

**ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ В  
КОНТЕКСТІ ЦИФРОВОЇ КРИМІНАЛІСТИКИ****Д.Ю. Берія, М.Є. Войтовецька, Н.Г. Козаченко, В.В. Зоріло, О.Ю. Лебедєва**Національний університет «Одеська політехніка», 1, пр.Шевченка, Одеса, 65044  
vikazorilo@gmail.com, whiteswanhelena@gmail.com

Цифрова криміналістика – галузь знань, що активно розвивається наразі. Задачі, що стоять перед цифровою криміналістикою, часто перетинаються з математичними методами пошуку слідів порушень цілісності цифрових зображень. Фотомонтаж, застосування фільтрів та інші порушення цілісності цифрових зображень можливі завдяки графічним редакторам з численною кількістю інструментів, зокрема – фільтрами штучного підвищення різкості. Такі графічні редактори як Gimp або Adobe Photoshop дозволяють користувачам навіть без спеціальної підготовки виконувати різні маніпуляції з зображеннями і з іншими цифровими мультимедійними файлами. Проблемі виявлення порушень цілісності цифрових зображень у вигляді обробки фільтрами, зокрема, фільтрами підвищення різкості, у відкритому друці приділено мало уваги. Метою цієї роботи є підвищення ефективності виявлення обробки цифрового зображення шляхом модифікації методу виявлення підвищення різкості. Було помічено, що під впливом фільтру штучного підвищення різкості у матрицях цифрового зображення з'являється велика кількість пікселів із значенням 0. Даний ефект отримав назву «ефект чорного». У роботі проведено аналіз параметрів цифрового зображення та ефекту чорного, що дозволило виконати модифікацію методу виявлення штучного підвищення різкості цифрових зображень. У результаті виконання роботи модифіковано метод виявлення штучного підвищення різкості цифрових зображень. Оригінал методу було протестовано для цифрових зображень у форматі без втрат. Виконану модифікацію перевірено як для зображень, збережених після обробки фільтром у форматі без втрат, так і з втратами. При тестуванні методу кількість помилок першого роду склала 8%, другого роду – 10% для цифрових зображень, збережених після фальсифікації з втратами, та 4% і 7% відповідно для цифрових зображень, збережених після фальсифікації у форматі без втрат.

**Ключові слова:** різкість, матриця зображення, порушення цілісності, пошук фальсифікації

**Вступ**

Порушення цілісності цифрових зображень не представляє складнощів для сучасних користувачів. Спеціалізоване програмне забезпечення просте й інтуїтивно зрозуміле як серед платних за стосунків (Adobe Photoshop), так і серед безкоштовних (Gimp).

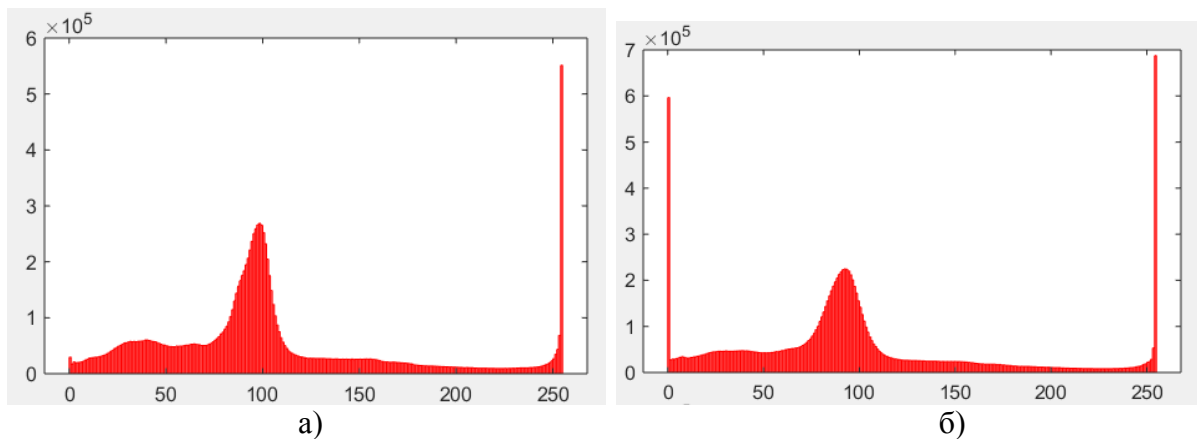
Загалом усі методи підробки цифрових зображень можна поділити на дві основні категорії – зміна сцени зображення (додавання або видалення об'єктів шляхом клонування або шляхом фотомонтажу з використанням декількох зображень) та пост обробка зображення після його фальсифікації (розмиття країв доданих об'єктів, маскування розмиття підвищенням різкості, зміна кольору тощо) [1-5]. Штучне підвищення різкості можна використовувати як з метою приховання фотомонтажу, так і з метою стеганографічної атаки на зображення. У будь-якому випадку виявлення даного фільтру у цифровому зображенні свідчить про порушення його цілісності. Тому дана тема є актуальною.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності виявлення обробки цифрового зображення шляхом модифікації методу виявлення підвищення різкості.

## Матеріали та методи

Як зазначено в [6], при застосуванні фільтру графічного редактора Gimp «Unsharp mask» у всіх трьох колірних компонентах цифрового зображення спостерігається значне збільшення пікселів зі значенням 0. Це легко можна пояснити з урахуванням контексту вирішуваної задачі. Коли ми щось хочемо візуально виділити, то використовуємо для цього підсилення контурів темнішими кольорами. Саме це і відбувається при використанні зазначеного фільтру. Бо у діапазоні значень матриць яскравості пікселів цифрового зображення від 0 до 255 0 – найтемніший колір (чорний), 255 – найсвітліший (білий).

Візуально цей ефект дуже легко побачити при аналізі гістограм матриць яскравості цифрового зображення (рис.1) – чітко видно пік гістограми саме в місці локації нульового значення. Це і є так званий «пік чорного».



**Рис. 1.** Гістограма компоненти R: а) – до обробки; б) – після обробки

Проте для автоматизації в роботі [29] запропоновано алгоритм, кроки якого наведемо далі.

Нехай  $R$ ,  $G$  і  $B$  матриці червоної, зеленої та синьої компонент цифрового зображення,  $(r_{ij}, g_{ij}, b_{ij})$  тріада цифрових компонент пікселя з координатами  $(i, j)$ .

1. Для матриці  $R$  знайти  $r$ , що дорівнює кількості тріад виду  $(0, g_{ij}, b_{ij})$ , та знайти  $r'$  – кількість тріад виду  $(1, g_{ij}, b_{ij})$ .

Якщо  $r=0$ ,

то вважати, що зображення необроблене фільтром «Unsharp Mask»,

інакше перейти до пункту 2.

2. Для матриці  $G$  знайти  $g$ , що дорівнює кількості тріад виду  $(r_{ij}, 0, b_{ij})$ , та знайти  $g'$  – кількість тріад виду  $(r_{ij}, 1, b_{ij})$ .

Якщо  $g=0$ ,

то вважаємо, що зображення необроблене фільтром «Unsharp Mask»,

інакше перейти до пункту 3.

3. Для матриці  $B$  знайти  $b$ , що дорівнює кількості тріад виду  $(r_{ij}, g_{ij}, 0)$ , та знайти  $b'$  – кількість тріад виду  $(r_{ij}, g_{ij}, 1)$ .

Якщо  $r=0$ ,

то вважати що зображення необробленим фільтром «Unsharp Mask»,

інакше переходимо до пункту 4.

4. Якщо  $r < r'$  або  $g < g'$  або  $b < b'$ ,

то зображення вважати необробленим фільтром «Unsharp Mask»,

інакше перейти до пункту 5.

5. Знайти коефіцієнт різкості  $K$  за формулою (1), розрахувавши попередньо відсоткові значення різниці тріад  $r$  та  $r'$  для червоної компоненти  $rR$  по формулі (2), аналогічно відсоткові значення різниці тріад  $g$  та  $g'$  для зеленої компоненти  $rG$  за формулою (3) та відсоткові значення різниці тріад  $b$  та  $b'$  для синьої компоненти  $rB$  за формулою (4):

$$K = \frac{|rR - rG| + |rG - rB| + |rB - rR|}{3}, \quad (1)$$

де

$$rR = \frac{(r - r') * 100}{r}, \quad (2)$$

$$rG = \frac{(g - g') * 100}{g}, \quad (3)$$

$$rB = \frac{(b - b') * 100}{b}. \quad (4)$$

6. Якщо  $K < 16$ ,

то будемо вважати, що зображення оброблене фільтром «Unsharp Mask», інакше зображення є оригінальним.

Помилки першого і другого роду при даному підході складають 10% і 18% відповідно.

Основна ідея – порівняння піку чорного з кількістю пікселів наступного за значенням кольору, тобто порівняння кількості нулів та одиниць. Якщо їх співвідношення у всіх трьох колірних компонентах менше за порогове значення, зображення вважають обробленим. В іншому випадку вважають, що штучне підвищення різкості не виявлено.

Дослідження ефекту «піку чорного» для зображень, збережених у форматі без втрат після обробки фільтром. У відкритому друці не знайдено інших робіт стосовно виявлення штучного підвищення різкості, тож немає з чим порівнювати даний метод. Проведемо дослідження даного ефекту.

### Результати та обговорення

Для обчислювального експерименту сформуємо базу з цифрових зображень у форматі з втратами та без втрат у кількості 600 штук: 300 з них було взято з бази NRCS [7] у форматі без втрат, та 300 цифрових зображень, отриманих сучасним смартфоном iPhone 12 у режимі стандартної зйомки у форматі з втратами. Усі цифрові зображення було оброблено у графічному редакторі Gimp за допомогою фільтру «Unsharp mask» при стандартних параметрах фільтру. Після обробки усі цифрові зображення було збережено у форматі без втрат (bmp).

Для усіх цифрових зображень за трьома колірними компонентами було підраховано кількість пікселів зі значення 0 до та після застосування фільтру. Типові результати представлено у таблицях 1 – 3.

**Таблиця 1**

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	25312	63526	2,50971871
2	188507	572980	3,03956882
3	954	10607	11,1184486
4	47233	162785	3,44642517
5	35054	136325	3,88899983
6	22875	109866	4,80288525
7	10696	83406	7,79786836

**Таблиця 2**

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів зеленої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	16394	45296	2,76296206
2	82359	309015	3,75204896
3	28	4555	162,678571
4	16561	78881	4,76305779
5	8378	58510	6,98376701
6	195	38140	195,589744
7	7988	17769	2,22446169

**Таблиця 3**

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів синьої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	2918944	3034603	1,03962358
2	240576	602991	2,50644703
3	3822	31344	8,20094192
4	1860674	1780279	0,95679254
5	3318235	3281909	0,98905261
6	775796	4783538	6,16597404
7	6233357	6285168	1,00831189

Як можемо спостерігати, результати для червоної та зеленої компонент порівняні між собою, в той час як показники синьої колірної компоненти значно відрізняються від інших двох. Отримані результати вказують на неможливість усереднення показників за трьома колірними компонентами та використання усіх трьох компонент одночасно для виявлення зазначеного фільтру. Проте використання червоної або зеленої матриць дійсно дозволяє чітко побачити пік чорного та дає можливість використовувати цей ефект надалі.

В той самий час збільшення піку чорного також відбувається, проте не є таким вираженим при повторному застосуванні зазначеного фільтру. Для усіх оброблених зображень було проведено повторне застосування фільтру за тими ж параметрами. Результат повторної обробки збережено у форматі без втрат. Типові результати представлено у таблицях 4-6.

**Таблиця 4**

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	63526	127776	2,01139691
2	572980	1070919	1,86903382
3	10607	44551	4,20015084
4	162785	331190	2,03452407
5	136325	289577	2,12416651
6	109866	247965	2,25697668
7	83406	176152	2,11198235

**Таблиця 5**

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів зеленої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	45296	98576	2,1762628
2	309015	620728	2,00873097
3	4555	9618	2,1115258
4	78881	183349	2,32437469
5	58510	109870	1,87779867
6	38140	69391	1,81937598
7	17769	82912	4,66610389

**Таблиця 6**

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	3034603	3170059	1,0446371
2	602991	1095081	1,8160818
3	31344	92368	2,9469117
4	1780279	1625188	0,9128839
5	3281909	3164033	0,9640831
6	4783538	4702879	0,9831382
7	6285168	6241724	0,9930879

Як можемо бачити, дійсно при повторному застосуванні фільтру до цифрового зображення збільшення кількості пікселів зі значенням 0 у червоній колірній компоненті в більшості випадків відбувається менше, ніж у 2,25 рази в порівнянні з первинним підвищенням різкості.

Дане порогове значення визначено емпіричним шляхом. Приданому значенні кількість помилок першого роду складає 4%, помилок другого роду – 7%. Подібний результат отримано і для зеленої матриці, при використанні зазначеного порогового значення кількість помилок першого роду 5 %, помилки другого роду – 7%.

Використання синьої колірної компоненти дещо відрізняється від отриманих показників за іншими двома колірними компонентами. Проте використання тільки

червоної колірної компоненти вже дало кращі результати в порівнянні з методом, описаним в роботі [6].

Для зручності розташуємо відношення відповідних показників у одній таблиці для червоної колірної компоненти (табл.7).

**Таблиця 7**

Порівняння відношень після першої та повторної обробки

№ цифрового зображення	Відношення необробленого обробленого ЦЗ	M/N та	Відношення обробленого та повторно обробленого ЦЗ
1		2,50971871	2,01139691
2		3,03956882	1,86903382
3		11,1184486	4,20015084
4		3,44642517	2,03452407
5		3,88899983	2,12416651
6		4,80288525	2,25697668
7		7,79786836	2,11198235

Як показав обчислювальний експеримент, при пороговому значенні 2,25 досягається найменша кількість помилок першого і другого роду.

Дослідження ефекту «піку чорного» для зображень, збережених у форматі без втрат після обробки фільтром. Проведемо експеримент таким самим чином, як попередній, з різницею у тім, що збережемо фотографії після обробки у форматі з втратами (jpg). Типові результати представлено у таблицях 8 – 10.

**Таблиця 8**

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	25312	60163	2,37685683
2	188507	512670	2,71963375
3	954	8996	9,42976939
4	47233	142776	3,02280185
5	35054	117192	3,3431848
6	22875	91609	4,00476503
7	10696	66025	6,17286836

**Таблиця 9**

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів зеленої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	16394	44243	2,69873124
2	82359	278508	3,38163407
3	28	3922	140,071429
4	16561	68570	4,14045046
5	8378	48409	5,77810933
6	195	28249	144,866667
7	7988	23088	2,8903355

Таблиця 10

Вплив фільтру на кількість 0-пікселів синьої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	2918944	2918944	0,74128829
2	240576	240576	2,36730181
3	3822	3822	6,93851387
4	1860674	1860674	0,65423712
5	3318235	3318235	0,688906
6	775796	4775796	0,70241317
7	6233357	6233357	0,70960351

Як можемо спостерігати, результати для червоної та зеленої компонент порівняні між собою і статистика за даними колірними компонентами така, що можна виділити порогове значення для виділення оброблених зображень серед необроблених.

Втім для синьої матриці даний ефект піку чорного не такий виражений. Про це свідчать результати експерименту. Тому використовувати синю колірну компоненту за даних обставин було б некоректно. Потрібні додаткові обстеження.

Для усіх оброблених зображень було проведено повторне застосування фільтру за тими ж параметрами. Результат повторної обробки збережено у форматі з втратами. Типові результати представлено у таблицях 11-13.

Таблиця 11

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	63526	120312	1,9997673
2	572980	914096	1,78301051
3	10607	36421	4,04857715
4	162785	273052	1,91245027
5	136325	231106	1,97202881
6	109866	159161	1,7373948
7	83406	137215	2,07822794

Як можемо бачити, дійсно при повторному застосуванні фільтра до цифрового зображення збільшення кількості 0-пікселів у червоній колірній компоненті в більшості випадків відбувається менше, ніж у 2 рази в порівнянні з первинним підвищенням різкості.

Дане порогове значення визначено емпіричним шляхом. При даному значенні кількість помилок першого роду складає 6%, помилок другого роду – 13%.

**Таблиця 12**

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів зеленої колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	45296	87970	1,98833714
2	309015	512243	1,83923981
3	4555	7816	1,99286079
4	78881	139256	2,03085898
5	58510	90272	1,86477721
6	38140	53874	1,90711176
7	17769	37477	1,62322419

**Таблиця 13**

Вплив повторного застосування фільтру на кількість 0-пікселів червоної колірної компоненти

№ цифрового зображення	Кількість 0-пікселів до обробки (N)	Кількість 0-пікселів після обробки (M)	Відношення M/N
1	3034603	1893813	0,875234
2	602991	972887	1,7082698
3	31344	73833	2,7841548
4	1780279	839802	0,6898766
5	3281909	1749792	0,7654544
6	4783538	2659782	0,7928803
7	6285168	3569772	0,8070542

Для зручності розташуємо відношення відповідних показників у одній таблиці для червоної колірної компоненти (табл.14).

Як показав обчислювальний експеримент, при пороговому значенні 2 досягається найменша кількість помилок першого і другого роду.

Зменшення порогового значення та отриманих показників у порівнянні з аналогічним експериментом для зображень, збережених після фальсифікації без втрат, зумовлене тим, що формат з втратами вносить певні артефакти у цифрове зображення. Один з основних кроків стиснення – квантування частотних коефіцієнтів у блоках матриці.

**Таблиця 14**

Порівняння відношень після першої та повторної обробки

№ цифрового зображення	Відношення необробленого та обробленого ЦЗ	Відношення M/N обробленого та повторно обробленого ЦЗ
1	2,37685683	1,9997673
2	2,71963375	1,78301051
3	9,42976939	4,04857715
4	3,02280185	1,91245027
5	3,3431848	1,97202881
6	4,00476503	1,7373948
7	6,17286836	2,07822794



Ефект повторної обробки вже було використано в методі виявлення розмиття цифрового зображення, заснованому на аналізі швидкості росту відповідних сингулярних чисел. Складність виявлення порогового значення для відокремлення розмитих цифрових зображень від нерозмитих була в тому, що для різних категорій зображень порогове значення також було різним. Застосування так званого експертного розмиття призвело до уникнення необхідності використовувати чи підлаштовувати порогове значення для різних категорій цифрових зображень.

Тобто, для виявлення штучного підвищення різкості потрібно створити копію підозрюваного зображення, застосувати до неї обробку фільтром. Для обох зображень знайти кількість 0-пікселів червоної компоненти та обчислити їх співвідношення. Якщо воно менше за порогове значення, то експертну обробку слід вважати вторинною, а підозрюване зображення першочергово обробленим, тобто не автентичним.

Іноколи можлива ситуація, коли кількість 0-пікселів до обробки дорівнює нулю. Тобто матимемо ділення на нуль. Для уникнення помилки у роботі програми просто вирішити цю проблему, змінивши нуль на одиницю. Це не зменшить ефективності методу, оскільки після застосування штучного підвищення різкості кількість 0-пікселів завжди буде великою.

Отже, на основі проведених експериментів та отриманих результатів складемо алгоритм модифікованого методу виявлення штучного підвищення різкості цифрового зображення.

Нехай  $A$  – підозрюване цифрове зображення,  $R$  – матриця червоної колірної компоненти цифрового зображення.

1. Для матриці  $R$  знайти  $r$ , що дорівнює кількості нульових значень.

*Якщо  $r=0$ ,*

*то призначити  $r=1$ ,*

*інакше перейти до пункту 2.*

2. Створити копію підозрюваного зображення. Застосувати до копії обробку фільтром «Unsharp Mask» графічного редактора Gimp з використанням параметрів за замовчуванням.

3. Для копії зображення виділити матрицю  $R'$ .

4. Для матриці  $R'$  знайти  $r'$ , що дорівнює кількості нульових значень матриці  $R'$ .

5. Знайти «коефіцієнт чорного»:

$$KoeffBlack = r'/r$$

6.  *$KoeffBlack < 2,25$  (або 2),*

*то зображення вважати обробленим фільтром «Unsharp Mask»,*

*інакше виявлення штучного підвищення різкості не виявлено.*

## Висновки

Проведено два обчислювальні експерименти з використанням 600 цифрових зображень. Усі зображення було оброблено фільтром фоторедактору GIMP «Unsharp Mask» та збережено у форматі з втратами і без втрат.

Отримано порогове значення 2 для застосування експертної обробки при збереженні зображення у форматі з втратами та 2,25 – без втрат. Кількість помилок першого і другого роду при даному підході становила 6 і 13 відсотків відповідно для збережених з втратами зображень та 4 і 7 відсотки – для зображень без втрат.

На основі проведених експериментів та отриманих результатів було модифіковано метод виявлення штучного підвищення різкості.

## Список літератури

1. Зоріло В.В. Методи підвищення ефективності виявлення порушення цілостності цифрового зображення. *Науково-технічний збірник «Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні»*. 2013. №1 (25). С. 75-81.
2. Zorilo V.V., Mokritskiy V.A. «Detection of digital image blurring traces». *Інформатика і математичні методи в моделюванні*. 2012. №3, P.220-226.
3. Зоріло В.В., Лебедева Е.Ю., Матвеева А.И., Ефименко А.А., Мокрицкий В.А. Влияние повышения резкости на математические параметры цифрового изображения. *Сучасна спеціальна техніка*. 2017. № 2. с. 67-73.
4. Кобозева А.А. Основы общего подхода к решению проблемы обнаружения фальсификации цифрового сигнала. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2009. Вип.72. С.35-41.
5. Узун И.А. Стеганоанализ цифровых изображений, хранящихся в произвольных форматах. *Інформатика і математическіе методи в моделюванні*. 2013. Том 3, № 2. С.179-189.
6. Zorilo V.V., Pyvovar O.V., Safronov P.S. Histogram analysis for detection of sharpened digital images. *Informaics and Mathematical Methods in Simulation*. 2019. Том 9. № 3. P.279-283.
7. NRCS Photo Gallery. URL: <https://photogallery.sc.egov.usda.gov/res/sites/PhotoGallery/index.html>.

### DETECTION OF VIOLATIONS OF INTEGRITY OF DIGITAL IMAGE IN THE CONTEXT OF DIGITAL FORENSICS

D.Yu. Beriia, M.Ye. Voitovetska, N.G. Kozachenko, V.V. Zorilo, O.Yu. Lebedeva

National Odessa Polytechnic University,  
1, Shevchenko, Odessa, 65044, Ukraine  
vikazorilo@gmail.com, whiteswanhelen@gmail.com

Digital forensics is a field of knowledge that is currently actively developing. The challenges facing digital forensics often intersect with mathematical methods for finding traces of violations of the integrity of digital images. Photomontage, application of filters and other violations of the integrity of digital images are possible thanks to graphic editors with a large number of tools, in particular - filters for artificial sharpening. Graphic editors such as Gimp or Adobe PhotoShop will allow users to perform various image manipulations and other digital media files, even without special training. Little attention has been paid in open printing to the problem of detecting violations of the integrity of digital images in the form of filter processing, in particular, sharpening filters. The aim of this work is to improve the detection efficiency of digital image processing by modifying the method of detecting sharpening. It has been observed that a large number of pixels with a value of 0 appear in the digital image matrices under the influence of the artificial sharpening filter. This effect is called the "black effect". The paper analyzes the parameters of the digital image and the black effect, which allowed to modify the method of detecting artificial sharpening of digital images. As a result of the work, the method of detecting artificial sharpening of digital images was modified. The original method was tested for digital images in a lossless format. The performed modification was checked both for the images saved after processing by the filter in a lossless format, and with losses. When testing the method, the number of errors of the first kind was 8%, the second kind - 10% for digital images saved after falsification with loss, and 4% and 7% respectively for digital images saved after falsification in lossless format.

**Keywords:** sharpness, image matrix, integrity breakdown, falsification search.