

# ЭФФЕКТ ДВОЙНОГО КВАНТОВАНИЯ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

## Аннотация

В работе получены достаточные условия проявления и отсутствия проявления эффекта двойного квантования, возникающего при двукратной JPEG-компрессии цифрового изображения, что может быть использовано для создания практического метода доказательства подлинности цифровой фотографии.

## 1. Введение

Доказательство подлинности цифровых изображений (ЦИ) является актуальной задачей во многих областях человеческой деятельности. Своей остротой данная проблема обязана бурному развитию технических средств обработки и генерации ЦИ, общедоступности редактирующего изображения программного обеспечения.

Большинство современных цифровых фотокамер используют для хранения ЦИ формат JPEG с потерями, основой которого является дискретное косинусное преобразование (DCT) [1], а большинство несанкционированных изменений цифровой фотографии сводится к замещению некоторой ее области на область другого ЦИ. После такой фальсификации полученное изображение часто сохраняется в формате JPEG, что приводит к обязательному повторному квантованию [1] коэффициентов DCT (DCT-коэффициентов) некоторой части или всего фальсифицированного ЦИ. Таким образом, обнаружение «следов» двойного квантования, при наличии таковых, является «указателем» на возможную фальсификацию изображения. В силу этого определение отличительных особенностей двукратного применения JPEG-сжатия изображения и построение методов выявления этих особенностей – чрезвычайно актуально с точки зрения решения проблемы обнаружения фальсификации цифровой фотографии.

Эффект двойного квантования (double quantization), или DQ-эффект, рассматривается в [2-5]. В [3] обращается внимание на возможность его использования для обнаружения несанкционированного изменения ЦИ, а в [5] делается попытка создания практического метода выявления фальсификации цифровой фотографии на основе эффекта двойного квантования. Однако, недостаточность теоретических исследований особенностей DQ-эффекта, отсутствие достаточных условий его визуального проявления, отсутствие учета особенностей его проявления в реальных условиях [2-5] и откровенно ошибочные посылки [5] не дали возможности авторам [5] создать действительно эффективный метод для решения рассматриваемой задачи. Все вышесказанное заставило авторов настоящей работы вернуться к более детальному, чем это делалось до настоящего момента в открытой печати, изучению DQ-эффекта.

*Целью* работы является теоретическое обоснование достаточных условий проявления эффекта двойного квантования DCT-коэффициентов ЦИ, а также достаточных условий отсутствия DQ-эффекта, что должно дать теоретическую базу для последующего создания практического метода выявления фальсифицированного ЦИ, который бы позволил не только зафиксировать факт произошедшего несанкционированного изменения изображения, но и локализовать область такого изменения.

## 2. Достаточные условия проявления и отсутствия проявления эффекта двойного квантования коэффициентов DCT

Процесс двукратного использования JPEG-сжатия (процесс двойного квантования) ЦИ, которое первоначально стандартным образом разбивается на блоки малой размерности [1], например,  $8 \times 8$ , далее рассматривается как процесс, состоящий из следующих шагов [3,5], выполняемых для каждого блока:

1. Первое квантование:

а) вычисление DST-коэффициентов (значение конкретного коэффициента обозначим  $u$ );

б) DST-коэффициенты квантуются при помощи массива нормализации [1], элементы которого далее называются коэффициентами квантования, и округляются до ближайшего целого, становясь равными

$$u^{(1)} = [u / q^{(1)}],$$

где  $q^{(1)}$  - соответствующий  $u$  коэффициент квантования,  $[ \bullet ]$  - операция округления аргумента до ближайшего целого.

2. Первое восстановление:

а) DST-коэффициенты, полученные на предыдущем шаге, умножаются на соответствующие им коэффициенты квантования:

$$\bar{u}^{(1)} = [u / q^{(1)}] q^{(1)};$$

б) вычисление обратного DST.

3. Второе квантование:

а) вычисление DST-коэффициентов;

б) DST-коэффициенты квантуются при помощи массива нормализации, элементы которого отличны от соответствующих элементов на шаге 1, и округляются до ближайшего целого. В результате получаем:

$$u^{(2)} = \left[ \left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] \frac{q^{(1)}}{q^{(2)}} \right].$$

Пусть  $H$  и  $H^{(2)}$  – гистограммы DST-коэффициентов ЦИ, отвечающих выбранной произвольным образом частоте, до первого квантования и после второго соответственно. Они, очевидно, будут отличаться друг от друга. Рассмотрим некоторые из свойств получаемых гистограмм, важные с точки зрения выявления проделанной дважды операции JPEG-сжатия изображения.

**Теорема 1.** Пусть  $\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} < 1$ . Если

$$\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right) \in Z, \quad (1)$$

где  $Z$  - множество целых чисел, то столбец гистограммы  $H^{(2)}$ , отвечающий значению  $u^{(2)}$ , будет пустым.

**Доказательство.** Если

$$\left[ \left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] \frac{q^{(1)}}{q^{(2)}} \right] = u^{(2)},$$

то

$$u^{(2)} - \frac{1}{2} \leq \left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] \frac{q^{(1)}}{q^{(2)}} < u^{(2)} + \frac{1}{2},$$

$$\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} - \frac{1}{2} \right) \leq \left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] < \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right). \quad (2)$$

При этом

$$\left| \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} - \frac{1}{2} \right) - \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right) \right| = \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}}. \quad (3)$$

По условию теоремы  $\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} < 1$ . Если выполнено соотношение (1), то, очевидно, не существует такого  $\left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] \in Z$ , которое бы удовлетворяло (2), а значит столбец гистограммы  $H^{(2)}$ , отвечающий значению  $u^{(2)}$ , будет пустым.

**Следствие.** Если  $q^{(1)}$ ,  $q^{(2)}$ ,  $u^{(2)}$  удовлетворяют условию теоремы 1, то пустыми окажутся столбцы гистограммы  $H^{(2)}$ , отвечающие не только значению  $u^{(2)}$ , но и значениям  $u^{(2)} + lT$ ,  $l \in Z$ , где  $T$  – период появления пустого столбца  $H^{(2)}$  за счет выполнения условия (1), определяемый в соответствии с формулой:

$$T = \frac{q^{(1)}}{\text{НОД}(q^{(1)}, q^{(2)})}, \quad (4)$$

где  $\text{НОД}(q^{(1)}, q^{(2)})$  – наибольший общий делитель  $q^{(1)}, q^{(2)}$ .

**Доказательство.** Пусть  $n = \text{НОД}(q^{(1)}, q^{(2)})$ , тогда  $q^{(1)} = nk$ ,  $q^{(2)} = nm$ , где  $k, m$  некоторые натуральные числа, причем  $\text{НОД}(k, m) = 1$ . В принятых обозначениях  $T = k$ . Рассмотрим значение

$$\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + lT + \frac{1}{2} \right) = \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right) + \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} lT \quad (5)$$

Поскольку первое слагаемое в правой части формулы (5) является целым по условию теоремы, второе –

$$\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} lT = \frac{m}{k} lk = ml \in Z,$$

то

$$\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + lT + \frac{1}{2} \right) \in Z,$$

а значит соответствующие столбцы гистограммы  $H^{(2)}$  будут пусты.

Возможность проявления ситуации, рассмотренной в теореме 1, никак не учтена в [5], что привело к ошибочным теоретическим расчетам и несоответствию между ними и практическими результатами.

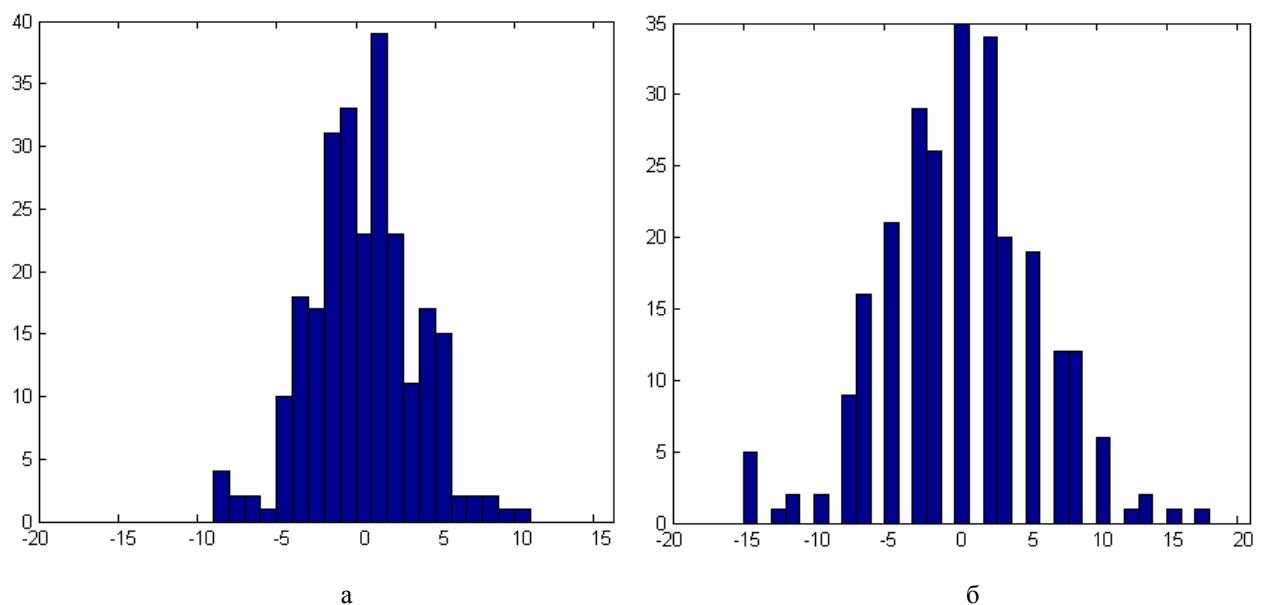
**Замечание 1.** Пусть  $\frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} > 1$ , тогда противоречия с существованием  $\left[ \frac{u}{q^{(1)}} \right] \in Z$ , удовлетворяющего (2), на данном этапе не возникает, т.к. на полуинтервале  $\left[ \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} - \frac{1}{2} \right), \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right) \right)$ , длина которого больше 1 в соответствии с (3), найдется хотя бы одно целое число.

Далее предполагаем, что соотношение (2) не является противоречивым, т.е. в случае  $q^{(2)} < q^{(1)}$  условие (1) не имеет места. Тогда можно показать [5], что число столбцов  $n(u^{(2)})$  гистограммы  $H$ , внесших свой вклад в столбец  $u^{(2)}$  гистограммы  $H^{(2)}$ , определяется как

$$n(u^{(2)}) = q^{(1)} \left( \left\lfloor \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} + \frac{1}{2} \right) \right\rfloor - \left\lceil \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( u^{(2)} - \frac{1}{2} \right) \right\rceil + 1 \right), \quad (6)$$

где  $\overline{\lfloor x \rfloor} = \min \{n \in Z \mid x \leq n\}$ ,  $\underline{\lceil x \rceil} = \max \{n \in Z \mid x \geq n\}$ ,  $n(u^{(2)})$ - периодическая функция с периодом (4), которая не определена для  $u^{(2)}$ , удовлетворяющих условию (1). Периодичность функции  $n(u^{(2)})$ , как правило, приводит к видимым особенностям гистограмм ДСТ-коэффициентов ЦИ после двукратного использования JPEG-сжатия с разными коэффициентами квантования. Эти особенности в общем случае можно охарактеризовать как периодическое возникновение пиков и впадин, называемое DQ-эффектом (рис.1). Однако такая картина имеет место не всегда. Очевидно, упомянутую периодичность, независимо от значений  $q^{(1)}$ ,  $q^{(2)}$ , могут нарушить особенности гистограммы ДСТ-коэффициентов исходного изображения. Возможны и другие варианты.

**Замечание 2.** Проявление DQ-эффекта в виде периодических пиков и впадин гистограммы  $H^{(2)}$  будет отсутствовать, если  $q^{(2)} / q^{(1)} = 2m$ ,  $m \in Z$ . Действительно, в этом случае в (6)  $n(u^{(2)}) = q^{(1)}(2m+1)$  для любого аргумента  $u^{(2)}$ .



**Рис.1.** Гистограммы ДСТ-коэффициентов частоты (2,2) для ЦИ, подвергнутого процессу двойного квантования с коэффициентами квантования: а -  $q^{(1)} = 3, q^{(2)} = 5$ ; б -  $q^{(1)} = 5, q^{(2)} = 3$

Установим достаточные условия проявления эффекта двойного квантования, одно из которых нашло свое выражение в теореме 1.

**Теорема 2.** Пусть  $q^{(1)} > q^{(2)}$ . Достаточным условием периодического возникновения незаполненных столбцов на гистограмме  $H^{(2)}$  ЦИ (рис.1(б)) является

$$\frac{q^{(1)}}{q^{(2)}} > \frac{3}{2}. \quad (7)$$

**Доказательство.** Поскольку для функции  $n(u^{(2)})$  имеет место соотношение (4), то  $q^{(1)}$  является ее периодом наряду с  $T$ . Рассмотрим значения  $n(q^{(1)} - k)$ , где  $0 < k \leq q^{(1)}$ ,  $k \in Z$  :

$$\begin{aligned} n(q^{(1)} - k) &= q^{(1)} \left( \left\lfloor \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( q^{(1)} - k + \frac{1}{2} \right) \right\rfloor - \left\lfloor \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \left( q^{(1)} - k - \frac{1}{2} \right) \right\rfloor + 1 \right) = \\ &= q^{(1)} \left( \left\lfloor q^{(2)} - \frac{2k-1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor - \left\lfloor q^{(2)} - \frac{2k+1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor + 1 \right) = \\ &= q^{(1)} \left( \left\lfloor -\frac{2k-1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor - \left\lfloor -\frac{2k+1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor + 1 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Если выполнено условие (7), то

$$\frac{2q^{(1)} - q^{(2)}}{2q^{(2)}} > 1. \quad (9)$$

Возьмем  $k$ , удовлетворяющее неравенству

$$1 \leq k < \frac{2q^{(1)} - q^{(2)}}{2q^{(2)}}. \quad (10)$$

В силу (9) хотя бы одно такое значение  $k$  существует, при этом

$$\begin{aligned} 0 < \frac{2k+1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} < 1, \quad \left\lfloor -\frac{2k+1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor = 0, \\ 0 < \frac{2k-1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} < \frac{2k+1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} < 1, \quad \left\lfloor -\frac{2k-1}{2} \frac{q^{(2)}}{q^{(1)}} \right\rfloor = -1 \end{aligned}$$

Таким образом, в условиях теоремы существуют такие значения  $0 < k \leq q^{(1)}$ ,  $k \in Z$ , легко определяемые из соотношения (10), при которых правая часть (8) обращается в ноль, что приводит к незаполненности столбца (столбцов)  $q^{(1)} - k$  в гистограмме  $H^{(2)}$ .

**Следствие.** В условиях теоремы  $n(q^{(1)} - 1) = 0$  при любом значении  $q^{(1)}$ .

**Замечание 3.** Условие (7) является достаточным, но не необходимым, для того, чтобы при  $q^{(1)} > q^{(2)}$  DQ-эффект проявился в наличии незаполненных столбцов в гистограмме

$H^{(2)}$ . Например, при  $q^{(1)} = 4, q^{(2)} = 3$  в соответствии с (6) значение  $n(2) = 0$ , хотя  $\frac{q^{(1)}}{q^{(2)}} < \frac{3}{2}$ .

**Замечание 4.** Пусть  $u^{(2)} = 0$ . При  $q^{(1)} > q^{(2)}$ , независимо от их конкретных значений,  $\frac{q^{(2)}}{2q^{(1)}} \notin Z$ . В соответствии с (6):

$$n(0) = q^{(1)} \left( \left\lfloor \frac{q^{(2)}}{2q^{(1)}} \right\rfloor - \left\lceil -\frac{q^{(2)}}{2q^{(1)}} \right\rceil + 1 \right) = q^{(1)} \left( 2 \left\lfloor \frac{q^{(2)}}{2q^{(1)}} \right\rfloor + 1 \right). \quad (11)$$

Из (11) вытекает, что для произвольных  $q^{(1)}, q^{(2)}$  значение  $n(0) \neq 0$ , а значит,  $n(lT) \neq 0, l \in Z$ .

В любом случае, зная значения коэффициентов квантования  $q^{(1)}, q^{(2)}$ , рассмотрев функцию  $n(u^{(2)})$  для аргументов  $u^{(2)} = \overline{0, T-1}$  (а в силу замечания 4 достаточно рассмотреть для  $u^{(2)} = \overline{1, T-1}$ ), конкретный вид гистограммы  $H^{(2)}$ , т.е. наличие или отсутствия в ней периодических артефактов, можно определить априори, не производя непосредственного построения  $H^{(2)}$ .

### 3. Особенности проявления DQ-эффекта при реальном восстановлении изображения.

Не ограничивая общность рассуждений, для простоты изложения далее рассматриваются изображения в градациях серого.

Все вышесказанное касалось проявления DQ-эффекта в «идеальных» условиях: учитывались лишь те округления при вычислениях, которые непосредственно проводились для DCT-коэффициентов. Однако реальный процесс восстановления ЦИ после первого квантования (процесс полного восстановления) включает в себя введение значений яркости пикселей после обратного DCT в диапазон  $[0, 255]$ , что приводит к возникновению дополнительного шума, присутствующего в восстановленном после первого квантования изображении, а это значит, что  $u^{(2)}$  реально отвечает не формуле (3), а соотношению

$$u^{(2)} = \left\lfloor \frac{[u/q^{(1)}]q^{(1)} + p}{q^{(2)}} \right\rfloor,$$

где  $p$  - неучтенный ранее шум, возникающий за счет восстановления изображения. Это очевидно разрушит «идеальную» визуальную картину DQ-эффекта. Соответствующие гистограммы DCT-коэффициентов далее будем обозначать  $\overline{H^{(2)}}$ . В реальных условиях восстановления гистограммы, представленные на рис.1, имеют вид, изображенный на рис.2.

**Замечание 5.** После обратного DCT при восстановлении изображения после первого квантования возможны следующие ситуации:

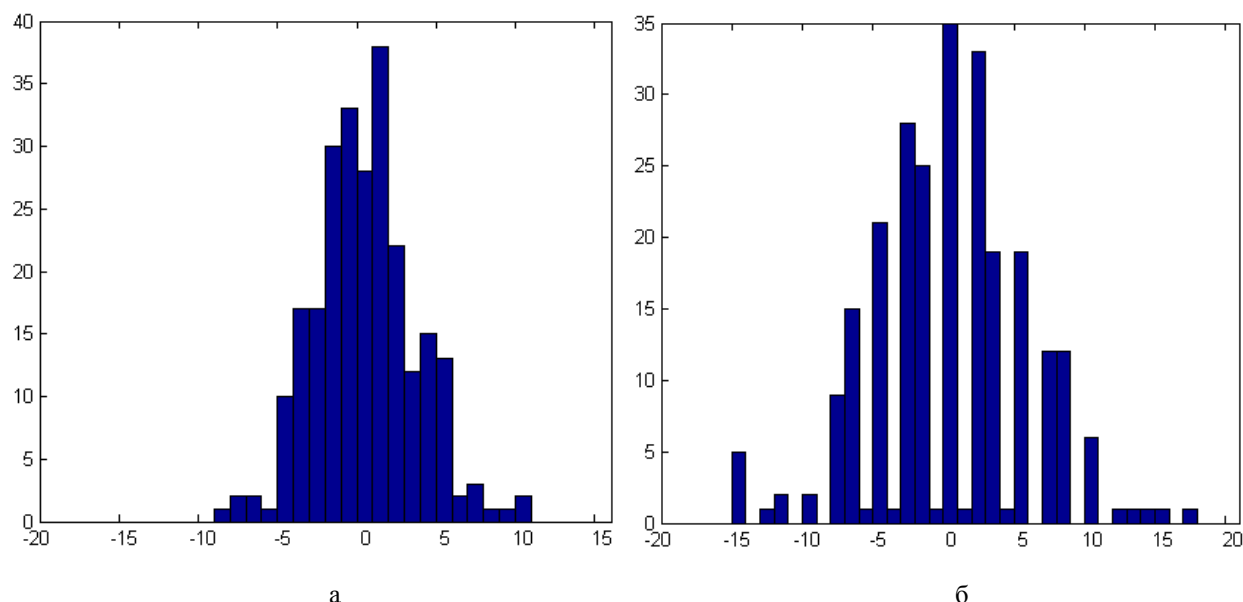
1. значения яркости пикселей попадут в границы сегмента  $[0, 255]$ ;
2. значения яркости большей части пикселей окажутся отрицательными или превосходящими 255.

В первом случае полное восстановление ЦИ потребует дополнительно лишь округлений этих значений до целых, что приведет к возникновению незначительного

шума округлений в пространственной области и, как следствие, величина соответствующего шума  $p$  в частотной области также окажется небольшой.

Во втором случае процесс полного восстановления ЦИ может привести, в силу значительности  $p$ , к последствиям, когда распознавание проявления DQ-эффекта в гистограммах  $\overline{H^{(2)}}$  окажется затруднительным или вообще невозможным.

Упомянутая выше проблема не затрагивалась ранее в работах, посвященных изучению и использованию эффекта двойного квантования, доступных из открытой печати, хотя для его практического применения является чрезвычайно актуальной. Шум, возникающий за счет восстановления ЦИ, является возмущающим воздействием как для матрицы яркости в пространственной области изображения, так и для матрицы DCT-коэффициентов в частотной. Но реакция на один и тот же даже малый шум различных DCT-коэффициентов будет разной. В [6] показано, что коэффициенты, отвечающие низким частотам, будут менее чувствительными [7] к возмущающим воздействиям, чем коэффициенты, отвечающие средним и высоким частотам. Таким образом, даже в случае ситуации 1 возмущения DCT-коэффициентов, отвечающих высоким и, возможно, средним



**Рис.2.** Гистограммы DCT-коэффициентов частоты (2,2) для ЦИ, подвергнутого процессу двойного квантования с полным предварительным восстановлением после первого квантования: а -  $q^{(1)} = 3, q^{(2)} = 5$ ; б -  $q^{(1)} = 5, q^{(2)} = 3$

частотам могут оказаться значительными, что приведет к значительным искажениям картины DQ-эффекта в гистограммах  $\overline{H^{(2)}}$  для таких частот. Заметим, что коэффициенты высоких частот в принципе являются неинформативными с точки зрения обнаружения следов двойного квантования: они практически все обнуляются еще при первом квантовании.

Иллюстрацией вышесказанного служит рисунок 3 (частота (3,4)): столбцы гистограммы  $\overline{H^{(2)}}$ , соответствующие значениям -4, 2, 7 (рис.3(б)), незаполненные в гистограмме  $\overline{H^{(2)}}$  (рис.3(а)), сравнимы по величине со столбцами, отвечающими значениям -7, 8 в  $\overline{H^{(2)}}$ , что полностью стирает картину периодического возникновения пиков и впадин. Из вышесказанного вытекает следующий вывод:

**Вывод:** для обнаружения следов двойного квантования на гистограммах DCT-коэффициентов ЦИ в реальных условиях имеет смысл исследовать не все гистограммы, а лишь те, которые соответствуют низким частотам, что значительно уменьшит вычислительные затраты для проводимого анализа.

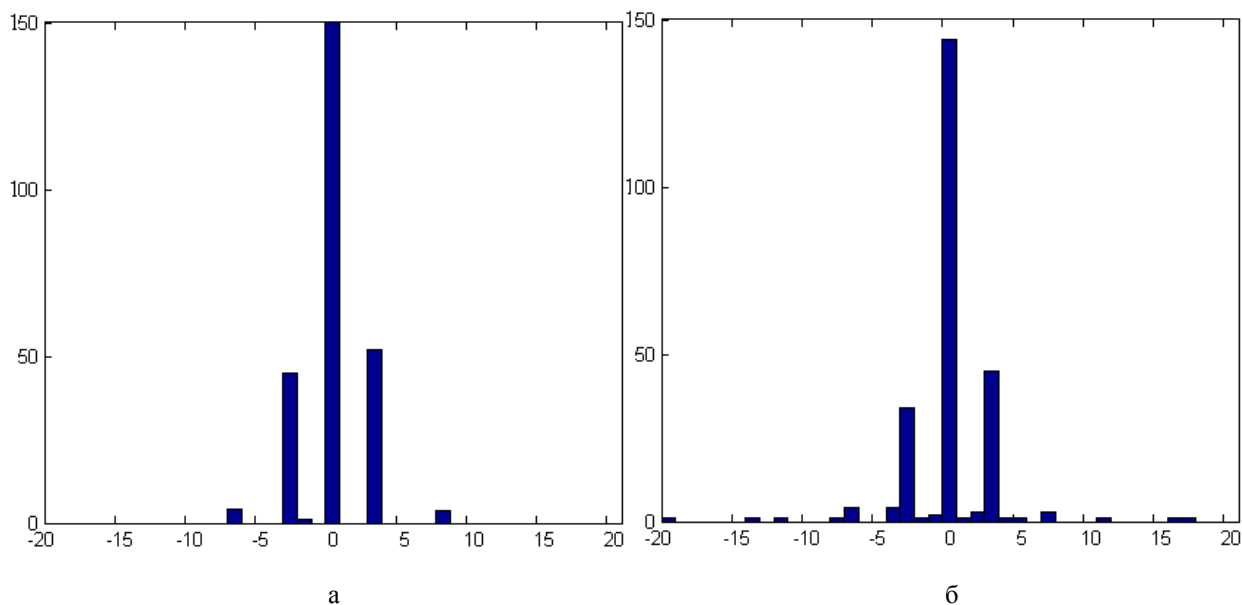


Рис.3. Гистограммы DCT-коэффициентов ЦИ частоты (3,4): а -  $H^{(2)}$ ; б -  $\overline{H^{(2)}}$

#### 4. Заключение.

В работе проведено детальное исследование двукратного использовании JPEG-сжатия изображения с различными коэффициентами квантования. В результате

1. Установлены достаточные условия проявления и отсутствия проявления DQ-эффекта;
2. Получена возможность значительного сокращения вычислительной работы при анализе ЦИ с целью выявления DQ-эффекта в реальных условиях за счет учета различной чувствительности DCT-коэффициентов.

Целью дальнейшей работы авторов является создание на базе проведенных исследований нового метода для выявления фальсификации цифровых фотографий, не требующего никакой дополнительной информации о технических характеристиках использованных фотокамер, позволяющего локализовать область фальсификации.

#### Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.
2. Lucas J., Fridrich J. Estimation of Primary Quantization Matrix in Double Compressed JPEG Images // Proc. Of DFRWS 2003, Cleveland, OH, August 5-8.
3. Popescu A. C., Farid H. Statistical Tools for Digital Forensics // Information Hiding. - 2004. - P. 128-147.
4. Popescu A. C., Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling // IEEE Trans. Signal Process. - 2005. - Vol. 53(2). - P. 758-767.
5. He J., Lin Z., Wang L., Tang X. Detecting Doctored JPEG Images Via DCT Coefficient Analysis // ECCV(3) 2006: 423-435.
6. Кобозева А.А. Связь свойств стеганографического алгоритма и используемой им области контейнера для погружения секретной информации // Искусственный интеллект. - 2007. - №4. - С.531-538.
7. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. - М.: Мир, 2001. - 430 с.