов клонирования независимо от характерных особенностей анализируемого изображения: наличие/отсутствие областей с малыми перепадами значений яркости.

3. Впервые на основании сформированного теоретического базиса и установленных качественных и количественных отличий областей клона и прообраза в условиях дополнительных возмущающих воздействий, разработан эффективный метод *KL* выявления результатов клонирования в ЦИ и реализующий его алгоритм, эффективность которого в смысле TPR в отсутствие постобработки является максимально возможной ($TPR = 100\%$), а в смысле FPR сравнимой с лучшими аналогами ($FPR = 4.8\%$); в условии дополнительных возмущающих воздействий, в том числе комплексных, сохраняющих надежность восприятия ЦИ ($PSNR \geq 37dB$), $TPR \geq 97\%$, независимо от конкретного вида возмущающего воздействия. Метод остается состоятельным в условиях значительных возмущающих воздействий, которые не рассматриваются современными аналогами: при сохранении ЦИ после клонирования в формат Jpeg с QF=5 значение $TPR = 69.3\%$; при наложении гауссовского шума с SNR=5dB значение $TPR = 67.8\%$. Сравнительный анализ эффективности *KL*, проведенный в условиях наиболее распространенных возмущающих воздействий: сжатия с потерями, наложения гауссовского шума, размытия ЦИ, показал, что для

каждого из них *KL* превосходит по эффективности лучшие из современных аналогов, что позволило повысить в целом эффективность выявления нарушения целостности цифрового изображения. Максимально это превосходство достигает 6.7% (показатель TPR).

4. Получил дальнейшее развитие блочно-ориентированный подход к выявлению результатов клонирования в ЦИ путем установления критерия и условий его применимости (область прообраза, не принадлежащая пересечению клона и прообраза, содержит хотя бы один 16×16 –блок) при отсутствии постобработки и необходимого условия при наличии постобработки клонированного ЦИ принадлежности блоков матрицы изображения областям клона и прообраза. При этом последнее, в отличие от аналогов, не использует пороговое значение количественного признака для выявления клона/прообраза. Это обеспечило эффективную работу разработанного метода независимо от условий проведения клонирования, при выявлении областей клона/прообраза, относительные размеры которых $\ll 0.85\%$ ЦИ (от 0.06% до 0.39%), что значительно меньше тех, которые эффективно выявляются существующими аналогами.
5. Вычислительная сложность разработанного алгоритма, реализующего метод *KL*, определяется как $O(n^4)$, где $n \times n$ – размер матрицы изображения, что дает возможность для его практического использования для экспертизы целостности ЦИ любого, в том числе значительного, размера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farid, H. A survey of image forgery detection / H.Farid // IEEE Signal Processing Magazine. – 2009. – Vol. 2, No. 26. – Pp. 16–25.
2. Haouzia, A. Methods for image authentication: a survey / A. Haouzia, R. Noumeir // Multimedia Tools and Applications. — 2008. — No 39(1). — Pp. 1–46.
3. Redi, J. A. Digital image forensics: a booklet for beginners / J.A. Redi, W. Taktak, J.L. Dugelay // Multimedia Tools and Applications. — 2011. — Vol. 51, No.1. — Pp. 133–162.
4. Рыбальский О. В. Проверка аутентичности фонограмм при проведении судебно-акустической экспертизы как одна из составляющих информационной безопасности страны. Часть 1 / О. В. Рыбальский // Захист інформації. – 2003. – № 1. – С. 17–28.
5. Рыбальский О. В. Проверка аутентичности фонограмм при проведении судебно-акустической экспертизы как одна из составляющих информационной безопасности страны. Часть 2 / О. В. Рыбальский // Захист інформації. – 2003. – № 2. – С. 24–31.
6. Shivakumar, B.L. Detecting Copy-Move Forgery in Digital Images: A Survey and Analysis of Current Methods / B.L.Shivakumar, S.Santhosh Baboo // Global Journal of Computer Science and Technology. – 2010. – Vol. 10, Iss.7. – Pp. 61–65.
7. Guo, J.M. Duplication forgery detection using improved daisy descriptor / J.M.Guo, Y.F. Liu, Z.J. Wu // Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40, No. 2. – Pp. 707–714.
8. Ratnam Singh. Copy Move Tampering Detection Techniques: A Review / Ratnam Singh, Mandeep Kaur //International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, No 5. – Pp. 3610–3615.
9. Rani, S. A Survey of Copy-Move Forgery Detection Techniques for Digital Images / S.Rani, M.Jayamohan, S.Sruthy // International Journal of Innovations in Engineering and Technology. – 2015. – Vol.5, Iss.2. – Pp.419–426.

10. Joglekar, N. P. A Compressive Survey on Active and Passive Methods for Image Forgery Detection / N. P. Joglekar, P. N. Chatur // *International Journal of Engineering and Computer Science*. – 2015. – Vol. 4, Iss. 1. – Pp. 10187–10190.
11. Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография [Текст] : монография / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. — М. : СОЛОН-Пресс, 2002. — 272 с.
12. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ : [монография] / А.В. Аграновский, А.В. Балакин, В.Г. Грибунин, С.А. Сапожников. — М.: Вузовская книга, 2009. — 220 с.
13. Li Kang. Copy-Move Forgery Detection in Digital Image / Li Kang, Xiao-Ping Cheng // *IEEE 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*. – 2010. – Vol. 5. – Pp. 2419–2421.
14. Mahdian, B. A bibliography on blind methods for identifying image forgery / B.Mahdian, S.Saic // *Signal Processing: Image Communication*. – 2010. – Vol. 25, No. 6. – Pp. 389–399.
15. Bravo-Solorio, S. Passive forensic method for detecting duplicated regions affected by reflection, rotation and scaling / S. Bravo-Solorio, A.K. Nandi // *Proc.European Signal Processing Conference*. – 2009. – Pp. 824–828.
16. Кобозева, А.А. Использование особенностей возмущений сингулярных чисел матрицы цифрового изображения для обнаружения его фальсификации / А.А.Кобозева // *Искусственный интеллект*. – 2008. – №1. – С. 145–153.
17. Кобозева, А.А. Матричный анализ – основа общего подхода к обнаружению фальсификации цифрового сигнала / А.А.Кобозева, О.В.Рыбальский, Е.А.Трифонова // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. – 2008. – №8 (126), ч.1. – С.62–72.
18. Ansari, M.D. Pixel-Based Image Forgery Detection: A Review / M.D. Ansari, S.P. Ghreera, V.Tyagi // *IETE Journal of Education*. – 2014. – Vol. 55, No 1. – Pp. 40–46.
19. Silva, E. Going deeper into copy-move forgery detection: exploring image telltales via multi-scale analysis and voting processes / E.Silva, T.Carvalho,

A.Ferreira, A.Rocha // *J. Vis. Commun. Image Represent.* – 2015. – Vol. 29. – Pp. 16–32.

20. Chen, Y.-L. Detecting recompression of JPEG images via periodicity analysis of compression artifacts for tampering detection / Y.-L. Chen, C.-T. Hsu // *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.* – 2011. – Vol. 6. – Pp. 396–406.

21. Бобок, И.И. Выявление цифровых изображений, пересохраненных в формат без потерь из формата с потерями, как составная часть стеганоанализа / И.И.Бобок // *Сучасна спеціальна техніка.* – 2013. – №3. – С.64–70.

22. Рыбальский, О.В. О возможности создания метода проверки подлинности неподвижных изображений, записанных на цифровых носителях / О.В. Рыбальский // *Спеціальна техніка у правоохоронній діяльності: зб. наук. пр. III міжнар. конф. КНУВС.* – 2007. – С. 13–14.

23. Рыбальский, О.В. Программа идентификации цифровой фото- и видеоаппаратуры и проверки оригинальности цифровых изображений / О.В. Рыбальский, В.И. Соловьев, Е.В. Белозеров // *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченко. Військово-спеціальні науки.* – 2013. – Вип. 41. – С. 77–80.

24. Kharrazi M. Blind source camera identification / M. Kharrazi, H. Sencar, N.Memon // *Proc. ICIP, International Conference on Image Processing.* – 2004. – vol. 1. – pp. 709–712.

25. Bayram, S. Source camera identification based on CFA interpolation / S. Bayram, H. T. Sencar, N. Memon, I. Avcibas // *Proc. ICIP, International Conference on Image Processing.* – 2005. – Vol. 3. – Pp. 69–72.

26. Chen, M. Source digital camcorder identification using sensor photo response non-uniformity / M. Chen, J. Fridrich, M. Goljan, J. Lukac // *Proc. of SPIE Electronic Imaging.* – 2007. – vol. 6505. – pp. 1G–1H.

27. Kurosawa, K. CCD fingerprint method – identification of a video camera from videotaped images / K. Kurosawa, K. Duroki, N. Saitoh // *Proc. of ICIP, International Conference on Image Processing.* – 1999. – Vol. 1. – Pp. 537–540.

28. Xue, X. An image identification system of seal with fingerprint based on cmos image sensor / X. Xue, S. Zhang, Y. Guo // Proc. of SPIE. – 2006. – Vol. 6027(3) A. – Pp. 1–8.

29. Рыбальский О. В. Выделение шума цифрового фотовидеоустройства на основе максимумов вейвлет-преобразования / О.В. Рыбальский, Е.В. Белозеров // Сучасні інформаційні та електронні технології : зб. наук. пр. 16 Міжнародної науково-практична конференції. – 2015. – С. 65 – 66.

30. Johnson, M. K. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting / M. K. Johnson, H. Farid // Proceedings of the ACM Workshop on Multimedia and Security. — 2005. — С.1–10.

31. Johnson, M. K. Exposing digital forgeries through specular highlights on the eye / M. K. Johnson, H. Farid // 9th International Conference on Information. — 2007. — Т. 4567. — С.311–325.

32. Johnson, M. K. Exposing digital forgeries in complex lighting Environments / M. K. Johnson, H. Farid // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2007. — № 3, Т.5. — С. 450–461.

33. Riess, C. Scene illumination as an indicator of image manipulation / C. Riess and E. Angelopoulou // International Conference on Information Hiding. — 2010. — С. 66–80.

34. Diaa M. Uliyan. Image Region Duplication Forgery Detection Based on Angular Radial Partitioning and Harris Key-Points / Diaa M. Uliyan, Hamid A. Jalab, Ainuddin W. Abdul Wahab, Somayeh Sadeghi // Symmetry. – 2016. – Vol. 8, Iss. 7. – Pp. 56–65.

35. Thajeel, S.A. A survey of copy-move forgery detection techniques / S.A.Thajeel, G. Sulong // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2014. – Vol. 70, Iss.1. – Pp. 25–35.

36. Sawinder Singh Mangat. A review of literature on copy-move forgery detection techniques / Sawinder Singh Mangat, Harpreet Kaur // International Journal of Computer Science and Information Technology & Security (IJCSITS). – 2016. – Vol.6, No 1. – P.482–486.

37. Somayeh Sadeghi. Efficient Copy-Move Forgery Detection for Digital Images / Somayeh Sadeghi, Hamid A. Jalab, Sajjad Dadkhah // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – No 71. – Pp. 755–758.
38. Kakar, P. Exposing postprocessed copy-paste forgeries through transform-invariant features / P. Kakar, N. Sudha // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2012. – Vol. 7, No. 3. – Pp. 1018–1028.
39. Yanjun Cao. A Novel Approach for Detecting Region Duplication in Digital Images / Yanjun Cao, Tiegang Gao, Li Fan, Qunting Yang // AISS. – 2011. – Vol. 3, No. 10. – Pp. 144–151.
40. Ali Qureshi, M. A review on copy move image forgery detection techniques / M. Ali Qureshi, M. Deriche // IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). – 2014. – Pp. 1–5.
41. Davarzani, R. Copy-move forgery detection using multiresolution local binary patterns / R. Davarzani, K. Yaghmaie, S. Mozaffari, M. Tapak // Forensic science international. – 2013. – Vol. 231, No. 1. – Pp. 61–72.
42. He, Z. Digital image splicing detection based on approximate run length / Z. He, W. Sun, W. Lu, H. Lu // Pattern Recognition Letters. – 2011. – Vol. 32, No. 12. – Pp. 1591–1597.
43. He, Z. Digital image splicing detection based on markov features in DCT and DWT domain / Z. He, W. Lu, W. Sun, J. Huang // Pattern Recognition Letters. – 2012. – Vol. 45, No. 12. – Pp. 4292–4299.
44. Зорило, В.В. Анализ особенностей сингулярных чисел матриц цифровых изображений при разных степенях сжатия для выявления фотомонтажа / В.В.Зорило, А.А.Кобозева // Захист інформації. – 2010. – №3. – С. 34–41.
45. Зорило, В.В. Использование характерных особенностей сингулярных чисел матриц цифровых изображений для выявления фотомонтажа / В.В.Зорило, А.А.Кобозева // Всеукраїнська науково-практична конференція «Фінансово-економічна безпека в Україні: стан та перспективи розвитку». – Одеса, 2010. – С.178–179.

46. Зорило, В.В. Метод выявления результатов размытия цифрового изображения / В.В.Зорило, А.А.Кобозева // Сучасна спеціальна техніка. – 2010. – №3(22). – С.72–82.
47. Бобок, И.И. Адаптация стеганоаналитического метода, основанного на теории возмущений, для задачи выявления нарушения целостности цифрового изображения / И.И. Бобок, Е.В. Малахов // Информатика та математичні методи в моделюванні. — 2012. — Том 2, №4. — С. 297–303.
48. Pan Xunyu. Region Duplication Detection Using Image Feature Matching / Pan Xunyu, Lyu Siwei // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2010. – Vol. 5, No. 4. – Pp. 857 – 867.
49. Chen, L. Region duplication detection based on harris corner points and step sector statistics / L. Chen, W. Lu, J. Ni, W. Sun, J. Huang // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2013. – Vol. 24, No. 3. – Pp. 244–254.
50. Frank Y. Shih. A Comparison Study on Copy-Cover Image Forgery Detection / Frank Y. Shih, Yuan Yuan // The Open Artificial Intelligence Journal. – 2010. – Vol. 4. – Pp. 49–54.
51. Xiu-Li Bi. Over-Segmentation Based Image Forgery Detection / Xiu-Li Bi, Chi-Man Pun, Xiao-Chen Yuan // International Conference on Electronic Science and Automation Control (ESAC). – 2015. – Pp. 23–26.
52. Achanta, R. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods / R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, S. Susstrunk // IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. – 2012. – Vol. 34. – Pp. 2274–2282.
53. Christlein, V. An Evaluation of Popular Copy-Move Forgery Detection Approaches / V.Christlein, C. Riess, J. Jordan, C. Riess, E. Angelopoulou // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2012. – Vol. 7, No 6. – Pp. 1841–1854.
54. Kalpana Manudhane. Methodology for Evidence Reconstruction in Digital Image Forensics / Kalpana Manudhane, M.M. Bartere // Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Vision. – 2013. – Vol. 13, Iss. 9.– Pp.8–16.

55. Amerini, I. Geometric Tampering Estimation by Means of a SIFT-based Forensic Analysis / I.Amerini, L.Ballan, R.Caldelli, A.D.Bimbo, G.Serra // IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2010. – Pp.1702 – 1705.
56. Venitta, A.M. Image Forgery Detection Using Feature Point Matching / A.M.Venitta, V.S.Kumari // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 5, Iss. 3. – P. 21–31.
57. Popescu, C. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions / C.Popescu, H.Farid // Technical Report TR 2004–515, Dartmouth College. – 2004. – Pp. 34–46.
58. Bashar, M. Exploring duplicated regions in natural images / M. Bashar, K. Noda, N. Ohnishi, K.Mori // IEEE Transactions on Image Processing. – 2010. – Vol. PP, Iss. 99. – Pp. 134–145.
59. Luo Weiqi. Robust detection of region-duplication forgery in digital image / Luo Weiqi, Jiwu Huang, Guoping Qiu // 18th International Conference on Pattern Recognition. – 2006. – Vol. 4. – Pp. 746–749.
60. Babak, M. Detection of copy–move forgery using a method based on blur moment invariants / M.Babak, S. Saic // Forensic Science International. – 2007. – Vol. 171, No. 2. – Pp.180–189.
61. Wang Junwen. Fast and robust forensics for image region-duplication forgery / Wang Junwen, Guangjie Liu, Zhan Zhang, Yuewei Dai, Zhiquan Wang // Acta Automatica Sinica. – 2009. – Vol. 35, No. 12. – Pp. 1488–1495.
62. Mohamadian Zahra. Detection of duplication forgery in digital images in uniform and nonuniform regions / Mohamadian Zahra, Ali Akbar Pouyan // In Computer Modelling and Simulation (UKSim), IEEE UKSim 15th International Conference. – 2013. – Pp. 455–460.
63. Seung-Jin, R. Detection of copy-rotate-move forgery using Zernike moments / R.Seung-Jin, Min-Jeong Lee, Heung-Kyu Lee // Information Hiding, Springer Berlin Heidelberg. – 2010. – Pp. 51–65.

64. Hwei-Jen, L. Fast copy-move forgery detection / Lin Hwei-Jen, Chun-Wei Wang, Yang-Ta Kao // WSEAS Transactions on Signal Processing. – 2009. – Vol.5, No. 5. – Pp. 188–197.

65. Wang Junwen. Detection of image region duplication forgery using model with circle block / Wang Junwen, Guangjie Liu, Hongyuan Li, Yuewei Dai, Zhiquan Wang // IEEE International Conference on Multimedia Information Networking and Security. – 2009. – Pp. 25–29.

66. Bravo-Solorio, S. Automated detection and localisation of duplicated regions affected by reflection, rotation and scaling in image forensics / S.Bravo-Solorio, Asoke K. Nandi // Signal Processing. – 2011. – Vol. 91, No. 8. – Pp. 1759–1770.

67. Bravo-Solorio, S. Exposing duplicated regions affected by reflection, rotation and scaling / S.Bravo-Solorio, Asoke K. Nandi // Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE International Conference. – 2011. – Pp. 1880–1883.

68. Vivek Kumar Singh. Fast and Efficient Region Duplication Detection in Digital Images Using Sub-Blocking Method / Vivek Kumar Singh, R.C. Tripathi // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2011. – Vol. 35. – Pp. 93–102.

69. Sridevi, M. Copy-move image forgery detection / M.Sridevi, C.Mala, S.Sandeep // Computer Science & Information Technology. – 2012. – Vol. 52. – Pp. 19–29.

70. Kang Xiao Bing. Identifying tampered regions using singular value decomposition in digital image forensics / Kang Xiao Bing, Sheng Min Wei // Computer Science and Software Engineering. – 2008. – Vol. 3. – Pp. 926–930.

71. Кобозева, А.А. Математическая основа метода выявления клонированных участков изображения, подвергнутых коррекции цвета / А.А.Кобозева // Інформаційна безпека. – 2013. – №2(10). – С.84–91.

72. Кобозева, А.А. Основы метода выявления клонированных участков изображения, подвергнутых коррекции цвета / А.А.Кобозева, Е.Ю.Лебедева // Збірник наукових праць Військового інституту КНУ ім.Т.Шевченка. – 2013. – №44. – С.96–102.

73. Кобозева, А.А. Основы метода выявления клонированных участков изображения, подвергнутых коррекции яркости / А.А. Кобозева, Е.Ю. Лебедева // Сучасна спеціальна техніка. – 2013. – №3. – С.17–24.

74. Кобозева, А.А. Принципы обнаружения клонированных участков, подвергнутых коррекции яркости / А.А. Кобозева, Е.Ю. Лебедева, В.В. Зорило // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференція «Інформаційні управляючі системи та технології». – 2013. – С.167–169.

75. Лебедева, Е.Ю. Использование треугольных блоков для определения области фальсификации в изображениях / Е.Ю. Лебедева, П.Е. Баранов // Інформаційна безпека. — 2011. —№2. — С.27 – 32.

76. Баранов, П.Е. Виявлення області фальсифікації цифрового зображення блоками трикутної форми / П.Е. Баранов, Е.Ю. Лебедева // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — 2011. —Том 1, №3. — С. 274 – 280.

77. Лебедева, Е.Ю. Обнаружение клонированных участков изображений блоками нестандартной формы / Е.Ю. Лебедева, О.А. Павлов // X Всеукраїнська науково-технічна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології». —2011. — С. 34–35.

78. Ardizzone, E. Copy-move forgery detection via texture description / E.Ardizzone, A. Bruno, G. Mazzola // 2nd ACM Workshop on Multimedia in Forensics, Security and Intelligence. – 2010. – Pp. 59–64.

79. Hsu Hao-Chiang. Detection of copy-move forgery image using Gabor descriptor / Hsu Hao-Chiang, Min-Shi Wang // IEEE International Conference Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID). – 2012. – Pp. 1–4.

80. Quan Xiaomei. Copy-move forgery detection in digital images based on local dimension estimation / Quan Xiaomei, Hongbin Zhang // IEEE International Conference Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec). – 2012. – Pp. 180–185.

81. Cozzolino, D. Efficient dense-field copy-move forgery detection / D.Cozzolino, G.Poggi, L.Verdoliva // IEEE Transaction on Information Forensics and Security . – 2015. – Vol. 10, No. 11. – Pp.1–14.

82. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. П.А. Чочиа. — М. : Техносфера, 2006. — 1070 с.

83. Fridrich, J. Detection of copy–move forgery in digital images / J. Fridrich, D. Soukal, J.Lukas // Proceedings of Digital Forensic Research Workshop, IEEE Computer Society, Cleveland, OH, USA. – 2003. – Pp. 55–61.

84. Кобозева А.А. Эффект двойного квантования и его особенности / А.А.Кобозева, Е.В. Нариманова // Вестник НТУ «ХПИ». — 2008. — №26. — С.110—119.

85. Нариманова Е.В. Исследование эффекта двойного квантования и его использование при обнаружении фальсификации ЦИ / Е.В. Нариманова // Вісник Східноукр-го нац-го ун-ту ім. В.Даля. — 2008. — №8(126), ч.1. — С.47—55.

86. Нариманова Е.В. Практическое использование DQ-эффекта для построения универсального метода обнаружения фальсификации цифрового сигнала / Е.В. Нариманова // Вісник Східноукр-го нац-го ун-ту ім. В.Даля. — 2010. — №9 (151), ч.1. — С.80 — 85.

87. Rohini A. Maind. Image Copy Move Forgery Detection using Block Representing Method / Rohini A. Maind, Alka Khade, D.K. Chitre // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE). – 2014. – Vol. 4, Iss. 2. – Pp. 49–53.

88. Manish Deoli. A Fast and Robust Approach to Detect Copy-Move Forgery in Digital Images / Manish Deoli, Jyoti Joshi // International Journal of Computer Applications Volume. – 2016. – Vol. 137, No. 5. – Pp. 29–33.

89. Zhang, G.Q. Quick detection of Copy-Move forgery based on FMT / G.-Q.Zhang, H.-J. Wang // Computer Engineering and Design. – 2010. – Vol. 31, No. 15. – Pp. 3530–3533.

90. Huang, Y. Improved DCT-based detection of copy-move forgery in images / Y.Huang, W. Lu, W. Sun, D. Long // Forensic Science International. – 2011. – Vol. 206, No. 1–3. – Pp. 178–184.

91. Wandji, N.D. Detection of Copy-Move Forgery in Digital Images Based on DCT / N.D.Wandji, S.Xingming, M.F. Kue // International Journal of Computer Science Issues (IJCSI). – 2013. – Vol.10. – Pp. 231–243.
92. Khan, S. Reduced time complexity for detection of copy-move forgery using discrete wavelet transform / S. Khan, A. Kulkarni // International Journal of Computer Applications. – 2010. – Vol. 6, No. 7. – Pp. 31–36.
93. Bashar, M.K. Wavelet-based multi resolution features for detecting duplications in images / M.K. Bashar, K. Noda, N. Ohnishi, H. Kudo, T. Matsumoto, Y. Takeuchi // Conference on Machine Vision and Intelligence. – 2007. – Pp. 264–267.
94. Bayram, S. An efficient and robust method for detecting copy-move forgery / S. Bayram, H.T. Sencar, N. Memon // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'09). – 2009. – Pp. 1053–1056.
95. Muhammad, G. Passive copy move image forgery detection using undecimated dyadic wavelet transform / G. Muhammad, M. Hussain, G. Bebis // Digital Investigation. – 2012. – Vol. 9, No. 1. – Pp. 49–57.
96. Yadev, P. Detection of copy-move forgery of Images using Discrete Wavelet transform / P.Yadev, Y.Rathore // International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE). – 2012. – Vol. 4, No. 4. – Pp. 565–570.
97. Ghorbani, M. DWT-DCT (QCD) based copy-move image forgery detection / M.Ghorbani, M.Firouzmand, A.Faraahi // IEEE 18th International Conference Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). – 2011. – Pp. 1–4.
98. Yadav, P. DWT Based Copy Move Image Forgery Detection / P.Yadav, Y.Rathore, A.Yadu // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering. – 2012. – Vol. 1, Iss. 5. – Pp. 56–58.
99. Weihai Li. Rotation robust detection of copy-move forgery / Weihai Li, Nenghai Yu // IEEE 17-th International Conference on Image Processing. – 2010. – Pp. 2113–2117.

100. Hu, J. An improved lexicographical sort algorithm of copy-move forgery detection / J. Hu, H. Zhang, Q. Gao, H. Huang // 2-nd IEEE International Conference on Networking and Distributed Computing, China. – 2011. – Pp. 23–27.
101. Lowe, D.G. Distinctive image features from scale-invariant key points / D.G. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60, No. 2. – Pp. 91–110.
102. Anantharaj, N. Tampering and Copy-Move Forgery Detection Using Sift Feature / N.Anantharaj // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2014. – Vol.2, Iss. 1. – Pp. 2132–2137.
103. Pooja, S. Detecting Region Duplication Forgery in Digital Image using SIFT Features / S.Pooja, S. Kotkar, S. Shriramwar // International Journal of Current Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 4, No. 3. — Pp.1437–1440.
104. Huang Hailing. Detection of copy-move forgery in digital images using SIFT algorithm / Huang Hailing, Weiqiang Guo, Yu Zhang // Computational Intelligence and Industrial Application. – 2008. – Vol. 2. – Pp. 272–276.
105. Prerna, C. A keypoint based copy-move forgery detection / C. Prerna, J. Percy Granaph, S.Angaline., I.Thanga Belsi // International Journal of Advanced Information Science and Technology. – 2013. – Vol. 12, No. 12.
106. Pan Xunyu. Detecting Image Region Duplication Using SIFT Features / Pan Xunyu, Lyu Siwei // Proc. IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2010. – Pp.1706–1709.
107. Bo Xu. Image copy-move forgery detection based on SURF / Bo Xu, Wang Junwen, Liu Guangjie, Dai Yuewei // IEEE International Conference Multimedia Information Networking and Security (MINES). – 2010. – Pp. 889–892.
108. Zhang Guang-Qun. SURF-based Detection of Copy-Move Forgery in Flat Region / Zhang Guang-Qun, Hang-Jun Wang // International Journal of Advancements in Computing Technology. – 2012. – Vol. 4, No. 17. – Pp. 521–529.
109. Christlein, V. On rotation invariance in copy-move forgery detection / V.Christlein, C. Riess, E. Angelopoulou // IEEE International Workshop on Information Forensics and Security. – 2010. – Pp. 1–6.

110. Zheng Jiming. Detection of Copy-Move Forgery Based on Keypoints' Positional Relationship / Zheng Jiming, Wanrui Haoa, Wei Zhub // Journal of Information and Computational Science. – 2012. – Vol. 1, No. 3. – Pp. 53–60.
111. Shivakumar, L. Detection of Region Duplication Forgery in Digital Images Using SURF / L. Shivakumar, S. Baboo // International Journal of Computer Science Issues. – 2011. – Vol. 8, No. 4. – Pp. 199–205.
112. Bay, H. Speeded-up robust features (SURF) / H. Bay, T. Tuytelaars, Luc van Gool // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – Vol. 110, No. 3. – Pp. 346–359.
113. Bay, H. SURF: speeded-up robust features / H. Bay, T. Tuytelaars, Luc van Gool // 9th European Conference on Computer Vision. – 2006. – Pp.404–417.
114. Amerini, I. A SIFT-based forensic method for copy move attack detection and transformation recovery / I.Amerini, L.Ballan, R.Caldelli, A.Del Bimbo, G.Serra // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2011. – Vol. 6, No 3. – Pp. 1099–1110.
115. Amerini, I. Copy-move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage / I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, L. del Tongo, G. Serra // Signal Processing. — 2013. — Vol.28. — №6. — C.659–669.
116. Panchal, P.M. A comparison of SIFT and SURF / P.M. Panchal, S.R. Panchal, S.K.Shah // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2013. – Vol. 1, Iss. 2. – Pp. 323–327.
117. Rublee, E. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / E. Rublee, V.Rabaud, K.Konolige, G.Bradski // IEEE International Conference on Computer Vision, Barcelona. – 2011. – Pp. 2564–2571.
118. Jiming Zheng. Detection of Region-Duplication Forgery in Image Based on Key Points' Binary Descriptors / Jiming Zheng, Liping Chang // Journal of Information & Computational Science. – 2014. – Vol. 11, No. 11. – Pp. 3959–3966.
119. Suganthi, N. Detecting Forgery in Duplicated Region using Keypoint Matching / N. Suganthi, N. Saranya, M. Agila // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2012. – Vol. 2, Iss. 11. – Pp. 1–5.

120. Saravana Kumar, S. Copy-move forgery image detection / S.Saravana Kumar, R.Barath, A.G.Jessy Nirmal // International Journal of Advanced Research in Computer Science Engineering and Information Technology. – 2016. – Vol. 4, Iss. 3, Special Iss. 2. – Pp. 859–864.
121. Li, G. A sorted neighborhood approach for detecting duplicated regions in image forgeries based on DWT and SVD / G. Li, Q. Wu, D. Tu, S. J. Sun // IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Beijing. – 2007. – Pp. 1750–1753.
122. Feng Liu. An efficient algorithm for image copy-move forgery detection based on DWT and SVD / Feng Liu, Hao Feng // International Journal of Security and its Applications. – 2014. – Vol.8, No.5. – Pp. 377–390.
123. Singh, R. Copy Move Forgery Detection on Digital Images / R. Singh, A.Oberoi, N. Goel // International Journal of Computer Applications. – 2014. – Vol. 98, No. 9. – Pp. 17–22.
124. Zimba, M. DWT-PCA (EVD) Based Copy-Move Image Forgery Detection / M. Zimba, S. Xingming, // International Journal of Digital Content Technology and its Applications. – 2011. – Vol. 5, No. 1. – Pp. 251–258.
125. Mohammad Farukh Hashmi. Copy-move image forgery detection using efficient and robust method combining un-decimated wavelet transform and scale invariant feature transform / Mohammad Farukh Hashmi, Vijay Anand, Avinas G. Keskar // AASRI Conference on Circuit and Signal Processing. – 2014. – Pp. 84–91.
126. Harpreet Kaur. Key-point based copy-move forgery detection and their Hybrid methods / Harpreet Kaur, Jyoti Saxena, Sukhjinder Singh // Journal of the International Association of Advanced Technology and Science. – 2015. – Vol. 16, No. 2. – Pp. 67–73.
127. Bharathi, V. An implementation of block and keypoint based forgery detection scheme / V. Bharathi, D. Dhivyabarathi // International Conference on Current Research in Engineering Science and Technology (ICCREST). – 2016. – Pp. 55–60.

128. Oommen, R.S. A hybrid copy-move forgery detection technique using regional similarity indices / R.S. Oommen, M. Jayamohan // International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT). – 2015. – Vol 7, No 4. – Pp.127–134.

129. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст]: учебное пособие для студ. физико-математических спец. вузов; Рекомендовано МО РФ / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — 6-е изд. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 636 с.

130. Каханер, Д. Численные методы и программное обеспечение [Текст] / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш; Пер. с англ. под ред. Х.Д.Икрамова. — 2-е изд., стер. — М.: Мир, 2001. — 575 с.

131. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р.Гантмахер. — М.: Наука, 1988. — 552 с.

132. Кобозева, А.А. Основы нового подхода к выявлению результатов клонирования в цифровом изображении в условиях возмущающих воздействий / А.А. Кобозева, С.Н. Григоренко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2015. – Т.5, №4. – С.303–311.

133. Никольский, С.М. Курс математического анализа. Т.2 / С.М.Никольский. — М.:Наука, 1991. — 544 с.

134. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.3 / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1966. – 656 с.

135. NRCS Photo Gallery: [Электронный ресурс] //United States Department of Agriculture. Washington, USA. Режим доступа: <http://http://photogallery.nrcs.usda.gov> (Дата обращения: 10.09.2014).

136. Кобозева, А.А. Теоретичні основи методу виявлення областей клонування в цифровому зображенні в умовах збурних дій / А.А.Кобозева, С.М.Григоренко // II Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації». – Міжгірський р-н, с. Верхнє Студене, 2016 р. – С.70–72.

137. Кобозева, А.А. Теоретические основы нового подхода к решению задачи выявления результатов клонирования в цифровом изображении, сохраненном в формате с потерями / А.А. Кобозева, С.Н. Григоренко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2015. – Т.17, №4. – С.21–30.

138. Кобозева, А.А. Обнаружение результатов клонирования в цифровом изображении в условиях возмущающих воздействий на измененное изображение / А.А.Кобозева, С.Н.Григоренко // VIII Международная научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития ИТ-индустрии». – Харьков, 2016. – С.42.

139. Григоренко С.Н. Розвиток методу виявлення клонування в цифровому зображенні в умовах додаткових збурних дій – Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2016. – Вип. 1(31). – С. 85–98.

140. Кобозева, А.А. Задача обнаружения результатов клонирования в изображении и новый подход к ее решению в условиях дополнительных возмущений / А.А.Кобозева, С.Н.Григоренко // Информационные технологии в управлении, образовании, науке и промышленности: монография/ под ред. В.С. Пономаренко. – Х.: Издатель Рожко С.Г., 2016. – С.300–313.

141. Мyna, A.N. Detection of region duplication forgery in digital images using wavelets and log-polar mapping / A.N. Myna, M.G. Venkateshmurthy, C.G.Patil // International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications. — 2007. — Vol.3. — Pp.371–377.

142. Конахович, Г.В. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г.В. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – К.: МК-Пресс, 2006. – 288 с.

143. Наріманова, О.В. Методика кількісної оцінки надійності сприйняття цифрового зображення /О.В. Наріманова, К.О. Трифонова, А.Є. Кілін, М.С. Кучма / Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2014. – Т.4, №4. – С.332–336.

144. Григоренко, С.Н. Кількісний аналіз відмінностей оригінального цифрового зображення від зображення, що піддалося клонуванню, в умовах

збереження у форматі із втратами / С.Н.Григоренко // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип.4 (141). – С.77–82.

145. Григоренко, С.М. Визначення кількісних показників порушення цілісності цифрового зображення / С.М.Григоренко // Перша Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми науково-технічного та правового забезпечення кібербезпеки у сучасному світі «ПНПЗК–2016». – Харків, 2016. – С.19.

146. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

147. Kobozeva, A.A. New approach development for solution of cloning results detection problem in lossy saved digital image / A.A. Kobozeva, S.M. Grigorenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2016. – Issue 2. – Pp. 62–69.

148. Деммель, Д. Вычислительная линейная алгебра [Текст]: теория и приложения / Д. Деммель; Пер. с англ. Х.Д. Икрамова. — М.: Мир, 2001. — 430 с.

149. Кобозева, А.А. Метод выявления нарушения целостности цифрового изображения, проведенного путем клонирования, робастный к сжатию с потерями / А.А.Кобозева, И.И.Бобок, С.Н.Григоренко // 17-я Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и электронные технологии «СИЭТ–2016». – Одесса, 2016. – С.127-128.

150. Макконнелл, Дж. Основы современных алгоритмов. 2-е дополненное издание. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.

151. Guangjie Liu. A passive image authentication scheme for detecting region-duplication forgery with rotation / Guangjie Liu, Junwen Wang, Shiguo Lian, Zhiquan Wang // Journal of Network and Computer Applications. – 201. – Vol. 134. – Pp. 1557–1565.

152. Parul Mishra. Region Duplication Forgery Detection Technique Based on SURF and HAC / Parul Mishra, Nishchol Mishra, Sanjeev Sharma, Ravindra Patel // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 6. – Pp. 1–8.
153. Diaa M. Uliyan. Copy Move Image Forgery Detection Using Hessian and Center Symmetric Local Binary Pattern / Diaa M. Uliyan, Hamid A. Jalab, Ainuddin W. Abdul Wahab // IEEE Conference on Open Systems (ICOS). – 2015. – Pp. 7–11.
154. Copy-Move Forgery Detection Technique for Forensic Analysis in Digital Images [Электронный ресурс] / Toqeer Mahmood, Tabassam Nawaz, Aun Irtaza, et al. // Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Volume 2016. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8713202> (Дата обращения: 05.06.2016).
155. Григоренко, С.Н. Усовершенствование метода обнаружения результатов фальсификации в цифровом изображении в условиях атак / А.А.Кобозева, С.Н.Григоренко // Проблемы региональной энергетики. Электронный журнал Академии наук Республики Молдова. – 2016. – №2 (31). – С. 93–103.
156. Кобозева, А.А. Удосконалення методу виявлення результатів клонування в цифровому зображенні / Кобозева А.А., Бобок І.І., Григоренко С.М. // V Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні управляючі системи та технології «ІУСТ–2016». – Одеса, 2016. – С.129-131.
157. Кобозева, А.А. Повышение эффективности выявления нарушения целостности в цифровом изображении / А.А.Кобозева, И.И.Бобок, С.Н. Григоренко // 5-я Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии «ИСТ–2016». – Харьков–Коблево, 2016. – 306-307.
158. Григоренко, С.Н. Сравнительный анализ эффективности метода выявления результатов клонирования в условиях постобработки изображения / С.Н.Григоренко // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2016. – Т.6, №2. – С.193–200.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ