

УДК 621.396.969

## Повышение эффективности использования информации при комплексировании цифровых многоспектральных изображений

**Никитин Олег Рафаилович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: [olnikitin@mail.ru](mailto:olnikitin@mail.ru).

**Кисляков Алексей Николаевич** – аспирант ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: [ankislyakov@mail.ru](mailto:ankislyakov@mail.ru).

Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.

*Аннотация:* В работе представлен способ повышения эффективности процедуры комплексирования многоспектральных изображений, а также рассмотрена возможность его применения в задачах мониторинга земной поверхности. При использовании многоканальной системы дистанционного зондирования возникает необходимость минимизации количества информации на выходе системы. Предложенный алгоритм позволяет уменьшить избыточность информации в системах дистанционного зондирования за счет сокращения количества спектральных каналов, что дает возможность более эффективно использовать данные дистанционного зондирования при дальнейшей обработке и анализе. Для выбора эффективного количества каналов могут использоваться методы оптимизации эксперимента, которые предполагают количественную оценку совместной энтропии изображений различных каналов. Задача вычисления совместной информативности большого количества взаимозависимых каналов решается путем разложения набора исходных изображений по независимым ортогональным составляющим. Определение результирующего набора изображений осуществляется по критерию максимума совместной энтропии с использованием итерационно-группового алгоритма.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, факторный анализ, комплексирование.

---

### Введение

Известно, что объем информации, формируемой многоканальной системой дистанционного зондирования, определяется количеством пространственных элементов разрешения и спектральных каналов [1, 2]. Поэтому для подобных систем характерным является большой объем информации, подлежащей обработке, хранению и дальнейшей передаче, что усложняет использование системы в оперативном режиме.

Обширная площадь исследуемой территории высокая скоротечность событий в пространстве, краткое время существования исследуемых объектов, а также огромные объемы информации при высокой ее избыточности порождают необходимость минимизации количества информации на выходе системы.

Цель комплексирования изображений состоит в представлении на результирующем изображении объектов, присутствующих по отдельности на изображениях различных кана-

лов, для более адекватной оценки характеристик исследуемых объектов.

Комплексирование является одним из особых видов цифровой обработки изображений, связанной с улучшением характеристик результирующего изображения, сокращением объема оперируемых данных, а также уменьшения избыточности информации.

Цель работы – разработка и исследование алгоритма минимизации количества информации, необходимого для процедуры комплексирования цифровых многоспектральных полутоновых изображений.

Задачей процедуры комплексирования [2] является представление максимального количества информации, содержащейся в наборе исходных многоспектральных изображений в одно результирующее изображение с минимальными потерями.

### Методы уменьшения избыточности информации

Метод уменьшения избыточности информации в системах дистанционного зондирования сводится как к сокращению общего числа спектральных каналов, так и к сокращению числа отдельных элементов изображения за счет уменьшения их спектральной яркости, которыми можно пренебречь при решении конкретной задачи [3].

Метод сокращения числа отдельных элементов изображения позволяет с использованием спектральных признаков искомым объектов сформировать маску, на которой присутствуют интересующие объекты. В результате обработки уменьшается поток данных, подлежащий дальнейшей обработке и передачи по каналам связи.

Наиболее эффективным является второе направление уменьшения информационной избыточности, которое сводится к сокращению количества спектральных каналов. Рассмотрим данный метод подробнее.

Экспериментальное изучение информационного содержания снимков показывает, что наиболее ценная для интерпретации информация, сосредоточена в небольшом количестве каналов. Данное обстоятельство дает основание для сокращения количества спектральных каналов применительно к задачам обработки и анализа многоспектральных снимков [3].

Для выбора эффективного набора каналов могут использоваться методы оптимизации эксперимента, которые предполагают количе-

ственную оценку информативности изображений различных каналов. В реальных условиях из-за сложного характера спектральных распределений и корреляции между отдельными спектральными каналами, нет необходимости говорить об информативности отдельных каналов, а можно говорить только об информативности их комбинаций.

Алгоритм поиска эффективного набора каналов строится как полный перебор всех возможных сочетаний по  $n$  каналов из полного количества  $N$  каналов по критерию максимума совместной информативности. При этом возникают следующие проблемы:

1) Критерий информативности сложен для непосредственного счета, что весьма затрудняет реализацию метода полного перебора при большом количестве каналов.

2) Прямое определение совместной энтропии каналов при  $N > 3$  практически невозможно даже для небольших объемов данных, так как требует очень большого числа степеней свободы.

Последовательный перебор каналов не обеспечивает оптимальной совокупности каналов, тогда как полный перебор является нерациональным. Компромисс заключается в построении итерационно-группового алгоритма [3,4]: путем последовательного отбора находят некоторую начальную конфигурацию заданного количества каналов. Затем предпринимаются попытки улучшить эту конфигурацию за счет замены любого из выбранных каналов на один из «свободных». Если очередная попытка



Рис. 1. Сравнение вычислительной сложности различных методов выбора каналов

удаётся, то производится фактическая замена и процесс продолжается далее.

Процесс оказывается сходящимся, т.е. возникает устойчивая конфигурация каналов, которую нельзя улучшить однократной заменой.

При этом объём вычислений по сравнению с последовательным перебором возрастает незначительно (рис. 1).

В качестве критерия «полезности» отдельных каналов измерительной системы используется максимизация количества информации Шеннона [5]. Совместная информация, содержащаяся в изображениях  $N$  каналов, есть

$$E(A_1, \dots, A_N) = \sum_{i=1}^N [E(A_i)] - T(A_1, \dots, A_N), \quad (1)$$

где  $E(A_i)$  – энтропия (разнообразие) изображения  $i$ -го канала  $A_i, i = 1, 2, \dots, N$ .  $T(A_1, A_2, \dots, A_N)$  – сопряженность между каналами.

$$E(A_i) = - \sum_{x,y} p(a_i(x,y)) \cdot \log [p(a_i(x,y))], \quad (2)$$

где  $a_i$  – значение яркости каналов,  $p(a_i(x,y))$  – функция распределения яркости.

$$T(A_1, \dots, A_N) = - \sum_{i=1}^L p(a_1, \dots, a_N) \cdot \log [p(a_1, \dots, a_N)], \quad (3)$$

– информация, содержащаяся в  $N$  каналах друг о друге, или мера сопряженности [6].

Прямое определение сопряженности каналов при  $N > 3$  практически невозможно даже для небольших объёмов данных, потому как требует очень большого числа степеней свободы. Так как полутонные изображения имеют

256 градаций яркости, то для оценки совместной сопряженности требуется примерно  $256^N$  измерений. Задачу можно решить, если разложить  $N$ -мерное изображение по независимым составляющим. Затем для каждой независимой компоненты определить энтропию и суммировать эти энтропии с учетом веса компоненты.

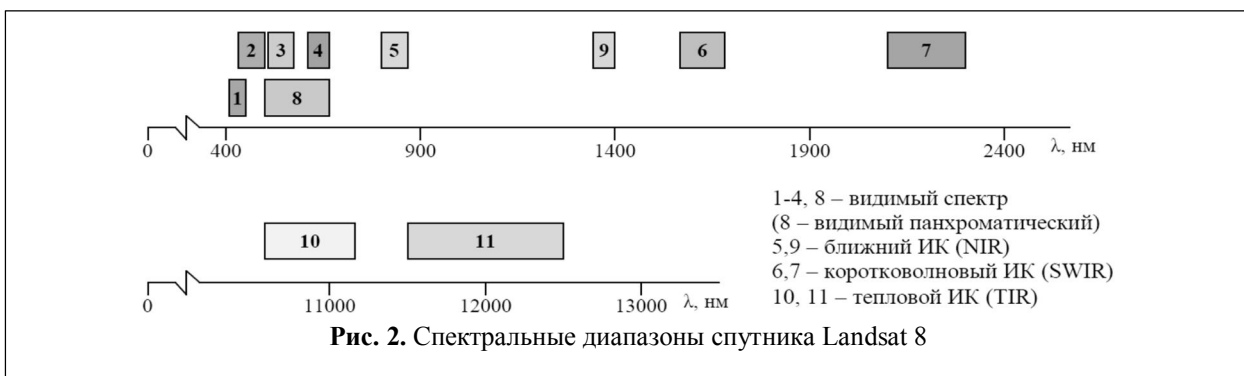
Для преобразования многоканальных изображений обычно используют метод главных компонент [6]. Допустим, что изображения в нескольких каналах полностью подобны друг другу. Тогда корреляция между ними будет равна 1, и значения яркости во всех каналах можно рассматривать как зависящие от одного фактора.

В противоположной ситуации, когда каналы полностью независимы, каждый из них описывается собственным независимым фактором. Реально яркости в каналах в какой-то степени коррелируют друг с другом, и эти каналы можно отобразить как функции от нескольких независимых факторов.

### Математическое моделирование

Чтобы продемонстрировать работоспособность метода приведем статистические параметры для снимков окрестности г. Лос-Анджелес, США, выполненных спутником Landsat 8 (рис. 2).

Съемка проводилась в 13 мая 2013 г. в 11 диапазонах (рис. 1). 12-й диапазон качества позволяет выделить облачный и снежный покров. Собственные энтропии изображений различных каналов, расположенные в порядке убывания, приведены на рис. 3.



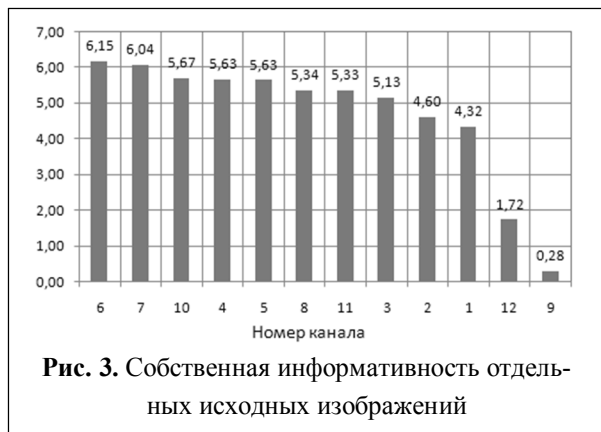


Рис. 3. Собственная информативность отдельных исходных изображений

Таблица 1. Корреляционная матрица между 12 изображениями

| №  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1  | 1,00 | 0,99 | 0,96 | 0,98 | 0,91 | 0,97 | 0,91 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,83 | 0,88 |
| 2  | 0,99 | 1,00 | 0,95 | 0,98 | 0,90 | 0,97 | 0,90 | 0,97 | 0,94 | 0,92 | 0,82 | 0,86 |
| 3  | 0,96 | 0,95 | 1,00 | 0,96 | 0,92 | 0,96 | 0,92 | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,88 | 0,92 |
| 4  | 0,98 | 0,98 | 0,96 | 1,00 | 0,91 | 1,00 | 0,91 | 0,99 | 0,97 | 0,96 | 0,86 | 0,89 |
| 5  | 0,91 | 0,90 | 0,92 | 0,91 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,94 |
| 6  | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 0,92 | 1,00 | 0,99 | 0,97 | 0,89 | 0,92 |
| 7  | 0,91 | 0,90 | 0,92 | 0,91 | 1,00 | 0,92 | 1,00 | 0,93 | 0,95 | 0,95 | 0,97 | 0,95 |
| 8  | 0,96 | 0,97 | 0,97 | 0,99 | 0,94 | 1,00 | 0,93 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,90 | 0,94 |
| 9  | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,95 | 0,99 | 0,95 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 0,94 | 0,97 |
| 10 | 0,93 | 0,92 | 0,95 | 0,96 | 0,95 | 0,97 | 0,95 | 0,98 | 0,99 | 1,00 | 0,95 | 0,98 |
| 11 | 0,83 | 0,82 | 0,88 | 0,86 | 0,96 | 0,89 | 0,97 | 0,90 | 0,94 | 0,95 | 1,00 | 0,96 |
| 12 | 0,88 | 0,86 | 0,92 | 0,89 | 0,94 | 0,92 | 0,95 | 0,94 | 0,97 | 0,98 | 0,96 | 1,00 |

Разложение по независимым компонентам осуществляется таким образом, что первый фактор описывает наиболее общую часть варьирования, объединяющую все переменные, второй и последующие – меньшую по убыванию, последний – оставшуюся.

Таблица 2. Собственные значения факторов

| Значение фактора | Собственные значения | % общей дисперсии | Кумулятив. значения | Кумулятивный % |
|------------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------|
| 1                | 11,35                | 94,62             | 11,35               | 0,95           |
| 2                | 0,40                 | 3,37              | 11,76               | 0,98           |
| 3                | 0,12                 | 1,02              | 11,88               | 0,99           |
| 4                | 0,06                 | 0,52              | 11,94               | 1,00           |
| 5                | 0,03                 | 0,27              | 11,98               | 1,00           |
| 6                | 0,02                 | 0,15              | 11,99               | 1,00           |
| 7                | 0,00                 | 0,02              | 12,00               | 1,00           |
| 8                | 0,00                 | 0,02              | 12,00               | 1,00           |
| 9                | 0,00                 | 0,01              | 12,00               | 1,00           |
| 10               | 0,00                 | 0,00              | 12,00               | 1,00           |
| 11               | 0,00                 | 0,00              | 12,00               | 1,00           |
| 12               | 0,00                 | 0,00              | 12,00               | 1,00           |

Общее количество значимых факторов зависит от степени корреляции между каналами

и обычно ограничивается 4-5 факторами, которые описывают более 99% всей информации. В таблице 2 приведены собственные значения факторов (их дисперсии). При этом полная дисперсия равна числу переменных (в данном случае 12).

Из таблицы видно, что из-за сильной корреляции между каналами, наиболее значимыми являются первые 5 факторов, содержащие 99,7 % информации от  $N$  каналов. Если функция распределения имеет нормальный вид, то энтропия для непрерывного распределения равна:

$$E_i = 0,5 \cdot \log_2(2\pi e \sigma_i) \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  – дисперсия  $i$ -го фактора.

Таким образом, при допущении нормальности распределения значений факторов совместная энтропия изображений нескольких каналов в силу независимости факторов равна сумме их энтропий:

$$E(A_1, \dots, A_N) = 0,5 \cdot [N \log_2(2\pi e) + \log_2(\sigma_1) + \dots + \log_2(\sigma_N)] \quad (5)$$

Результаты показывают, что 94,6 % всего разнообразия описывается первым фактором, с которым в наибольшей степени коррелируют все каналы. Остальные факторы имеют как положительные, так и отрицательные коэффициенты корреляции.

Таблица 3. Факторные нагрузки – коэффициенты корреляции исходных изображений и факторов

| № канала     | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 | Фактор 4 | Фактор 5 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1            | 0,97     | 0,22     | 0,10     | -0,05    | 0,06     |
| 2            | 0,96     | 0,25     | 0,08     | 0,02     | 0,06     |
| 3            | 0,97     | 0,09     | 0,02     | -0,20    | -0,09    |
| 4            | 0,98     | 0,19     | -0,03    | 0,07     | -0,04    |
| 5            | 0,97     | -0,17    | 0,17     | 0,03     | 0        |
| 6            | 0,99     | 0,13     | -0,06    | 0,05     | -0,03    |
| 7            | 0,97     | -0,19    | 0,16     | 0,03     | 0        |
| 8            | 0,99     | 0,09     | -0,08    | 0,04     | -0,03    |
| 9            | 0,99     | -0,02    | -0,11    | 0,03     | 0        |
| 10           | 0,99     | -0,07    | -0,12    | 0,01     | 0,02     |
| 11           | 0,94     | -0,33    | 0,00     | 0,02     | -0,05    |
| 12           | 0,96     | -0,21    | -0,12    | -0,09    | 0,10     |
| Дисперсия    | 11,35    | 0,40     | 0,12     | 0,06     | 0,03     |
| Дисперсия, % | 94,62    | 3,37     | 1,02     | 0,52     | 0,27     |

В таблице 3 представлено разложение 12 каналов по пяти независимым факторам. В идеальном случае эти изображения полностью независимы друг от друга. Реально степень корреляции между полученными изображениями удается снизить с «очень сильной» (0,8-0,9) до «средней» (0,6-0,7) или «слабой» (0,3-0,4) в зависимости от сравниваемых изображений.

**Таблица 4.** Корреляционная матрица между факторными отображениями

| № | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1,00  | -0,64 | -0,47 | 0,23  | -0,47 |
| 2 | -0,64 | 1,00  | 0,66  | -0,21 | 0,39  |
| 3 | -0,47 | 0,66  | 1,00  | -0,12 | 0,27  |
| 4 | 0,23  | -0,21 | -0,12 | 1,00  | -0,33 |
| 5 | -0,47 | 0,39  | 0,27  | -0,33 | 1,00  |

Построив гистограммы распределения по каждому факторному отображению для 256 градаций, можно определить их собственную энтропию. При допущении независимости каналов совместная энтропия в данном случае оценивается как

$$E(A_1, \dots, A_N) = \log_2(\sigma_1) + \dots + \log_2(\sigma_N) - N \log_2 N \quad (6)$$

где аргументы с дисперсией корректируют вклад каждого фактора в общее разнообразие. Вычисление совместной информативности нескольких изображений дает возможность выбрать эффективный набор изображений, ориентируясь относительно величины совместной информативности.

На начальном этапе необходимо выбрать нужное количество каналов путем сравнения совместных информативностей. Для этого сначала каналы необходимо расположить в порядке убывания их собственной информативности, а затем вычислить совместную информативность для различного количества каналов, используя метод последовательного выбора (рис. 4).

Подход к сокращению объема данных основывается на оценивании возможного вклада каждого спектрального канала в решение по-

ставленной задачи и выборе такой комбинации многоспектральных изображений, которые в совокупности дают максимальное сокращение объема данных при минимальных потерях информации.



**Рис. 4.** Совместная информативность различного количества каналов

Уровень допустимых потерь информации зависит от поставленной задачи и может быть задан заранее или выбран оператором в процессе обработки.

Из графиков видно, что наибольшую информативность имеет комбинация из всех 12 каналов, однако разница между значениями информативности для 9 и 12 каналов составляет 10%, что позволяет использовать набор из 9 каналов с номерами 6,7,10, 4,5,8,11,3,2 для дальнейших расчетов.

Каналы с номерами 1,12,9 исключаются из рассмотрения. Так при потере 10,83 % общей информации объем данных сокращается на 25%. Для некоторого количества каналов, например, для 8, совместная информативность по дисперсии имеет меньшее значение, чем, например, для 5, что обусловлено дополнительными шумами, вносимыми этими каналами при малом значении их собственной информативности.

При этом корреляционная матрица показывает, что 9-й канал при малой собственной информативности является наиболее ценным с точки зрения дополнительной информации к более информативным изображениям.

Для того, чтобы учесть информацию оставшихся четырех каналов (№ 2,1,12 и 9),

используется последовательная замена каждого из оставшихся каналов на один из выбранных, после чего проводится расчет взаимной информативности получившейся комбинации каналов. В случае улучшения результата каналы сменяют друг друга.

**Таблица 5.** Совместная информативность набора изображений при последовательной замене исключенных ранее каналов

| №  | 1     | 12    | 9     |
|----|-------|-------|-------|
| 6  | 11,67 | 11,46 | 11,33 |
| 7  | 12,28 | 12,02 | 10,92 |
| 10 | 12,03 | 11,42 | 10,32 |
| 4  | 12,24 | 12,09 | 10,53 |
| 5  | 10,78 | 9,98  | 8,12  |
| 8  | 11,44 | 8,42  | 6,29  |
| 11 | 9,82  | 6,99  | 6,79  |
| 3  | 8,45  | 3,43  | 3,93  |
| 2  | 8,59  | 1,35  | 0,66  |

В результате наиболее выгодным с точки зрения информативности является набор, состоящий из 9 каналов с номерами 6,1,10,4,5,8,11,3,2. При этом выбранные 9 каналов содержат уже 93,17% информации всей совокупности каналов. Дополнительный учет информации дает ее прирост на 4%. Итоговые потери информации составляют 6,83% при сокращении объема оперируемых данных на 25%.

### Заключение

Указанная количественная оценка информативности многоспектральных снимков позволяет прогнозировать возможности произвольных комбинаций спектральных каналов при решении тематических задач дистанционного

зондирования земной поверхности, а также минимизировать состав спектральных каналов при минимальных потерях полезной информации, улучшая тем самым показатели качества и оперативности интерпретации материалов.

### Литература

1. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филипс Т.Л. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис. Пер. с англ. – М.: Недра, 1983. – 415 с. – Пер изд. США 1978. – 296 с.
2. Захарова Л.Н., Захарова А.И. Совместный анализ данных оптических и радиолокационных сенсоров: возможности, ограничения и перспективы / Радиотехника и электроника. – 2011, том 56, № 1, С. 5-19.
3. Паишков Д.П. Методы оптимального выбора спектральных каналов при фиксированном разрешении при решении задач дистанционного зондирования Земли / Системы управления, навигации и связи, – 2007, выпуск 4, – С. 31-34.
4. Попов М.А., Станкевич С.А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли / Современные проблемы зондирования Земли из космоса – 2006. – Т.3, № 1. – С. 106-112.
5. Корчинский В.М. Информативность многоспектральных проекционных изображений. / Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2005, № 1 (15) С. 52-54.
6. Касимов Н.С., Романова Э.П., Тишков А.А. География и мониторинг биоразнообразия – М.: Издательство Научного и научно-методического центра, 2002. – 432 с.
7. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Комплексование многоспектральных изображений с использованием методов морфологического анализа и цветового кодирования / Радиотехнические и телекоммуникационные системы, №1 2013. С. 52-57.

Поступила 28 октября 2013 г.

English

### Effectiveness increase of information use in complexing digital multispectral images

**Nikitin Oleg Rafailovich** – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Radio Systems Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov.

**Kislyakov Alexey Nikolaevich** – post-graduate student of the Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletov.

Address: 600000 Vladimir, Gorky str., 87.

*Abstract:* The method of effectiveness increase of complexing multispectral images as well as the possibility of its application in the tasks of monitoring earth surface are considered in the paper. There is a necessity to minimize the amount of information in the system output while using a multichannel system of remote sensing. The suggested algorithm allows to diminish the information redundancy in the systems of remote sensing at the expense of decreasing the number of spectral channels that give the possibility to more efficiently use the remote sensing data in later processing and analyzing. The experiment optimization methods which provide quantitative assessment of joint entropy of images of different channels are applied for the selection of the appropriate number of channels. The problem of joint calculation of informativeness of a great number of interdependent channels is solved by dividing a set of source images into independent orthogonal components. The determination of a resultant set of images is performed by measuring joint maximum entropy with the usage of iterative - group algorithm.

*Key words:* remote sensing, factor analysis, complexing.

### References

1. *Dejvis Sh.M., Landgrebe D.A., Filips T.L.* Remote Sensing: Quantative Approach. Ed. by *F. Svejna* and *Sh. Dejvis*. Transl. from English. M.: Nedra, 1983. 415 p. First ed. USA 1978. 296 p.
2. *Zaharova L.N., Zaharova A.I.* Combined Analysis of Optical and Radio Location Sensors Data: Possibilities, Restrictions and Prospects. *Radiotekhnika i jelektronika*. 2011, Vol. 56, № 1, P. 5-19.
3. *Pashkov D.P.* Methods of Optimum Selection of Spectrum Channels at Fixed Resolution in Remote Ground Sensing. *Sistemy upravlenija, navigacii i svjazi*, 2007, Iss. 4. P. 31-34.
4. *Popov M.A., Stankevich S.A.* Optimization Methods of Spectrum Channel Number in Processing and Analysis of Remote Ground Sensing Data. *Sovremennye problemy zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2006. V.3, № 1. P. 106-112.
5. *Korchinskij V.M.* Information Contents of Multispectral Projected Images. *Avtomatika. Avtomatizacija. Jelektrotehnicheskie komplekсы i sistemy*. 2005, № 1 (15) P. 52-54.
6. *Kasimov N.S., Romanova Je.P., Tishkov A.A.* Geography and Monitoring of Biodiversity. M.: Izdatel'stvo Nauchnogo i nauchno-metodicheskogo centra, 2002. 432 p.
7. *Nikitin O.R., Kisljakov A.N.* Complexing Multispectral Images Using Morphological Analysis Method and Light Encoding. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. № 1, 2013, P. 52-57.