

## Метод преобразования гистограмм яркостей и вейвлет-коррекция атмосферных искажений спутниковых изображений

К.Т. Протасов<sup>1,2</sup>, Л.А. Бусыгин<sup>1</sup>, В.В. Белов<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634034, г. Томск, пр. Ленина, 40

<sup>3</sup>Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 18.05.2009 г.

Рассматриваются подходы к атмосферной коррекции изображений методом преобразования гистограмм (когда результирующая гистограмма известна) и с использованием вейвлет-преобразований (когда результирующая гистограмма неизвестна). Показано, что такая коррекция приводит к повышению контраста аэрокосмических изображений земной поверхности.

*Ключевые слова:* вейвлет-преобразование, спутниковые изображения, оценка контраста; wavelet transform, satellite image, contrast estimate.

### Введение

При компьютерном анализе аэрокосмических изображений земной поверхности улучшение их качества связано, как правило, с задачей извлечения информации о характеристиках ландшафта или находящихся на поверхности объектов. Одна из основных проблем использования спутниковых данных для решения различных научно-исследовательских и прикладных задач состоит в том, что излучение, распространяющееся от объекта наблюдения к приемнику, трансформируется атмосферой. Физические причины этого обусловлены процессами рассеяния и поглощения излучения молекулярной и аэрозольной составляющей атмосферы.

Существуют методы устранения (точнее, как правило, уменьшения) этого влияния атмосферы, в частности, например, развиваемый в Институте оптики атмосферы СО РАН RTM-метод (Radiative Transfer Model [1]). Однако этот метод требует достаточно большого объема априорной информации об оптико-геометрических условиях съемки. В некоторых случаях эта коррекция может быть осуществлена при минимальной априорной информации. Это возможно, когда имеет место наиболее распространенный дефект спутниковых изображений, связанный с ослаблением контраста. Для оптимального использования всего количества информации спутниковых видеоданных существуют процедуры усиления контраста за счет переноса

отдельных частей или всего диапазона наблюдаемых градаций яркостей изображения на весь диапазон шкалы.

Контраст изображения можно определить следующим образом. Пусть изображение представляет собой матрицу значений яркостей  $f(x_i, y_j) = f(i, j)$ , заданных на растре целочисленных значений индексов  $i = 1, \dots, N$  и  $j = 1, \dots, M$  плоскости изображения. Обозначим минимальное значение яркостей рассматриваемой сцены через  $f_a$ , а максимальное значение — через  $f_b$ . Тогда контраст изображения естественно охарактеризовать как  $A = (f_b - f_a) / \Delta$ , где  $\Delta$  — полный диапазон изменений  $f$  [2–4]. Линейное увеличение контраста без потери информации связано с отображением наблюдаемого диапазона яркостей на весь интервал возможных значений.

Когда необходимо выделить какие-либо уровни яркостей изображения, несложно осуществить локальное увеличение контраста, используя подходящие нелинейные преобразования. К сожалению, в настоящее время не существует общей теории улучшения качества изображений. Более того, даже попытка приблизить воспроизводимое изображение к идеализированному оригиналу не всегда удовлетворяет субъективной оценке пользователя. Это объясняется отсутствием общепринятого универсального критерия качества изображения.

Качество обработанного изображения можно охарактеризовать дифференциальной энтропией. Так, например, известно [5], что операция сглаживания (усреднения) гистограммы или соответ-

\* Константин Тихонович Протасов (prot@iao.ru); Леонид Александрович Бусыгин (LeonidBusygin@mail2000.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

вующей плотности вероятности может привести к возрастанию энтропии. Использование энтропийного критерия полезно тем, что можно ввести принцип экстремума энтропии, который предписывает выбирать из множества распределений то, которое обладает максимальной или минимальной энтропией. Так, если область возможных значений случайной величины  $f(i, j)$  – яркости изображения – ограничена интервалом  $(f_a, f_b)$ ,  $f_a \leq f(i, j) \leq f_b$ , то максимальной энтропией обладает равномерное на интервале  $[f_a, f_b]$  распределение. Поэтому в компьютерных системах коррекции изображений преобразование к равномерной гистограмме (процедура эквализации) является предпочтительным с субъективной точки зрения.

Существуют различные методы повышения контрастов спутниковых сканерных цифровых изображений земной поверхности, наблюдаемых через замутненную атмосферу, два из которых будут рассмотрены в данной статье.

## Метод преобразования гистограмм яркостей

Проблемы увеличения контраста и преобразования гистограмм яркостей при анализе аэрокосмических изображений связаны с проблемой видения в мутных средах и со следующим уравнением, описывающим процесс формирования изображения (если не учитывать нелинейных искажений):

$$g(x, y) = \iint_D h(x-u, y-v) f(u, v) du dv + N(x, y), \quad (1)$$

где  $f(u, v)$  – идеальное изображение;  $h(x, y)$  – функция размытия точки (ФРТ);  $g(x, y)$  – наблюдаемое размытое изображение;  $N(x, y)$  – шум. Характер искажения изображений (размытие границ, уменьшение контраста и т.д.) зависит от разрешающей способности оптической (оптико-электронной) системы и состояния атмосферы в момент съемки.

В тех случаях, когда в атмосфере отсутствуют слои повышенной мутности, удаленные от земной поверхности, и пространственное разрешение прибора сравнимо с полушириной функции размытия точки, то ФРТ можно считать квази-дельта-функцией:

$$h'(x, y) \Rightarrow C\delta(x-y) = C\delta_{xy} = C\delta_{ij}. \quad (2)$$

Эту дельта-функцию можно представить в виде матрицы с диагональю из единиц с весовым множителем в виде неопределенной константы  $C$ . Другими словами, для оцифрованного космическими системами регистрации изображения  $g(x, y)$  имеем

$$g(x, y) = \sum_{i,j}^{M \times N} C\delta_{(x-i)(y-j)} f(i, j) \Delta i \Delta j = Cf(x, y), \quad (3)$$

где

$$\delta_{(x=i)(y=i)} = \begin{Bmatrix} 1_{(x=i)(y=i)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1_{(x=i)(y=i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1_{(x=i)(y=i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1_{(x=i)(y=i)} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь  $i, j$  – номера пикселей по строкам и столбцам соответственно.

Если построить гистограмму распределения яркостей наблюдаемого изображения  $g(x, y)$ , то эта гистограмма с точностью до константы  $C$  та же, что и для функции  $f(x, y)$ . Таким образом, если  $p_g[g(x, y)]$  – гистограмма наблюдаемого слабоконтрастного изображения, искаженного атмосферой, а  $p_f[f(x, y)]$  – гистограмма неискаженного изображения, то  $p_g(z) = Cp_f(z)$ . Тогда технология коррекции аэрокосмических изображений на основе преобразования гистограмм сводится к следующему.

Если изображения изопланарны [6], то восстановление изображения  $f(x, y)$  по наблюдаемому  $g(x, y)$  состоит в масштабном преобразовании яркостей с коэффициентом пересчета  $C$ , который неизвестен. Если ФРТ не постоянна и в пределах изображения меняет свою форму, т.е. изображения неизопланарны, то функциональная связь гистограмм становится более сложной, а именно:

$$p_g(z) = C(z)p_f(z), \quad (5)$$

что требует дополнительного рассмотрения. Из выражения (4) следует, что наблюдаемое изображение  $g(x, y)$  не приводит к размыванию границ перепадов яркостей и это влияние проявляется в масштабировании радиояркостей неопределенным коэффициентом  $C$ . Причем если  $C < 1$ , то  $g(x, y)$  темнее  $f(x, y)$ , а если  $C > 1$ , то зарегистрированное изображение светлее исходного.

Пусть анализируемый непрерывный видеосигнал дискретизируется, в результате чего формируется растровое изображение, содержащее  $N \times M$  элементов (пикселей). Пусть  $x$  – переменная, представляющая уровень яркости каждого пикселя. Для простоты положим, что  $x$  нормирована в интервале  $0 \leq x \leq 1$ , где 0 означает уровень черного, а 1 – уровень белого в шкале яркости. Задача заключается в поиске преобразований вида

$$y = T(x), \quad 0 \leq x \leq 1, \quad (6)$$

которые отображают уровень яркости  $x$  в уровень  $y$ .

Методы преобразования шкалы яркости основаны на изменении функции плотности вероятности уровней яркости обрабатываемого изображения. Обозначим функцию плотности вероятности исходного обрабатываемого изображения  $p_x(x)$ , а плотность вероятности отсчетов яркости преобразованного по формуле (6) изображения обозначим  $p_y(y)$ .

Предположим, что наблюдения представлены непрерывными значениями. Для конкретного

изображения необходимо получить «улучшенное» изображение с заданной функцией плотности  $p_y(y)$ . Задача сводится к отысканию преобразования  $T$  по паре заданных функций  $p_x(x)$  и  $p_y(y)$ . Функция преобразования  $y = T(x)$  и ее обратная функция  $x = T^{-1}(y)$  будут строго монотонно возрастать в интервале  $[0,1]$ , если функция  $T(x)$  удовлетворяет следующим условиям:

- а)  $T(x)$  однозначна и строго монотонна в интервале  $0 \leq x \leq 1$ ;
- б)  $0 \leq T(x) \leq 1$  при  $0 \leq x \leq 1$ . (7)

Условие монотонности сохраняет порядок перехода от черного к белому в шкале яркости улучшенного изображения, а второе условие гарантирует получение отображения, которое совпадает с разрешенными значениями яркости элементов изображения. При этих условиях функцию  $p_y(y)$  можно выразить через  $p_x(x)$  и  $T(x)$  следующим образом:

$$p_y(y) = \left[ p_x(x) \frac{dx}{dy} \right]_{x=T^{-1}(y)}. \quad (8)$$

Функция  $p_x(x)$  восстанавливается по исходному изображению, а функция  $p_y(y)$  задана пользователем. Задача сводится к нахождению функции преобразования  $T(x)$ , которая полностью определяет  $p_y(y)$ . Для нахождения преобразования будем использовать идею предварительного перехода к равномерной гистограмме. Это преобразование осуществляется использованием интегральной функции распределения

$$z = H(x) = \int_0^x p_x(t) dt, \quad 0 \leq x \leq 1. \quad (9)$$

Переменная  $t$  в выражении (9) является переменной интегрирования, из этого уравнения следует, что  $dx/dy = 1/p_x(x)$ , тогда (8) сводится к

$$p_y(y) = 1, \quad 0 \leq y \leq 1. \quad (10)$$

Итак, использование уравнения (9) позволяет получить изображение, в котором значения яркости распределены равномерно. Чтобы получить изображение с необходимым распределением яркостей  $p_y(y)$ , вновь воспользуемся выражением, аналогичным (9), тогда

$$z = G(y) = \int_0^y p_y(t) dt. \quad (11)$$

Распределение  $p_z(z)$  величины  $z$  в выражениях (9) и (11) оказывается равномерным, тогда из (11) можно найти величину  $y$  обратным преобразованием:

$$y = G^{-1}(z) = G^{-1}[H(x)] = T(x). \quad (12)$$

Таким образом, если в исходном изображении сначала произвести выравнивание плотности преоб-

разованием (11), а затем новые (равновероятные) уровни яркости подвергнуть обратному преобразованию, согласно функции (12), то в результате получим изображение с уровнями яркости, имеющими заранее заданную пользователем плотность вероятности  $p_y(y)$ . При использовании уравнения (12) для непрерывных переменных возникают затруднения, связанные с определением обратной функции в аналитическом виде. В дискретном случае эту проблему можно обойти, поскольку число различных уровней яркости невелико и оказывается возможным вычислить и запомнить преобразованное значение для каждого дискретного уровня яркости элемента изображения.

Дискретная формулировка этой задачи подробно рассмотрена в [3]. На практике, как правило, неизвестна гистограмма, к которой следует преобразовать неконтрастное изображение. В то же время можно предположить, что гистограмма зарегистрированного изображения, и это показывают наблюдения, подобна (с точностью до масштабного преобразования) гистограмме изображения другого фрагмента наблюдаемой сцены, но не искаженной атмосферой (или, точнее, существенно менее выраженного), смежного с анализируемым фрагментом (если таковое, конечно, имеется). Если никакой другой априорной информации нет, то предлагаемый вариант следует принять как первое приближение. В связи с этим алгоритм коррекции методом преобразования гистограмм можно представить следующим образом:

- а) строим гистограмму наблюдаемого изображения  $g(x)$  и корректируем «концы» гистограммы, исключая выбросы, сохранив 95% площади  $g(x)$ ;
- б) масштабным преобразованием отображаем значения яркостей на весь допустимый диапазон значений (обычно это 255 градаций яркости)

$$y = \frac{255(x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})},$$

где  $x_{\min}$  — минимальное и  $x_{\max}$  — максимальное значение гистограммы, при этом гистограмма получается линейчатой, некоторые значения в ней отсутствуют;

в) сглаживаем полученную гистограмму аппроксимирующим сплайном и определяем  $f_s(y)$ .

Рассмотрим пример космического изображения, приведенного на рис. 1, полученного прибором AVHRR (спутник NOAA). Характерной особенностью этого изображения является то, что лишь часть снимка существенно замутнена (фрагмент б).

Если предположить справедливость гипотезы текстурной однородности всего кадра изображения, то гистограмму яркостей незамутненного участка изображения можно получить с относительным контрастом  $A_a = 0,41$  (рис. 2, фрагмент а), гистограмму замутненного изображения с относительным контрастом  $A_b = 0,23$  (фрагмент б), а гистограмму яркостей реконструированного изображения с контрастом  $A_c = A_a = 0,41$  (фрагмент в).

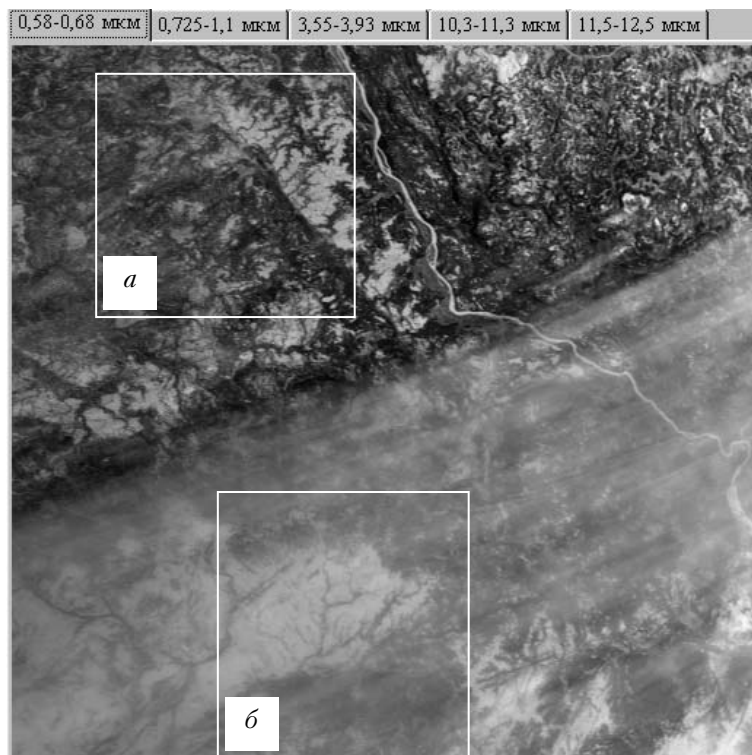


Рис. 1. Полупрозрачное замутнение части изображения

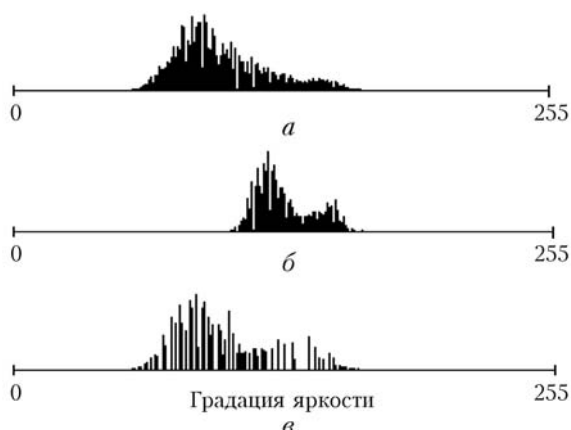


Рис. 2. Гистограммы фрагментов *а* и *б* приведенного изображения, гистограмма восстановленного фрагмента (*в*) путем преобразования гистограмм

На рис. 3 приведен результат преобразования гистограмм яркостей и реконструкции изображений двух выбранных фрагментов, замутненных на исходном изображении.

Из рис. 3 следует, что контраст замутненного участка изображения можно существенно улучшить в рамках сделанных предположений. Однако при дальнейшей, например, тематической обработке этой части изображения нужно иметь в виду, что оно описывается гистограммой с пропущенными значениями. Игнорирование этого факта может привести к некорректной интерпретации изображения, т.е. к ошибкам или неточностям интерпретации данных спутникового зондирования.

## Вейвлет-коррекция спутниковых изображений

Гистограмму без пропусков можно получить, воспользовавшись вейвлет-представлениями изображений и технологией контрастирования, представленной в работе [7]. Описанный в ней подход был использован для коррекции медицинских рентгеновских снимков. Он основан на концепции краевых характеристик, которые появляются в местах, где яркость изображения резко изменяется (скачками). В некоторых алгоритмах выделения краев используются локальные максимумы градиента изображений, сглаженных с различным масштабом.

Эти краевые особенности могут быть классифицированы по соответствующему масштабу. Авторы [7] формализовали и исследовали концепцию многомасштабного представления края (МПК), используя вейвлет-преобразования (ВП), основанные на особом классе сплайновых (не ортогональных) вейвлетов. В их подходе разделяемая сплайновая масштабируемая функция  $h(x,y)$  — функция размытия точки, играет роль сглаживающего фильтра и соответствующие ориентированные вейвлеты заданы ее частными производными.

Рассмотрим метод повышения контраста, который основан на этом подходе. Так как величина краевых градиентов определяет разность яркостей между различными компонентами ландшафта на изображении, контраст между ними может быть

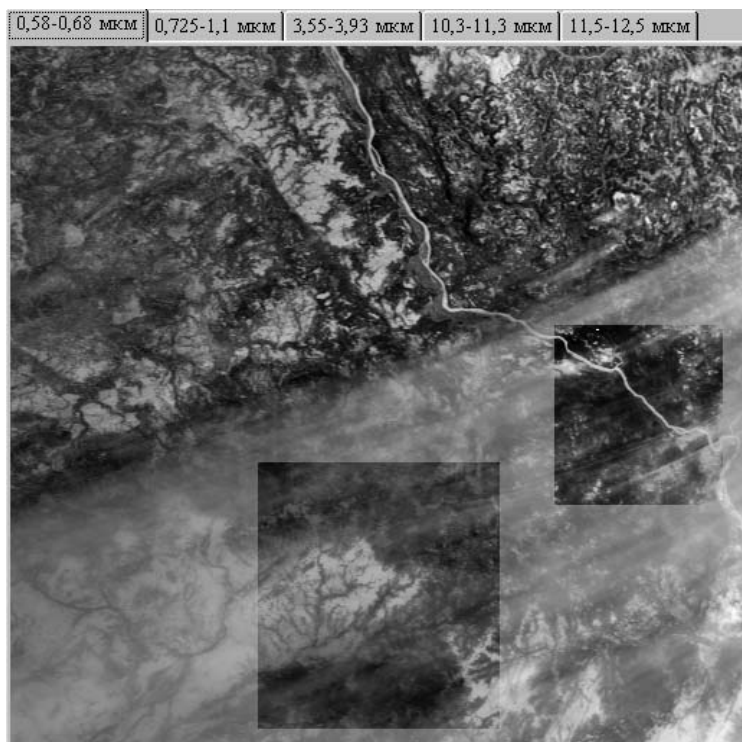


Рис. 3. Восстановление контраста фрагментов изображения методом преобразования гистограмм

увеличен применением соответствующего преобразования краевых градиентов. Могут быть разработаны различные преобразования для разных масштабов, что позволяет сделать акцент на объектах определенных размеров.

Выберем тип дифференцирующего вейвлета и назовем вектор неизвестных параметров  $(c^1, c^2, \dots, c^n)^T$ , которые регулируют роль каждой вейвлет-функции в линейной модели восстановления изображений. Для данного изображения  $I(x, y)$  простейшим преобразованием является линейное растяжение его краевых градиентов. В самом деле, для краевых наборов  $A_{2^j}(I)$  можно определить растянутые края с коэффициентом растяжения  $c^j \geq 1$  путем умножения каждого максимума градиента на скаляр  $c^j$ ,  $j = 1, \dots, n$ :

$$c^j A_{2^j}(I) = \left\{ [(x_i, y_i); c^j \nabla_{2^j} I(x_i, y_i)] \mid [(x_i, y_i); \nabla_{2^j} I(x_i, y_i)] \in A_{2^j}(I) \right\}, \quad (13)$$

где  $\nabla_{2^j} I(x, y)$  — градиент соответствующего масштаба [6]. Заметим, что при этом происходит изменение длины вектора градиента в каждой краевой точке без изменения его направления. Применим такие преобразования для каждого масштаба. Выделим два типа преобразований. Первый тип — постоянное растяжение, т.е. постоянное на всех масштабах. В этом случае контраст объектов всех размеров будет одинаково увеличен. Преобразованный набор многомасштабных краев имеет вид

$$\{c^j A_{2^j}\}_j, \text{ где } c^j = c \text{ и не зависит от } j.$$

Второй тип — переменное растяжение — представляет больший интерес, так как оно изменяется в зависимости от масштаба и контраст объектов различных размеров увеличивается выборочно. Преобразованный набор краев имеет вид

$$\{c^j A_{2^j}\}_j, \text{ где } c^j \geq 1 \text{ и меняется в зависимости от } j.$$

В обоих случаях изображение может быть восстановлено в два шага. На первом шаге ВП изображения восстанавливается из преобразованного МПК с помощью алгоритма, представленного в среде Mat\_LAB. На втором шаге, для получения изображения, производим обратное ВП. Важная задача, возникающая при этом, состоит в оптимизации критерия качества по параметрам  $\mathbf{c} = (c^1, c^2, \dots, c^n)^T$ . Пусть гистограмма изображения, полученного вейвлет-преобразованием, будет  $f_{wt}(y \mid \mathbf{c})$ , тогда квадратичный критерий качества

$$J(\mathbf{c}) = \sum_{t=1}^T |f_s(t) - f_{wt}(t \mid \mathbf{c})|^2 = \min_{\{\mathbf{c}\}}, \quad (14)$$

где  $f_s(t)$  — сглаженная сплайном предполагаемая гистограмма;  $T$  — количество отсчетов.

Для оптимизации  $J(\mathbf{c})$  воспользуемся поисковым алгоритмом Цыпкина [8]. С этой целью неизвестным параметрам зададим первое приближение  $c^i = 1$ ,  $i = 1, \dots, n$ , и введем элементарные векторы поисковых направлений:

$$\mathbf{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{e}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \mathbf{e}_n = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Выберем поисковый шаг  $a$  и оценим односторонние градиенты критерия качества

$$\nabla_+ J(\mathbf{c}) = (J(\mathbf{c} + a\mathbf{e}_1), J(\mathbf{c} + a\mathbf{e}_2), \dots, J(\mathbf{c} + a\mathbf{e}_n))^T,$$

$$\nabla_- J(\mathbf{c}) = (J(\mathbf{c} - a\mathbf{e}_1), J(\mathbf{c} - a\mathbf{e}_2), \dots, J(\mathbf{c} - a\mathbf{e}_n))^T$$

и двусторонний градиент

$$\nabla_{\pm} J(\mathbf{c}) = \frac{\nabla_+ J(\mathbf{c}) - \nabla_- J(\mathbf{c})}{2a}.$$

Тогда вектор неизвестных коэффициентов  $\mathbf{c}$  и корректирующая гистограмма восстановленного вейвлет-преобразованием изображения будут получены следующим выражением:

$$\mathbf{c}[m] = \mathbf{c}[m-1] - \gamma_m \nabla_{\pm} J(\mathbf{c}[m-1], a[m-1]), \quad (15)$$

где  $\gamma_m$  – рабочий шаг;  $m$  – номер итерации, причем  $\gamma < a$ .

Для иллюстрации этого подхода по сети Интернет было выбрано слабоконтрастное изображение земной поверхности с высоким пространственным разрешением, наблюдаемой из космоса в условиях безоблачной атмосферы с относительным контрастом  $A = 0,45$  (рис. 4).

С использованием описанного выше метода произведена атмосферная коррекция этого изображения. Оно приведено на рис. 5.



Рис. 4. Исходный спутниковый снимок высокого разрешения



Рис. 5. Результат применения вейвлет-преобразования исходного изображения

Применение этой процедуры обработки изображений привело к повышению контраста на 57% ( $A = 0,71$ ).

### Заключение

Таким образом, алгоритмически и программно реализованы два подхода к повышению контрастов при наблюдении изображений земной поверхности через атмосферу с помощью сканирующих радиометров среднего и низкого разрешения. Первый (метод преобразования гистограмм яркостей в сочетании с принципом подобия) применим, если наблюдаемый участок характеризуется текстурной однородностью, экранирован горизонтально неоднородным атмосферным слоем (полупрозрачным облаком, туманом, дымовым шлейфом и т.п.) и содержит разрывы в этом экране, которым соответствуют фрагменты высококонтрастных изображений. Реконструированное в этом случае изображение характеризуется более высоким контрастом  $A_c = 0,41$ , тогда как исходный контраст  $A_b = 0,23$  (что может упростить решение задачи обнаружения), но в гистограмме яркостей появляются пропуски, что необходимо учитывать при тематической обработке таких изображений с целью получения тех или иных количественных оценок.

Второй подход вейвлет-преобразования также приводит к повышению контраста с уровня 0,45 до уровня 0,71, но не требует наличия в изображениях опорных неискаженных или незначительно искаженных атмосферой участков, и гистограмма распределения яркостей не содержит пропусков.

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1056–1063.
2. *Прэнт У.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М.: Мир, 1982. Кн. 2. 480 с.
3. *Вудс Р.Э., Гонсалес Р.С.* Цифровые методы улучшения изображений в реальном времени // ТИИЭР. Тематический выпуск: Обработка изображений. 1981. Т. 69. № 5. С. 176–190.
4. *Вычислительная оптика: Справочник / Под общ. ред. М.М. Русинова.* Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
5. *Тарасенко Ф.П.* Введение в курс теории информации. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1963. 240 с.
6. *Белов В.В., Креков Г.М., Макушкина И.Ю.* Изопланарность в системах видения // Оптика атмосф. 1989. Т. 2. № 10. С. 1011–1018.
7. *Jian Lu, Denis M., Healy Jr., John B. Weaver.* Contrast enhancement of medical images using multiscale edge representation // Opt. Eng. 1994. V. 33. N 7. С. 2151–2161.
8. *Цыткин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400 с.

*K.T. Protasov, L.A. Busygin, V.V. Belov. The method of transform histograms of brightness; as well as wavelet-correction of satellite image atmospheric distortions.*

In the present article, approaches to the atmospheric correction of images with the help of histogram transform (when the resulting histogram is known) and wavelet transform (when the resulting histogram is unknown) are considered. It is demonstrated that the correction increases the contrast of aerospace images of the Earth's surface.