

## МЕТОД КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЕРЕНОСА ГРАДИЕНТОВ

*Шипко В.В., к.т.н., ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
г. Воронеж, e-mail: shipko.v@bk.ru.*

## METHOD OF INTEGRATION OF MULTISPECTRAL IMAGES ON THE BASIS OF TRANSFER OF GRADIENTS

*Shipko V.V.*

*The new method of integration of digital multispectral images consisting in assignment to one (priority) spectral image of mean or median value of gradients in the sliding window of set of other spectral images is offered. Such approach allows to increase local contrast of the resulting image containing elements of the source images of the same scene received in the different spectral ranges at the same time as much as possible having saved brightness portrait of objects from all spectral a component of the multispectral image and the brightness portrait priority spectral components. The examples of integration images and results of numerical researches confirming efficiency of the offered method are presented.*

**Key words:** integration of images, multispectral images, gradient.

**Ключевые слова:** комплексирование изображений, многоспектральные изображения, градиент.

### Введение

В настоящее время интенсивное развитие комплексов дистанционного зондирования Земли в основном направлено на расширение спектрального диапазона съемки и увеличение спектрального разрешения. Создаются многоканальные комплексы мониторинга Земной поверхности воздушного и космического базирования [1, 2]. При этом выдвигаются достаточно жесткие требования и на высокое пространственное разрешение таких комплексов. Каждый из приемных каналов многоканальных комплексов имеет свои преимущества и ограничения в информативности получаемых спектральных изображений. Это связано со спецификой формирования сигналов в этих спектральных диапазонах, обусловленной различными факторами (спектральная селективность объектов съемки, наличие помех и искажений в отдельных спектральных компонентах и т.д.).

Важным направлением обработки получаемых многоспектральных изображений является их комплексирование [3]. Как правило комплексирование заключается в совместной обработке нескольких изображений одного и того же участка местности, полученных в различных спектральных диапазонах, в результате чего можно дополнительно значительно повысить заметность объекта или его деталей на едином изображении. Это происходит благодаря возможности извлечения посредством такой обработки дополнительной информации об объектах местности, заключенной в характере взаимосвязи зональных яркостей между спектральными диапазонами. Конечным продуктом комплексирования может быть как единое полутонное, так и псевдоцветное изображение, на котором с требуемой точностью отображают-

*Предлагается новый метод комплексирования цифровых многоспектральных изображений, заключающийся в присвоении одному (приоритетному) спектральному изображению среднего или медианного значения градиентов в скользящем окне совокупности других спектральных изображений. Такой подход позволяет повысить локальный контраст результирующего изображения, содержащего элементы исходных изображений одной и той же сцены, полученных в разных спектральных диапазонах, при этом максимально сохранить контурные признаки объектов от всех спектральных компонент многоспектрального изображения и яркостный портрет приоритетной спектральной компоненты. Представлены примеры комплексированных изображений и результаты численных исследований, подтверждающие эффективность предложенного метода.*

ся спектральные признаки объектов интереса.

Достоинствами синтеза единого (комплексированного) изображения является:

- возможность аккумулирования в единое изображение особенностей спектральных изображений объектов местности;

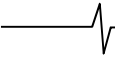
- возможность сделать доступной информацию многоспектральных изображений, связанную с корреляцией яркостей между каналами съемки, а точнее с различиями в корреляциях яркостей объектов и фонов.

Условно, синтез единого полутонного комплексированного изображения по набору спектральных изображений можно разделить на два подхода [4]:

- 1) синтез единого полутонного изображения на основе линейной комбинации компонент вектора зональных яркостей;

- 2) синтез единого полутонного изображения на основе нелинейных функций компонент вектора зональных яркостей.

Основной задачей комплексирования является перенос информации составляющих разноспектральных изображений, при этом требуется обеспечить высокую скорость обработки в режиме реального времени с мак-



симальным сохранением информации от всех спектральных составляющих.

Существует множество методов и алгоритмов комплексирования [3, 5-9]. Но большая часть из них эффективна лишь для двухспектральных изображений, либо эти алгоритмы являются вычислительно затратными для многоспектральных изображений.

Как показал анализ [3-9], очень часто при комплексировании многоспектральных изображений выбирают приоритетную спектральную компоненту с целью максимизировать ее влияние на результирующее единое изображение. Поскольку при наличии большого набора спектральных компонент с различными фоно-объектовыми портретами, а часто это инверсные области [3, 10], возникают трудности их качественного объединения, в частности при усреднении таких областей они сольются в один тон. Поэтому выбирается приоритетная спектральная компонента, к которой по определенному правилу добавляются отличительные признаки других компонент. Как известно, наиболее информативными отличительными признаками являются контура объектов [3, 4, 10, 11], поэтому этот факт будет использоваться при постановке задачи синтеза единого комплексированного изображения и оценке его эффективности.

#### Постановка задачи

Используемая модель исходного оцифрованного по строкам  $i$  и столбцам  $j$   $L$ -компонентного изображения  $\Lambda$  в общем случае имеет вид:

$$\Lambda = [\lambda_{i,j}^1 \ \lambda_{i,j}^2 \ \dots \ \lambda_{i,j}^L]^T, \quad \lambda_{i,j}^l \in [0, \dots, 2^N - 1], \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n; m, n$  – число строк и столбцов изображения соответственно;  $\lambda_{i,j}^l$  – элементы компоненты  $l$ ;  $l$  – индекс компоненты,  $l = 1, \dots, L, N$  – степень квантования яркости компонент изображения  $\Lambda$ ;

Формально запись процедуры синтеза можно представить следующим образом:

$$\hat{\lambda}_{i,j} = F[\Lambda], \quad (2)$$

где  $\hat{\lambda}_{i,j}$  – скалярная величина, яркость точки  $(i, j)$  единого изображения;  $F$  – некоторое преобразование компонент вектора яркости многоспектрального изображения  $\Lambda$  для точки  $(i, j)$ .

С учетом выбора приоритетной спектральной компоненты выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = F[\Lambda], \quad (3)$$

где  $r$  – индекс приоритетной компоненты,  $r \in [1, \dots, L]$ ;

$\hat{\lambda}_{i,j}^r$  – комплексированное изображение с приоритетом  $r$  компоненты.

Таким образом, необходимо синтезировать единое изображение  $\hat{\lambda}_{i,j}^r$  по совокупности спектральных изображений  $\lambda_{i,j}^1, \lambda_{i,j}^2, \dots, \lambda_{i,j}^L$ , которое будет максимально приближено к зональной яркости приоритетного изображения  $\lambda_{i,j}^l$  и содержать контурные признаки

остальных спектральных изображений, т.е. удовлетворять равенству:

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = F1[F2[\Lambda]] \rightarrow \min \left\{ \left\| \hat{\lambda}_{i,j}^r - \lambda_{i,j}^r \right\|, \left\| \hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y \right\| \right\}, \quad (4)$$

где  $F1$  – оператор яркостного преобразования;  $F2$  – оператор пространственного (контурного) преобразования;  $\hat{g}_{i,j}^r$  – бинарное изображение пространственного положения контуров единого комплексированного изображения;  $g_{i,j}^y$  – бинарное изображение пространственного положения эталонных контуров, например, определяемое по усредненному изображению всех спектральных компонент  $y_{i,j} = \frac{1}{L} \sum_1^L \lambda_{i,j}^l$ .

#### Метод комплексирования мультиспектральных изображений на основе переноса градиентов спектральных компонент

Вначале определяют приоритетное изображение  $\hat{\lambda}_{i,j}^r$  путем субъективной оценки изображений оператором, либо используя какой-нибудь автоматический критерий.

На следующем шаге формируют единое (эталонное) изображение для оценки общих контурных признаков:

$$y_{i,j} = Y[\lambda_{i,j}^1, \lambda_{i,j}^2, \dots, \lambda_{i,j}^L], \quad (5)$$

где  $Y$  – оператор формирования единого изображения для оценки общих контуров.

В качестве  $Y$  может использоваться любой способ преобразования зональных яркостей, к примеру, усреднение, максимум, линейная комбинация компонент  $\Lambda$  с весовыми коэффициентами и т.д.

После чего вычисляют разности значений яркости (градиенты) каждого пиксела изображения  $y_{i,j}$  с окружающими его пикселями в скользящем окне:

$$(\Delta_{i \pm p, j \pm q})_d = (y_{i,j} - y_{i \pm p, j \pm q})k, \quad (6)$$

где  $p = 0, \dots, P$  – параметр, определяющий координаты пиксела окрестности по  $i$ ;  $q = 0, \dots, Q$  – параметр, определяющий координаты пиксела окрестности по  $j$ ;  $d = 1, \dots, D-1$  – индекс разности значений яркости  $i, j$ -го пиксела с пикселями окрестности;  $D$  – количество пикселов в скользящем окне,  $D = (2P+1)(2Q+1)$ ;  $k$  – коэффициент усиления градиентов.

Далее формируют набор оценок каждого пиксела единого комплексированного изображения с приоритетной компонентой  $r$  по полученным градиентам единого эталонного изображения. Это может быть выполнено в виде суммы набора градиентов (6) и каждого пиксела приоритетного изображения  $\lambda_{i,j}^r$  [9]:

$$(\hat{\lambda}_{i,j}^r)_d = \lambda_{i,j}^r + (\Delta_{i \pm p, j \pm q})_d. \quad (7)$$

Результирующее единое комплексированное изображение может быть представлено в виде среднего или медианного значения оценок  $(\hat{\lambda}_{i,j}^r)_d$ :

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = \text{MEAN}_d[(\hat{\lambda}_{i,j}^r)_d] = \frac{1}{D-1} \sum_d (\hat{\lambda}_{i,j}^r)_d, \quad (8)$$

$$\hat{\lambda}_{i,j}^r = \text{MED}[(\hat{\lambda}_{i,j}^r)_d], \quad (9)$$

Таким образом, при комплексировании многоспектральных изображений по данному методу происходит перенос градиентов всех спектральных составляющих наиболее приоритетному в яркостном смысле изображению.

**Примеры комплексирования и результаты численных исследований**

В качестве критерия различия яркостей приоритетного изображения  $\lambda_{i,j}^r$  и комплексированного изображения  $\hat{\lambda}_{i,j}^r$ , выбрана среднеквадратическая ошибка (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\hat{\lambda}_{i,j}^r - \lambda_{i,j}^r)^2}. \quad (10)$$

Для исследования качественных характеристик предлагаемого метода в сохранении контурных признаков всех спектральных компонент в комплексированном изображении, вычислялись ошибки типа пропуск контура ( $\delta_{\text{ПК}}$ ) и ложное определение контура ( $\delta_{\text{ЛК}}$ ) в соответствии с выражениями

$$\delta_{\text{ЛК}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & (\hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y) = 1, \\ 0, & (\hat{g}_{i,j}^r - g_{i,j}^y) \neq 1, \end{cases} \quad (11)$$

$$\delta_{\text{ПК}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} 1, & (g_{i,j}^y - \hat{g}_{i,j}^r) = 1, \\ 0, & (g_{i,j}^y - \hat{g}_{i,j}^r) \neq 1, \end{cases} \quad (12)$$

при этом общая (суммарная) ошибка определения контуров

$$\delta = \delta_{\text{ПК}} + \delta_{\text{ЛК}}. \quad (13)$$

На рис. 1 представлены шесть исходных спектральных изображения, а на рис. 2 – единые эталонные изображения для оценки контуров, полученные методом

усреднения исходных изображений  $y_{i,j}^{\text{mean}} = \frac{1}{L} \sum_l \lambda_{i,j}^l$  (а),

методом максимума  $y_{i,j}^{\text{max}} = \max_l [\lambda_{i,j}^l]$  (б) и среднего между ними  $y_{i,j}^{\text{max mean}} = \frac{(y_{i,j}^{\text{mean}} + y_{i,j}^{\text{max}})}{2}$  (в). На рис. 3 представлены

бинарные контурные изображения, полученные детектором границ Канны [11] с фиксированными параметрами. Из рис. 3 видно, что на контурах усредненного изображения  $y_{i,j}^{\text{mean}}$  хорошо просматриваются основные объекты, за исключением некоторых объектов (правый верхний угол изображений  $\lambda_{i,j}^l$ ), при этом на контурах изображения  $y_{i,j}^{\text{max}}$  эти участки хорошо прорисованы. Альтернативой является изображение  $y_{i,j}^{\text{max mean}}$ , на контурах которого хорошо отображены детали объектов изображений  $y_{i,j}^{\text{mean}}$  и  $y_{i,j}^{\text{max}}$ .

В табл. 1 для сравнения представлены значения взаимосвязей (10) и (13) между спектральными изображениями  $\lambda_{i,j}^l$  и эталонами  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max mean}}$ .

На рис. 4, 5 представлены результаты численных исследований предлагаемого метода комплексирования. При проведении вычислительного эксперимента использовались спектральные изображения, представленные на рис. 1. В качестве приоритетного изображения при комплексировании и оценке яркости выбрано первое спектральное изображение  $\lambda_{i,j}^1$ , в качестве эталонов для переноса градиентов и последующей оценки контуров использовались изображения  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max mean}}$ , контура которых представлены на рис. 3, конечная оценка вычислялась по выражению (9).

На рис. 4, 5 представлены результаты численных исследований предлагаемого метода комплексирования. При проведении вычислительного эксперимента использовались спектральные изображения, представленные на рис. 1. В качестве приоритетного изображения при комплексировании и оценке яркости выбрано первое спектральное изображение  $\lambda_{i,j}^1$ , в качестве эталонов для переноса градиентов и последующей оценки контуров использовались изображения  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max mean}}$ , контура которых представлены на рис. 3, конечная оценка вычислялась по выражению (9).

На рис. 4, 5 представлены результаты численных исследований предлагаемого метода комплексирования. При проведении вычислительного эксперимента использовались спектральные изображения, представленные на рис. 1. В качестве приоритетного изображения при комплексировании и оценке яркости выбрано первое спектральное изображение  $\lambda_{i,j}^1$ , в качестве эталонов для переноса градиентов и последующей оценки контуров использовались изображения  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $y_{i,j}^{\text{max mean}}$ , контура которых представлены на рис. 3, конечная оценка вычислялась по выражению (9).

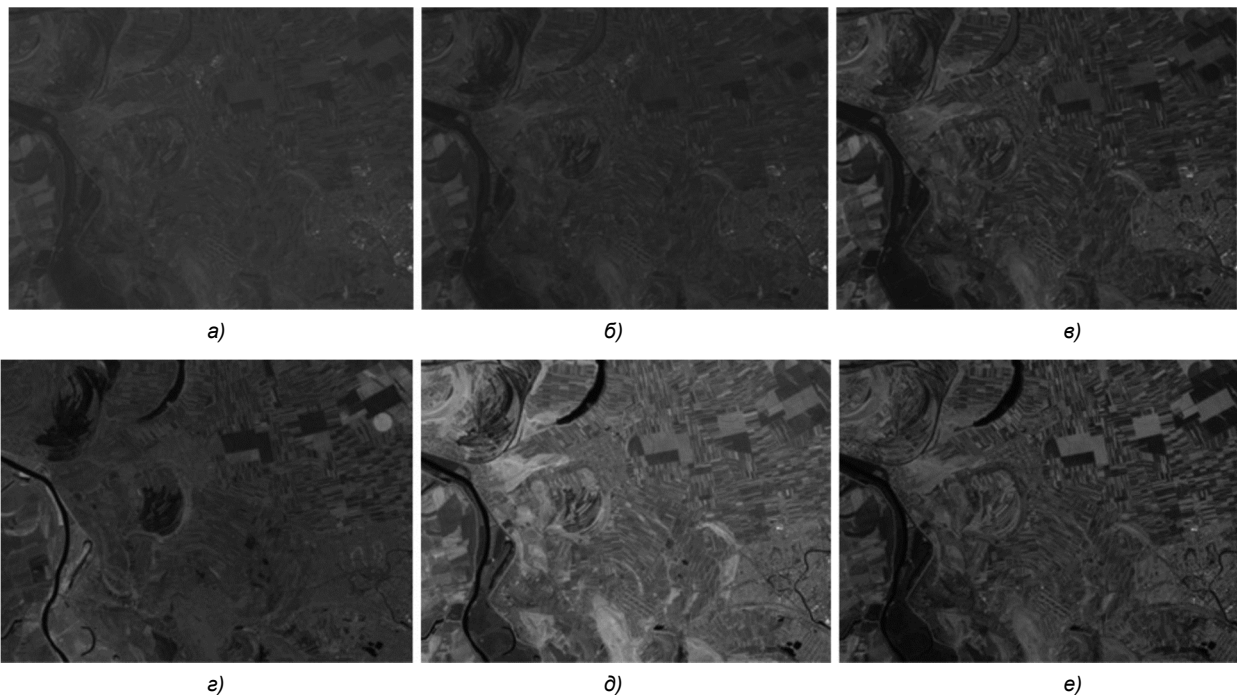


Рис. 1. Спектральные изображения:  $\lambda_{i,j}^1$  (480 нм) – а,  $\lambda_{i,j}^2$  (550 нм) – б,  $\lambda_{i,j}^3$  (670 нм) – в,  $\lambda_{i,j}^4$  (820 нм) – г,  $\lambda_{i,j}^5$  (1650 нм) – д,  $\lambda_{i,j}^6$  (2200 нм) – е

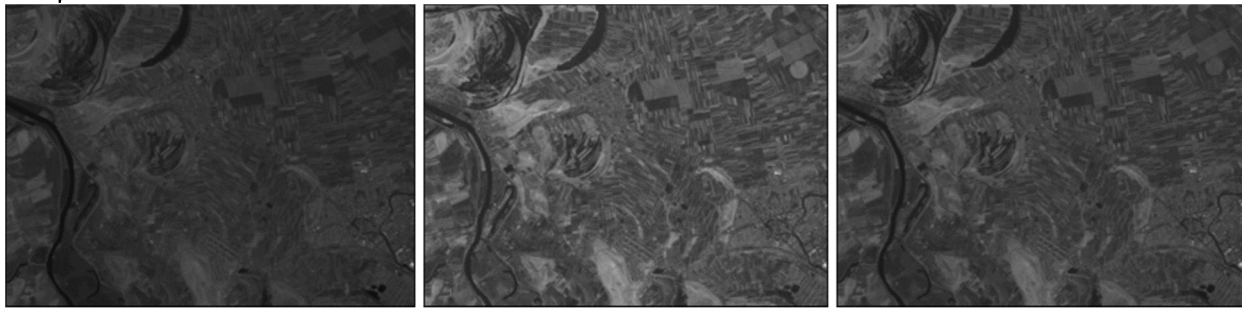


Рис. 2. Эталонные комплексированные изображения:  $y_{i,j}^{\text{mean}}$  – а,  $y_{i,j}^{\text{max}}$  – б,  $y_{i,j}^{\text{max, mean}}$  – в

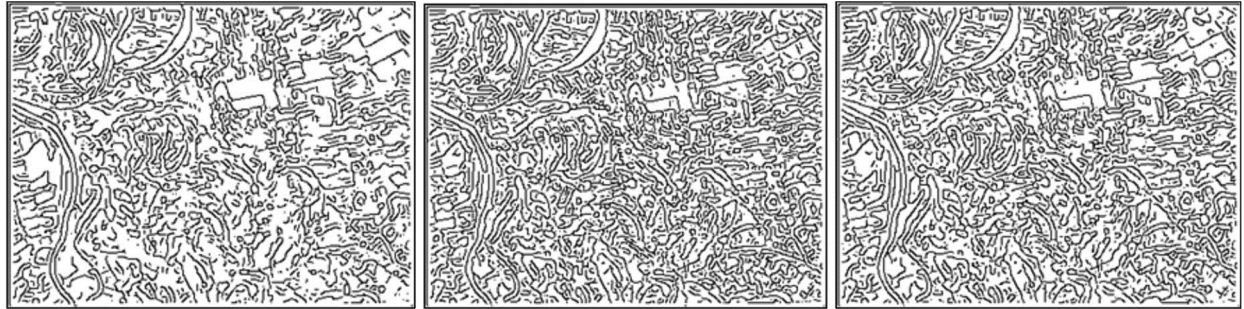


Рис. 3. Контура изображений:  $y_{i,j}^{\text{mean}}$  – а,  $y_{i,j}^{\text{max}}$  – б,  $y_{i,j}^{\text{max, mean}}$  – в

Таблица 1 – Яркостные и контурные взаимосвязи исходных изображений и эталонов

	$\lambda_{i,j}^1$	$\lambda_{i,j}^2$	$\lambda_{i,j}^3$	$\lambda_{i,j}^4$	$\lambda_{i,j}^5$	$\lambda_{i,j}^6$
$y_{i,j}^{\text{mean}}$	$\sigma = 7,70$ $\delta = 0,138$	$\sigma = 35,50$ $\delta = 0,136$	$\sigma = 11,45$ $\delta = 0,126$	$\sigma = 21,57$ $\delta = 0,241$	$\sigma = 33,63$ $\delta = 0,123$	$\sigma = 13,89$ $\delta = 0,162$
$y_{i,j}^{\text{max}}$	$\sigma = 35,48$ $\delta = 0,203$	$\sigma = 47,56$ $\delta = 0,209$	$\sigma = 44,60$ $\delta = 0,189$	$\sigma = 49,23$ $\delta = 0,261$	$\sigma = 11,01$ $\delta = 0,057$	$\sigma = 40,61$ $\delta = 0,188$
$y_{i,j}^{\text{max, mean}}$	$\sigma = 18,54$ $\delta = 0,179$	$\sigma = 29,96$ $\delta = 0,184$	$\sigma = 27,29$ $\delta = 0,160$	$\sigma = 33,61$ $\delta = 0,254$	$\sigma = 17,63$ $\delta = 0,08$	$\sigma = 24,62$ $\delta = 0,171$

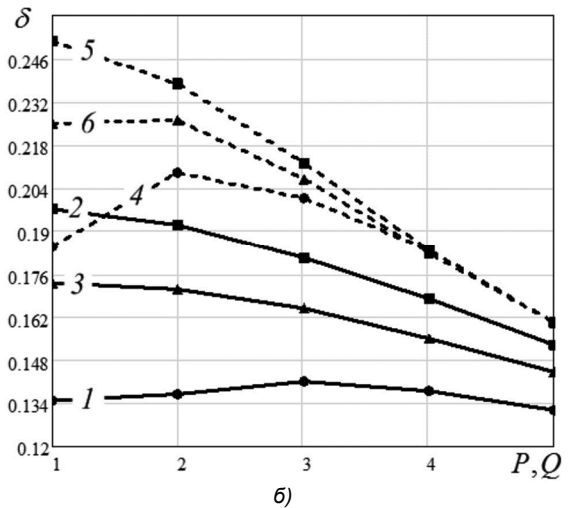
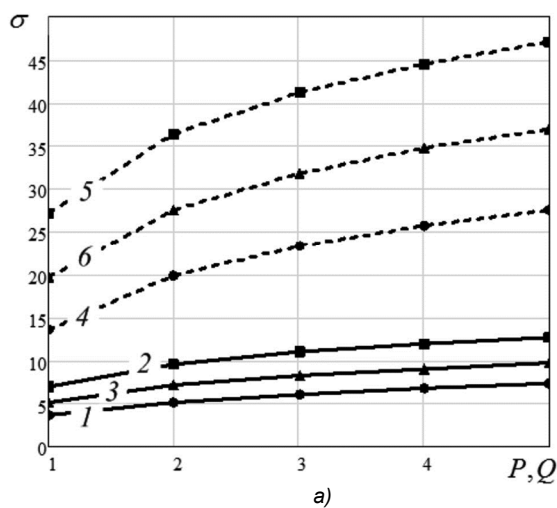


Рис. 4. Зависимость  $\sigma$  (а) и  $\delta$  (б) от размера скользящего окна  $(P, Q)$ : 1 –  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $k=1$ , 2 –  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $k=1$ , 3 –  $y_{i,j}^{\text{max, mean}}$ ,  $k=1$ , 4 –  $y_{i,j}^{\text{mean}}$ ,  $k=4$ , 5 –  $y_{i,j}^{\text{max}}$ ,  $k=4$ , 6 –  $y_{i,j}^{\text{max, mean}}$ ,  $k=4$

На рис. 6-9 представлены некоторые варианты комплексированных изображений, полученные по раз-

работанному методу с результатами их численных оценок.

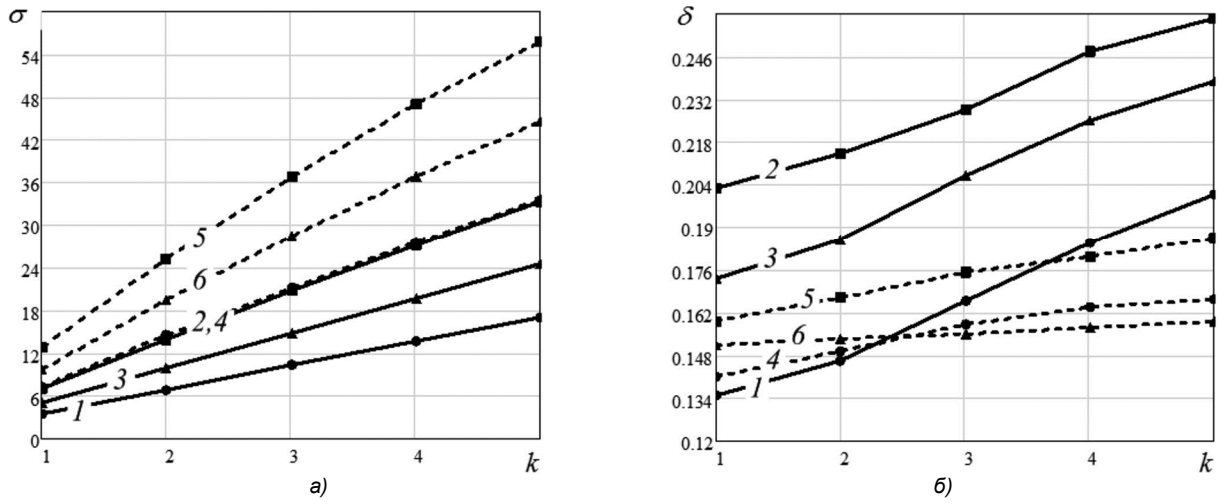


Рис. 5. Зависимость  $\sigma$  (а) и  $\delta$  (б) от коэффициента усиления градиентов  $k$  :

$1 - y_{i,j}^{mean}, (P,Q)=1, 2 - y_{i,j}^{max}, (P,Q)=1,$   
 $3 - y_{i,j}^{max, mean}, (P,Q)=1, 4 - y_{i,j}^{mean}, (P,Q)=5, 5 - y_{i,j}^{max}, (P,Q)=5, 6 - y_{i,j}^{max, mean}, (P,Q)=5$

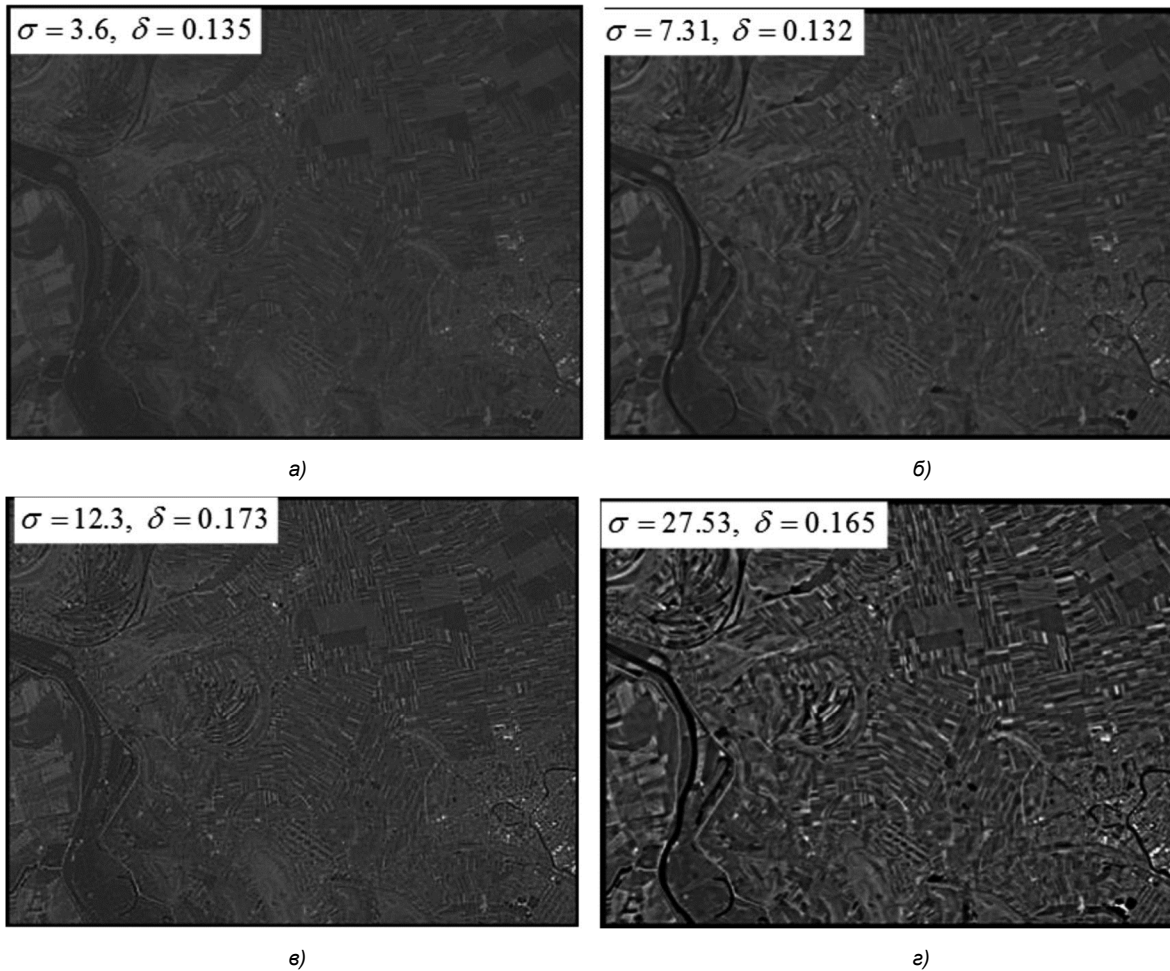
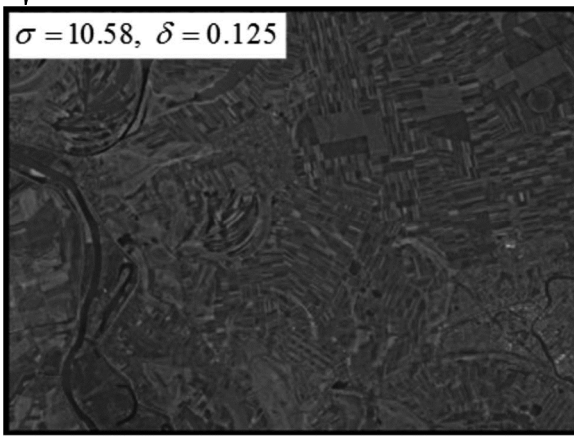


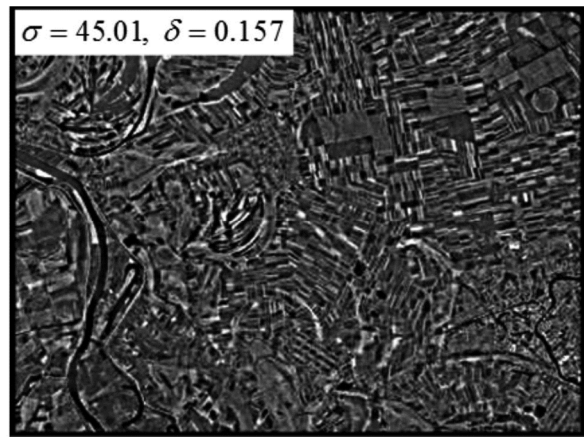
Рис. 6. Комплексированные изображения, полученные по выражению (9)

с приоритетом яркости изображения  $\lambda_{i,j}^1$  и переносом градиентов изображения  $y_{i,j}^{mean}$  :

(P,Q)=1, k=1, - а, (P,Q)=5, k=1 - б, (P,Q)=1, k=4 - в, (P,Q)=5, k=4 - г

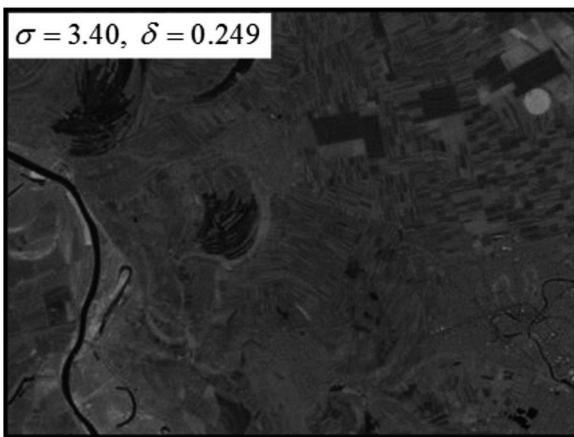


а)

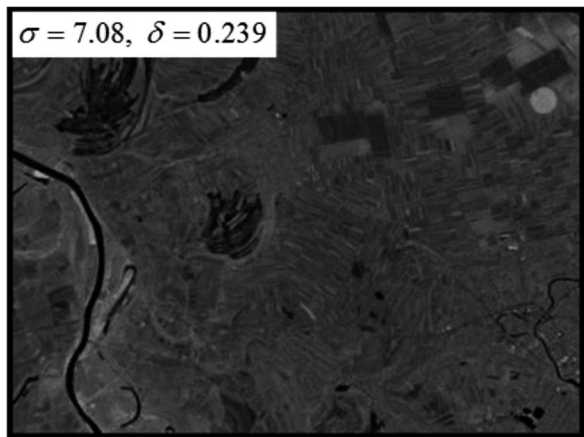


б)

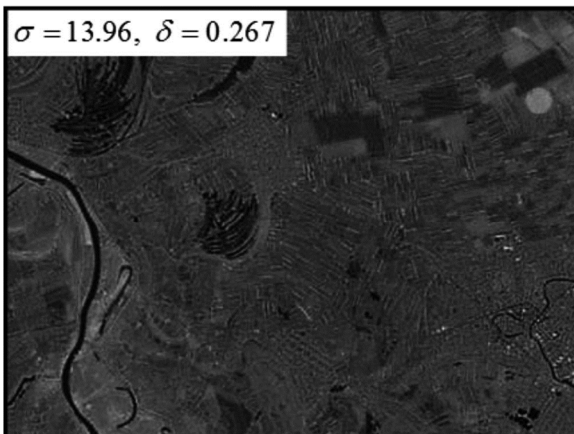
Рис. 7. Комплексированные изображения, полученные по выражениям (7), (9) с приоритетом яркости изображения  $\lambda_{i,j}^1$  и переносом градиентов изображения  $y_{i,j}^{\max}$ :  $(P,Q)=5, k=1$  – а,  $(P,Q)=1, k=4$  – б



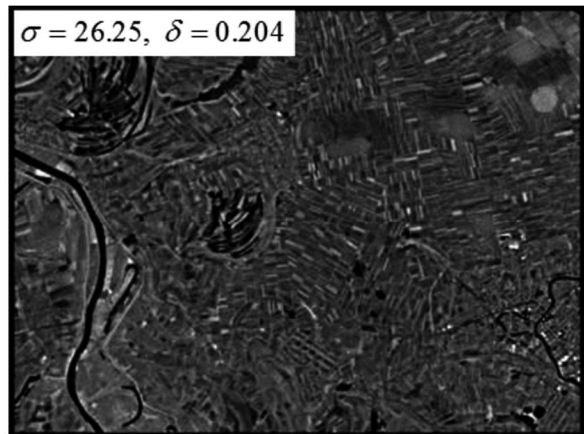
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Комплексированные изображения, полученные по выражениям (7), (9) с приоритетом яркости изображения  $\lambda_{i,j}^4$  и переносом градиентов изображения  $y_{i,j}^{\max}$ :  $(P,Q)=1, k=1$  – а,  $(P,Q)=5, k=1$  – б,  $(P,Q)=1, k=4$  – в,  $(P,Q)=5, k=4$  – г

Анализ результатов проведенных исследований показал, что результирующие комплексированные изображения обладают высоким локальным контрастом, яркостью близкой к приоритетному изображению и с контурными признаками всех спектральных составляющих. Выявлено, что с увеличением коэффициента усиления  $k$  можно повысить локальный контраст, что является положительным визуальным эффектом, но при этом увеличи-

вается СКО (10) с приоритетным изображением, а также могут возникать ложные контурные признаки, обусловленные шумовой составляющей, что приводит к увеличению (13). С увеличением размеров скользящего окна, также улучшается визуальное качество изображения и критерий контурных признаков (13), при этом возможно небольшое возрастание СКО (10) и вычислительных затрат алгоритма.

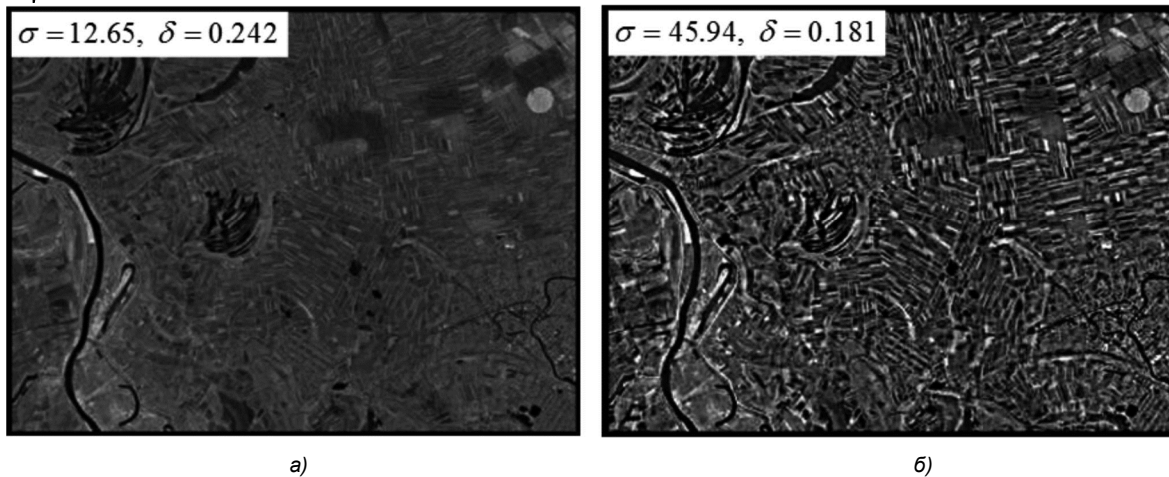


Рис. 9. Комплексированные изображения, полученные по выражениям (7), (9) с приоритетом яркости изображения  $\lambda_{i,j}^4$  и переносом градиентов изображения  $y_{i,j}^{\max}$  :

$$(P, Q) = 5, k = 1 - а, (P, Q) = 5, k = 4 - б$$

### Заключение

Таким образом, предлагаемый метод позволяет с высокой эффективностью комплексировать многоспектральные изображения. Результирующее комплексированное изображение обладает яркостными признаками приоритетного спектрального изображения и контурными признаками всех остальных спектральных изображений. Разработанные алгоритмы на основе предлагаемого метода могут использоваться в автоматизированных комплексах сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли с целью улучшения качества комплексирования.

### Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга; Логос. 2007. 192 с.
2. Действующие и перспективные спутники наблюдения земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 107-111.
3. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
4. Автоматизированные системы наземных комплек-

сов сбора и обработки данных воздушной разведки. Учебное пособие / Под ред. И.Н. Белоглазова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2003. 296 с.

5. Патент RU 2451338 опубликовано 20.05.2012 г., МПК G06Т 5/00

6. Патент RU 2540778 опубликовано 10.02.2015 г., МПК G06Т 5/50, G06К 9/46

7. Богданов А.П., Холопов И.С. Алгоритмы формирования цветного комплексированного изображения из многоспектральных монохромных на основе методов преобразования цветов / Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 26-32.

8. Васильев А.С. Методы комплексирования изображений многоспектральных оптико-электронных систем // Сборник трудов международной конференции «Прикладная оптика – 2014». – СПб, 2014, Т.2, С.191-194.

9. Шипко В.В. Алгоритм комплексирования двух разноспектральных изображений на основе цветового синтеза // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. С. 32-38.

10. Сагдуллаев Ю.С., Ковин С.Д. Восприятие и анализ разноспектральных изображений: Монография. М.: Издательство «Спутник+», 2016. 251 с.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.