

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГРИГОРЕНКО СВІТЛАНА МИКОЛАЇВНА

УДК 004.056.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ
ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ**

05.13.21 — системи захисту інформації

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса — 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Кобозєва Алла Анатоліївна,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри інформатики та управління захи-
стом інформаційних систем

Офіційні опоненти: Лауреат Державної премії,
доктор технічних наук, професор
Рибальський Олег Володимирович,
Національна академія внутрішніх справ,
професор кафедри інформаційних технологій

кандидат технічних наук, доцент
Шишкін Олександр Володимирович
Національний університет
«Одеська морська академія»,
доцент кафедри морського радіозв'язку

Захист відбудеться «31» січня 2017 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради К 41.052.11 в Одеському національному політехнічному університеті за
адресою:

65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного полі-
технічного університету за адресою:

65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

Автореферат розісланий « ____ » _____ 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.О.Фомін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток інформаційних технологій привів до небувалої легкості здійснення неавторизованих модифікацій цифрових контентів, зокрема, цифрових зображень (ЦЗ), які розглядаються далі в роботі. Високопрофесійні підробки можуть привести до серйозних негативних наслідків як для окремо взятих людей, так і суспільства в цілому, при використанні їх у вигляді речовинних доказів у судових розглядах, у вигляді об'єктів контролю результатів діяльності людини або технічного пристрою, у справі пропаганди, при створенні «чорного піару» для «небажаних» опонентів і т.д. Все це приводить до необхідності проведення ефективної експертизи цілісності цифрових контентів для можливості їх використання з метою, що відрізняється від розважальної.

Одним з найбільш широко й часто використовуваних програмних інструментів при неавторизованих змінах зображення (фальсифікаціях) є клонування, реалізоване у всіх сучасних графічних редакторах. При клонуванні оригінальна підобласть ЦЗ – прообраз копіюється й вставляється в іншу область цього ж зображення, замінюючи собою його оригінальну частину й створюючи клон. На практиці з метою «маскування» такого виду фальсифікації ЦЗ, як правило, піддається постобробці - додатковим збурним діям (ЗД), що значно ускладнює процес виявлення її результатів.

Під порушенням цілісності ЦЗ в роботі розуміється результат застосування до нього операції клонування в умовах відсутності/наявності його постобробки.

Питання, пов'язані з рішенням задачі виявлення клонування, у тому числі в умовах додаткових ЗД, уже піднімалися фахівцями в області інформаційної безпеки, серед яких I.Amerini, L.Ballan, R.Caldelli, A.Popescu, H.Farid, G.Liu і ін., а також вчені з України: О.В.Рибальський, А.А.Кобозєва, О.Ю.Лебедева, О.В.Наріманова, В.В.Зоріло та ін., які зробили вагомий внесок у рішення проблеми виявлення порушення цілісності цифрових контентів. Однак існуючі методи не забезпечують бажану ефективність при наявності постобробки ЦЗ. Навіть в умовах відсутності додаткових ЗД лише деякі алгоритми у змозі не пропустити ЦЗ, що зазнали клонування.

Існуючі методи виявляються ефективними часто лише в певних умовах проведення клонування, орієнтовані на конкретні ЗД (до того ж не розраховані на значні збурення зображення), однією з основних причин чого є орієнтованість використовуваних ними математичних апаратів на специфіку й реалізацію конкретних програмних інструментів обробки ЦЗ, «тиражування» основних ідей існуючих підходів для рішення розглянутої задачі при розробці нових методів.

Однією з важливих задач, невирішеною повною мірою, залишається задача виявлення областей клонування малих відносних розмірів, що часто має місце на практиці, наприклад, коли із ЦЗ усуваються малі об'єкти, що дозволяють опосередковано робити висновок про реальний час і місце відображеної сцени. Існуючі методи, як правило, взагалі не розглядають задачу виявлення областей клону/прообразу (КП), коли вони становлять менше 0.85–1% ЦЗ, що можна пояснити лише недостатньою спроможністю їх математичних базисів.

Таким чином, задача виявлення результатів клонування в ЦЗ є важливою, вимагає залучення математичних інструментів, які не використовувалися в розглянутій області дотепер, а тема дисертаційного дослідження «Підвищення ефективності виявлення порушення цілісності цифрового зображення» є *актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до пп. 1.2.1.1, 1.2.1.2, 1.2.3.4, 1.2.6.9 і 1.2.8 «Основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі при-

родничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014–2018 роки», визначених постановою Президії НАН України від 20.12.2013 № 179; відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямків наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року, затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України №942 від 7 вересня 2011р. Обраний напрямок дослідження відповідає пп. 4.11, 4.12 «Стратегії національної безпеки України», затвердженої Указом Президента України № 287/2015 від 26 травня 2015 р.

Дисертаційна робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті відповідно до планів науково-дослідної роботи на тему «Розробка методів підвищення ефективності комплексної системи захисту інформації» (№ держреєстрації 0115U000834).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності процесу виявлення порушення цілісності ЦЗ шляхом розробки методу виявлення результатів клонування в зображенні, ефективного, у тому числі, в умовах (значних) додаткових збурних дій, а також для областей клону/прообразу малих відносних розмірів.

Під областями КП малих відносних розмірів розуміються області, що становлять менш 0.85% ЦЗ. Процес виявлення порушень цілісності ЦЗ трактується як процес виявлення клонування в умовах наявності/відсутності постобробки. Ефективність виявлення порушення цілісності ЦЗ визначається двома параметрами: відношенням кількості фальсифікованих ЦЗ (під якими розуміються зображення, що піддалися клонуванню), визначених як фальсифіковані, до загального числа розглянутих фальсифікованих (TPR (true positive rate)), вираженим у відсотках; відношенням кількості оригінальних ЦЗ, визначених як фальсифіковані, до загальної кількості розглянутих оригінальних зображень (FPR (false positive rate)), вираженим у відсотках. Далі вважається, що фальсифіковане ЦЗ є виявленим, якщо в ньому визначається наявність областей КП, при цьому ці області мають непусте перетинання з реальними областями КП. Оригінальне ЦЗ визначається як фальсифіковане, якщо в ньому фіксується наявність областей КП.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні *задачі*:

1. Провести аналіз сучасного стану задачі виявлення областей клону/прообразу в цифровому зображенні в умовах додаткових збурних дій;
2. Визначити формальні характеристики підобластей ЦЗ, нечутливі до збурень вхідних даних, кількісно однакові для областей клону й прообразу, у тому числі в умовах постобробки, незалежно від специфіки й сили додаткової збурної дії, а також від умов проведення клонування;
3. Розробити теоретичні основи методу виявлення клонування в ЦЗ, що забезпечать його ефективність незалежно від виду та специфіки додаткових збурних дій, які використовуються для постобробки зображення;
4. Розробити метод виявлення результатів клонування в ЦЗ, ефективний, у тому числі, для областей клону/прообразу малих відносних розмірів, в умовах (значних) додаткових збурних дій;
5. Встановити якісні й кількісні відмінності областей клону й прообразу в умовах додаткових збурних дій, з врахуванням яких розробити алгоритмічну реалізацію методу виявлення областей клону/прообразу в ЦЗ; провести аналіз ефективності розробленого алгоритму, у тому числі порівняльний із сучасними аналогами.

Об'єкт дослідження — процеси порушення цілісності цифрового зображення.

Предмет дослідження — методи виявлення порушення цілісності цифрового зображення, що відбулося шляхом клонування.

Методи дослідження. Для розробки теоретичного базису методу виявлення клонування в ЦЗ використовуються теоретичні основи цифрової обробки зображень, теорія інтерполяції, чисельні методи, математичний аналіз, теорія збурень, матричний аналіз. Для визначення формальних характеристик ЦЗ, кількісно однакових для областей КП, використовуються математичний аналіз, теорія збурень, чисельні методи. Для забезпечення незалежності ефективності розробленого методу від особливостей ЦЗ, розмірів КП використовуються математичний аналіз і теоретичні основи цифрової обробки зображень. Оцінка обчислювальної складності алгоритму, що реалізує розроблений метод, здійснюється з використанням теорії алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. *Вперше* на підставі геометричного представлення ЦЗ знайдений формальний параметр, кількісно однаковий для відповідних блоків областей клону й прообразу в умовах наявності/відсутності додаткових збурних дій: значення глобального (локального) мінімуму матриці мінімальних блокових відмінностей, яка ставиться у відповідність аналізованому зображенню, що дало можливість розробити теоретичний базис, який забезпечує незалежність ефективності розробленого на його основі методу виявлення результатів клонування від виду та специфіки додаткових збурних дій, які використовуються для постобробки зображення.

2. *Вперше* на підставі знайденого формального параметра, кількісно однакового для відповідних блоків клону й прообразу, встановлені характерні особливості елементів матриці мінімальних блокових відмінностей у випадку наявності клонування: існування співпадаючих за відповідними значеннями околів радіуса не менше одиниці для елементів матриці, що визначають співпадаючі за значенням її глобальні (локальні) мінімуми, що не властиво для оригінальних ЦЗ. Врахування цього в сукупності із встановленими особливостями гістограм абсолютних значень елементів матриці різниці блоків зображення у випадку їхньої приналежності/ неприналежності клону й прообразу дало можливість для забезпечення ефективної роботи розробленого методу виявлення результатів клонування незалежно від властивостей аналізованого зображення, що відрізняє його від сучасних аналогів.

3. *Вперше* на підставі отриманого теоретичного базису, розроблений метод виявлення результатів клонування, ефективний, у тому числі в умовах (значних) додаткових збурних дій, ефективність якого не залежить від особливостей аналізованого ЦЗ, проведення операції клонування, специфіки конкретної збурної дії, яка використовується для постобробки зображення, й перевищує сучасні аналоги, що дозволило в цілому підвищити ефективність виявлення порушення цілісності ЦЗ.

4. *Отримали подальший розвиток* теоретичні основи блоково-орієнтованого підходу до виявлення клонування в зображенні шляхом отримання критерію в умовах відсутності постобробки і необхідної умови при наявності постобробки ЦЗ приналежності блоків матриці зображення областям клону й прообразу. Отримані умови характеризуються нечутливими до змін вхідних даних кількісними параметрами. Це забезпечило ефективну роботу розробленого методу при виявленні в умовах постобробки областей клону/прообразу, відносні розміри яких значно менше тих, які ефективно виявляються існуючими аналогами.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи полягає в доведенні здобувачем отриманих наукових результатів до конкретних алгоритмів, які можуть бути використані як складові частини систем захисту інформації, інформаційних систем різного наповнення будь-якої установи, підприємства й т.д.

Алгоритм, що реалізує розроблений метод *KL* виявлення результатів клонування в ЦЗ, дозволив підвищити ефективність процесу виявлення порушення цілісності зображення (з урахуванням показника TPR): на 6.7% в умовах стиску із втратами клонованого ЦЗ, на 5.8% в умовах накладання шуму, на 4% в умовах розмиття клонованого ЦЗ, у порівнянні з найкращими із сучасних аналогів, при цьому при відсутності додаткових ЗД наявність КП визначається при його використанні в 100% ЦЗ. Алгоритм залишається ефективним у випадку малих відносних розмірів області КП (<0.85% ЦЗ) і дозволяє виявляти результати клонування у випадку, коли КП становлять <<0.85% ЦЗ, на відміну від існуючих аналогів.

В умовах додаткових ЗД, у тому числі комплексних, що зберігають надійність сприйняття ЦЗ, значення показника TPR для розробленого алгоритму не менше 97%, а значення FPR=4.8% порівняно із кращими сучасними аналогами. Алгоритм дозволяє ефективно виявляти результати клонування в умовах значних ЗД, де сучасні аналоги взагалі не працюють: в умовах стиску з коефіцієнтом якості QF=10 детектує результати клонування в 70% фальсифікованих ЦЗ, а при ЗД, для якої SNR=5dB – в 67.8% ЦЗ.

Розроблений алгоритм є поліноміальним ступеня 4.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується актами впровадження в діяльність: ТОВ «СКАЙ СІСТЕМ АУТОМЕЙШН», ТОВ «ВПА-ЮГ», ТОВ «НГХ СЕРВІС».

Особистий внесок здобувача. Роботи [1-3,11] виконані автором самостійно. 3 робіт, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать: ідея використання нечутливості об'єму циліндричного тіла, що ставиться у відповідність ЦЗ (частині ЦЗ), до стиску зображення із втратами при виявленні областей КП, аналіз властивостей матриць блокових відмінностей [4,12]; доказ нечутливості задачі побудови інтерполяційного сплайна для елементів матриці ЦЗ до змін вхідних даних для сплайнів різного, у тому числі високого, ступеня [5,10]; забезпечення ефективності розробленого методу виявлення клонування в умовах стиску із втратами з довільним коефіцієнтом якості, у тому числі для формату Jpeg2000 [6]; дослідження характерних особливостей околіїв елементів – локальних мінімумів матриці мінімальних блокових відмінностей, для випадку оригінального ЦЗ й зображення, для якого відповідні блоки матриці належать областям КП, аналіз попиксельних відмінностей відповідних блоків КП [7,13,14]; розробка методу виявлення областей КП в умовах постобробки ЦЗ [8,9].

Апробація результатів дисертації. Наукові результати і основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науковому семінарі при Вченій раді НАН України «Технічні засоби захисту інформації» (Одеса, 2015) та 6 Міжнародних наукових конференціях [9-14].

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи викладено у 14 публікаціях: 7 статей, з яких 6 опубліковано в журналах, включених у перелік фахових видань України, з них 3 без співавторів; 5 статей – в журналах, включених до міжнародних наукометричних баз (Index Copernicus, РИНЦ, EBSCO, Google Scholar, Ulrich, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Наукова періодика України); 1 стаття в зарубіжному періодичному виданні; 1 колективна монографія; 6 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 158 найменувань, до-

датків на 4 сторінках, 45 рисунків і 19 таблиць – всього 172 сторінка. Основний текст дисертації складається з 136 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність напрямку дослідження, приведено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовані мета та задачі дослідження, відображені наукова новизна та практична цінність роботи, особистий внесок здобувача, наведені відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

У першому розділі проведено огляд сучасних наукових джерел по темі дисертації, на підставі якого встановлено: клонування було й залишається одним з найбільш часто й широко використовуваних при фальсифікації ЦЗ програмних інструментів, забезпечуючи актуальність його виявлення; задача виявлення результатів клонування в ЦЗ в умовах його постобробки не є повністю вирішеною, більшість існуючих методів орієнтовані на роботу в умовах певного й іноді дуже обмеженого набору додаткових ЗД, часто виявляючись неспроможними в умовах значних ЗД, у випадку, коли клонування відбувається з метою усунення об'єкта, що знаходиться в області ЦЗ з малими перепадами значень яскравості. Існуючі методи розраховані на аналіз клонованих ЦЗ, у яких відносні розміри КП більші за 0.85% ЦЗ, що значно обмежує використання цих методів на практиці.

Таким чином, у розділі 1 показано, що задача підвищення ефективності процесу виявлення порушення цілісності ЦЗ шляхом розробки нового методу виявлення результатів клонування в ЦЗ, ефективного, в тому числі в умовах додаткових ЗД, а також для областей КП малих відносних розмірів, є актуальною.

У другому розділі розробляється теоретичний базис для методу рішення задачі виявлення порушення цілісності ЦЗ, проведеного шляхом клонування, в тому числі в умовах додаткових до клонування ЗД.

Для простоти викладу, не обмежуючи спільності міркувань, на цьому етапі дослідження розглядаються монохромні ЦЗ. Будь-яке ЦЗ є результатом дискретизації області визначення $D \subset R^2$ і квантування значень функції $f(x, y)$, $(x, y) \in D$, результатом чого є $n \times m$ – матриця F з елементами $f_{ij} \in \{0, 1, \dots, 255\}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, а геометричним представленням може бути тривимірна поверхня S , яка є графіком функції $g(x, y)$, що наближує $f(x, y)$ на множині D з використанням елементів F , зокрема, $g(x, y)$ може виступати інтерполяційним сплайном для елементів F , що й припускається нижче. Показано, що якщо $g(x, y)$ – інтерполяційний сплайн 1-го ступеня, то задача його побудови є нечутливою до змін вхідних даних – значень яскравості пікселів ЦЗ. У роботі визначений параметр, що характеризує поверхню S і, як наслідок, ЦЗ з матрицею F у цілому й при цьому є нечутливим до малих змін характеристик поверхні (ЦЗ) – об'єм V циліндричного тіла T з твірною, паралельною осі аплікат OZ , обмеженого поверхнею S і координатною площиною XOY : $V = \iint_D g(x, y) dx dy$, $g(x, y)$ – інтерполяційний сплайн 1-го ступеня для елементів F .

Якщо $K \subset D$, $P \subset D$ – області, які відповідають КП, то їм можна поставити у відповідність: $V_K = \iint_K g(x, y) dx dy$, $V_P = \iint_P g(x, y) dx dy$. Якщо ЦЗ не піддавалося постобробці, то: $V_K = V_P$, інакше в силу нечутливості задачі знаходження об'єму: $V_K \approx V_P$.

Для чисельного обчислення значень об'ємів з використанням подвійних інтегралів як складена квадратурна формула використовується інтегральна сума для по-

двійного інтегралу, що відповідає розбивці області інтегрування $L \subset D$, для якої часткова область є квадратом, у центрі якого знаходиться точка з координатами відповідного пікселя. Беручи до уваги те, що координати пікселів, що знаходяться поряд, відрізняються на одиницю, можна вважати, що довжина сторони кожного отриманого квадрата, а тому і його площа S_{ij} дорівнюють 1. Тоді:

$$\iint_L g(x, y) dx dy = \sum_{(i, j) \in L} g(i, j) S_{ij} = \sum_{(i, j) \in L} g(i, j) = \sum_{(i, j) \in L} f_{ij}. \quad (1)$$

Для (1) не має значення ступінь інтерполяційного сплайна $g(x, y)$, що знімає необхідність розгляду сплайна ступеня вище одиниці для інтерполяції елементів матриці F у ході запропонованого рішення задачі, що розглядається в роботі.

Таким чином, для областей КП без наступної обробки ЦЗ повинно виконуватися співвідношення, для якого встановлена нечутливість до збурень вхідних даних:

$$\sum_{(i, j) \in P} f_{ij} = \sum_{(i, j) \in K} f_{ij}, \quad (2)$$

а в умовах додаткових ЗД:

$$\sum_{(i, j) \in K} f_{ij} \approx \sum_{(i, j) \in P} f_{ij}. \quad (3)$$

Припускається, що постобробка після виконаного клонування стосується всього ЦЗ. З врахуванням результатів проведеного літературного огляду для розроблюваного методу використовується блоково-орієнтований підхід, як найбільш точний серед існуючих. Далі припускається, що області КП такі, що прообраз має хоча б один $q \times q$ – блок, який не належить області перетину КП.

З врахуванням проведеного експерименту, у ході якого для $q = 4, q = 8$ була встановлена наявність, а для $q \geq 16$ відсутність в оригінальних ЦЗ $q \times q$ – блоків, для яких виконувалася умова (2), у роботі отриманий критерій наявності в ЦЗ областей КП в умовах відсутності додаткових ЗД, відповідно до якого, якщо $B^{(P)}$ і $B^{(K)}$ – $q \times q$ – блоки матриці F ЦЗ, для яких $q \geq 16$ і $B^{(P)} \cap B^{(K)} = \emptyset$, то для того, щоб $B^{(P)}, B^{(K)}$ були відповідними блоками з КП, необхідно й достатньо виконання (2).

З врахуванням отриманого критерію з метою зменшення можливостей для виникнення хибних тривог при роботі розроблюваного методу виявлення КП в ЦЗ далі використовуються $q \times q$ – блоки, для яких $q \geq 16$.

Беручи до уваги результати експерименту й отриманий критерій, на цьому етапі дослідження припускається, що якщо постобробка ЦЗ після клонування мала місце, то області КП, які були однаковими до неї, зміняться одна відносно другої менше, ніж ті, які відрізнялися від КП, а тому відрізнялися між собою до постобробки.

В роботі кількісно визначається характеристика «відмінності блоків» з врахуванням (3), тобто з врахуванням введеної характеристики об'єму відповідного тіла. Нехай $B_{ij}, i = \overline{1, n - q + 1}, j = \overline{1, m - q + 1}$, – $q \times q$ – блок $n \times m$ – матриці ЦЗ F , для якого на місті (1,1) знаходиться елемент f_{ij} . Такий вид блоку B_{ij} назовемо *основним*. Кожному блоку B_{ij} ставиться в відповідність $(n - q + 1) \times (m - q + 1)$ – матриця блокових відмінностей $M^{(ij)}$ (МБВ) з елементами $m^{(i, j)}_{k, l}$, що визначаються як:

$$m^{(i, j)}_{k, l} = \sum_{t, p=1}^q r_{tp}, \quad k = \overline{1, n - q + 1}, l = \overline{1, m - q + 1} \quad (4)$$

де $r_{tp}, t, p = \overline{1, q}$, — елементи $q \times q$ – матриці R , яка отримана наступним чином:

$$R = |B_{ij} - B_{kl}|, \quad (5)$$

де рівність (5) розуміється в поелементному сенсі. Елементи МБВ $M^{(ij)}$ відображають відмінність блоку B_{ij} від будь-якого іншого блоку матриці ЦЗ в сенсі (4)–(5), а тому визначають і ті блоки, які відрізняються від B_{ij} найменше (в сенсі об'ємів відповідних циліндричних тіл), не перетинаючись із ним, і є шуканими, враховуючи задачу, що розглядається.

У роботі встановлені відмінності властивостей $M^{(ij)}$ в випадках, коли B_{ij} належить/не належить області КП.

Очевидно $\min M^{(ij)} = m^{(i,j)}_{ij} = 0$. Малими в порівнянні з іншими елементами $M^{(ij)}$ будуть також $m^{(i,j)}_{kl}$, $k \in \{i-1, i, i+1\}$, $l \in \{j-1, j, j+1\}$. Однак малість цих елементів не є показником схожості блоків, що відповідають їм, у розглянутому в роботі сенсі. Тому для зручності наступних досліджень елемент $m^{(i,j)}_{ij}$ матриці $M^{(ij)}$ і його 8 найближчих сусідів робляться рівними великому, у порівнянні з іншими елементами $M^{(ij)}$, числу. Нова матриця позначається $\overline{M}^{(ij)}$ і називається модифікованою матрицею блокових відмінностей (ММБВ). Мінімальний елемент $\overline{M}^{(ij)}$ відповідає блоку B_{kl} клона (прообразу), якщо B_{ij} – блок прообразу (клону). В цьому випадку:

$$\min \overline{M}^{(ij)} = \min \overline{M}^{(kl)}. \quad (6)$$

Якщо B_{ij} не є блоком КП, то в загальному випадку $\min \overline{M}^{(ij)}$ ніяк не пов'язаний з $\min \overline{M}^{(kl)}$ для довільного блоку B_{kl} , який не перетинає B_{ij} .

Враховуючи (6), матриці F ЦЗ ставиться у відповідність $(n-q+1) \times (m-q+1)$ -матриця G – матриця мінімальних блокових відмінностей (ММБВ), елемент якої g_{ij} , $i = \overline{1, n-q+1}$, $j = \overline{1, m-q+1}$, відображає величину найменшої відмінності в сенсі (4)–(5) $q \times q$ -блока B_{ij} від будь-якого іншого блоку матриці F :

$$g_{ij} = \min \overline{M}^{(ij)}, \quad i = \overline{1, n-q+1}, \quad j = \overline{1, m-q+1}. \quad (7)$$

Відповідним блокам B_{ij} і B_{kl} КП в G будуть відповідати співпадаючі значення глобальних (чи локальних в умовах значних ЗД, як показано нижче) мінімуми:

$$g_{ij} = g_{kl}, \quad (8)$$

при цьому g_{ip} є глобальним мінімумом G , якщо $g_{ip} = \min_{1 \leq i \leq n-q+1, 1 \leq j \leq m-q+1} g_{ij}$, і локальним мінімумом, якщо в G існує такий окіл $U(g_{ip})$ для g_{ip} , що $\forall g_{ij} \in U(g_{ip}), g_{ij} \neq g_{ip} : g_{ij} > g_{ip}$. Окіл $U(g_{ip})$ радіуса r' створюють елементи $g_{t+k, p+l}$, $k, l \in \{-r', \dots, 0, \dots, r'\}$.

Таким чином, знайдений формальний параметр – *показник збігу*, кількісно однаковий для відповідних блоків КП ЦЗ, в тому числі в умовах додаткових ЗД: значення глобального (локального) мінімуму для ММБВ, що відповідає аналізованому ЦЗ. Показано, що наявність показника збігу в фальсифікованому ЦЗ не залежить від особливостей проведення клонування, специфіки реалізації конкретного програмного інструмента, використовуваного для постобробки ЦЗ, від величини ЗД, а тому може бути використаною навіть у випадку значних ЗД. Крім того, якщо в області прообразу, що не належить перетину КП, буде міститися хоча б один 16×16 -блок, то незалежно від того, які відносні розміри будуть мати КП, умова (8) дозволить виявити відповідні блоки, що підтверджується при тестуванні алгоритмічної реалізації розробленого на основі (8) методу (розділ 4). Очевидно, що задача отримання параметрів, що фігурують в (8), є нечутливою до збурень вхідних даних.

Твердження 1 (необхідна умова наявності в ЦЗ областей КП). Нехай ЦЗ є $n \times m$ -матрицею F зазнало клонування. Якщо B_{ij} і B_{kl} – відповідні $q \times q$ -блоки КП, то для ММБВ G , що побудована для ЦЗ відповідно (7), виконується умова (8), де значення $g_{ij} = g_{kl}$ відповідають глобальному (локальному) мінімуму G .

Якщо частина прообразу, яка не належить області перетину КП, містить більше одного $q \times q$ -блока, то (8) визначає в першу чергу ті відповідні блоки, які відрізняються найменше. Іншим блокам КП будуть відповідати наступні за значенням глобальні (локальні) мінімуми G (без врахування тих глобальних (локальних) мінімумів, що вже були використані) і т.д.

Отримана теоретичним шляхом необхідна умова наявності в ЦЗ КП на практиці може порушуватися в силу особливостей реалізації цифрової обробки ЦЗ, зокрема, у силу того, що всі значення матриці F ЦЗ повинні належати множині $\{0,1,\dots,255\}$, що приводить до похибки, яка виникає за рахунок введення значень яскравості в прийнятті межі від 0 до 255 після проведеної постобробки. Така ситуація очевидно тим більше ймовірна, чим більше величина ЗД, використаної в процесі постобробки ЦЗ.

Таким чином, умова (8) є показником на блоки, «підозрілі» на те, щоб бути відповідними блоками КП у ЦЗ, дає можливість визначити їхнє місце розташування: це блоки, що відповідають елементам f_{ij}, f_{kl} матриці F . Умова (8) для переважної більшості ЦЗ є не тільки необхідною, але й достатньою для того, щоб блоки B_{ij} і B_{kl} були відповідними блоками КП. Виключення можуть складати ЦЗ, що містять значні області з малими перепадами значень яскравості пікселів – «фонові». Твердження 1 буде мати місце й при іншому, у порівнянні з основним видом, визначенні блоків B_{ij} , наприклад, коли елемент f_{ij} знаходиться в B_{ij} на місці (q, q) .

У розділі 2 запропонована ідея аналізу ММБВ за допомогою «перетинів» виду $c_1 \leq z \leq c_2$, де $c_1, c_2 \in \mathbb{N}$ – сталі, поверхні, що відповідає G , яка реалізована у вигляді методу в розділі 3.

В третьому розділі розробляється базовий метод виявлення результатів клонування (БМВК) у ЦЗ, ефективний в умовах додаткових ЗД, у тому числі значних, на основі теоретичного базису, розробленого в розділі 2.

При проведенні обчислювальних експериментів у роботі використовується експериментальна множина (ЕМ), яка складається з 400 ЦЗ з бази NRCS, що є традиційною при роботі з зображеннями, і 100 ЦЗ, зроблених непрофесійними камерами.

У ході розробки БМВК шляхом обчислювального експерименту визначені можливі параметри ЗД, які традиційно використовуються при постобробці ЦЗ після клонування, що зберігають його надійність сприйняття, яка кількісно оцінюється за до-

помогою пікового відношення «сигнал-шум» $PSNR = 10 \cdot \lg \left(255^2 / \left(\frac{1}{mn} \sum_{i,j} (f_{ij} - \bar{f}_{ij})^2 \right) \right)$

де $\bar{f}_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$, – елементи матриці \bar{F} зміненого ЦЗ (вважається, що надійність сприйняття ЦЗ збережена, якщо $PSNR > 37\text{dB}$): гауссівський шум з нульовим маточікуванням і $D \leq 0.0005$ ($D \in \{0.0005, 0.0001\}$); мультиплікативний шум з $D \leq 0.001$ ($D \in \{0.0005, 0.001\}$); стиск із втратами, фільтрація (усереднюючий фільтр із розміром маски $p < 5$, медіанний фільтр з $p = 3$, гауссів фільтр). Як комплекси ЗД розглядаються накладання шумів із визначеними вище параметрами з наступним

стиском ЦЗ з коефіцієнтами якості $QF \in \{65,75,85,95\}$ (як найпоширеніші і найімовірніші на практиці).

У ході розробки БМВК шляхом обчислювального експерименту визначені кількісні показники відмінності між відповідними $q \times q$ -блоками ($q \in \{16,24,32\}$) КП після постобробки ЦЗ, у якості якої використовувалися накладання шумів з параметрами, значення яких встановлені вище, після чого ЦЗ зберігалося у форматах без/з втратами (Tif/Jpeg ($QF \in \{65,75,85\}$)). В результаті отримані значення $T_{min}^{(q)}$ і $T_{max}^{(q)}$ відповідно для мінімальної й максимальної в умовах розглянутих ЗД відмінності в сенсі (4)-(5) $q \times q$ -блока клона від відповідного блоку прообраза: для $q = 32$ $T_{min}^{(32)} = 408$, $T_{max}^{(32)} = 10147$; для $q = 24$ $T_{min}^{(24)} = 309$, $T_{max}^{(24)} = 5940$; для $q = 16$ $T_{min}^{(16)} = 60$, $T_{max}^{(16)} = 2849$, які використовуються для алгоритмічної реалізації БМВК.

Головним об'єктом аналізу при виявленні областей КП у ЦЗ є ММБВ G . Для ЦЗ, що мають значні області з малим перепадом значень яскравості пікселів, співвідношення (8) може вказувати не тільки на області КП, а на оригінальні області ЦЗ, що мало відрізняються. Для уточнення областей КП пропонується метод розподілу відрізка навпіл аналізу ММБВ (МАМБО), який є складовою частиною БМВК. МАМБО аналізує ММБВ за допомогою множини «перетинів» поверхні, яка відповідає G , виду $c_1 \leq z \leq c_2$, $c_1, c_2 = const$, $c_1, c_2 \in \mathbb{N}$, де \mathbb{N} – множина натуральних чисел. Результатом «перетину» є місця розташування тих блоків ЦЗ, для яких мінімальна відмінність їх від всіх інших у сенсі (4)-(5) знаходиться в межах $[c_1, c_2]$.

Основні кроки МАМБО наступні.

Крок 1. Нехай G - ММБВ аналізованого за допомогою $q \times q$ -блоків $n \times m$ - ЦЗ.

Крок 2. Визначити порогові значення T_{min} , T_{max} для можливих значень елементів G , що відповідають блокам КП. В умовах обраного q можливо: $T_{min} = T_{min}^{(q)}$, $T_{max} = T_{max}^{(q)}$; в умовах відомих додаткових ЗД T_{min} , T_{max} можуть визначатися за результатами обчислювального експерименту (наведеними в роботі); якщо інформація про ЗД відсутня, а q не визначений однозначно: $T_{min} = \min_q T_{min}^{(q)}$, $T_{max} = \max_q T_{max}^{(q)}$.

Крок 3 (розподіл відрізка навпіл).

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

3.2. Побудувати «перетини» поверхні, що є графіком функції, яка інтерполює елементи матриці G : $a \leq z \leq c$, $c \leq z \leq b$, представити їх у вигляді бінарних ЦЗ.

3.3. Встановити: $k_1 = 0$, $k_2 = 0$.

3.4. (Аналіз «перетинів» у вигляді бінарних зображень).

3.4.1. Якщо «перетин» $a \leq z \leq c$ має однакові за формою й розмірами об'єкти, обмежені замкненою кривою,

то $k_1 = k_1 + 1$.

Якщо площа однакових об'єктів дорівнює 1,

то перехід на крок 4.

3.4.2. Якщо «перетин» $c \leq z \leq b$ має однакові за формою й розмірами об'єкти, обмежені замкненою кривою,

то $k_2 = k_2 + 1$.

Якщо площа однакових об'єктів дорівнює 1,

то перехід на крок 4.

3.4.3. Якщо $k_1 = 1$, $k_2 = 0$,

то із двох «перетинів» для подальшого аналізу використовується $a \leq z \leq c$.
Встановити: $b = c$. Обчислити значення середини нового відрізка $[a, b]$:
 $c = (a + b)/2$. Перехід на крок 3.2.

3.4.4. Якщо $k_1 = 0, k_2 = 1$,

то із двох «перетинів» для подальшого аналізу використовується $c \leq z \leq b$.
Встановити: $a = c$. Обчислити значення середини нового відрізка $[a, b]$:
 $c = (a + b)/2$. Перехід на крок 3.2.

3.4.5. Якщо $k_1 = k_2 = 1$,

то із двох «перетинів» вибрати той, однакові об'єкти на якому менші за розмірами. У випадку, якщо це «перетин» $a \leq z \leq c$, встановити: $b = c$, інакше: $a = c$. Обчислити значення середини нового відрізка $[a, b]$: $c = (a + b)/2$. Перехід на крок 3.2.

3.4.6. Якщо $k_1 = k_2 = 0$ і $c - a > P$, де P – порогове значення, що визначається експериментальним шляхом,
то обидва «перетини» вимагають подальшого аналізу. Для кожного з них:
встановити a рівним лівому кінцю сегмента, що визначає «перетин», b – правому кінцю сегмента, що визначає «перетин», перейти на крок 3.2.

Крок 4. Якщо $k_1 = k_2 = 0$ для кожного з побудованих «перетинів»,

то аналізоване ЦЗ не піддавалося клонуванню.

Якщо $k_1 = 1$ чи $k_2 = 1$,

то аналізоване ЦЗ піддавалося клонуванню. Відповідні блоки областей КП, що відрізняються один від одного в сенсі (4)-(5) найменше, визначаються ізольованими однаковими об'єктами білого кольору площі 1 на бінарному зображенні-перетині.

Експериментальним шляхом з використанням ЕМ встановлено, що порогове значення $P = 300$.

У розділі 3 проводиться обґрунтування й практична перевірка виконання умови (8) у випадку значних ЗД для локальних мінімумів ММБВ, у ході чого розглянуто збереження ЦЗ у форматах із втратами Jpeg і Jpeg2000 з малими коефіцієнтами якості, стиск за допомогою малорангових апроксимацій матриці ЦЗ, а також її блоків. Проілюстрована спроможність розробленого нового підходу до виявлення в ЦЗ областей КП в умовах значних ЗД, в тому числі, геометричних.

З врахуванням всього вищесказаного основні кроки БМВК, що далі позначається KL_B , виглядають наступним чином.

Крок 1 (побудова матриці мінімальних блокових відмінностей G).

Вибрати розмір q квадратного блоку для аналізу ЦЗ.

Для $n \times m$ – матриці F ЦЗ:

1.1. Кожному елементу f_{ij} , $i = \overline{1, n - q + 1}$, $j = \overline{1, m - q + 1}$, матриці F поставити в співвідношення $q \times q$ – блок B_{ij} .

1.2. Для кожного блоку B_{ij} , $i = \overline{1, n - q + 1}$, $j = \overline{1, m - q + 1}$, матриці F :

1.2.1. Побудувати $(n - q + 1) \times (m - q + 1)$ – МБВ $M^{(ij)}$ відповідно до (4)-(5).

1.2.2. По матриці $M^{(ij)}$ побудувати ММВ $\overline{M}^{(ij)}$.

1.2.3. Визначити черговий елемент g_{ij} матриці G : $g_{ij} = \min \overline{M}^{(ij)}$.

Крок 2 (аналіз матриці G).

2.1. Визначити $G_{\min} = \min G$.

2.2. Обчислити кількість k_{\min} елементів в матриці G , де досягається G_{\min} .

2.3. Якщо $(k_{\min} = 2) \& (G_{\min} \in [T_{\min}^{(q)}, T_{\max}^{(q)}])$, де $T_{\min}^{(q)}, T_{\max}^{(q)}$ – відповідно мінімальне й максимальне значення можливої відмінності $q \times q$ – блоку клону від відповідного блоку прообразу,

то знайти місце розташування в G двох її елементів, що дорівнюють G_{\min} . Нехай це g_{i_1, j_1} і g_{i_2, j_2} , яким відповідають блоки B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} ;

інакше знайдені мінімуми не відповідають КП й далі не розглядаються, перехід на крок 2.5.

2.4. (Перевірка блоків B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2}).

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

то ці блоки не є блоками КП і далі не розглядаються,

інакше

якщо для елементів g_{i_1, j_1} і g_{i_2, j_2} існують околиці $U(g_{i_1, j_1})$ і $U(g_{i_2, j_2})$ радіуса r' , в яких вони є локальними мінімумами,

то B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} – «підозрілі» блоки на те, щоб виявитися відповідними блоками КП. Ці блоки позначаються певним чином на аналізованому ЦЗ;

інакше B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} не є відповідними блоками КП.

2.5. Знаходиться наступний за значенням мінімум \overline{G}_{\min} матриці G . Встановлюється: $G_{\min} = \overline{G}_{\min}$. Перехід на крок 2.2.

Крок 3. (Висновки й додатковий аналіз).

Попередні результати виявлення клонування виділені на ЦЗ так, як пропонується на кроці 2.4, або аналізоване ЦЗ залишається без змін.

Проводиться додатковий аналіз матриці G з використанням МАМБО, у результаті якого робиться остаточний висновок про наявність, місця розташування областей КП або про відсутність результатів клонування на аналізованому ЦЗ.

Вибір розміру q квадратного блоку для аналізу ЦЗ може бути зробленим з урахуванням специфіки ЦЗ або розмірів «підозрілої» з погляду клонування області.

У четвертому розділі проводиться аналіз і оцінка, у тому числі порівняльна, ефективності алгоритмічної реалізації БМВК в умовах відсутності постобробки ЦЗ; удосконалення БМВК з метою підвищення ефективності з наступним його аналізом в умовах постобробки ЦЗ.

При тестуванні алгоритмічної реалізації кожного з розглянутих у роботі методів ефективність оцінювалася двома кількісними показниками: TPR, FPR.

При алгоритмічній реалізації БМВК для його тестування вибиралися блоки B_{ij} основного виду. Обчислювальний експеримент проводився над ЦЗ з ЕМ, розмір яких становив 512×512 пікселів, які піддавалися клонуванню з наступним збереженням у форматі без втрат (Tif), області КП становили $\ll 0.85\%$ ЦЗ: як правило, від 0.098% до 0.39% ЦЗ, а також використовувалися області КП, розмір яких був менше 0.098% ЦЗ. Аналізувалася матриця однієї колірної складової ЦЗ, що вибира-

лася випадковим чином. Аналіз проводився з використанням 16×16 – блоків. Глобальний мінімум відповідної ММБВ G в умовах відсутності ЗД мав нульове значення ($T_{\min}^{(q)} = T_{\max}^{(q)} = 0$), що виключало необхідність проведення додаткового аналізу матриці G з використанням МАМБО. Показник TPR у цих умовах дав максимально можливе значення: TPR=100%. Для визначення показника FPR оригінальні ЦЗ з ЕМ аналізувалися з використанням $q \times q$ – блоків для $q \in \{16, 24, 32\}$. В результаті для q , що дорівнювало 16, 24, 32, значення FPR склали 11, 7.5 і 3% відповідно. Встановлено, що алгоритмічна реалізація БМВК уступає деяким сучасним аналогам по показнику FPR, що є небажаним і вимагає його вдосконалення.

З метою вдосконалення KL_B у роботі визначаються характерні риси околіїв співпадаючих за значенням локальних (глобальних) мінімумів G і попиксельних відмінностей блоків ЦЗ. Встановлено, що якщо B_{ij} і B_{kl} – блоки КП відповідно, то в переважній більшості випадків буде виконуватися: $g_{i-p, j-u} = g_{k-p, l-u}$, $p, u \in \{0, 1\}$, тобто в околах g_{ij} і g_{kl} радіуса $r = 1$ в G значення відповідних елементів будуть однаковими, що не характерно для блоків, які не належать КП; в умовах клонування r буде тим більше, чим більше розмір $q \times q$ – блока, що повністю підтверджується результатами обчислювального експерименту, представленими в табл. 1.

У роботі теоретично обґрунтовано й практично підтверджено, що характерні риси матриці R (5) відрізняються у випадках, коли B_{ij} і B_{kl} – блоки оригінальної області ЦЗ або відповідні для КП. За допомогою аналізу гістограм значень елементів R встановлено, що максимальна попиксельна відмінність у першому випадку більше, ніж у другому. Крім того, для блоків оригінальних частин ЦЗ часто спостерігався варіант, коли гістограма мала глобальний максимум в аргументі, що відрізнявся від «умовного нуля» (тобто відповідний стовпець гістограми не містив у собі нульові значення елементів R), що було нетиповим для блоків КП. Кількісно результати експерименту виглядали наступним чином. Для відповідних блоків КП, як правило, $\max R \leq 40$, (середнє значення $\max R$ по всіх ЦЗ склало 29, найменше – 13, найбільше – 46), максимум гістограма досягала в «умовному нулі» більш ніж в 95% ЦЗ. Для оригінальних ЦЗ картина відрізнялася: середнє значення $\max R$ по всіх ЦЗ склало 71, а аргумент максимуму гістограми перевищував «умовний нуль» для 37% ЦЗ.

Таблиця 1 – Радіус співпадаючих за відповідними значеннями околіїв елементів G , що відповідають співпадаючим за значенням локальним мінімумам G

Розмір $q \times q$ – блоку	Для КП			Для оригінальних ЦЗ		
	32	24	16	32	24	16
Середнє значення r	7.1	3.67	1.89	0.15	0.24	0.35
Максимальне/мінімальне значення r	14/1	7/1	4/1	1/0	1/0	1/0

З врахуванням проведеного додаткового аналізу G крок 2 удосконаленого методу KL виявлення КП, який відрізняє його від KL_B , виглядає наступним чином.

Крок 2 (аналіз матриці мінімальних блокових відмінностей G).

Кроки 2.1., 2.2., 2.3 – аналогічні KL_B .

2.4. (Перевірка блоків B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2}).

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

то ці блоки не належать КП й далі не розглядаються,

інакше

якщо для елементів g_{i_1, j_1} і g_{i_2, j_2} існують околи $U(g_{i_1, j_1})$ і $U(g_{i_2, j_2})$ радіуса r' , в яких вони є локальними мінімумами,

то

2.4.1. Знайти r – радіус співпадаючих за значеннями околів елементів g_{i_1, j_1} і g_{i_2, j_2} в матриці G .

2.4.2. Якщо $r = 0$

то пара блоків B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} не належить КП,

інакше

якщо $r > 1$

то пара блоків B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} належить областям КП; ці блоки помічаються відповідним чином на аналізованому ЦЗ,

якщо $r = 1$

то

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

2.4.2.2. Побудувати гістограму значень матриці R . Для цієї гістограми визначити моду t , а також M – максимальне значення R ;

якщо $(M > 46)OR(t \notin \text{"умовним нульом"})$

то пара блоків B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} не належить областям КП,

інакше B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} належать областям КП, помічаються на ЦЗ,

інакше B_{i_1, j_1} і B_{i_2, j_2} не є блоками областей КП.

2.5. Аналогічно KL_B .

Удосконалення KL_B дозволило зменшити для KL значення FPR для q , що дорівнює 16, 24, 32, відповідно до 4.8, 2.8, 0.8%, зробивши значення FPR порівнянним з аналогічним показником для кращих сучасних аналогів (табл.2).

Таблиця 2 – Результати порівняльного аналізу ефективності KL і сучасних аналогів в умовах відсутності постобробки клонованого ЦЗ

Метод	Fridrich (2003)	Lowe (2004)	Popescu and Farid (2004)	Pan and Lyu (2010)	Pan Xunyu (2010)	Amerini (2011)	Amerini (2013)	Mishra (2013)	Hashmi et al. (2014)	Diaa et al. (2015)	Diaa et al. (2016)	KL
TPR,%	89	74	87	83	89.96	100	94.9	73.6	80	92	96	100
FPR,%	84	4	86	8.8	1.25	8	9.2	3.6	10	8	2.9	4.8

В роботі проведено аналіз KL в умовах додаткових ЗД, що зберігають надійність сприйняття ЦЗ, у якості яких на першому етапі використовувалися мультиплікативний або гауссівський шум, розмиття по Гауссу, фільтрація медіанним або усереднюючим фільтром, після чого, на другому етапі, ЦЗ зберігалася або у форматі без втрат (Tif), або із втратами (Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$), приводячи до комплексного виду ЗД. Використовувалися параметри ЗД, визначені вище. Розмиття по Гауссу здійснювалося з використанням маски фільтра нижніх частот Гаусса, що формувалася за допомогою функції *fspecial* (середовище Matlab (License number: 21808. Platform: All. License option: Group Term: Perretual. Use: Classroom)), одним з параметрів якої, поряд з розмірами маски, є δ , який задає середнеквадратичне відхилення розподілу Гаусса, що використовується при формуванні маски фільтра. На даному етапі

обчислювального експерименту $\delta = 0.5$. Відносний розмір області клону максимально становив 0.39% ЦЗ. При алгоритмічній реалізації KL , додатково до прийнятого вище для реалізації KL_B , використовувалися значення встановлених вище порогів $T_{\min}^{(q)}, T_{\max}^{(q)}, q \in \{16, 24, 32\}$.

Отримані результати говорять про високу ефективність KL : $TPR \geq 97\%$ для всіх розглянутих варіантів постобробки; TPR практично не залежить від розміру використовуваного при аналізі $q \times q$ -блока, а також від специфіки і виду ЗД і їхніх комплексів, як і передбачалося при формуванні теоретичного базису методу.

У роботі показана спроможність алгоритмічної реалізації KL у випадку області КП малих відносних розмірів; в умовах значних, у тому числі комплексних, ЗД. Ілюстрація першого, коли метою клонування було приховування об'єкта на оригінальному ЦЗ, при цьому прообраз був частиною «фонові» області ЦЗ, і клонування відбувалося в межах цієї області (в умовах комплексної ЗД), наведена на рис.1, де відносні розміри КП менші 0.06% ЦЗ, ілюстрація другого випадку – на рис.2.

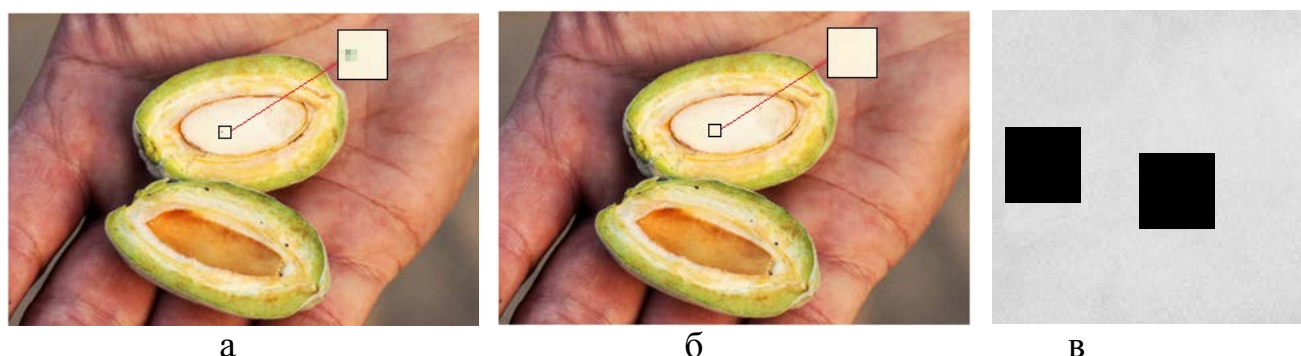


Рисунок 1 – Ілюстрація роботи KL у випадку малих відносних розмірів КП: а – оригінальне ЦЗ; б – ЦЗ, що є результатом клонування з наступним розмиттям по Гауссу з маскою 5×5 і збереженням у форматі Jpeg з $QF = 75$; в – результат роботи KL для виділеної частини ЦЗ (КП пофарбовані в чорний колір)

Встановлено, що при зміні сили ЗД матриця G і її характерні для КП області принципово не змінюються, що приводить до принципово порівнянних результатів роботи KL незалежно від сили ЗД, що й очікувалося при формуванні теоретичного базису розробленого методу.

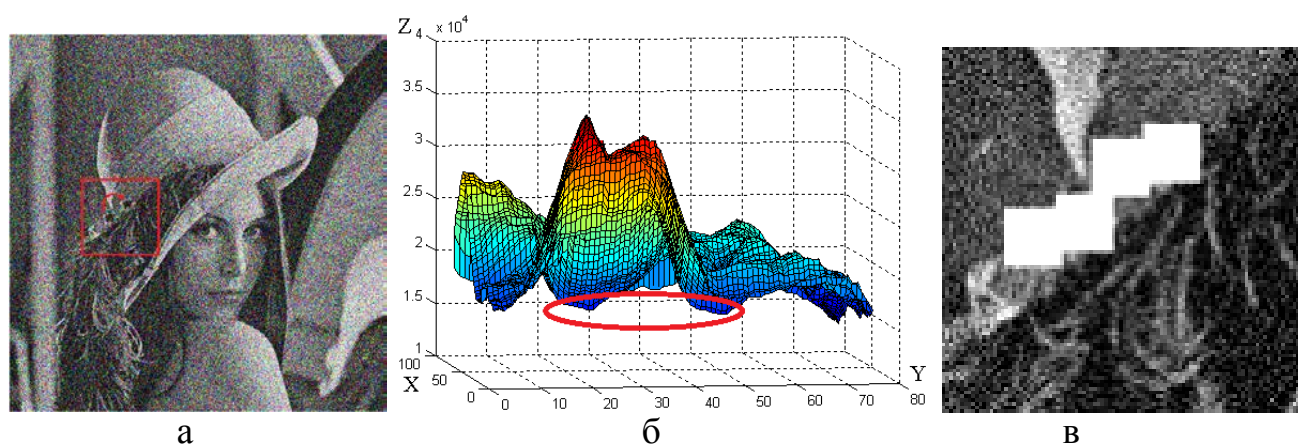


Рисунок 2 – Ілюстрація роботи KL в умовах значних ЗД: а – ЦЗ після клонування з наступним накладанням гауссівського шуму ($SNR=3.5dB$) і збереження в Jpeg з $QF=75$; б – поверхня, що відповідає G для виділеної області ЦЗ; в – результат роботи KL для виділеної частини ЦЗ

У роботі проведений порівняльний аналіз ефективності *KL* з сучасними аналогами в умовах додаткових ЗД, результати якого в умовах стиску із втратами (Jpeg) представлені на рис.3. Тут і далі для *KL* використані середні значення TPR по всім задіяним при аналізі ЦЗ $q \in \{16,24,32\}$ для кожного значення параметра, при якому відбувається порівняння, в даному випадку для кожного значення QF. Результати для *KL* при збереженні клонованого ЦЗ в Jpeg2000 є порівнянними із представленими для його алгоритмічної реалізації на рис.3.

Отримані результати свідчать про перевагу по ефективності з погляду TPR методу *KL* над усіма розглянутими аналогами. При зменшенні QF в 5 разів (з 100 до 20) значення TPR зменшилося незначно: на 7.1% (з 99.2% до 92.1%). Необхідно відзначити, що для $QF < 40$ тестування сучасних аналогів практично не проводиться. Виключення становить Amerini (2011), для якого проводилося тестування в умовах стиску з $QF=20$, у яких *KL* перевищує Amerini (2011) на 5.6% (TPR). Тестування в умовах стиску з $QF=5$ жодного із сучасних аналогів не проводилося взагалі, що може говорити тільки про їхню неспроможність у даних умовах, у той час як для *KL* $TPR=69.3\%$. Тестування більшості сучасних аналогів проводилося при $QF \geq 50$. Для $QF = 50$ *KL* перевищує Amerini (2011) – кращий з аналогів у цих умовах на 2.6% (TPR). Для найчастіше використовуваного при стиску у форматі Jpeg значення $QF = 75$ *KL* перевищує кращий з аналогів Mahmood et al. (2016) на 4.5% (TPR). Максимальна перевага *KL* над аналогами спостерігається в умовах $QF = 60$ для Daa et al. (2016) і становить 6.7%. При цьому області КП для *KL* завжди при його тестуванні мали розміри менше 0.85% ЦЗ, на відміну від алгоритмів-аналогів.

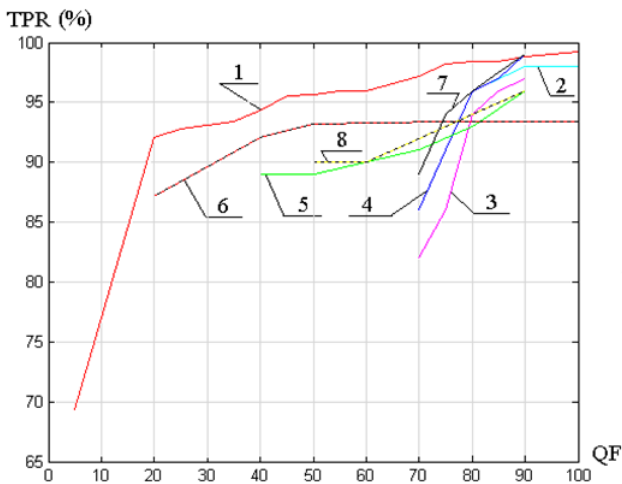


Рис.3. Залежність TPR від QF, що використовується при стиску ЦЗ після клонування: 1 - *KL*; 2 - Lin et al. (2009); 3 - Bayram et al. (2009); 4 - Huang et al. (2011); 5 - Liu et al. (2011); 6 - Amerini(2011); 7 - Mahmood et al. (2016); 8 - Daa et al. (2016)

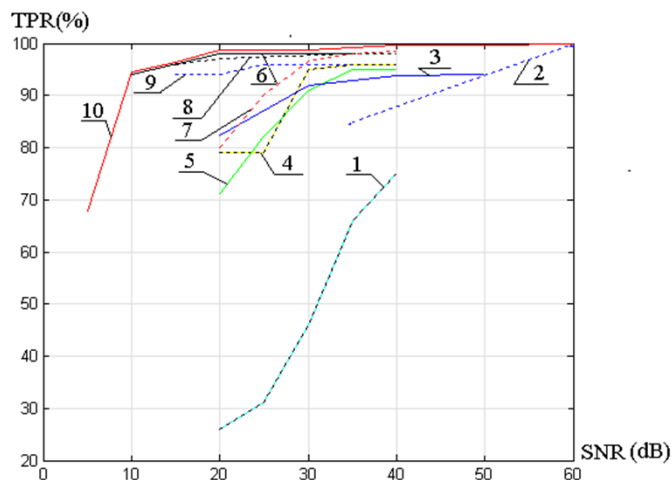


Рис.4. Залежність TPR від значення SNR при накладанні на ЦЗ гауссівського шуму після клонування: 1 – Popescu and Farid (2004); 2 – Deoli et al. (2016); 3 – Amerini (2011); 4 – Bayram et al. (2009); 5 – Huang et al. (2011); 6 – Lin et al. (2009); 7 – Mahmood et al. (2016); 8 – Liu et al. (2011); 9 – Daa et al. (2016); 10 – *KL*

Результати порівняльного аналізу *KL* з аналогами в умовах накладання на ЦЗ після клонування гауссівського шуму наведені на рис.4. Сила ЗД кількісно оцінюється різницею показником спотворення «сигнал-шум» SNR. Як видно з отриманих результатів, *KL* перевищує аналоги по ефективності з врахуванням TPR (максимально – на 5.8% для Amerini(2011) в умовах $SNR=50dB$), при цьому будучи спроможним навіть у тих умовах, у яких існуючі до нього методи взагалі не працюють – при $SNR=5dB$ $TPR=67.8\%$. При цьому TPR для *KL* при зменшенні SNR від 60 до 20 dB практично не змінюється, маючи високе значення: $TPR \geq 98.6\%$.

Результати порівняльного аналізу ефективності KL в умовах Гауссова розмиття представлені в табл.3. Алгоритм, що реалізує KL , перевищує аналоги по ефективності (TPR), кращий з них Mahmood et al.(2016) максимально на 4% (при $\delta = 2$).

Таблиця 3 – Значення TPR (%) в умовах розмиття по Гауссу ЦЗ після клонування для різних значень параметра Гауссова фільтра δ з маскою 5×5

Метод δ	Fridrich (2003)	Huang et al. (2011)	Bayram et al. (2009)	Mahmood et al.(2016)	KL
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 чином, з отриманих результатів очевидна як абсолютна, так і відносна висока ефективність розробленого методу KL виявлення результатів клонування як при наявності, так і при відсутності додаткових ЗД.

Обчислювальна складність алгоритмічної реалізації методу KL визначається кількістю всіляких пар $q \times q$ -блоків B_{ij} $n \times m$ -матриці F ЦЗ, тобто дорівнювати $O((nm)^2)$ операцій, а у випадку $n \times n$ -матриці F – $O(n^4)$ операцій.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива науково-практична задача підвищення ефективності процесу виявлення порушення цілісності ЦЗ шляхом розробки методу виявлення результатів клонування, ефективного, в тому числі в умовах (значних) додаткових збурних дій, а також для областей клону/прообразу малих відносних розмірів.

В рамках досягнення мети роботи були отримані наступні результати:

1. Вперше на підставі знайденого нечутливого до збурних дій параметра, який кількісно характеризує зображення в цілому – об'єму відповідного циліндричного тіла, показано, що відповідним блокам клону й прообразу будуть відповідати рівні за значенням, у тому числі в умовах постобробки, елементи матриці мінімальних блокових відмінностей, що визначають її глобальний (локальний у випадку значних збурних дій при постобробці або при наявності в ЦЗ областей з малими перепадами яскравості) мінімум. Це послужило теоретичною основою для розробки методу виявлення результатів клонування в ЦЗ й забезпечило його високу ефективність незалежно від виду й сили збурної дії, що використовується в процесі постобробки клонowanego зображення.

2. Вперше на підставі встановлених характерних рис гістограм абсолютних значень матриці різниці $q \times q$ -блоків ЦЗ і відмінності максимальних різниць яскравості пікселів блоків у випадку їхньої приналежності/неприналежності клону й прообразу (середні значення склали 29 і 71 відповідно для $q=32$), з використанням аналізу матриці мінімальних блокових відмінностей встановлена наявність співпадаючих за відповідними значеннями околів радіуса $r \geq 1$ її елементів, що визначають однакові за значенням локальні мінімуми, які відповідають блокам клону й прообразу. Величина радіуса тим більша, чим більша величина $q \times q$ -блока, який міститься в області, що відрізняє клон від прообразу, і для $q=32$ може досягати $r=14$. Для переважної більшості оригінальних ЦЗ $r=0$. Встановлені властивості забезпечили, на відміну від існуючих аналогів, високу ефективність розробленого методу виявлення результатів

клонування незалежно від характерних особливостей аналізованого ЦЗ: наявність/відсутність областей з малими перепадами значень яскравості.

3. Вперше на основі сформованого теоретичного базису і встановлених якісних і кількісних відмінностей областей клону й прообразу в умовах додаткових збурних дій розроблений ефективний метод *KL* виявлення результатів клонування в ЦЗ і алгоритм, що його реалізує, ефективність якого в сенсі TPR у відсутності постобробки є максимально можливою (TPR=100%), а в сенсі FPR порівнянню із кращими аналогами (FPR=4.8%); в умовах додаткових ЗД, у тому числі комплексних, що зберігають надійність сприйняття ЦЗ, TPR \geq 97%, незалежно від конкретного виду збурної дії. Метод залишається спроможним в умовах значних ЗД, які взагалі не розглядаються сучасними аналогами: при збереженні ЦЗ після клонування у формат Jpeg с QF=5 значення TPR=69.3%; при накладанні гауссівського шуму з SNR=5dB значення TPR=67.8%. Порівняльний аналіз ефективності *KL*, проведений в умовах найпоширеніших ЗД: стиску із втратами, накладанні гауссівського шуму, розмитті ЦЗ, показав, що для кожної з них *KL* перевищує по ефективності найкращі із сучасних аналогів, що дозволило підвищити в цілому ефективність виявлення порушення цілісності ЦЗ. Максимально ця перевага досягає 6.7% (показник TPR).

4. Отримав подальший розвиток блоково-орієнтований підхід до виявлення результатів клонування в ЦЗ шляхом встановлення критерію й умов його застосування (область прообразу, що не належить перерізу клону й прообразу, містить хоча б один 16×16-блок) при відсутності постобробки й необхідної умови при наявності постобробки клонованого ЦЗ приналежності блоків матриці зображення областям клону й прообразу. При цьому остання, на відміну від аналогів, не використовує порогове значення кількісної ознаки для виявлення клону/прообразу. Це забезпечило ефективну роботу розробленого методу незалежно від умов проведеного клонування, при виявленні областей клону/прообразу, відносні розміри яких \ll 0.85% ЦЗ (від 0.06% до 0.39%), що значно менше тих, які виявляються існуючими аналогами.

5. Обчислювальна складність алгоритму, що реалізує *KL*, визначається як $O(n^4)$, де $n \times n$ -розмір матриці ЦЗ, що дає можливість для його практичного використання для експертизи цілісності ЦЗ будь-якого, у тому числі значного, розміру.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Григоренко, С.М. Кількісний аналіз відмінностей оригінального цифрового зображення від зображення, що піддалося клонуванню, в умовах збереження у форматі із втратами / С.М.Григоренко // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 4(141). – С.77–82.
2. Григоренко, С.М. Розвиток методу виявлення клонування в цифровому зображенні в умовах додаткових збурних дій / С.М.Григоренко // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2016. – Вип. 1(31). – С. 85–98. (DOAJ, Наукова періодика України, Ulrich)
3. 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. (Ulrich, EBSCO, РИНЦ, Index Copernicus)
4. 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.

5. Кобозева, А.А. Основы нового подхода к выявлению результатов клонирования в цифровом изображении в условиях возмущающих воздействий / А.А. Кобозева, С.Н.Григоренко // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2015. – Т.5, №4. – С.303–311. (Ulrich, EBSCO, РИНЦ, Index Copernicus)
6. Kobozeva, A.A. New approach development for solution of cloning results detection problem in lossy saved digital image / А.А. Kobozeva, S.M. Grigorenko // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – 2016. – Issue 2. - PP. 62–69. (Ulrich, EBSCO, РИНЦ, Index Copernicus)
7. 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. (Google Scholar)
8. 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.
9. 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.
10. Кобозева, А.А. Теоретичні основи методу виявлення областей клонування в цифровому зображенні в умовах збурних дій / А.А.Кобозева, С.М.Григоренко // II Міжнародна НПК «Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації». – Міжгірський р-н, с. Верхнє Студене, 2016 р. – С.70–72.
11. 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.
12. Кобозева, А.А. Метод виявлення порушення цілісності цифрового зображення, проведеного путем клонирования, робастний к сжатию с потерями / А.А.Кобозева, И.И.Бобок, С.Н.Григоренко // 17-я Международная научно-практическая конференция «СИЭТ–2016». – Одесса, 2016. – С.127-128.
13. 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». – Одесса, 2016. – С.129-131.
14. 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. – С.306-307.

АНОТАЦІЯ

Григоренко С.М. Підвищення ефективності виявлення порушення цілісності цифрового зображення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.21 – Системи захисту інформації. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2017.

В роботі вирішена важлива науково-практична задача підвищення ефективності процесу виявлення порушення цілісності цифрового зображення шляхом розробки методу виявлення результатів клонування, ефективного, в тому числі в умовах (значних) додаткових збурних дій, а також для областей клону/прообразу малих відносних розмірів.

Практична цінність роботи полягає в доведенні здобувачем отриманих наукових результатів до конкретних алгоритмів, які можуть бути використані як складові частини систем захисту інформації, інформаційних систем різного наповнення будь-якої установи, підприємства.

На підставі побудованого теоретичного базису, розроблений ефективний метод виявлення результатів клонування, ефективність якого не залежить від особливостей аналізованого цифрового зображення, проведення операції клонування, виду збурної дії й перевищує сучасні аналоги, що дозволило в цілому підвищити ефективність виявлення порушення цілісності цифрового зображення. Максимально ця перевага становить 6.7%.

Ключові слова: цифрове зображення, порушення цілісності, клонування, постобробка зображення, клон, прообраз.

АННОТАЦІЯ

Григоренко С.Н. Повышение эффективности выявления нарушения целостности цифрового изображения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.21 - Системы защиты информации. - Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2017.

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 алгоритмов, которые могут быть использованы при разработках систем защиты информации любого учреждения, предприятия.

Объектом исследования являются процессы нарушения целостности цифрового изображения; предметом исследования — методы обнаружения нарушения целостности цифрового изображения, проведенного путем клонирования.

На основании полученного при помощи геометрического представления цифрового изображения параметра, нечувствительного к возмущающим воздействиям, количественно характеризующего изображение в целом – объема цилиндрического тела, отвечающего изображению, найден параметр, числовое значение которого одинаково для соответствующих блоков клона и прообраза, в том числе, в условиях постобработки изображения: значение глобального (локального) минимума матрицы минимальных блоковых отличий анализируемого изображения, что послужило теоретической основой для разработки метода выявления результатов клонирования, в том числе в условиях дополнительных возмущающих воздействий и обеспечило его высокую эффективность независимо от вида и силы этого воздействия.

На основании установленных характерных особенностей гистограмм значений элементов матрицы разности $q \times q$ -блоков ЦИ и различия максимального отличия пикселей блоков в случае их принадлежности/непринадлежности клону и прообразу, с использованием анализа матрицы минимальных блоковых отличий установле-

но 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 аналогов, эффективность разработанного метода выявления результатов клонирования независимо от характерных особенностей анализируемого ЦИ: наличие/отсутствие областей с малыми перепадами значений яркости. Разработанный метод является эффективным, в том числе в условиях дополнительных (значительных) возмущающих воздействий, превосходя современные аналоги, что позволило в целом повысить эффективность выявления нарушения целостности ЦИ (максимально на 6.7%).

Получил дальнейшее развитие блочно-ориентированный подход к выявлению результатов клонирования в ЦИ путем установления критерия и условий его применимости при отсутствии постобработки и необходимого условия при наличии постобработки клонированного ЦИ принадлежности блоков матрицы изображения областям клона и прообраза, что обеспечило эффективную работу разработанного метода независимо от условий проведения клонирования, при выявлении областей клона/прообраза, относительные размеры которых $\ll 0.85\%$ ЦИ, что значительно меньше тех, которые эффективно выявляются существующими аналогами.

Вычислительная сложность разработанного алгоритма, реализующего метод, определяется как $O(n^4)$, где $n \times n$ – размер матрицы изображения.

Ключевые слова: цифровое изображение, нарушение целостности, клонирование, постобработка изображения, клон, прообраз.

ABSTRACT

Grigorenko S.M. Effectiveness improvement of integrity violation detection of digital images. – Manuscript.

Thesis for degree the candidate in technical sciences, specialty 05.13.21 - Information Security Systems – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2017.

The research is dedicated to the solving an important scientific and practical problem of effectiveness improvement of integrity violation detection of digital images by developing a new detection method of cloning results in the image. The developed method is effective in the case of additional (major) disturbances, as well as for areas clone/prototype image of the small relative size.

The practical value of the research is that its scientific findings were reduced to specific algorithms which can be used to develop information security systems for any institution or enterprise.

The efficiency of the developed method, which is polynomial of degree 4, won't depend on the features of analyzed digital images and cloning operation that allow a total increase the efficiency of integrity violation detection of digital images. This maximum advantage achieves of 6.7%.

Keywords: digital image, integrity violation, cloning, image post-processing, clone, prototype.